

**FELIPE MENDES CARNEIRO DA COSTA**

**MARISA ANDRADE CURTO**

**SHIRLEI DE OLIVEIRA SILVA**

**DESSALINIZAÇÃO COM MUDANÇA DE FASE CONDUZIDA  
A BAIXAS TEMPERATURAS**

Projeto de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo, Curso de Engenharia Civil

São Paulo

2015

**FELIPE MENDES CARNEIRO DA COSTA**

**MARISA ANDRADE CURTO**

**SHIRLEI DE OLIVEIRA SILVA**

**DESSALINIZAÇÃO COM MUDANÇA DE FASE CONDUZIDA  
A BAIXAS TEMPERATURAS**

São Paulo

2015

**FELIPE MENDES CARNEIRO DA COSTA**

**MARISA ANDRADE CURTO**

**SHIRLEI DE OLIVEIRA SILVA**

**DESSALINIZAÇÃO COM MUDANÇA DE FASE CONDUZIDA  
A BAIXAS TEMPERATURAS**

Projeto de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo, Curso de Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Podalyro Amaral  
de Souza

São Paulo

2015

**da Costa, Felipe Mendes Carneiro**

**Dessalinização com mudança de fase conduzida a baixas temperaturas / F. M. C. da Costa, M. A. Curto, S. O. Silva -- São Paulo, 2015.**

**74 p.**

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

**1.Dessalinização 2.Destilação 3.Baixa Temperatura I.Universidade de São Paulo.  
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II.t. III.Curto, Marisa  
Andrade IV. Silva, Shirlei de Oliveira**



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de agradecer primeiramente à família e amigos, que estiveram presente e nos apoiaram durante os anos da graduação.

Ao Prof. Dr. Podalyro Amaral dos Souza, pelo entusiasmo, pela sugestão do tema e pela orientação na elaboração do presente trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Marco Antônio Palermo e Prof. Dr. Theo Syrto Octavio de Souza, pelas observações e ensinamentos.

À Profa. Dra. Yvone de Faria Lemos de Lucca, que nos apoiou e auxiliou na elaboração do trabalho.

Felipe, Marisa e Shirlei

## RESUMO

Este projeto trata do estudo de um novo processo de dessalinização com mudança de fase conduzida a baixas temperaturas que, baseado em princípios físicos simples, pode garantir a produção de água própria ao consumo humano de maneira sustentável e economicamente viável.

No decorrer do estudo foram analisados os princípios físicos que norteiam o processo, suas principais implicações e a caracterização geral do sistema. Além disso, melhorias foram indicadas e as dificuldades de implantação discutidas. Como produto final inicialmente propôs-se a construção de um protótipo, visando demonstrar o princípio e testar a implantação de melhorias na eficiência do processo. Então, dado o insucesso na busca por auxílio financeiro para a construção, partiu-se para um estudo de caso da implantação de uma estação de dessalinização conduzida pelo princípio de mudança de fase a baixa temperatura em uma comunidade de pequeno porte do Nordeste brasileiro.

Para o estudo escolheu-se o município de Berberibe, localizado no litoral leste do estado do Ceará, a aproximadamente 79km da capital Fortaleza, e com uma população estimada de 50.000 habitantes. Considerando o abastecimento de uma pequena comunidade da região, com cerca de 1.000 habitantes, foi possível dimensionar o evaporador da estação de dessalinização idealizada, chegando a uma área de evaporação de aproximadamente 2.000 m<sup>2</sup>. Ainda, elaborou-se um esquema de implantação representando todos os elementos da planta.

## **ABSTRACT**

This paper deals with the study of a new low-temperature phase change desalination process which, based on simple physical principles, can ensure the production of potable quality water in a sustainable and economically viable way.

The main physical principles, inherent to the process, its implications and the overall characterization of the system were analyzed along the studies. Additionally, improvements were indicated and deployment difficulties discussed. As the final product, initially it was proposed to build a prototype aiming to demonstrate the principle and test possible improvements in the process efficiency. Then, due to the lack of financial support, the group decided to study the implementation of a low-temperature phase change desalination plant in a small Brazilian northeastern community.

The city chosen for the study was Berberibe, located on the east coast of the state of Ceará, about 79km away from the capital, Fortaleza, and with an estimated population of 50,000. Considering the supply of a small community in the region, with about 1,000 people, it was possible to size the evaporator chamber of the idealized desalination plant, reaching an evaporation area of approximately 2,000 m<sup>2</sup>. Moreover, a scheme, representing all the elements of the plant, was elaborated.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Capacidade instalada de dessalinização no mundo (Adaptado de <i>Pacific Institute</i> , 2009).....	6
Figura 2: Divisão entre as fontes de água salina utilizadas na dessalinização (Adaptado de ZIOLKOWSKA, 2014).....	7
Figura 3: Divisão dos métodos de dessalinização empregados atualmente (Adaptado de KOSCHIKOSKI, 2011).....	8
Figura 4: Distribuição de Boltzmann, n° de partículas em função da velocidade (University of California, Davis) .....	9
Figura 5: Equilíbrio líquido-vapor (Adaptada de PETRUCCI, R.H, 2011).....	10
Figura 6: Pressão de vapor da água doce e salgada (Elaborada pelo autor) .....	13
Figura 7: Calor latente de vaporização em função da temperatura e da salinidade (S) (Adaptado de SHARQAWY; LIENHARD; ZUBAIR, 2010).....	15
Figura 8: Experimento de Torricelli (Portal da Refrigeração) .....	16
Figura 9: Princípio básico da dessalinização à baixa temperatura (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010) .....	17
Figura 10: Representação genérica do processo de dessalinização por mudança de fase, sendo $h$ a entalpia específica, $T$ a temperatura e $Q$ a taxa de transferência de calor. (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010) .....	19
Figura 11: Taxa de produção de água doce [kg/h] em função da taxa alimentação do sistema com água salina e da temperatura de evaporação com entrada de calor igual a $Q_i = 1.000$ kJ/h. (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010) .....	21
Figura 12: Relação entre o consumo de energia específica [kJ/kg] e o rendimento do sistema para várias temperaturas de evaporação. (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010).....	21
Figura 13: Configuração básica do processo (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010).....	23

Figura 14: Dessalinização em múltiplos estágios (Adaptada de KHANDAN et al, 2012).....	25
Figura 15: Esquema do sistema com o pulverizador (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010).....	26
Figura 16: Gráfico da influência da temperatura de entrada (Adaptada de KALOGIROU, 2001).....	28
Figura 17: Gráfico da influência da diferença de temperatura entre a fonte quente e fria (Adaptada de JOYCE et al, 1994).....	29
Figura 18: Gráfico da influência da temperatura entre a fonte quente e a fria (Adaptada de JOYCE et al, 1994).....	29
Figura 19: (a) Jato para cima. (b) Jato para baixo (IKEGAMI et al, 2006).....	30
Figura 20: Subsistema de aquecimento solar (Elaborada pelo autor).....	31
Figura 21: Célula Solar (Adaptada de ECO) .....	32
Figura 22: Vista externa do local selecionado (Elaborado pelo autor) .....	33
Figura 23: Vista interna do local selecionado (Elaborado pelo autor) .....	34
Figura 24: Planta do projeto da instalação - tamanhos em centímetros – fora de escala (Elaborada pelo autor) .....	35
Figura 25: Projeto da instalação do protótipo, da esquerda para a direita: parte externa, parte interna e vista lateral - tamanhos em centímetros – fora de escala (Elaborada pelo autor).....	36
Figura 26: Detalhe da vista externa (Elaborado pelo autor).....	37
Figura 27: Detalhe da vista lateral (Elaborado pelo autor) .....	38
Figura 28: Caixa d'água de 250 litros (Fortlev).....	39
Figura 29: Ilustração esquemática do evaporador (Elaborado pelo autor).....	40
Figura 30: Dimensões da bomba (Catálogo do fabricante).....	41
Figura 31: Informações técnicas da bomba (Catálogo do fabricante) .....	42
Figura 32: Informações técnicas da bomba (Catálogo do fabricante) .....	43

Figura 33: Disponibilidade hídrica superficial ao longo do território brasileiro (Atlas do Brasil, 2010) .....	47
Figura 34: Disponibilidade hídrica subterrânea ao longo do território brasileiro (Atlas do Brasil, 2010) .....	48
Figura 35: Síntese da de avaliação oferta/demanda (Atlas do Brasil, 2010).....	49
Figura 36: Mapa do Ceará com indicação dos municípios em situação de emergência (Secretaria da Defesa Pública e Defesa Social, 2015) .....	51
Figura 37: Alternativa ao gradeamento (Rebrn) .....	53
Figura 38: Hierarquia das necessidades de água (Adaptado de WORLD HEALTH ORGANIZATION).....	55
Figura 39: Esquema de remineralização e dosagem (Pozzani) .....	59
Figura 40: Cartucho de calcita (Pozzani) .....	59
Figura 41: Exemplo de clorador de pastilha (Nautilus).....	60
Figura 42: Delimitação do município de Berberibe (Google Maps) .....	63
Figura 43: Possível local de instalação da planta de dessalinização (Google Maps) .....	64
Figura 44: Vista lateral da planta de dessalinização (Elaborada pelo autor).....	64
Figura 45: Vista superior da planta de dessalinização (Elaborada pelo autor).....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variações da pressão de vapor em função da Temperatura (T) e da Salinidade (S) (Elaborada pelo autor com base em dados de SPIELGLER; LAIRD, 1980) .....	12
Tabela 2: Propriedades da água (Elaborada pelo autor).....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

$m_s$ : massa de água salgada

$m_f$ : massa de água doce

$m_b$ : massa de salmoura

$h_s$ : entalpia específica da água salgada

$h_f$ : entalpia específica da água fresca

$h_b$ : entalpia específica da salmoura

$h_L$ : calor latente de condensação/vaporização

$Q_i$ : taxa de calor inserida no sistema

$Q_l$ : taxa de perda de calor do sistema

$Q_o$ : taxa de perda de calor durante a mudança de fase

$T_e$ : temperatura de evaporação

$E_{in}$ : energia inserida no sistema

$E_{out}$ : energia retirada do sistema

$H_s$ : entalpia da água salgada

$H_f$ : entalpia da água fresca

$H_b$ : entalpia da salmoura

$U$ : coeficiente de transferência de calor

$A$ : área de transferência de calor

$c$ : calor específico da água

$e$ : espessura da cobertura da câmara de evaporação

$T$  : temperatura ambiente

$T_{EC}$ : temperatura da câmara de evaporação

$\lambda$  : condutividade térmica do material da câmara de evaporação

$e$ : espessura do material do evaporador

$dT/dx$ : gradiente de temperaturas



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	DESSALINIZAÇÃO .....	4
3.2	PANORAMA MUNDIAL.....	6
3.3	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA DESSALINIZAÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS .....	8
3.3.1	Pressão de vapor.....	9
3.3.2	Entalpia de vaporização .....	13
3.3.3	Vácuo de Torricelli .....	15
3.4	DESSALINIZAÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS .....	16
3.4.1	Princípio físico .....	16
3.4.2	Transformação termodinâmica .....	17
3.4.3	Configuração básica do sistema.....	22
3.5	SUGESTÕES DE MELHORIA .....	24
3.5.1	Dessalinização em múltiplos estágios .....	24
3.5.2	Evaporação com uso de spray .....	25
3.5.3	Aquecimento solar .....	30
4	PROTÓTIPO .....	32
4.1	LOCAL DE INSTALAÇÃO.....	33
4.2	IMPLANTAÇÃO .....	34
4.3	MATERIAIS.....	39
4.3.1	Reservatórios.....	39
4.3.2	Tubulação.....	39
4.3.3	Evaporador .....	40

4.3.4	Bomba de vácuo.....	40
4.3.5	Coleta de dados.....	43
5	ESTUDO DE CASO .....	44
5.1	ESTUDO DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DOCE .....	45
5.2	ESCOLHA DA CIDADE.....	46
5.3	TOMADA D'ÁGUA .....	52
5.4	PRÉ-TRATAMENTO .....	52
5.5	UNIDADE DE EVAPORAÇÃO .....	54
5.6	UNIDADE DE CONDENSAÇÃO .....	56
5.7	PÓS-TRATAMENTO.....	56
5.8	DEVOLUÇÃO DA SALMOURA.....	61
6	PLANTA DA INSTALAÇÃO .....	62
7	MULTIDISCIPLINARIEDADE .....	65
8	CONCLUSÃO.....	67

# 1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais importantes e abundantes do planeta Terra. Elemento indispensável à manutenção dos ecossistemas, funcionamento do corpo humano, atividades econômicas, geração de energia e, principalmente, manutenção das condições necessárias à constituição e continuação da vida no planeta, está presente em aproximadamente 70% da superfície terrestre. No entanto, menos de 3% de todo o seu volume é constituído de água doce e grande parte desta encontra-se concentrada em geleiras ou reservas subterrâneas de grande profundidade, portanto inacessíveis ao consumo direto pelos seres humanos.

O Brasil, mesmo sendo um país com grandes reservas de água doce, também sofre com a falta d'água. A disparidade na distribuição das fontes de água e da população pode ser apontada como uma das principais causas. A maior parte da água doce brasileira está concentrada nas regiões norte e centro-oeste, em torno da bacia do Rio Amazonas, enquanto a população encontra-se majoritariamente presente nas regiões nordeste, sudeste e sul, onde se tem os maiores índices de urbanização. Tal discrepância dificulta uma utilização eficiente de todas as fontes hídricas existentes, acarretando na exploração excessiva das bacias adjacentes aos grandes centros urbanos.

Estas bacias, por sua vez, sofrem com a diminuição dos níveis de chuva observada nos últimos anos, o crescimento da demanda devido ao crescimento acelerado da população das grandes cidades e ao aumento dos padrões de consumo, o aumento nos níveis de poluição, a crescente impermeabilização do solo e com o nível de desperdício de água cada vez maior. Tais eventos acabam por reduzir ainda mais a oferta de água própria ao consumo nas regiões de maior demanda, gerando graves crises de abastecimento, como a que estamos enfrentando atualmente na região sudeste.

São Paulo vive hoje uma das maiores crises hídricas de sua história. Desde 2013, chove menos do que a média na região e, “nos primeiros três meses de 2014, choveu menos da metade do esperado para o período” (COHEN). Mas não é só o nível de chuvas que prejudica o abastecimento no estado, os altos níveis de desperdício também são um fator importante. Segundo dados do Sistema Nacional

de Informações sobre Saneamento (2015), o estado de São Paulo desperdiçou 34,3% da água tratada em 2013, sendo o principal motivo os vazamentos nas redes de distribuição. Tais situações, combinadas com o crescente aumento de demanda e a falta de investimentos do setor público na manutenção e ampliação do sistema de abastecimento brasileiro, acarretaram em um cenário bastante crítico na região.

No final de 2014, o sistema Cantareira, outrora responsável pelo abastecimento da maior parte da população da Grande São Paulo (8,8 milhões de pessoas), chegou a operar com menos de 6% de seu volume (CANTAREIRA, 2014). Atualmente, com níveis de precipitação um pouco mais elevados e políticas de racionamento e conscientização sendo amplamente exploradas, o sistema mostra sinais de recuperação, porém ainda opera no vermelho, com apenas a segunda cota do volume morto recuperada. Tal redução no volume disponível reduziu também a cobertura do sistema, que hoje atende 5,2 milhões de pessoas, cerca de 60% de sua cobertura inicial (NÍVEL, 2015).

A falta de água nos mananciais já explorados e a dificuldade de viabilização na utilização de novos mananciais, muito distantes das regiões de consumo ou necessitando de tratamentos excessivamente caros para garantia de potabilidade, fez com que governos de várias partes do Brasil começassem a pensar na dessalinização como uma possível solução ao problema da falta d'água. Em São Paulo, por exemplo, o Consórcio PCJ (Piracicaba, Capivari e Jundiaí) pretende oferecer 40m<sup>3</sup>/s de água, captada e dessalinizada em Bertiooga, aos reservatórios de Jaguari e Jacareí, no Sistema Cantareira, através de um projeto de R\$ 2,0 bilhões (TOMAZELA, 2015). O Sistema São Lourenço, que pretende atender a Região Metropolitana de São Paulo com 4,7m<sup>3</sup>/s de água doce, tem valor de projeto equivalente (R\$ 1,6 bilhões) e produção cerca de 8,5 vezes menor (SABESP), ratificando a eficiência de um bom projeto de dessalinização.

No Rio de Janeiro, a inexistência de barreiras físicas entre a água salgada e o grande público consumidor, como a Serra do Mar em São Paulo, favorece ainda mais o processo de dessalinização. Frente à crise hídrica que aflige a região, o governador do estado, Luiz Fernando Pezão, esteve recentemente em reunião com técnicos espanhóis e israelenses para entender a viabilidade de um projeto de

dessalinização no estado (GOVERNO,2015). Além disto, o Governo Federal, em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, já desenvolve desde 2004 no nordeste brasileiro o Programa Água Doce (PAD); um projeto que pretende implantar mais de 1.200 unidades de dessalinização de água salobra até 2016, de forma a garantir água de qualidade para populações de baixa renda do semiárido brasileiro (Portal do Brasil, 2015).

A redução no nível de precipitação e da disponibilidade de água potável próximo aos grandes centros urbanos só reforçam, portanto, a necessidade de se desenvolver tecnologias de produção de água própria ao consumo humano a partir de águas salobras e salgadas de forma eficiente e economicamente viável. É nesse contexto que se insere o presente trabalho de formatura, tratando de um processo de dessalinização inovador, com baixo consumo energético e que pode garantir uma produção de água fresca bastante eficiente através de princípios simples.

## **2 OBJETIVOS**

O presente trabalho tem por objetivo o estudo de viabilidade de um novo processo de dessalinização de água que tem na mudança de fase a baixas temperaturas seu principal princípio. Tal estudo será realizado através da análise dos conceitos teóricos envolvidos no processo e tem como propósito final a apresentação de melhorias, com a finalidade de aperfeiçoar o sistema.

A segunda etapa do trabalho consistiria inicialmente no desenvolvimento de um projeto que tornaria possível a elaboração de um modelo em escala real. Esse modelo seria responsável por comprovar o princípio estudado e ratificar as melhorias indicadas. Após sua construção, tanto o desempenho do processo de dessalinização como a influência dele na qualidade da água produzida seriam estudados de forma a obter-se resultados conclusivos sobre a eficiência e a viabilidade do processo.

No entanto, após algumas tentativas sem sucesso na obtenção de auxílio financeiro que permitisse a compra dos materiais necessários para a construção do modelo, tornou-se inviável prosseguir com objetivo inicial do projeto. Assim, em

novembro, o grupo, em conjunto com o professor orientador, tomou a decisão de não dar continuidade à execução do protótipo por falta de recursos e tempo hábil para sua construção e análise dos resultados.

Com isso, a abordagem do trabalho de formatura teve de ser alterada. Acordou-se em prosseguir com um estudo de caso de uma comunidade de pequeno porte com deficiência no abastecimento de água de sua população por falta de fontes hídricas próprias. Este estudo abordará de forma geral todos os itens necessários à implantação de uma planta de dessalinização a baixa pressão e temperatura, para abastecimento de aproximadamente 1.000 pessoas.

Pretende-se com este trabalho contribuir para a popularização do uso de técnicas de dessalinização como solução em regiões onde o abastecimento de água sofre com a falta de mananciais de qualidade em suas proximidades.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 DESSALINIZAÇÃO**

A dessalinização é o processo físico-químico de retirada do excesso de sais e minerais da água do mar. Segundo o CONAMA (Resolução 357/2005), água salina é aquela que possui mais de 30.000 partes por milhão de sal dissolvido, sendo considerada água doce aquela que possui menos de 5.000 partes por milhão. Desta forma, para que o processo de dessalinização seja bem-sucedido deve-se retirar cerca de 25.000 partes por milhão de sal da água salgada.

A forma mais elementar e natural de conduzir um processo de dessalinização é através da destilação simples. Neste método procura-se imitar o ciclo natural da água, no qual as águas superficiais de mares e oceanos evaporam, ascendem em direção as nuvens, são armazenadas por certo tempo e precipitam, voltando a suas origens. No processo de dessalinização, o retorno à fonte deve ser desviado, de forma que o vapor seja condensado em uma região onde não mais exista a alta concentração de sais, garantindo que a água produzida permaneça com o baixo nível de salinidade do vapor produzido.

Esse processo de dessalinização possui, entretanto, alguns obstáculos que dificultam sua ampla utilização. O primeiro deles diz respeito ao alto consumo energético do processo devido à elevada temperatura de evaporação da água à pressão atmosférica ao nível do mar. O segundo está relacionado à necessidade de remineralização da água produzida, visto que, no processo de evaporação, os minerais inicialmente contidos na água permanecem em estado sólido e não acompanham a água em estado de vapor. E por fim, tem-se a baixa eficiência do processo, que alcança em geral cerca de 50% do volume original de água.

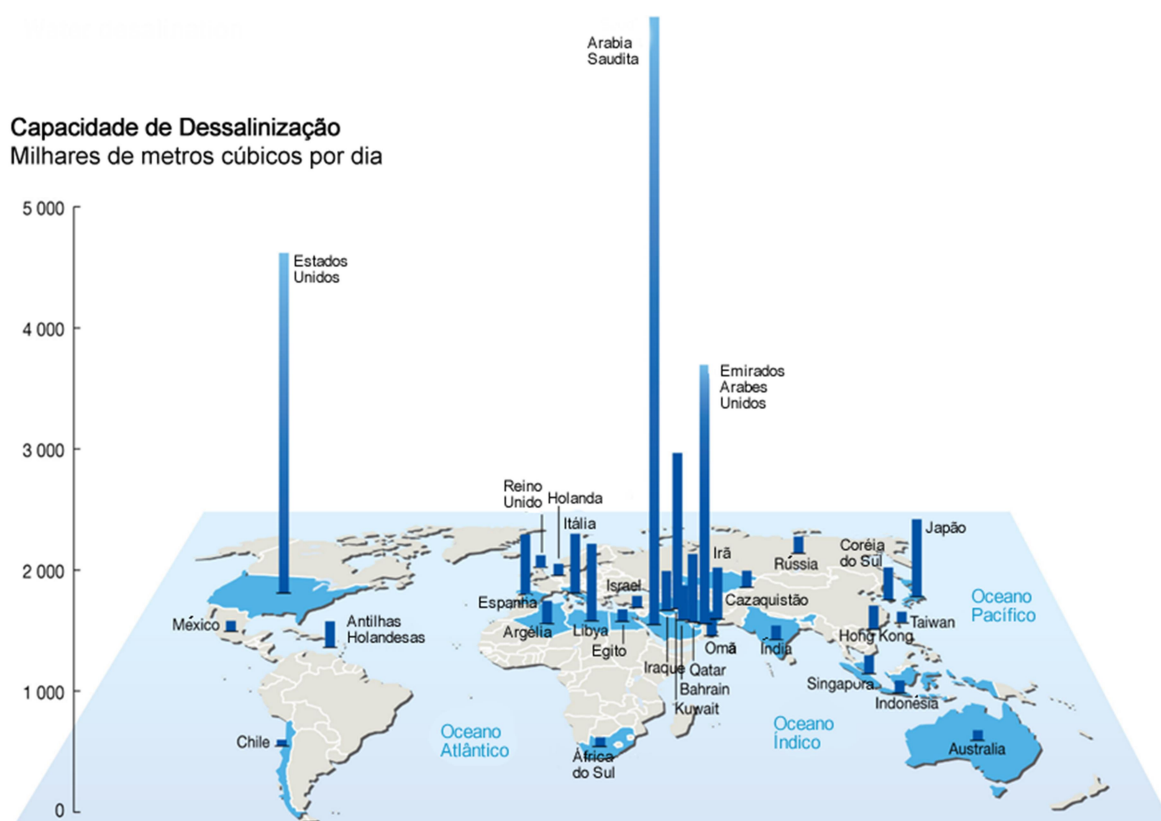
Outro processo de dessalinização com bastante utilização em escala industrial é a osmose. Neste processo a água passa por uma membrana semipermeável, buscando naturalmente equilibrar a concentração de solutos entre suas duas faces. Para que a dessalinização ocorra é preciso inverter o fluxo natural da água de forma que ela passe pela membrana deixando seus sais e caminhe em direção à água doce. Tal inversão pode ser obtida com a aplicação de pressão externa sobre a solução salgada ou com a utilização de membranas cátion e ânion que atraem os sais eletricamente carregados, deixando as moléculas de água pura para trás.

O processo de osmose é conhecido no mercado por alcançar o maior nível de filtração entre as tecnologias disponíveis, com eficiências que chegam a mais de 90%. Entretanto é também um dos que demandam maiores cuidados em relação a água utilizada, visto que os solutos presentes na água podem entupir a membrana e reduzir drasticamente sua permeabilidade, e maiores quantidades de energia, necessária para garantir a pressão suficiente sobre a solução salgada, são demandadas. Desta forma, acaba por torna-se um processo muito caro e com viabilidade econômica prejudicada.

Neste estudo apresentar-se-á um processo de dessalinização a baixas temperaturas, que busca conduzir a dessalinização de água do mar por evaporação utilizando menos energia que os processos convencionais, aproveitando-se de propriedades termodinâmicas naturais às moléculas de água.

### 3.2 PANORAMA MUNDIAL

De acordo com as Organização das Nações Unidas, atualmente mais de 1 bilhão de pessoas vivem em áreas nas quais os recursos hídricos são escassos. Uma das regiões mais áridas do planeta, o Oriente Médio há tempos contorna seus problemas hídricos através da dessalinização de água. Isso se reflete na preponderância desta região no cenário mundial do setor de dessalinização. O mapa, produzido pelo *Pacific Institute (2009)* e exposto a seguir, mostra a capacidade instalada de usinas de dessalinização ao redor do mundo.



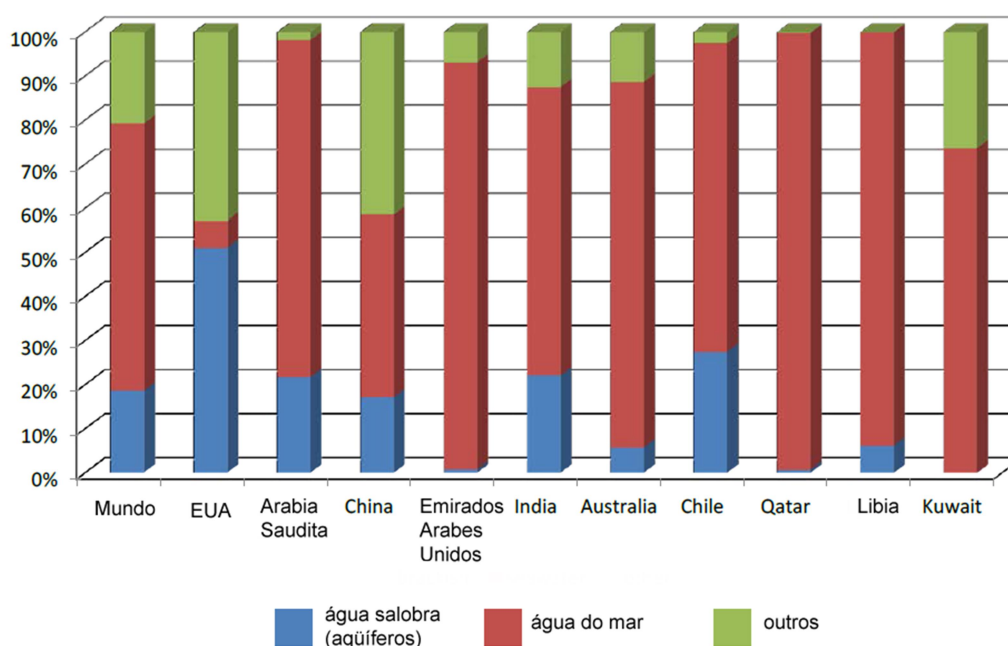
**Figura 1: Capacidade instalada de dessalinização no mundo (Adaptado de *Pacific Institute*, 2009)**

Outras regiões do planeta com clima não tão severo quanto o do Oriente Médio também têm investido em dessalinização. Singapura investe desde meados do século XX no princípio, principalmente devido a sua particular geografia de uma cidade-estado com poucos recursos hídricos e como uma forma de independência de nações estrangeiras, como a, Malásia para importação de água. A grande



estiagem que assola o estado americano da Califórnia nos últimos meses está levando o governo local a construir novas usinas de dessalinização. A Austrália tem adotado uma política de segurança hídrica através da “diversidade” – considerando a dessalinização como parte de um portfólio de fontes de água pura. Na China o governo avalia que a transposição do rio Yangtze para a região de Pequim e o 1 bilhão de metros cúbicos anuais que trará não será suficiente para atender a demanda futura. Serão necessários mais 600 milhões de metros cúbicos obtidos através de uma das maiores usinas de dessalinização do mundo.

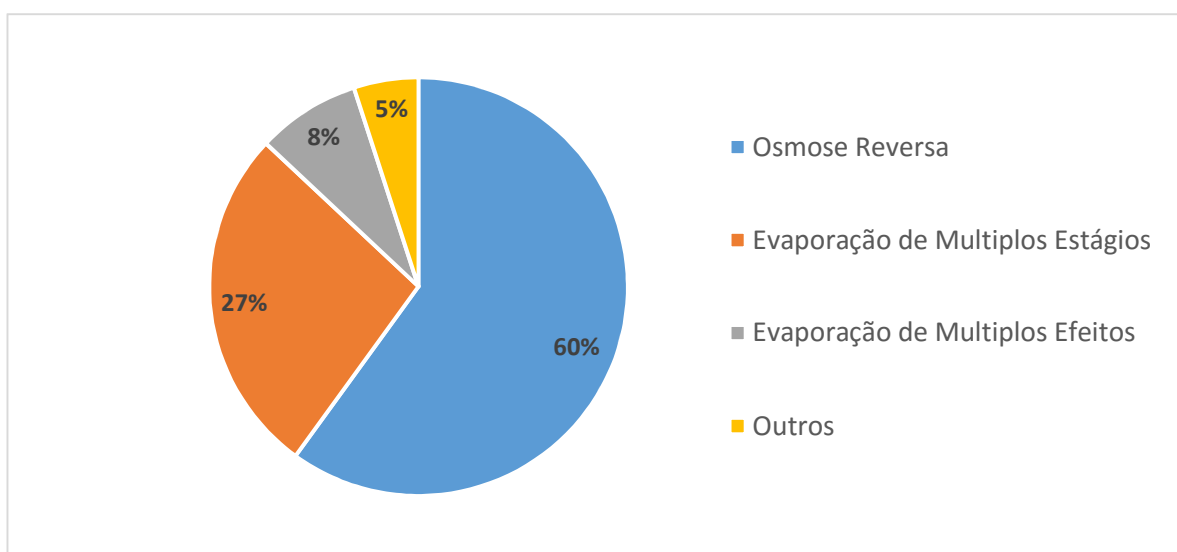
As principais fontes de água salina utilizada nas usinas de dessalinização ao redor do mundo são a água do mar e a água salobra proveniente de aquíferos subterrâneos. O gráfico a seguir mostra a participação de cada fonte de água salina atualmente empregada.



**Figura 2: Divisão entre as fontes de água salina utilizadas na dessalinização (Adaptado de ZIOLKOWSKA, 2014)**

Atualmente existem cerca de 13.080 usinas de dessalinização no mundo que podem ser agrupadas de acordo com o método de dessalinização empregado: osmose reversa, evaporação de múltiplos estágios, evaporação de múltiplos efeitos ou outros. Na evaporação por múltiplos estágios utiliza-se múltiplas câmaras em série, onde o vapor aquecido de uma etapa é utilizado para aumentar a

temperatura da câmara da etapa seguinte. Já na evaporação por múltiplos efeitos, o processo de evaporação é conduzido quase que instantaneamente uma vez que a água, já aquecida, proveniente dos tubos de alimentação, é injetada em uma câmara com altíssima temperatura; o vapor produzido é conduzido a uma calha, onde condensa e precipita, e a salmoura passa para a fase seguinte para reiniciar o processo.



**Figura 3: Divisão dos métodos de dessalinização empregados atualmente (Adaptado de KOSCHIKOSKI, 2011)**

### 3.3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA DESSALINIZAÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS

O princípio básico por trás da dessalinização a baixas temperaturas está relacionado à possibilidade de evaporação da água do mar a temperaturas menores que 100°C quando da presença de menores pressões que a pressão atmosférica sobre sua superfície. Três conceitos são fundamentais para o entendimento desse processo: a pressão de vapor da água, sua entalpia de vaporização/condensação e o vácuo de Torricelli.

### 3.3.1 Pressão de vapor

Pressão de vapor, ou pressão de vapor de equilíbrio, 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.

Quando uma solução está em um sistema fechado, existe um equilíbrio natural entre ele e sua fase gasosa, independente da temperatura do líquido ou do sistema. Isso acontece, pois, as moléculas de uma substância possuem uma ampla distribuição de energias cinéticas individuais (Figura 4), assim, essencialmente a qualquer temperatura, sempre existirão moléculas com energia suficiente para escapar da força coesiva intrínseca da solução e mudar de fase.

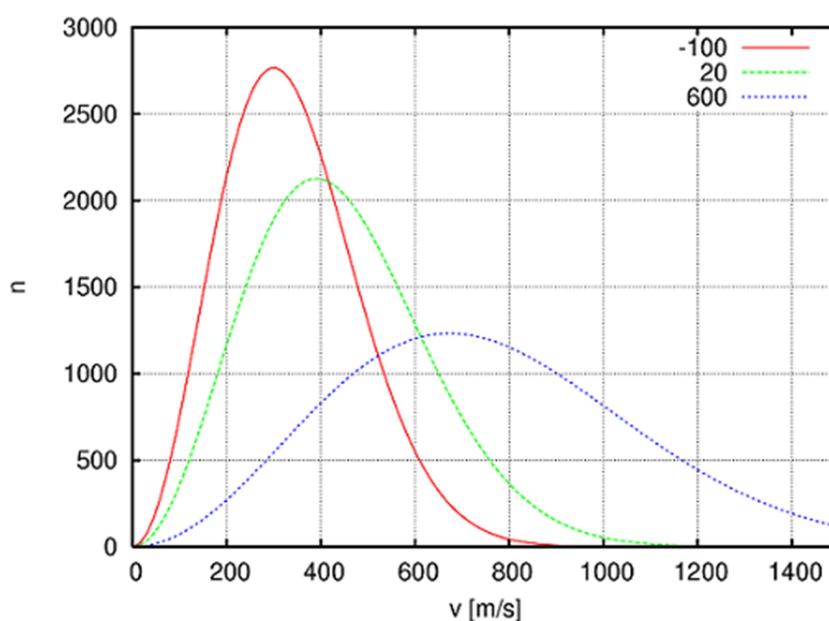


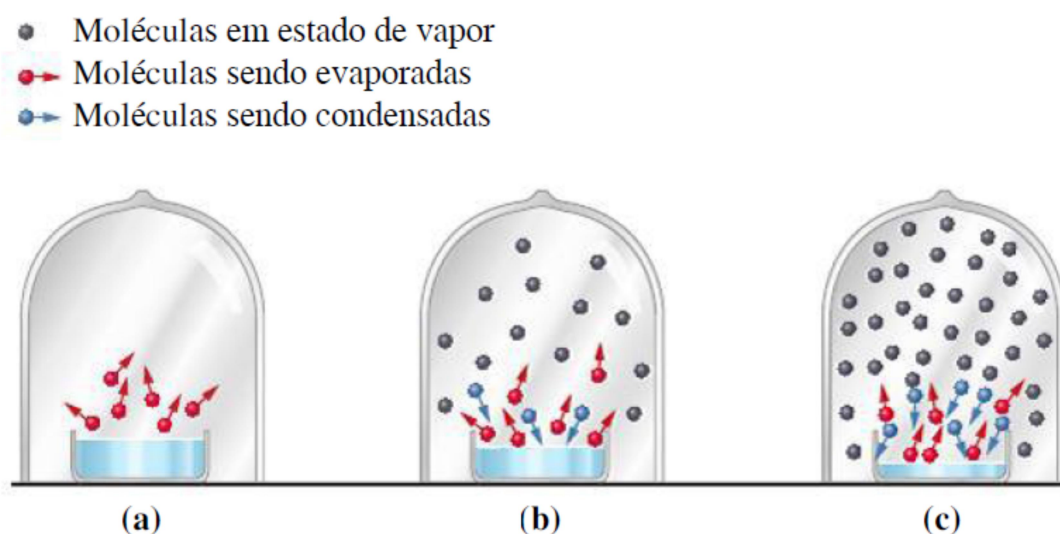
Figura 4: Distribuição de Boltzmann, nº de partículas em função da velocidade (University of California, Davis<sup>1</sup>)

---

<sup>1</sup> Disponível em

<[http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical\\_Chemistry/Physical\\_Properties\\_of\\_Matter/Phases\\_of\\_Matter/Liquids/Vapor\\_Pressure](http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Physical_Properties_of_Matter/Phases_of_Matter/Liquids/Vapor_Pressure)>. Acesso em 21 de abril de 2015.

O estabelecimento do equilíbrio entre a fase líquida e a gasosa da água em um sistema fechado pode ser observada na figura a seguir (Figura 5). Inicialmente apenas a fase líquida está presente. Pela distribuição de Boltzmann, existem moléculas internas ao líquido que possuem energia suficiente para romper as forças intermoleculares da água, assim inicia-se o processo de vaporização (estágio (a)). O sistema passa então a possuir duas fases, uma líquida e uma gasosa (estágio (b)). A fase gasosa também apresenta uma distribuição ampla de energia entre suas moléculas, assim, havendo algumas delas energia inferior àquela requerida para continuar no estado gasoso, inicia-se o processo de condensação. Naturalmente o sistema tende a se ajustar de forma que a taxa de condensação de moléculas se equipare à de evaporação e o sistema entre em equilíbrio dinâmico (estágio (c)). Estabelece-se então a pressão de vapor.



**Figura 5: Equilíbrio líquido-vapor (Adaptada de PETRUCCI, R.H, 2011)**

A pressão de vapor está intimamente ligada à temperatura do líquido, assim, em uma excelente aproximação, pode-se dizer que para uma determinada substância a pressão de vapor depende apenas de sua temperatura. Entretanto, 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 salgada, os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  ocupam parte do espaço

entre as moléculas de água, resultando menor interação entre estas e acarretando a diminuição da pressão de vapor da solução em relação à água pura na mesma temperatura. A tabela e o gráfico abaixo indicados mostram a variação da pressão de vapor da água com sua temperatura e salinidade.

Tabela 1: Variações da pressão de vapor em função da Temperatura (T) e da Salinidade (S) (Elaborada pelo autor com base em dados de SPIELGLER; LAIRD, 1980)

T (°C)	Pv (mmHg)						
	Água fresca	S = 20 g/kg	S = 30 g/kg	S = 34 g/kg	S = 40 g/kg	S = 50 g/kg	S = 60 g/kg
<b>0</b>	4,6						
<b>10</b>	9,2						
<b>20</b>	17,5	17,4	17,3	17,2	17,2	17,1	17,0
<b>30</b>	31,8	31,5	31,3	31,3	31,2	31,0	30,8
<b>40</b>	55,3	54,8	54,5	54,3	54,1	53,8	53,5
<b>50</b>	92,5	91,6	91,0	90,8	90,5	90,0	89,4
<b>60</b>	149,4	147,8	147,0	146,7	146,1	145,2	144,3
<b>70</b>	233,7	231,3	230,0	229,4	228,6	227,2	225,7
<b>80</b>	355,1	351,4	349,4	348,5	347,3	345,1	342,8
<b>90</b>	525,8	520,3	517,3	515,9	514,2	510,9	507,6
<b>100</b>	760,0	752,1	747,8	745,8	743,3	738,6	733,7
<b>110</b>	1074,6	1063,4	1057,3	1054,5	1050,9	1044,3	1037,8
<b>120</b>	1489,0	1474,0	1456,0	1461,0	1456,0	1447,0	1438,0
<b>130</b>	2026,0	2005,0	1994,0	1988,0	1982,0	1969,0	1956,0
<b>140</b>	2711,0	2683,0	2668,0	2661,0	2652,0	2632,0	2618,0
<b>150</b>	3570,0	3534,0	3514,0	3505,0	3493,0	3472,0	3449,0

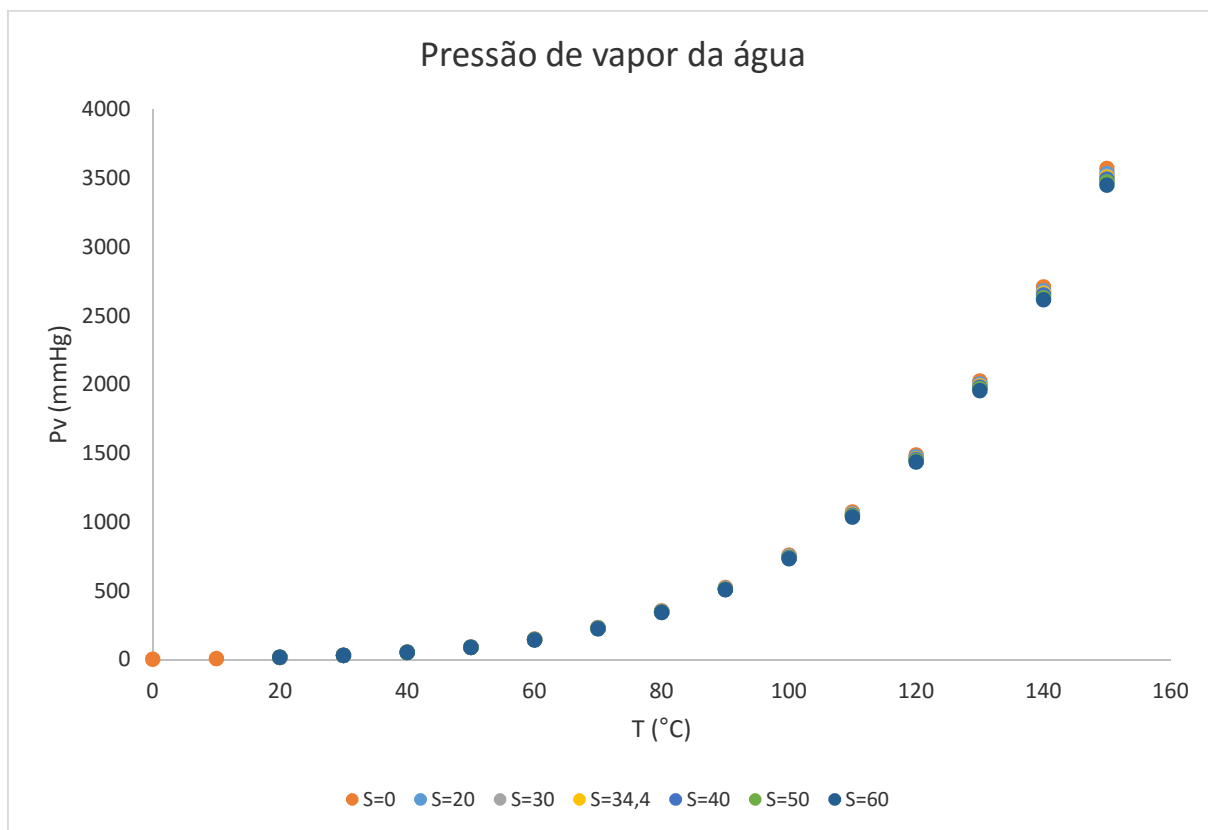


Figura 6: Pressão de vapor da água doce e salgada (Elaborada pelo autor)

### 3.3.2 Entalpia de vaporização

O processo de vaporização de uma substância é diretamente relacionado a três aspectos: temperatura, área superficial e forças intermoleculares.

A temperatura associa-se diretamente à energia cinética das moléculas da substância, isto é, à sua capacidade de romper a barreira de um determinado estado e sofrer a mudança de fase. Quanto maior a temperatura de um sistema, mais moléculas terão energia suficiente para ultrapassar as forças intermoleculares do líquido e passar ao estado de vapor. A área superficial relaciona-se à superfície de contato entre o líquido e a fase gasosa, isto é, ao nível de interação entre as fases. Desta forma, quanto maior a área superficial, maior será a interação entre as fases e também a taxa de evaporação/condensação observada no equilíbrio. Por fim, as forças intermoleculares estão relacionadas às forças de atração molecular da substância; quanto maior a atração observada, maior será a barreira a ser transpassada na evaporação, portanto, maior será a energia requerida para tal e

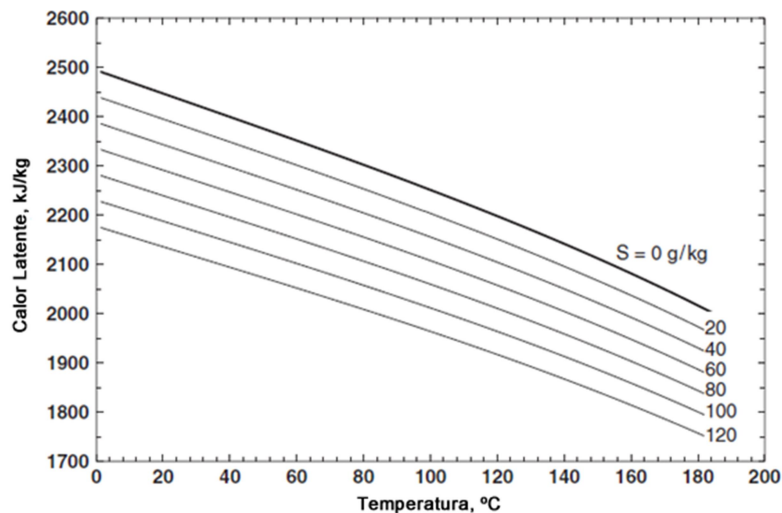
menos moléculas satisfarão o quesito a uma data temperatura, implicando uma menor taxa de evaporação.

No processo de vaporização, as partículas que passam ao estado de vapor têm muito mais energia do que as partículas que permanecem no estado líquido, assim, a energia média que resta na fase líquida após a evaporação de suas partículas diminui. Para garantir que o processo de vaporização continue, torna-se necessário introduzir mais energia à fase líquida, sem haver, entretanto, um aumento de temperatura. A essa energia, introduzida no sistema a temperatura constante, dá-se o nome de calor latente. Vendo por outro ângulo, a quantidade de calor absorvida por um sistema para que certa quantidade de líquido se transforme em vapor, a temperatura constante, é chamada entalpia de vaporização. Isto posto, a entalpia de vaporização nada mais é do que o calor latente de mudança de fase da substância.

$$\Delta H_{\text{vaporização}} = H_{\text{vapor}} - H_{\text{líquido}}$$

A vaporização é um processo endotérmico, assim a entalpia de vaporização de uma substância é sempre positiva. Tal valor é, entretanto, dependente das forças intermoleculares da substância em questão e de sua temperatura de evaporação. No caso da água a pressão atmosférica, isto é, com temperatura de evaporação de 100°C, a entalpia de vaporização, ou calor latente de evaporação, é igual a 44 kJ/mol ou 540 cal/g. Do ponto de vista termodinâmico, a condensação é o processo oposto à vaporização, assim, a entalpia de condensação de uma substância é igual em módulo e oposta em sinal à entalpia de vaporização da mesma substância.





**Figura 7: Calor latente de vaporização em função da temperatura e da salinidade (S)**  
(Adaptado de SHARQAWY; LIENHARD; ZUBAIR, 2010)

### 3.3.3 Vácuo de Torricelli

Em meados do século XVII, o físico italiano Evangelista Torricelli (1608 – 1647) demonstrou a possibilidade criar-se vácuo, ou uma pressão muito baixa, na superfície livre do líquido que se encontra no interior do tubo. Em seu experimento original, Torricelli tomou um tubo de vidro, fechado em uma das extremidades, e encheu-o até a borda com mercúrio (Hg). Em seguida, tampou a ponta aberta e, inverteu o tubo, mergulhando sua ponta em uma bacia com a mesma substância. Soltando a ponta aberta notou que a coluna de mercúrio descia somente até certo nível.

Ele então concluiu que, como a coluna de mercúrio está em equilíbrio com a pressão atmosférica exercida na superfície livre, a pressão no tubo ao nível P (Figura 8) é igual à pressão atmosférica atuante na superfície livre do recipiente. Havendo apenas uma quantidade desprezível de vapor acima da coluna, a pressão no ponto P é basicamente devida à coluna de mercúrio sobre ele, assim, a pressão atmosférica externa corresponde exatamente à pressão que mantém uma coluna de mercúrio a uma altura de 760 mm, a nível do mar.

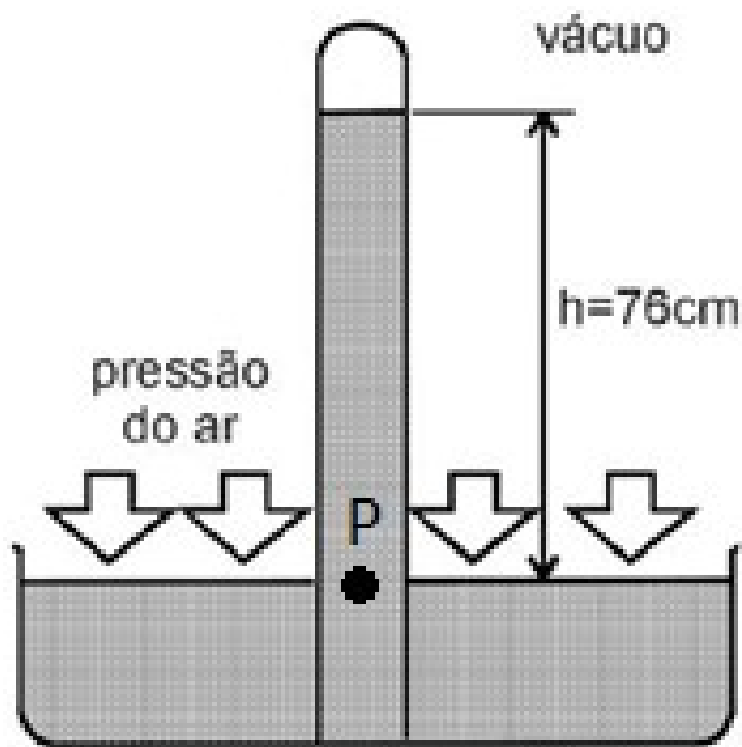


Figura 8: Experimento de Torricelli (Portal da Refrigeração<sup>2</sup>)

Pode-se traduzir os efeitos observados por Torricelli para o mercúrio também para outras substâncias. A água, sendo aproximadamente 14 vezes mais leve que o mercúrio, necessita de uma coluna de aproximadamente 10,3m para equilibrar a pressão atmosférica de 760 mmHg.

### 3.4 DESSALINIZAÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS

#### 3.4.1 Princípio físico

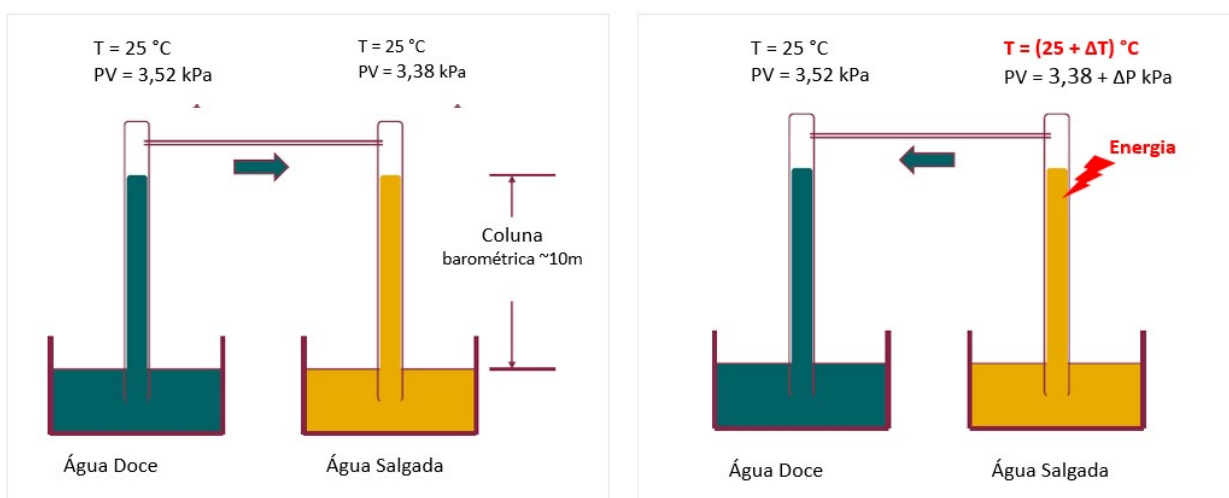
O princípio da dessalinização a baixas temperaturas pode ser demonstrado por um esquema muito simples (Figura 9). Nele, dois recipientes, um contendo água doce e outro, água salina, são mantidos a temperatura ambiente e interligados por meio de um tubo. Inicialmente, a ligação entre os recipientes será

---

<sup>2</sup> Disponível em <<http://www.refrigeracao.net/Topicos/Pressao.htm>>. Acesso em 05 de julho de 2015.

ocupada pelo vapor dos respectivos fluidos, sendo que a água doce, possuindo pressão de vapor um pouco mais elevada à temperatura ambiente, tenderá a sobrepor o vapor da água salgada e assim mover-se em busca do equilíbrio do sistema, isto é, a equalização das concentrações.

Se, entretanto, a temperatura da água salina for mantida levemente acima daquela da água fresca, pode-se inverter o processo natural, fazendo com que o vapor proveniente da água salgada se mova em direção ao recipiente de água doce e haja produção de água fresca. Em um estudo realizado na *New Mexico State University* (KHANDAN; GUDE, 2010) sobre esse princípio de dessalinização, concluiu-se que uma diferença de temperatura de aproximadamente 15 °C seria suficiente para sobrepor a pressão de vapor da água doce e inverter o fluxo. Tão baixa variação de temperatura pode ser facilmente alcançada utilizando fontes de calor tais como a energia solar ou calor reaproveitado de outros sistemas, por exemplo.



**Figura 9: Princípio básico da dessalinização à baixa temperatura**  
(Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010)

### 3.4.2 Transformação termodinâmica

Os processos de dessalinização consomem em geral alto volume de energia, entretanto, a energia nem sempre é de igual qualidade ou custo. No processo de osmose reversa, por exemplo, utiliza-se energia mecânica; destilação simples utiliza energia térmica de alta qualidade; destilação à vácuo utiliza energia

mecânica e energia térmica de moderada qualidade; e, por fim, destilação solar utiliza energia térmica de baixa qualidade. Quanto maior a qualidade da energia, isto é, sua facilidade de conversão para outras formas, mais cara ela tende a ser. Sendo a energia elétrica a de mais alta qualidade, seguida pelas energias mecânica, térmica e solar, fica fácil entender os altos custos associado ao gasto energético do processo de dessalinização por osmose, por exemplo.

Na dessalinização por mudança de fase conduzida a baixas temperaturas, a energia solar pode ser aproveitada com bastante eficiência, desta forma pode-se reduzir consideravelmente os custos energéticos do processo. Um estudo conduzido segundo os princípios da primeira lei da termodinâmica (Lei da Conservação de Energia<sup>3</sup>) ajudará a compreender o rendimento e a taxa de consumo de energia desse processo, enquanto uma análise baseada na segunda lei da termodinâmica<sup>4</sup> mostrará os efeitos da qualidade da energia utilizada. O esquema a seguir (Figura 10) representa de forma simplificada as transformações termodinâmicas desse processo.

---

<sup>3</sup>  $Q = \Delta U + \tau$

<sup>4</sup> Dois enunciados definem a segunda lei da termodinâmica (WYLEN; SONNTAG, 1976):

Enunciado de Kelvin-Planck: “é impossível construir um dispositivo que opere em um ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico”. Este enunciado estabelece não ser possível a construção de uma máquina térmica com rendimento igual à 100%.

Enunciado de Clausius: “é impossível construir um dispositivo que opere em um ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além da passagem de calor de um corpo frio para um corpo quente”. Já neste enunciado, aprende-se que é impossível construir um refrigerador, máquina térmica que opera no sentido contrário ao fluxo natural de calor (da fonte quente para a fonte fria), que opere sem receber trabalho externo.

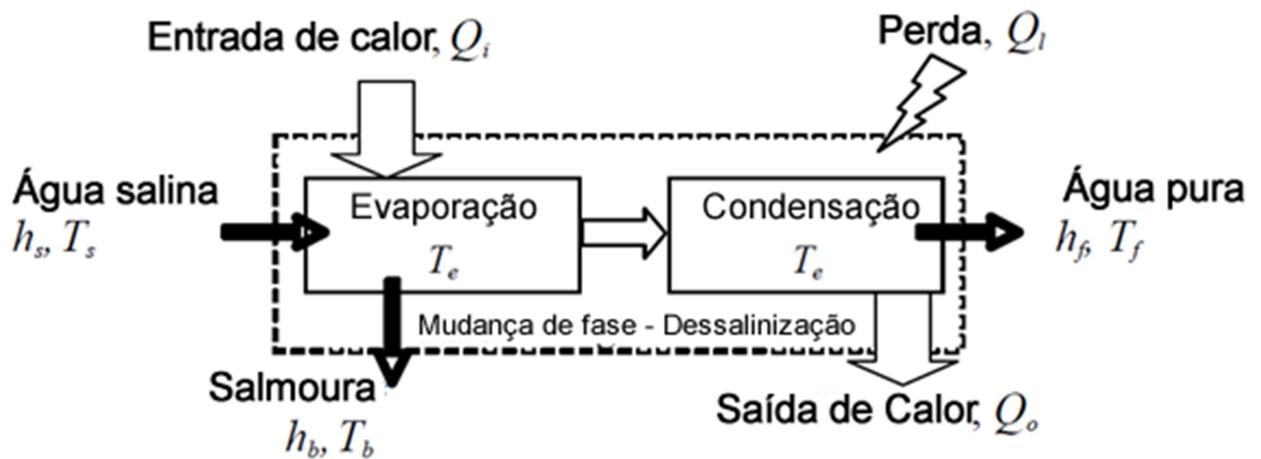


Figura 10: Representação genérica do processo de dessalinização por mudança de fase, sendo  $h$  a entalpia específica,  $T$  a temperatura e  $Q$  a taxa de transferência de calor.

(Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010)

Inicialmente, a câmara de evaporação é alimentada por um fluxo de água salgada que, recebendo determinada quantidade de calor, sofre uma mudança de fase produzindo vapor de água e salmoura. O vapor move-se em direção à câmara de condensação, enquanto a salmoura é retirada do sistema. Ao chegar à câmara de condensação, o vapor perde calor e sofre nova mudança de fase, voltando ao estado líquido, desta vez como água doce. Tal perda de calor é decorrente de dois processos, o primeiro relacionado à mudança de fase propriamente dita e o segundo, à troca de calor entre a câmara e o meio externo.

Nesse sistema,  $Q_i$  é o calor inserido no sistema para que a água atinja a temperatura de evaporação ( $T_e$ );  $Q_0 = m_f \cdot h_L$  é a taxa de perda de calor durante a mudança de fase, sendo  $m_f$  a taxa de produção de água fresca e  $h_L$  o calor latente de condensação à temperatura de evaporação, isto é, a quantidade de calor necessária para que uma unidade de massa de água mude de fase a temperatura indicada ( $T_e$ ); e  $Q_l = U \cdot A \cdot \Delta T$  é a taxa de perda de calor, sendo  $U$  o coeficiente de transferência de calor,  $A$  a área de transferência de calor e  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre a câmara de evaporação e o ambiente. Aplicando-se a primeira lei da termodinâmica, pode-se determinar a taxa de produção de água doce em função da taxa de alimentação do sistema com água salgada e da temperatura de evaporação vigente.

$$E_{in} = E_{out} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$H_s + Q_i - H_b = Q_l + H_f + Q_o$$

$$m_s \cdot h_s + Q_i - m_b \cdot h_b = U \cdot A \cdot \Delta T + m_f \cdot h_f + m_f \cdot h_L$$

$$m_s \cdot h_s + Q_i - (m_s - m_f) \cdot h_b = U \cdot A \cdot \Delta T + m_f \cdot h_f + m_f \cdot h_L$$

$$\frac{m_f}{m_s} = \frac{(Q_i - U \cdot A \cdot \Delta T) / m_s + (h_s - h_b)}{h_f + h_L - h_b} \quad (\text{Eq. 2})$$

Admitindo-se  $Q_i = 1.000 \text{ kJ/h}$  e  $UA = 0,8 \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{K}}$ , pode-se observar que para uma dada velocidade de alimentação do sistema, maiores taxas de produção de água doce são obtidas a menores temperaturas de evaporação (Figura 11). Ainda, desenhando-se 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 produzida), a diversas temperaturas de evaporação (Figura 12), conclui-se que quanto menor temperatura de evaporação, menor é a energia específica requerida para atingir o rendimento desejado, ou seja, processos conduzidos a baixas pressões, e por consequência baixas temperaturas, podem usufruir de energias de menor qualidade, tais como a energia solar e energia térmica reaproveitada de outros processos, de maneira mais eficiente.

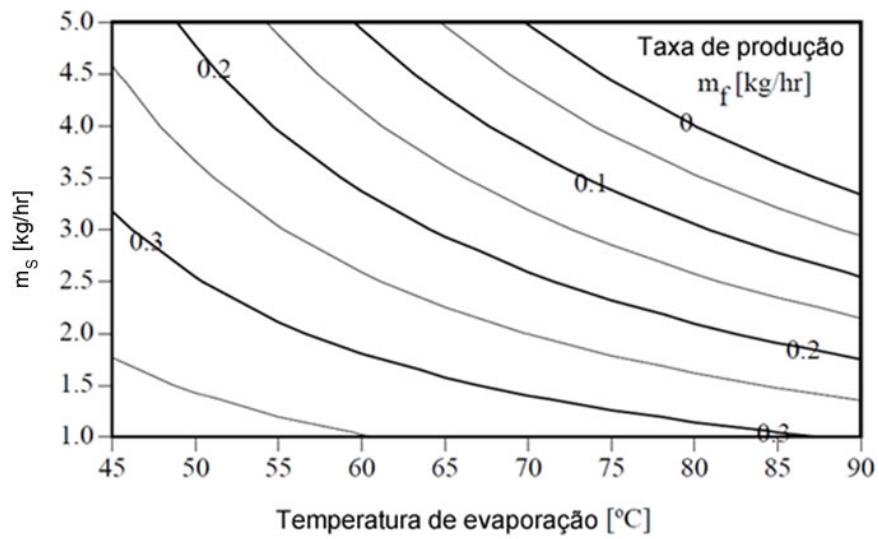


Figura 11: Taxa de produção de água doce [kg/h] em função da taxa alimentação do sistema com água salina e da temperatura de evaporação com entrada de calor igual a  $Q_i = 1.000$  kJ/h. (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010)

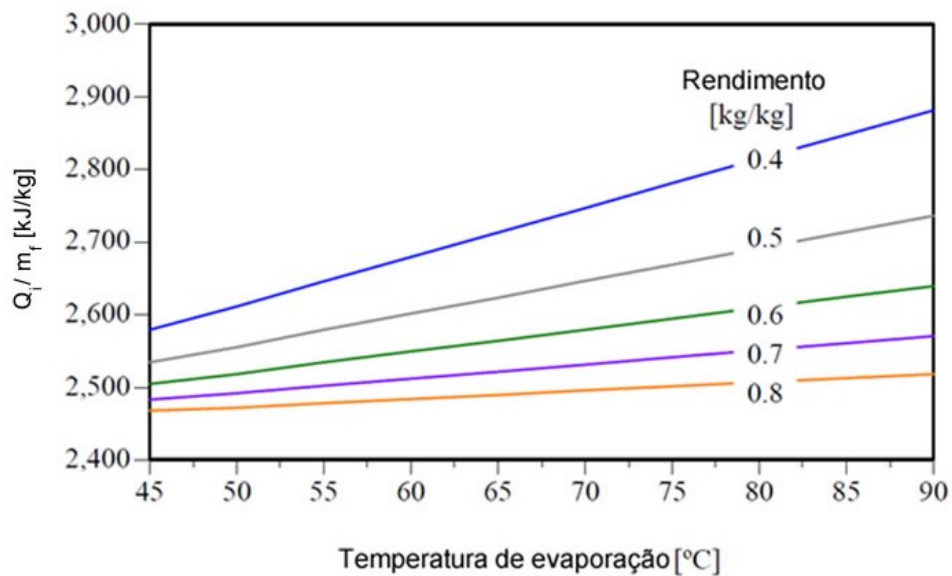


Figura 12: Relação entre o consumo de energia específica [kJ/kg] e o rendimento do sistema para várias temperaturas de evaporação. (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010)

De forma a analisar os efeitos da qualidade da energia utilizada no processo, considere dois casos, cada um alimentado com 1kg/h de água salina,  $m_s$ :

Caso 1: um processo de dessalinização por mudança de fase utilizando energia térmica de qualidade moderada à taxa de 1.000 kJ/h, temperatura de evaporação de 90°C e temperatura ambiente de 25°C.

Caso 2: um processo de dessalinização por mudança de fase utilizando energia térmica de baixa qualidade, também à taxa de 1.000 kJ/h, mas com temperatura de evaporação de 50°C e temperatura ambiente de 25°C.

Utilizando-se os gráficos obtidos através da primeira lei da termodinâmica (Figura 11 e Figura 12), observa-se que a taxa de produção de água doce para os casos 1 e 2 é de 0,294 kg/h e 0,368 kg/h e a necessidade de energia específica, 3.401 kJ/kg e 2.717 kJ/kg, respectivamente. Se, comparativamente, um motor térmico ideal fosse operado a partir das respectivas diferenças de temperatura, a eficiência alcançada segundo o Ciclo de Carnot<sup>5</sup> seria de 17,9% para o caso 1 e 7,7% para o caso 2.

Assim, dada a entrada de energia térmica de 1000 kW e com base na equivalência dos trabalhos reversíveis, a energia específica necessária nos dois casos seria de 608 kJ/kg e 210 kJ/kg, respectivamente. Tais resultados permitem concluir que, mesmo sendo uma energia de menor qualidade, a energia utilizada no caso 2 possibilita maior produção de água fresca com menor quantidade de energia específica agregada, ressaltando a eficiência do processo de mudança de fase conduzido a baixas temperaturas.

### 3.4.3 Configuração básica do sistema

Uma configuração básica para o processo de dessalinização proposto está apresentada na figura abaixo (Figura 13). Dentre os principais componentes do sistema estão uma câmara de evaporação, um condensador natural, um reservatório elevado de água doce, dois permutadores de calor e três colunas de aproximadamente 10m de altura que, junto ao sistema de conservação de nível dos

---

<sup>5</sup> Eficiência do Ciclo de Carnot:  $\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$





### 3.5 SUGESTÕES DE MELHORIA

Algumas ideias de melhoria, se bem implementadas, podem aumentar consideravelmente a produtividade do sistema acima exposto. Dentre tais proposições pode-se citar: a reutilização do calor dentro do próprio sistema, diminuindo a necessidade de introdução de calor externo; a busca por maior eficiência no processo de evaporação e; a utilização de dispositivos específicos para captação da energia solar e sua utilização como fonte de calor para o sistema.

#### 3.5.1 Dessalinização em múltiplos estágios

A configuração básica do processo de dessalinização descrita neste trabalho exige introdução de calor externo para que a água salgada alcance uma pressão de vapor maior do que aquela da água doce. Entretanto, o sistema subutiliza o calor contido na água doce que já foi condensada e será retirada do sistema. Um processo em múltiplos estágios pode ser a solução para que o valor uma vez inserido no sistema, o calor seja reciclado no decorrer do processo.

A imagem a seguir (Figura 14) mostra um sistema de dessalinização em dois estágios. Nele, o vapor gerado na primeira câmara de evaporação serve como um pré-aquecedor da água salgada que alimenta a segunda câmara, enquanto o vapor gerado nesta segunda câmara pode pré-aquecer a água que alimentará a primeira. Ainda, nesse segundo pré-aquecimento, a água salgada que alimentará a primeira câmara serve como o elemento resfriador do produto da segunda.

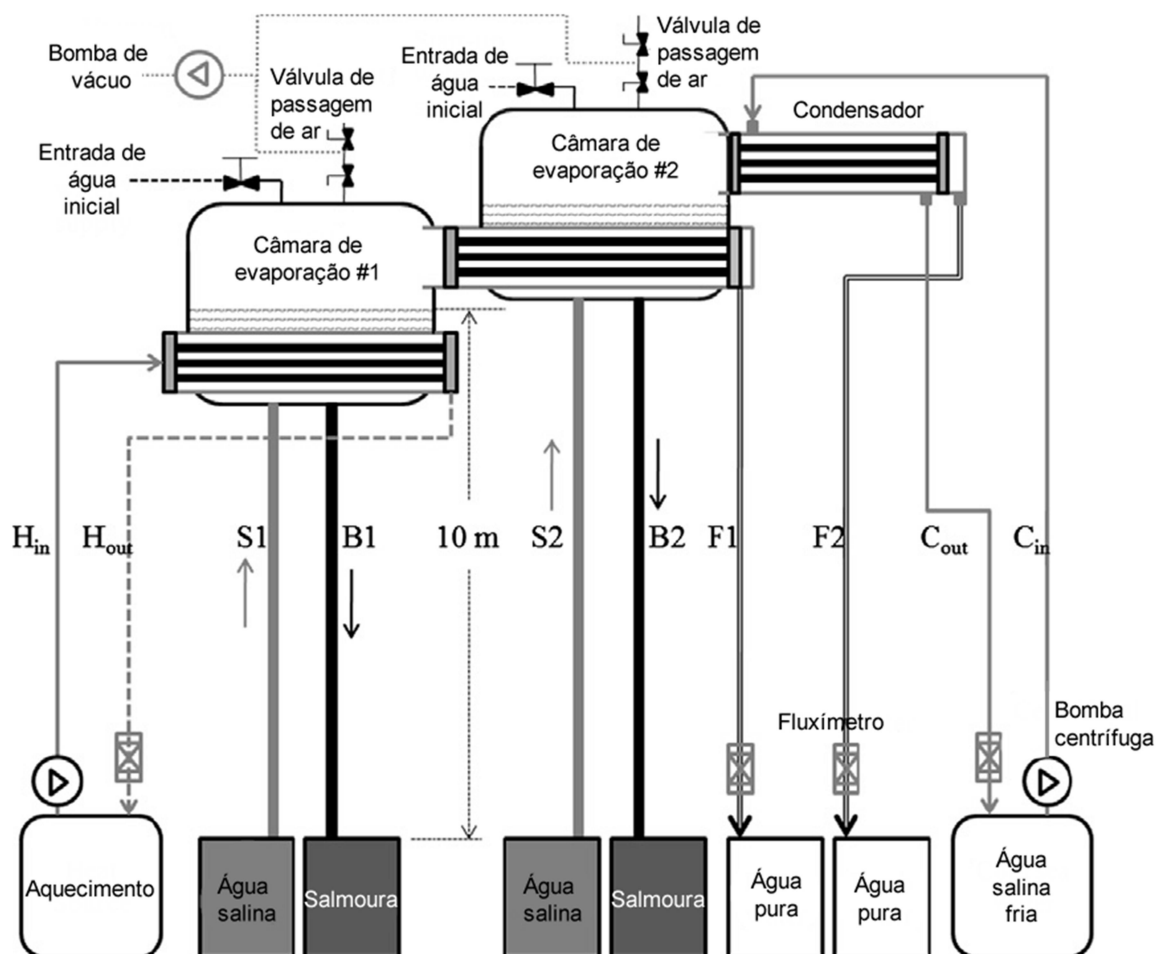
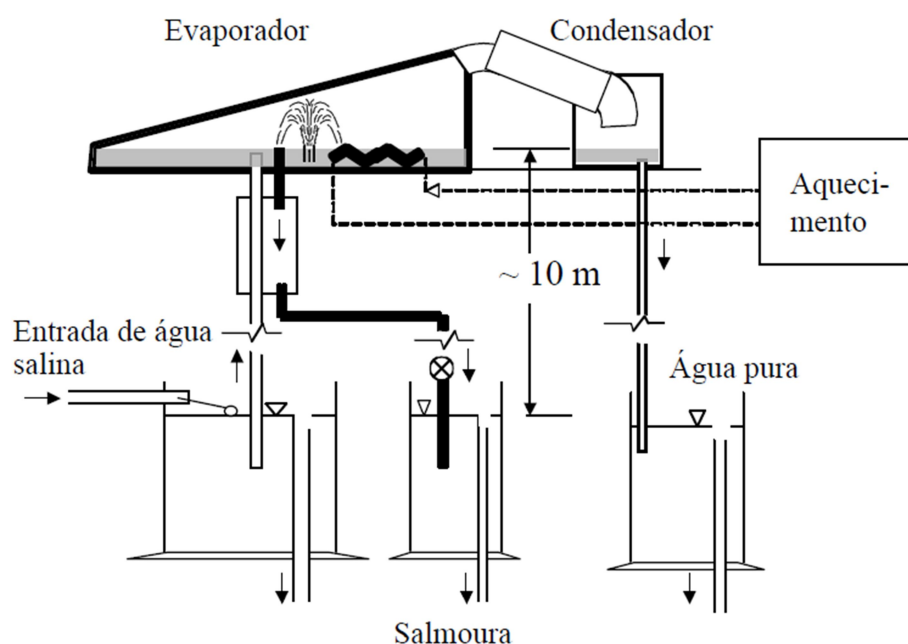


Figura 14: Dessalinização em múltiplos estágios (Adaptada de KHANDAN et al, 2012)

### 3.5.2 Evaporação com uso de spray

De forma a melhorar a eficiência do processo de evaporação da água salina, pode-se inserir no sistema um spray do qual jorra água salina aquecida em gotículas finas, aumentando a superfície de contato do fluido e, consequentemente, a taxa de evaporação do sistema. Uma bomba é utilizada para coletar água na base do evaporador e fazê-la jorrar através do pulverizador. Tal processo facilita a evaporação da água presente na câmara de evaporação e aumenta a eficiência de produção de água doce.



**Figura 15: Esquema do sistema com o pulverizador (Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010)**

### 3.5.2.1 Influência das características geométricas das gotas

KALOGIROU (2001) demonstra teoricamente através do equacionamento da transferência de massa e calor, a influência do diâmetro das gotas no desempenho de um sistema de dessalinização. O autor conclui que quanto menor for o diâmetro das gotas, maior será a eficiência do processo de evaporação. O menor diâmetro das gotículas leva a uma maior área específica (relação entre a área da gota pelo seu volume) e isto facilita a troca de calor entre a gota e o ambiente. Esta característica foi também comprovada experimentalmente por JOYCE et al (1994).

Entretanto, não basta apenas produzir gotículas de pequeno diâmetro, deve-se considerar também a possibilidade de tais gotículas em suspensão coalescerem e formarem gotas maiores, diminuindo a performance do evaporador. Portanto, a produção das pequenas gotas é um processo complexo e depende de pulverizador e pressão de entrada de água salina adequados.

Outro aspecto de fundamental importância em relação ao tamanho das gotas diz respeito à possibilidade de que as gotas em suspensão sejam tão pequenas a ponto de serem carregadas pelo fluxo de vapor até a região de acúmulo de água pura e, portanto, contaminem a água destilada com a água

salina. MUTHUNAYAGAN; RAMAMURTHI e PADEN (2005) estimaram a velocidade vertical máxima do fluxo de vapor em um dessalinizador com características semelhantes aquele aqui proposto em 6,8 m/s e o coeficiente de arrasto de uma gota em 0,5 (sendo o número de Reynolds considerado para a gota 17 e o fluxo laminar).

Sendo a força de arrasto vertical sobre uma gota  $F = \frac{\rho V^2}{2} C_D 4 \pi r^2$ , obtém-se que para uma gota de 1 mm de diâmetro e utilizando os dados acima indicados, a força de arrasto vertical é de cerca de  $0.63 \times 10^{-6} \text{ N}$ . Já o peso de uma gota de 1 mm pode ser estimado em aproximadamente  $5 \times 10^{-6} \text{ N}$ . Assim, conclui-se que não é possível que uma gota deste tamanho possa ser arrastada pelo fluxo de vapor no evaporador. Contudo, considerando uma gotícula de 0.1 mm de diâmetro, ela estaria sujeita a uma força de arrasto vertical de  $0.63 \times 10^{-8} \text{ N}$ , sendo seu peso de  $0.5 \times 10^{-8} \text{ N}$ , estaria, portanto, sujeita ao arrasto. Desta forma, nota-se a importância em se realizar um estudo sobre o tamanho da gotícula produzida, para que a melhoria não acabe influenciando negativamente o processo por meio de contaminação da água destilada produzida.

### 3.5.2.2 Influência da Temperatura

Não apenas o diâmetro, mas também a temperatura da água salina em forma de gotículas, são características importantes para o rendimento da evaporação. KALOGIROU (2001), em seu estudo, considera apenas a influência da temperatura na saída do evaporador. A partir de equacionamento teórico e de simulação computacional, o autor constrói um gráfico mostrando a influência da temperatura das gotas, do seu diâmetro e de sua área específica na eficiência do processo. Salienta-se que no dessalinizador considerado pelo autor não é utilizado qualquer artifício para a alteração da pressão na câmara de evaporação. Nesse método, apenas o aumento da temperatura das gotas eleva a quantidade de água evaporada.

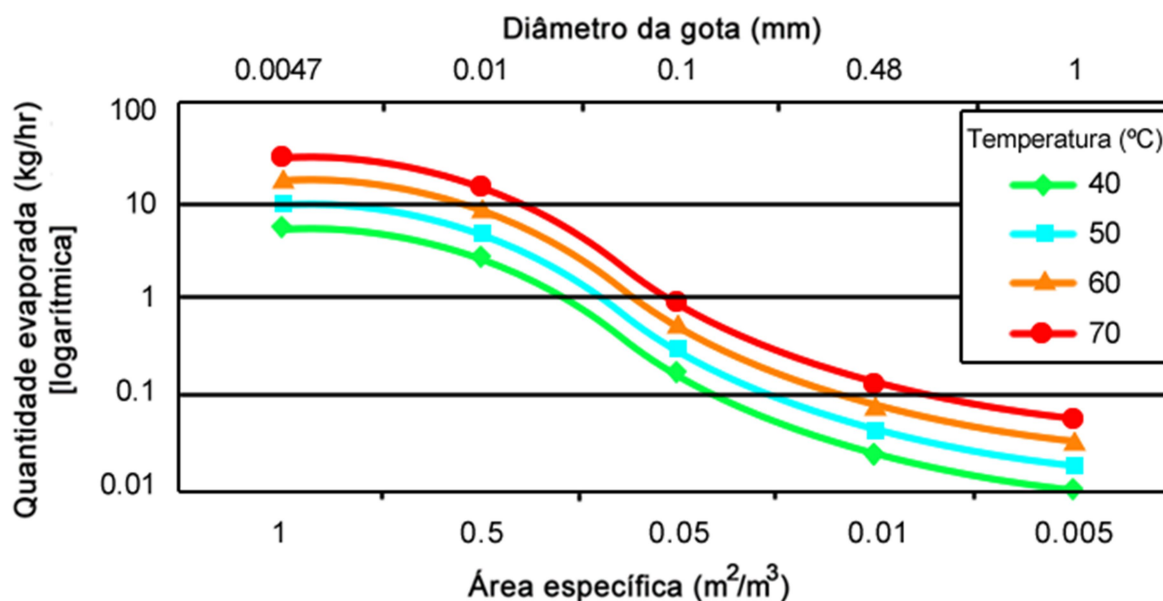


Figura 16: Gráfico da influência da temperatura de entrada (Adaptada de KALOGIROU, 2001)

Já JOYCE et al (1994) levam em consideração a diferença entre a temperatura na saída do pulverizador, que representa a fonte quente, e entrada do condensado, a fonte fria. A taxa de conversão é definida como a relação entre a vazão em massa da água destilada resultante e a vazão em massa da água salina de entrada. Nas figuras a seguir são apresentados os resultados experimentais conduzidos neste artigo. Conclui-se que a taxa de conversão aumenta em função da diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria.

É importante observar que os autores utilizaram vazões de água salinas de diferentes concentrações e pulverizadores diversos, embora isto não tenha sido discriminado nos gráficos apresentados no artigo.

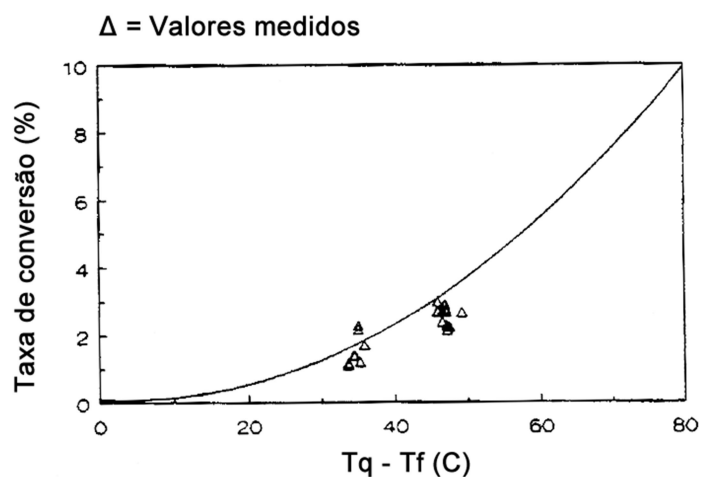


Figura 17: Gráfico da influência da diferença de temperatura entre a fonte quente e fria  
(Adaptada de JOYCE et al, 1994)

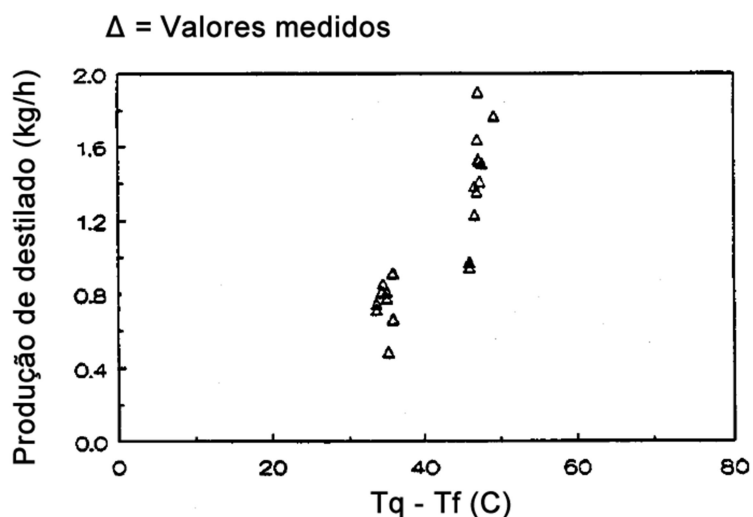


Figura 18: Gráfico da influência da temperatura entre a fonte quente e a fria  
(Adaptada de JOYCE et al, 1994)

### 3.5.2.3 Outras características

Nos resultados experimentais do trabalho conduzido por MUTHUNAYAGAM; RAMAMURTHI; PADEN (2005), não houve indicação de que a taxa de condensação de água pura seja significativamente dependente da concentração de sal na água salina que alimenta o sistema de dessalinização.

Entretanto, um dos fatores que pode influenciar no rendimento do sistema é o posicionamento do pulverizador. IKEGAMI et al (2006) demonstraram experimentalmente a influência da direção do spray no caso de um sistema do tipo *spray flash desalination*. O estudo compara a eficiência da utilização de um spray com jato apontando para cima (Figura 19a) e outro apontando para baixo (Figura 19b). O spray com jato para cima possibilita tornar a câmara do evaporador mais compacta e aumentar o tempo de residência da água salina em forma de gotas, tornando portanto o sistema mais eficiente.

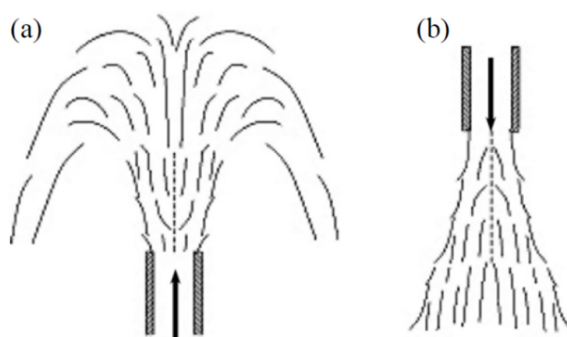


Figura 19: (a) Jato para cima. (b) Jato para baixo (IKEGAMI et al, 2006)

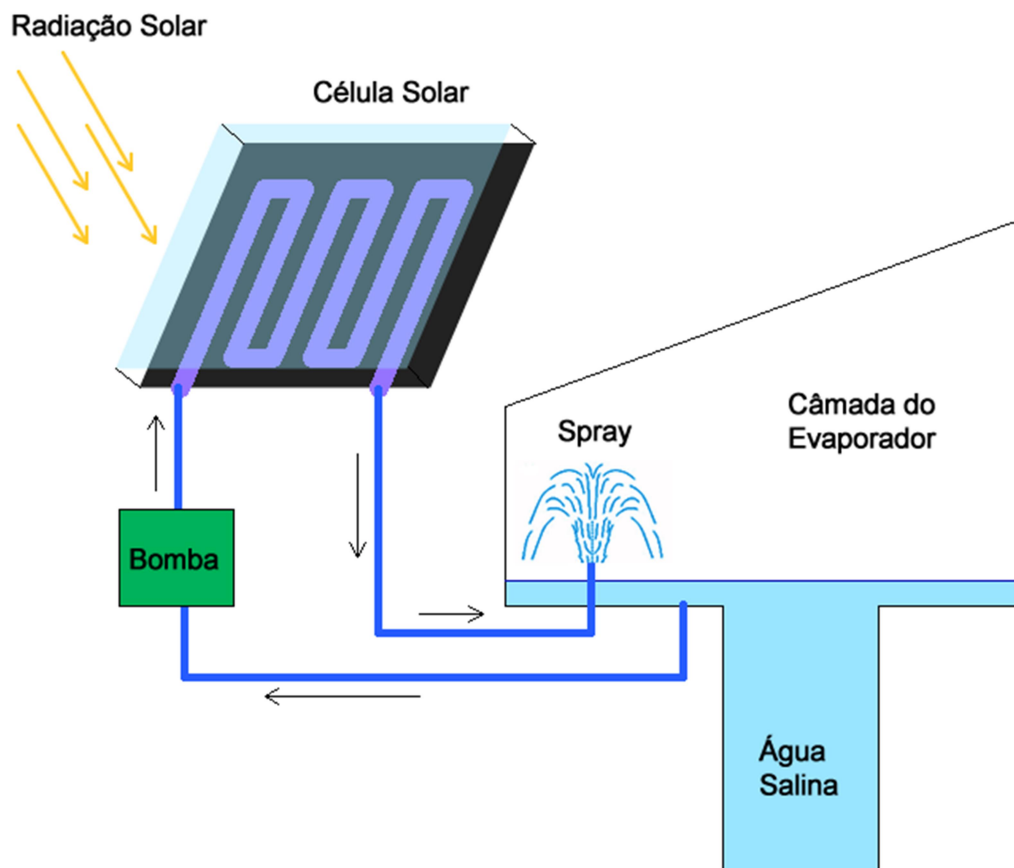
### 3.5.3 Aquecimento solar

Outra proposta de melhoria ao sistema é a intensificação na utilização de energia solar para o aquecimento da água no topo da torre barométrica de água salina. O subsistema proposto (Figura 20) consiste de uma bomba que coleta água salina já no topo da respectiva torre, bombeia-a para a célula de aquecimento solar e, por fim, pulveriza-a na câmara de evaporação com a utilização do spray. As gotículas de água salina aquecida pulverizadas aumentam a capacidade de evaporação do dessalinizador uma vez que há o aumento da superfície de contato no sistema.

A célula solar (Figura 21) é composta de uma placa de cor escura com a finalidade de absorver a maior quantidade possível de calor da radiação solar. O vidro de cobertura da célula atua na criação de um ambiente similar a uma estufa: o calor entra com facilidade e fica retido no seu interior. Dentro da célula solar existe um intrincado sistema de tubos feitos de material com alta condutibilidade



térmica nos quais transita a água salina a ser aquecida. O sistema funciona em ciclo semifechado, isto é, parte da água pulverizada pelo spray evapora, enquanto a outra volta ao topo da torre barométrica de água salina e é novamente encaminhada para a célula solar.



**Figura 20: Subsistema de aquecimento solar (Elaborada pelo autor)**

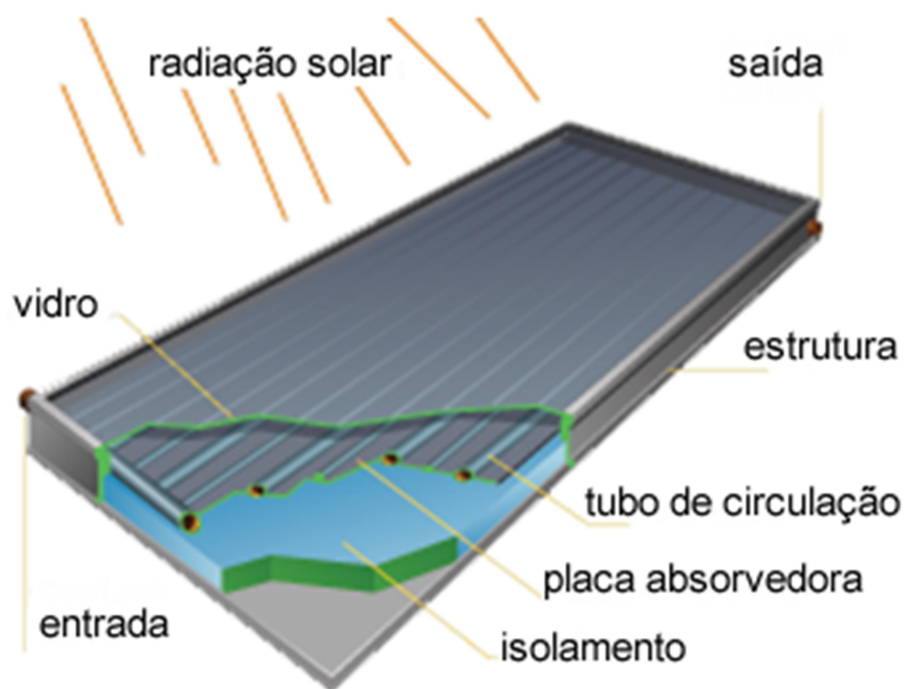


Figura 21: Célula Solar (Adaptada de ECO<sup>6</sup>)

#### 4 PROTÓTIPO

O objetivo do presente trabalho é a análise de viabilidade de um método de dessalinização a baixas temperaturas para utilização em grande escala. No trabalho de formatura I, conduziu-se uma análise teórica do princípio. Já no trabalho de formatura II, era de desejo do grupo e seu orientador a elaboração de um protótipo para comprovar o funcionamento do método e analisar as melhorias propostas. Entretanto, a construção desse modelo não se mostrou viável sem auxílio financeiro externo, o que acabou por inviabilizar a análise prática do princípio e nos fazer voltar ao aprofundamento teórico da tese através de um estudo de caso.

Durante o semestre, acreditou-se na possibilidade de estabelecimento de parceria com entidades interessadas pelo princípio de dessalinização proposto para garantir a viabilidade financeira do desenvolvimento do protótipo. Entretanto, não se obteve sucesso nesta busca e, assim, seu desenvolvimento acabou

---

<sup>6</sup> Disponível em <<http://www.eco7.co.uk/Solar-Thermal-Systems.html>>. Acesso em 28 de junho de 2015.

comprometido. O grupo já havia iniciado os trabalhos de concepção do projeto de construção do modelo, escolha do local de instalação, dos materiais a serem utilizados e da forma de análise dos dados coletados, assim, mesmo com a decisão de não prosseguir com a construção do modelo, abaixo serão resumidos os esforços feitos durante o semestre para sua elaboração.

#### 4.1 LOCAL DE INSTALAÇÃO

Para o local de instalação propôs-se o CTH (Centro Tecnológico de Hidráulica) no campus Butantã da Universidade de São Paulo, devido à disponibilidade de espaço, materiais básicos e pessoas que poderiam auxiliar na execução e análise dos dados coletados. O local da instalação seria no prédio principal, onde parte da instalação estaria fora do prédio e parte dentro. As fotos abaixo mostram o local selecionado.



**Figura 22: Vista externa do local selecionado (Elaborado pelo autor)**



**Figura 23: Vista interna do local selecionado (Elaborado pelo autor)**

## 4.2 IMPLANTAÇÃO

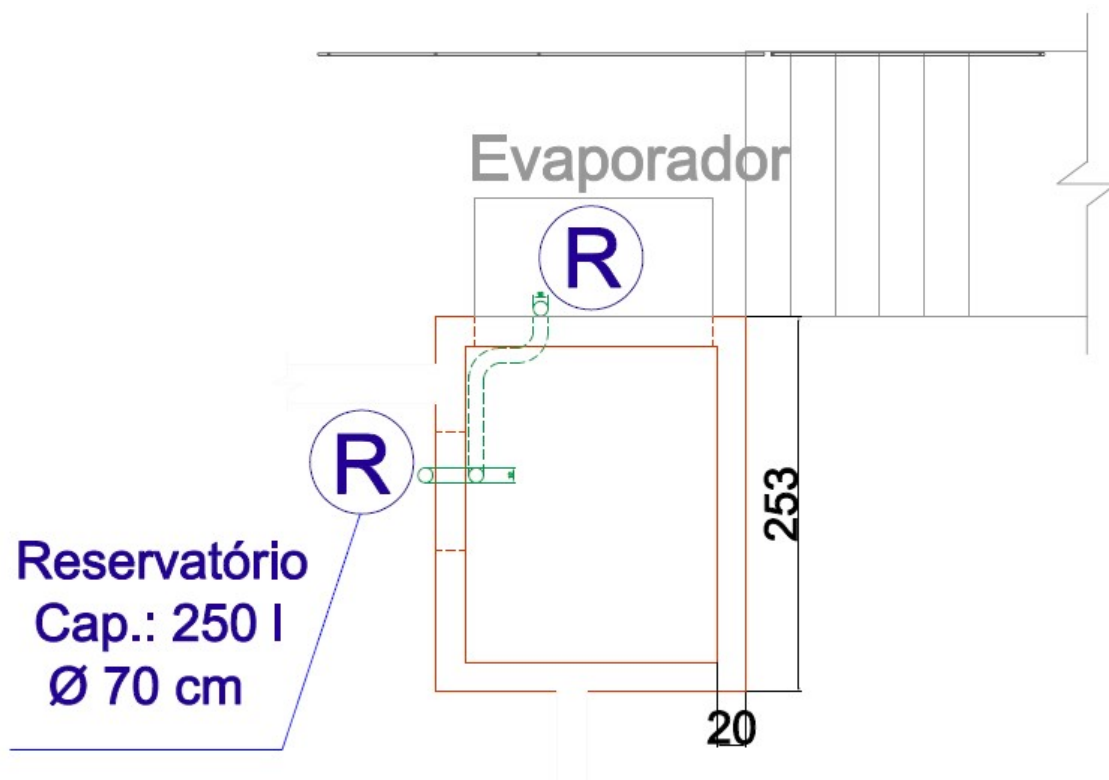
O protótipo seria constituído basicamente pelos seguintes elementos:

- Tanque de água salina
- Tubulação de água salina
- Evaporador
- Condensador
- Tubulação de água destilada
- Reservatório de água destilada

É desejável que os elementos que reservam a água salina estejam em temperatura acima dos de água doce, sendo assim, eles seriam instalados na parte externa do prédio, de modo a aproveitar a insolação disponível. O evaporador, sendo dependente da energia solar para aquecimento da água salina, seria instalado na parte externa em altura de aproximadamente 13 metros, para obter maior insolação possível e atingir pressão próxima do vácuo. O condensador e os elementos de água doce seriam instalados na parte interna do prédio. Desse modo

seria possível obter a diferença de temperatura desejada para a dessalinização a baixas temperaturas e permitir fácil acesso na coleta de dados para posterior análise.

A instalação projetada está representada nas imagens abaixo.



**Figura 24: Planta do projeto da instalação - tamanhos em centímetros – fora de escala**  
(Elaborada pelo autor)

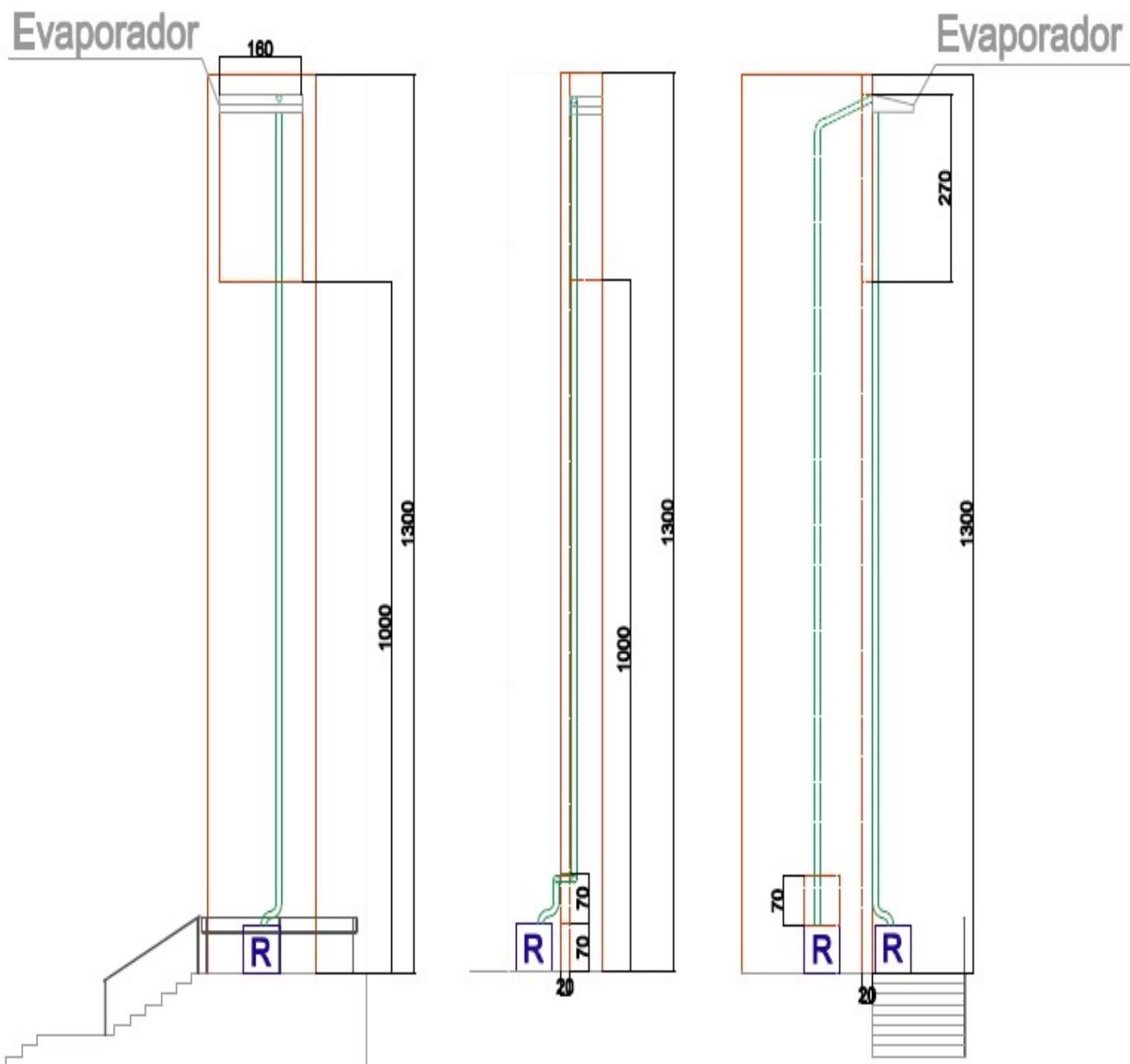


Figura 25: Projeto da instalação do protótipo, da esquerda para a direita: parte externa, parte interna e vista lateral - tamanhos em centímetros – fora de escala (Elaborada pelo autor)



# Evaporador

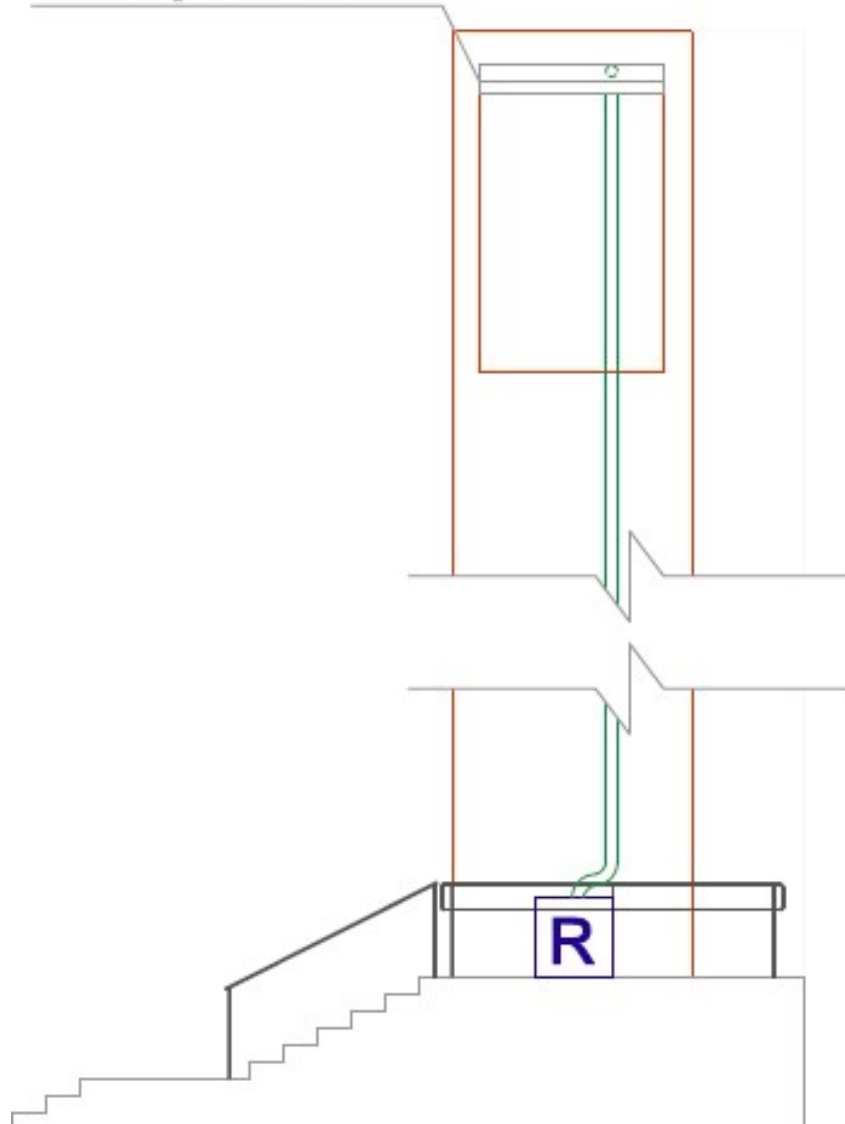
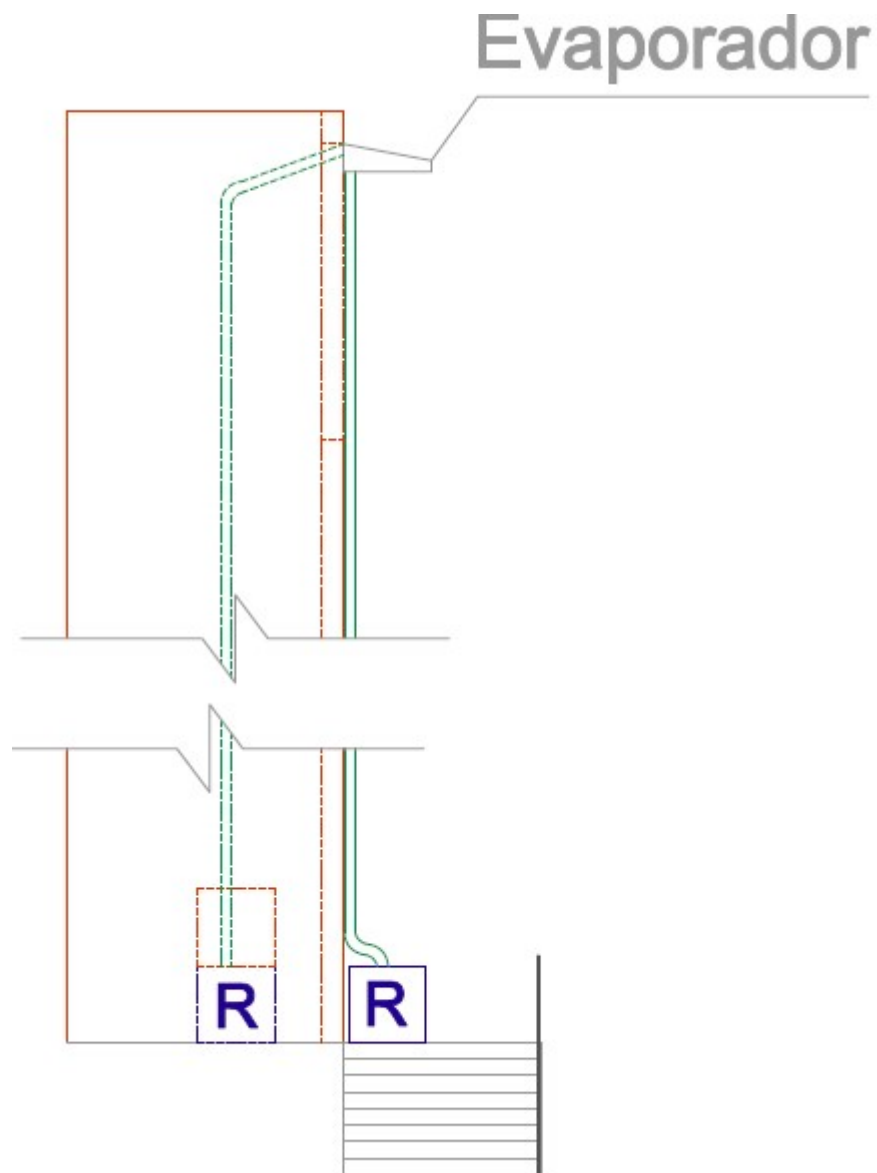


Figura 26: Detalhe da vista externa (Elaborado pelo autor)



**Figura 27: Detalhe da vista lateral (Elaborado pelo autor)**

Como a única fonte de calor da instalação projetada é o sol, o funcionamento do protótipo só seria possível em dias ensolarados e durante algumas horas por dia.



## 4.3 MATERIAIS

### 4.3.1 Reservatórios

Seriam utilizados reservatórios de água comuns (“caixas d’água”) de 250 litros cada, uma como tanque de água salina e outra como tanque de água destilada. As dimensões do reservatório são: diâmetro da base de 0,74 m, diâmetro do topo com tampa de 1,0 m e altura com tampa de 0,68 m.



Figura 28: Caixa d’água de 250 litros (Fortlev<sup>7</sup>)

### 4.3.2 Tubulação

Seriam utilizados materiais de PVC para toda a instalação hidráulica do modelo, isto é, tubos, conexões, válvulas e demais elementos utilizados. As tubulações em geral seriam compostas por tubos com diâmetro de 100 mm, sendo apenas a deposição de salmoura realizada através de uma mangueira, devido ao baixo volume de deposição projetado.

---

<sup>7</sup> Fonte: <http://www.fortlev.com.br/produto/caixa-dagua-de-poli-etileno-2>. Acessado em 29 de novembro de 2015

### 4.3.3 Evaporador

O evaporador seria construído com chapas de acrílico e teria sua face superior pintada de preto para maior absorção do calor do sol. Quanto maior a quantidade de calor absorvido, melhor o desempenho do elemento.

A face superior do evaporador seria inclinada para direcionar melhor o vapor para o condensador e aumentar a superfície de incidência solar. A face inferior também deveria ser inclinada, para permitir a retirada de salmoura mais concentrada, uma vez que a concentração de sais seria maior na parte mais baixa do evaporador.

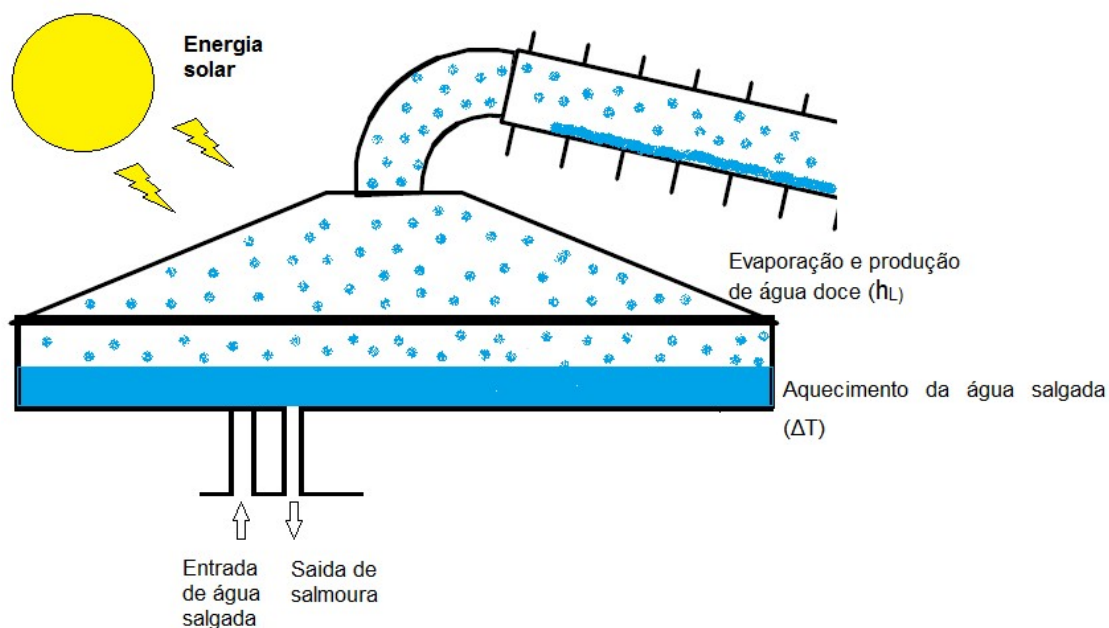
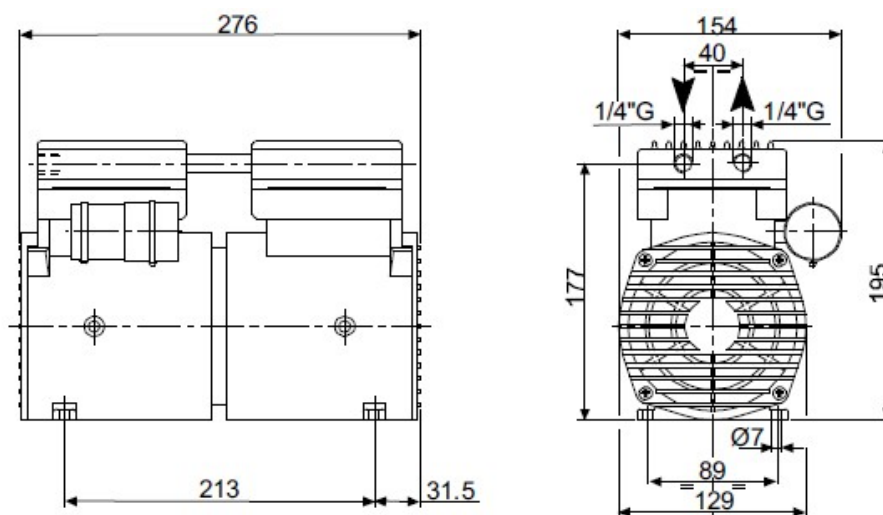


Figura 29: Ilustração esquemática do evaporador (Elaborado pelo autor)

### 4.3.4 Bomba de vácuo

Para o funcionamento do protótipo seria necessária uma bomba de vácuo para o estabelecimento inicial de pressão de vácuo dentro do evaporador, que representa o aspecto mais importante no funcionamento do princípio de dessalinização apresentado. Para tal, uma bomba da D.V.P. Brasil Bombas de Vácuo, a ZA 100P foi cotada. Essa bomba seria instalada na parte interna do

prédio de forma a ficar abrigada e seria conectada com o evaporador através de uma mangueira de resistência adequada.



**ZA.100P**

**Figura 30: Dimensões da bomba (Catálogo do fabricante)**

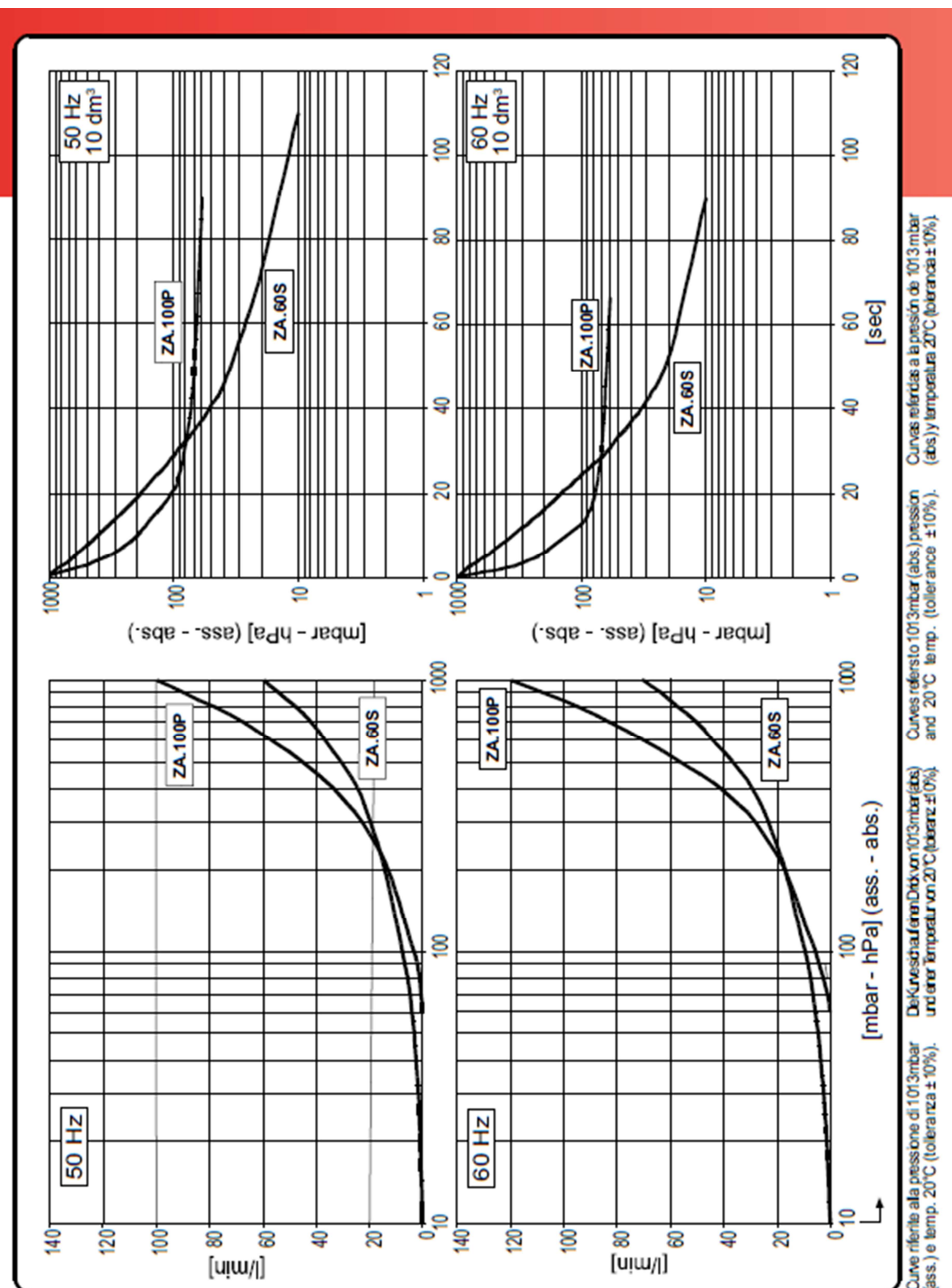


Figura 31: Informações técnicas da bomba (Catálogo do fabricante)

Modello (I)	Model (GB)	ZA.60S		ZA.100P					
Modell (D)	Modelo (E)	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz				
Codice catalogo	Catalog code	9210006		9210007					
Atikelnummer	Código catálogo								
Portata nominale	Nominal flow rate	60	70	100	120				
Nennsaugvermögen	Caudal nominal								
Pressione finale (ass.)	Final pressure (abs.)	10		60					
Enddruck (abs.)	Presión final (abs.)								
Potenza motore	Motor power	0,27							
Motorleistung	Potencia motor								
Numero di giri nominale	R.P.M	1400	1700	1400	1700				
U/min	Número de revoluciones								
Rumorosità (UNI EN ISO 2151)	Noise level (UNI EN ISO 2151)	52	54	55	57				
Schalldruckpegel (UNI EN ISO 2151)	Nivel sonoro (UNI EN ISO 2151)								
Temperatura di funzionamento(*)	Operating temperature (*)	40 ÷ 45		45 ÷ 50					
Betriebstemperatur (*)	Temperatura de funcionamiento (*)								
Peso	Weight	8,7 [85,3]		8,9 [87,3]					
Gewicht	Peso								
Tipo di servizio	Duty type	S1							
Betriebsart	Tipo de servicio								

(\*) Temperatura ambiente 20°C

(\*) Umgebungstemperatur 20°C

(\*) Ambient Temperature 20°C

(\*) Temperatura ambiente 20°C

**Figura 32: Informações técnicas da bomba (Catálogo do fabricante)**

#### 4.3.5 Coleta de dados

Para o estudo de viabilidade da dessalinização a baixas temperaturas, a observação mais importante seria à taxa de produção de água fresca no modelo, de modo a permitir uma extrapolação dos resultados para uma planta de grande escala. Neste âmbito, seria necessário controlar as quantidades de entrada e saída de água nos tanques de água salina e de água destilada, além da retirada de salmoura do sistema. Seria necessário também observar as temperaturas no evaporador e no tanque de água destilada. A diferença de temperatura entre eles, em conjunto com a pressão de vapor no evaporador, é o que garante o bom funcionamento do sistema.

A instalação foi projetada para funcionamento apenas durante algumas horas do dia, enquanto a incidência solar fosse suficiente para aumentar a temperatura no evaporador. Ela também foi projetada para uma coleta de dados manual, que seria realizada com periodicidade pré-determinada (a cada hora ou meia hora, por exemplo) durante sua operação. Assim, os dados obtidos seriam discretos e parte da análise dos dados coletados seria dada a sua extrapolação, visando obter resultados contínuos.

O tanque de água destilada precisaria apresentar um escape, como um “ladrão”, que seria direcionado a um reservatório graduado, sendo assim possível

medir a quantidade de água produzida e manter o nível constante no reservatório de água destilada. A retirada de salmoura seria realizada através de uma mangueira de saída controlada, também sendo direcionada a um reservatório graduado, que permita a medição da quantidade de salmoura retirada do sistema. A realimentação do sistema seria realizada com a solução produzida a partir da mistura dessas duas quantidades, que seria introduzida ao tanque de água salina. Desse modo seria possível garantir a manutenção do equilíbrio do sistema.

Não seria realizada a medição de gasto energético do sistema, pois a bomba de vácuo seria utilizada apenas para fornecer as condições necessárias para o início do funcionamento do sistema, não sendo necessária para o funcionamento contínuo dele. Além disso, a fonte de calor considerada para o evaporador seria apenas o calor solar, não sendo necessária nenhuma introdução adicional de energia no sistema.

Como o sistema baseia-se em evaporação e condensação não seriam necessários testes para análise da qualidade da água produzida. Como em uma destilação nenhuma partícula sólida é evaporada, a água produzida não apresentaria sais nem poluentes.

## **5 ESTUDO DE CASO**

A impossibilidade de construção do protótipo levou-nos a trilhar outro caminho dentro do âmbito do projeto. Optou-se por abordar um estudo de caso que visa determinar as dimensões necessárias a um sistema de dessalinização para que, utilizando-se dos princípios de dessalinização a baixas pressão temperatura, possa-se desenvolver um sistema que seja capaz de produzir água fresca suficiente ao abastecimento de uma comunidade ribeirinha de pequeno porte. Essa mudança de enfoque tornou possível dar continuidade ao trabalho de formatura, construindo um produto final claro e objetivo e sem a dependência de agentes externos para seu efetivo desenvolvimento.

O estudo de caso será conduzido em três etapas: inicialmente, escolher-se-á a comunidade a ser tratada no projeto, levando em consideração a atual situação hídrica da região, a facilidade de captação de água salgada e o nível de insolação solar, dado que, a princípio, visa-se conduzir o processo exclusivamente por meio

de aquecimento solar. Em seguida, será analisada a demanda representada pela comunidade escolhida e, por fim, serão definidas as dimensões e características da planta de dessalinização adequada a ela.

## 5.1 ESTUDO DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DOCE

Analisando-se as transformações ocorridas no sistema proposto de dessalinização a baixa pressão e baixa temperatura, pode-se inferir relações que regem o processo de produção de água doce. O balanço de massas é a relação mais óbvia, pois toda massa que entra no sistema deve sair em mesma quantidade. Outra relação importante diz respeito ao balanço energético na câmara de evaporação, dado que o calor inserido é responsável por conduzir três processos termodinâmicos diferentes: o aquecimento da água salina, sua evaporação e a compensação da perda de calor ocorrida no sistema, seja por reflexão da radiação incidente, absorção pelo material da cobertura, radiação da cobertura para o céu, convecção do material para o ambiente ou outras perdas menores devido a vazamentos de calor.

A energia inserida no evaporador é fruto da troca de calor entre o ambiente externo, com alta temperatura durante o período de insolação, e o ambiente interno da câmara, onde se encontra a água salina a temperatura ambiente. Tal mecanismo é denominado condução de calor e pode ser representado pela equação de Fourier<sup>8</sup>, que estabelece uma relação entre a taxa de transferência de calor e o gradiente de temperatura entre os dois sistemas.

Segundo uma análise matemática das transformações exploradas acima é possível estabelecer uma relação entre a área da câmara de evaporação e o volume de água fresca produzida.

### a. Balanço de massa

---

$$^8 Q = -\lambda * A * \frac{dT}{dx}$$

$$m_s = m_f + m_b \quad (\text{Eq. 3})$$

b. Balanço energético no evaporador

$$Q_i = m_s * c * (T_{EC} - T) + m_f * h_L + Q_l \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\lambda * A * (T_{EC} - T) / e = m_s * c * (T_{EC} - T) + m_f * h_f + Q_l$$

$$A = \frac{m_s * c * (T_{EC} - T) + m_f * h_f + Q_l}{\lambda * (T_{EC} - T) / e} \quad (\text{Eq. 5})$$

## 5.2 ESCOLHA DA CIDADE

Historicamente, as usinas de dessalinização têm sido implantadas em regiões de clima árido, com baixa pluviosidade, pouca ou nenhuma fonte de água potável e fácil acesso ao mar. No Brasil, tais características são facilmente encontradas em diversas cidades da região nordeste do país, onde, além da escassez hídrica e da adversidade das condições climáticas, a população ainda sofre com sérios problemas nos sistemas de abastecimento e tratamento de água pela falta de planejamento público e de maiores investimentos no setor.

A Agência Nacional de Águas (ANA) publicou em 2010 um conjunto de estudos hidrológicos (Atlas do Brasil, 2010) no qual desenvolve uma análise da oferta de água disponível à população urbana brasileira e propõe alternativas técnicas para garantir o abastecimento de todos os municípios do país. Em tal documento, foram encontrados mapas que mostram o panorama da disponibilidade hídrica ao longo do território brasileiro (Figura 33 e Figura 34), assim como uma análise da relação oferta/demanda (Figura 35) que ajuda na identificação das regiões mais carentes de recursos hídricos naturais e que demandarão novas fontes de abastecimento nos próximos anos.



DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL

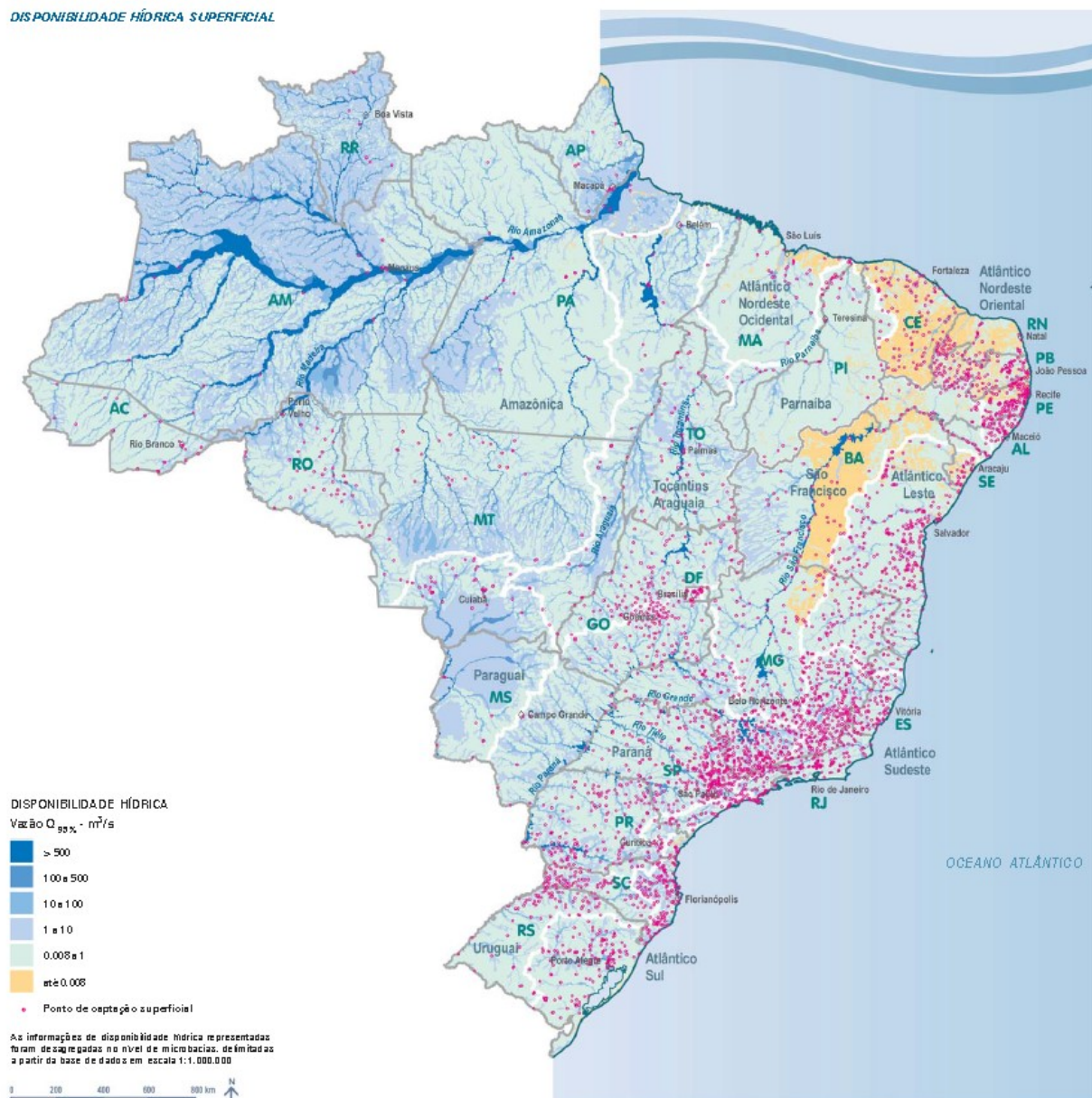


Figura 33: Disponibilidade hídrica superficial ao longo do território brasileiro (Atlas do Brasil, 2010)

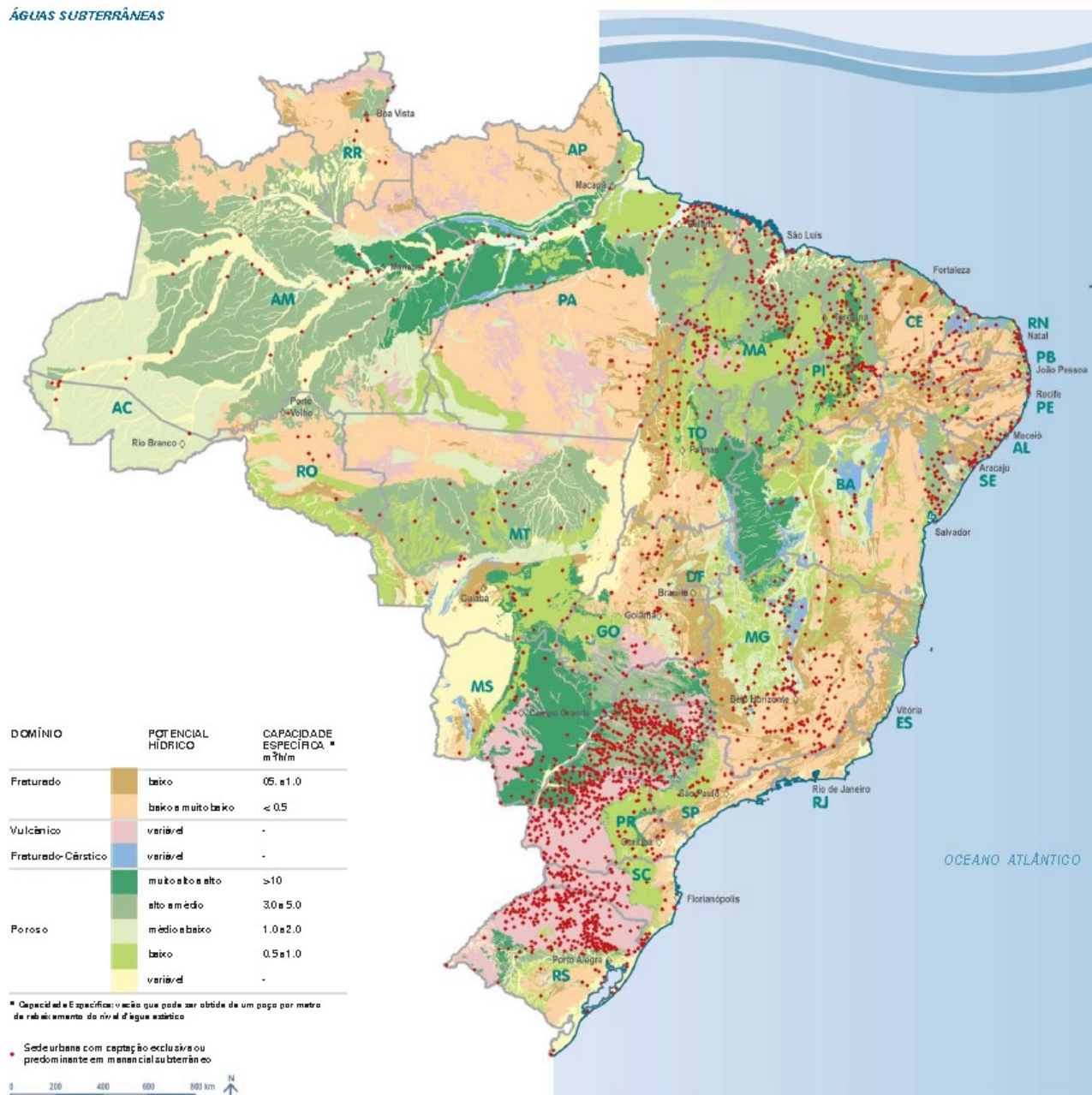
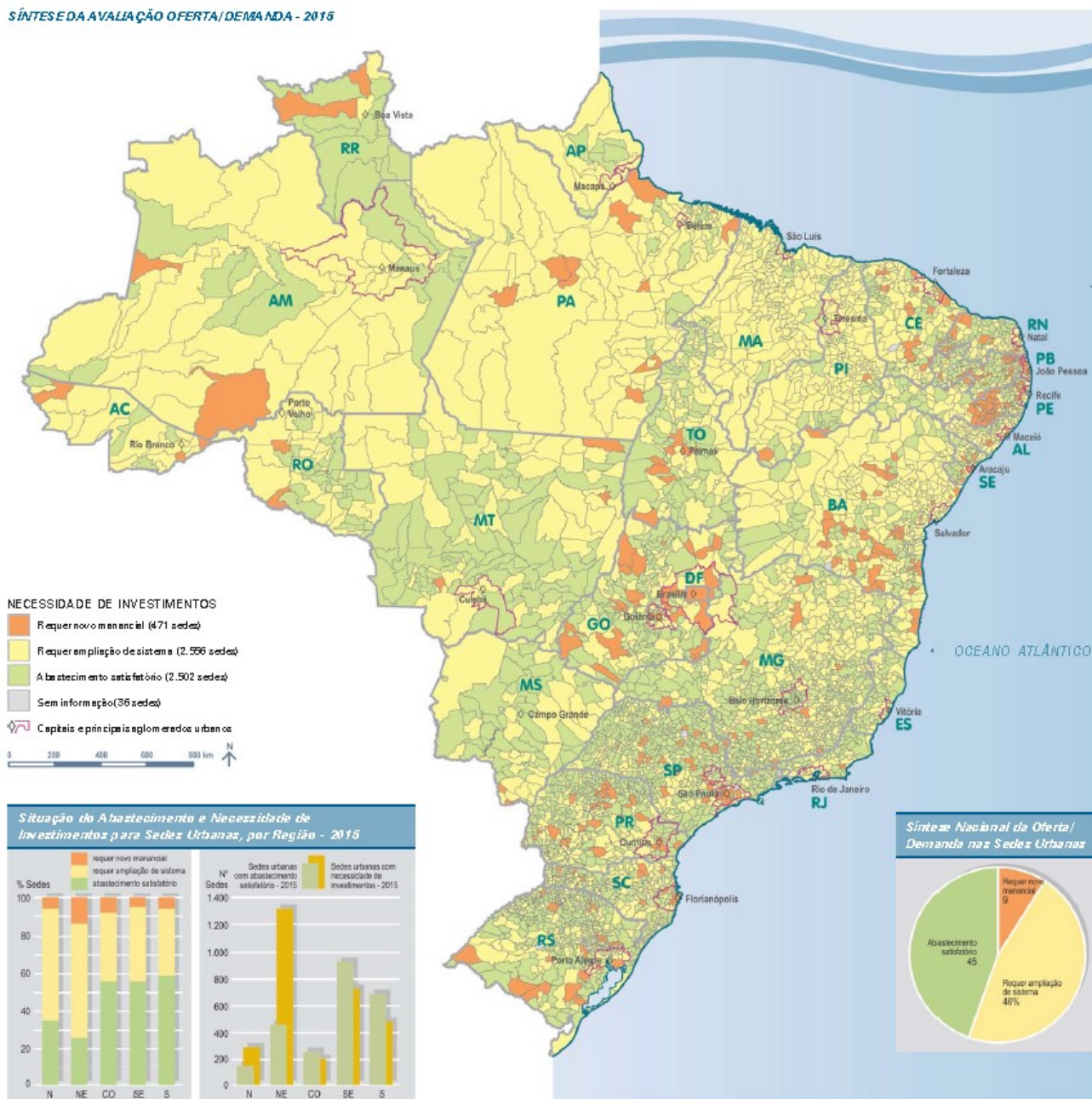


Figura 34: Disponibilidade hídrica subterrânea ao longo do território brasileiro (Atlas do Brasil, 2010)





**Figura 35: Síntese da de avaliação oferta/demanda (Atlas do Brasil, 2010)**

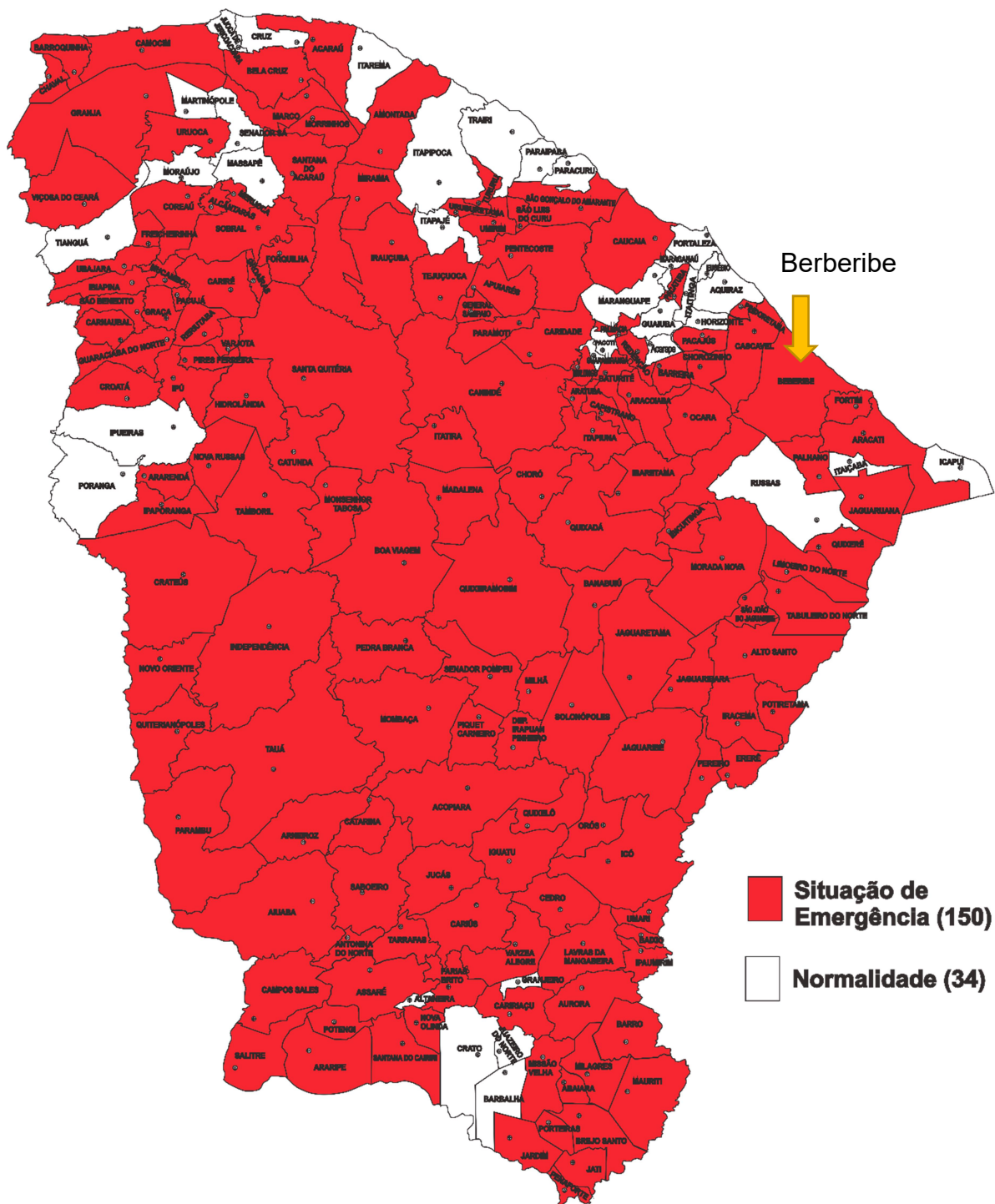
Os dois primeiros mapas indicam uma posição bastante desfavorável quanto à disponibilidade hídrica para os estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, uma vez que possuem oferta reduzida tanto de fontes superficiais quanto subterrâneas, já o terceiro ratifica a posição de dificuldade da região Nordeste, apontando-a como a mais necessitada em termos de investimento no sistema de abastecimento existente e da necessidade de novas fontes de água própria ao consumo. Este cenário nos levou a escolher o estado do Ceará como

sede para o estudo de caso, visto que, segundo os dados apresentados, diversas regiões em dificuldades estão localizadas no litoral do estado - ou muito próximas a ele -, o que indica condições atrativas para o sistema de dessalinização proposto.

O Ceará concentra mais de 50% de toda a caatinga brasileira e é o único estado do Nordeste que está totalmente inserido na sub-região do sertão, tendo aproximadamente 93% de todo o seu território dentro do Polígono das Secas<sup>9</sup>. Após quatro duros anos de estiagem e com perspectivas ruins para 2016, o Governo do Estado reconheceu recentemente situação bastante crítica em seus municípios e decretou estado de emergência em quase todo o território (Figura 36). Hoje, somados, todos os reservatórios cearenses estão funcionando com apenas 15,4% da capacidade (GOVERNO, 2015). O Programa Água Doce, do Governo Federal, já iniciou seus trabalhos na região e entregou cerca de 15 estações de dessalinização no final de agosto, mas ainda há muito trabalho a fazer (Portal Brasil, 2015).

---

<sup>9</sup> Região sujeita à repetidas crises de estiagens e que são objeto de políticas especiais do setor público.



**Figura 36: Mapa do Ceará com indicação dos municípios em situação de emergência (Secretaria da Defesa Pública e Defesa Social, 2015)**

Observando o mapa divulgado pela Defesa Civil cearense, assim como a avaliação oferta/demanda apresentada pela Agência Nacional de Águas, escolheu-se o município de Berberibe como sede para o estudo de caso.

Berberibe é uma cidade do litoral leste do estado do Ceará, localizado a 79 km da capital Fortaleza e com uma população estimada de 50.000 habitantes (GOVERNO DO CEARÁ). O município tem clima tropical quente semiárido, com pluviometria concentrada nos quatro primeiros meses do ano. Possui um IDH médio de 0,638, segundo PNDU/2010<sup>10</sup>, e um PIB per capita de aproximadamente R\$ 5.000, segundo o IBGE/2010. É um município com grande extensão de costa, aproximadamente 54 km, e que recebe muitos turistas por conta das belas praias, intensificando assim sua necessidade por um abastecimento de qualidade.

### 5.3 TOMADA D'ÁGUA

Para a captação da água salgada usar-se-á o benefício da proximidade com o mar para conduzir uma captação direta, isto é, imaginou-se a concepção de um reservatório enterrado, com as mesmas dimensões do evaporador, que, estando conectado com o mar por meio de uma tubulação e controlado por um sistema de boia de nível, é capaz de conduzir a alimentação contínua do evaporador sem a preocupação com o reabastecimento do reservatório de água salgada. As colunas de abastecimento serão instaladas no interior dos pilares de sustentação da estrutura de evaporação do sistema.

### 5.4 PRÉ-TRATAMENTO

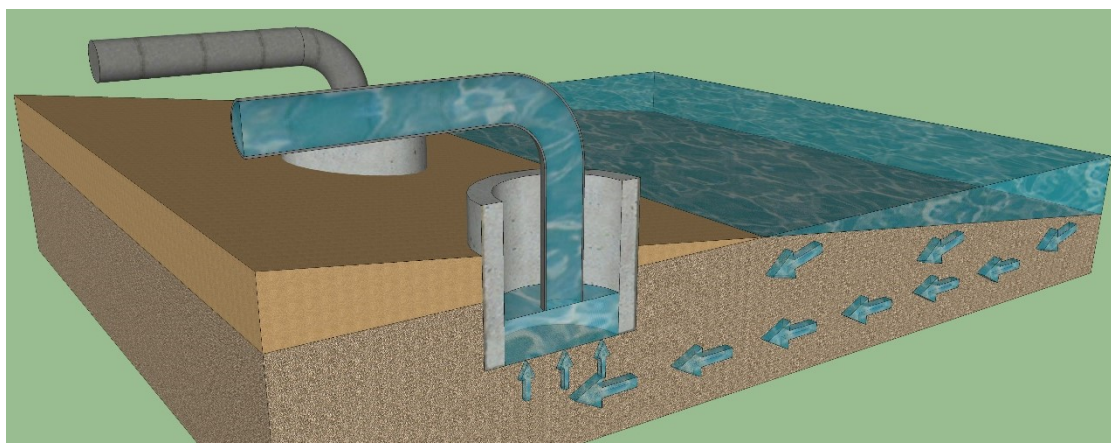
Antes que a água do mar chegue à unidade de dessalinização da usina, esta deve passar por uma etapa de pré-tratamento para que o sistema opere em sua máxima eficiência, aumente o seu tempo de vida e diminua seus custos de operação. O pré-tratamento consiste em uma etapa física e duas etapas químicas, quais sejam:

---

<sup>10</sup> Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

1. Gradeamento
2. Tratamento anti-incrustação orgânica
3. Tratamento anti-deposição de sais

O gradeamento visa a retirada de materiais grosseiros com tamanho da ordem de 6 a 10 mm da água afluyente. A retirada desses materiais é necessária para que se evite danificação dos equipamentos utilizados. Outras formas de tratamento físico, tais como filtros ou tanques de decantação, podem ser utilizadas para separar materiais mais finos, como a areia. Uma alternativa com relação ao gradeamento é o uso de poços na própria areia da praia que, garantindo o abastecimento do reservatório por infiltração da água, ainda garante uma filtração natural dela.



**Figura 37: Alternativa ao gradeamento (Rebrn<sup>11</sup>)**

A incrustação orgânica e a deposição de sais são problemas relacionados ao funcionamento da unidade de dessalinização propriamente dita. Os materiais orgânicos e inorgânicos tendem a aderir à superfície dos componentes de troca de calor do sistema formando camadas com baixa condutibilidade térmica que diminuem a eficiência do sistema, aumentam o gasto de energia e dificultam a manutenção das câmaras de evaporação.

---

<sup>11</sup> Disponível em <<http://rebrn.com/re/mit-team-invents-efficient-shockwave-based-process-for-desalination-1495141/>>. Acesso em 20 de novembro de 2015.



O material orgânico presente na água do mar é composto por microrganismos, algas, bactérias, protozoários, esporos, entre outros. De forma a prevenir a entrada desses organismos no sistema, um biocida deve ser adicionado à água. Alguns exemplos de biocidas são: ozônio, radiação ultra-violeta, formaldeídos, hipoclorito de sódio (NaOCl), gás cloro (Cl<sub>2</sub>), entre outros, sendo os dois últimos os mais amplamente utilizados. Estes biocidas podem ser adicionados de forma constante na linha de entrada da água ou em grandes dosagens ocasionais.

Já o tratamento anti-deposição de sais tem o objetivo de evitar que íons dissolvidos na água do mar precipitem dentro do dessalinizador. A deposição de sais é o principal problema a ser combatido pela etapa de pré-tratamento. Conforme a água evapora na câmara do evaporador, maior fica a concentração de sais dissolvidos nessa região até que seja atingido o limite de solubilidade de alguns sais presentes na água do mar e, então, estes comecem a precipitar. Carbonato de Cálcio, Sulfato de Cálcio, Complexos de Sílica, Sulfato de Bário e Fluoreto de Cálcio são os principais sais presentes na água do mar que ocasionam esse problema. O tratamento anti-deposição pode ser feito com adição de ácido sulfúrico ou agentes inibidores de precipitação (por exemplo, polifosfatos e ácido fosfônico). Pequenas doses da ordem de 1 a 2 mg/L de inibidores de precipitação já são suficientes para prevenir este fenômeno. A adição de ácido sulfúrico é amplamente utilizada, devido a seu baixo custo, na redução do pH da água e precipitação do carbonato de cálcio.

## 5.5 UNIDADE DE EVAPORAÇÃO

A unidade de evaporação é o item que mais influencia a produção de água destilada no sistema de dessalinização, visto que é o elemento responsável pela captação de energia e determina a extensão da superfície de contato para evaporação. A determinação de suas dimensões, como visto anteriormente, pode ser feita através da relação estabelecida entre diversos parâmetros relativos ao ambiente no qual a unidade está inserida e aos fluxos de entrada e saída de água.

Na condução deste estudo será considerada uma produção de 70.000 l/dia de água doce, isto é, a vazão necessária para o abastecimento de uma



comunidade de aproximadamente 1.000 pessoas segundo as indicações de consumo mínimo diário de água da OMS (Organização Mundial da Saúde).



**Figura 38: Hierarquia das necessidades de água (Adaptado de WORLD HEALTH ORGANIZATION)**

Considerando-se uma unidade de evaporação construída com cobertura acrílica ( $\lambda_{acrílico} = 1,9 \text{ W/mK}$ ) de 1,5 cm de espessura em um sistema com 80% de rendimento e 10% de perdas na captação de energia solar, funcionando 7 horas por dia, com temperatura de evaporação igual a  $50^\circ\text{C}$  e temperatura ambiente igual a  $25^\circ\text{C}$ , determina-se que são necessários aproximadamente  $2.000 \text{ m}^2$  de superfície de evaporação para que a demanda seja atendida.

a. Determinação da demanda de água doce

$$m_f = 1.000 \cdot 70 / (7 \cdot 60 \cdot 60)$$

$$\boxed{m_f = 2,7 \text{ kg/s}}$$

b. Área do evaporador

$$Q_i = \frac{m_f}{80\%} \cdot c \cdot (T_{EC} - T) + m_f \cdot h_L + 0,1 \cdot Q_i$$

$$A = \frac{\frac{m_f}{80\%} * c * (T_{EC} - T) + m_f * h_f}{0,9 * \lambda * (T_{EC} - T_s) / e}$$

$$\boxed{A = 1\,979,7\,m^2}$$

## 5.6 UNIDADE DE CONDENSAÇÃO

A unidade de condensação será substituída por uma tubulação na forma de funil que atue na captura do vapor da câmara de evaporação e direcione o fluxo diretamente para a unidade de pós-tratamento. Neste cenário, deve-se estar bastante atento com relação ao nível de água dentro da tubulação para garantir o equilíbrio do sistema.

## 5.7 PÓS-TRATAMENTO

A água obtida do processo de dessalinização não é própria para o consumo humano, pois não se adequa aos critérios de potabilidade exigidos pela Resolução CONAMA nº20 de 1986<sup>12</sup>. A água dessalinizada é pobre em alguns minerais essenciais para a saúde humana, tem alto poder corrosivo, apresenta risco de proliferação de bactérias e microorganismos e possui gosto característico não agradável. Portanto é essencial uma etapa de pós tratamento na qual a água é remineralizada e clorada.

O dessalinizador pode também destilar compostos orgânicos voláteis, caso presentes na água do mar, e contaminar a água dessalinizada. Tais compostos apresentam risco a saúde humana devido a sua toxicidade e podem ser retirados da água através do processo de reaeração da água na etapa de pós tratamento.

### 9.7.1 Remineralização

Há muito tempo sabe-se que a concentração em excesso de certos elementos orgânicos e inorgânicos na água é prejudicial à saúde humana. Frente a

---

<sup>12</sup> Resolução que caracteriza os padrões brasileiros de qualidade para a água doce.

tal constatação, diversos órgãos de saúde ao redor do mundo definiram padrões de potabilidade que regulam as máximas concentrações de certos elementos químicos e microrganismos presentes na água. Entretanto, somente nas últimas décadas surgiram estudos que mostram que a água para ser potável deve ter concentrações mínimas de alguns minerais. Esta preocupação recente deve-se principalmente ao aumento da utilização de água produzida em usinas de dessalinização para o consumo humano a partir da segunda metade do século XX. Anteriormente a essa época este assunto era de pouco interesse, pois a água encontrada naturalmente com poucos minerais (água de chuva e de gelo formado naturalmente, por exemplo) era de pouca utilização.

Dentre as principais características da água destilada estão: ser altamente agressiva a tubulações metálicas, comumente utilizadas para abastecimento; ter gosto característico pouco agradável; ter baixa dureza; e baixos índices de flúor. Esses dois últimos pontos são especialmente importantes com relação a cuidados de saúde pública. Estudos realizados na década de 1960 já evidenciavam menor mortalidade para algumas doenças cardiovasculares em populações abastecidas com água de alta dureza – característica da água relacionada à presença de íons de cálcio e magnésio por exemplo.

No final da década de 1970, a Organização Mundial da Saúde (OMS) patrocinou seu primeiro grande estudo sobre a potabilidade de água desmineralizada. O estudo foi conduzido por pesquisadores da Academia de Ciências Médicas da União Soviética. Essa pesquisa possuía como principal objetivo desvendar os possíveis efeitos adversos em relação ao consumo humano de água desmineralizada e estabelecer quantidades mínimas para a remineralização da água destilada de forma a torná-la adequada tanto às questões técnicas quanto às questões de saúde envolvidas.

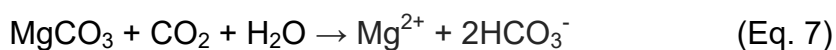
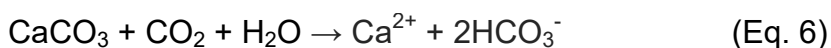
Algumas consequências constatadas pelo estudo da OMS relacionados a ingestão de água desmineralizada foram: efeito direto sobre a mucosa intestinal, no metabolismo e na homeostase óssea; baixa ou nenhuma ingestão de cálcio e magnésio devido à falta desses minerais na água destilada; perda de cálcio e magnésio e outros elementos essenciais em comida preparada com água desmineralizada; possível aumento de ingestão de metais tóxicos na dieta devido à

maior capacidade da água desmineralizada de absorver metais de materiais em contato com ela.

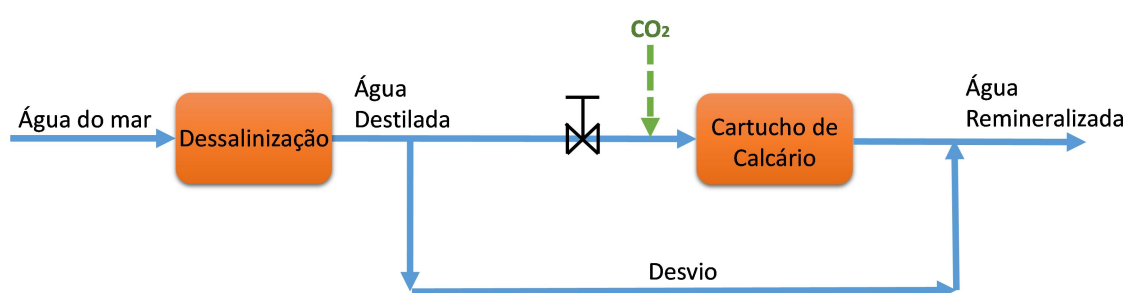
Atualmente é recomendado que toda água destilada seja remineralizada e atenda a algumas quantidades mínimas de cálcio e magnésio. Para o magnésio, um mínimo de 10 mg/L e uma quantidade ótima de 20 a 30 mg/L é requerido, para o cálcio, um mínimo de 20 mg/L e uma quantidade ótima de 50 mg/L; e para a dureza ótima da água, a somatória de cálcio e magnésio deve ser de 2 a 4 mmol/L. Pouco ou nenhum efeito adverso foi verificado quando observadas estas concentrações. A concentração de magnésio foi estudada com base em seus efeitos no sistema cardiovascular e a concentração de cálcio se deve ao estudo da sua influência na ossificação. Já a dureza da água também está relacionada com a formação de pedras nos rins.

A remineralização pode ser conduzida com a mistura de pequenos volumes de água rica em minerais. A própria água do mar pode ser utilizada na mistura com a água dessalinizada para que sejam atendidas as recomendações de quantidades mínimas de minerais. Cuidados com a água do mar utilizado na mistura devem ser tomados para que ela seja segura química e microbiologicamente, devendo, portanto, ser tratada. A Organização Mundial da Saúde recomenda que a mistura de água do mar com a água destilada seja na proporção de 1/99 devido a considerações de sabor. Com esta proporção é possível adicionar de 4 a 5 mg/L de íons de cálcio e de 12 a 17 mg/L de íons de magnésio em média segundo a OMS.

Outra forma de remineralização comumente utilizada é a percolação da água destilada através de cartuchos contendo calcário. O calcário é uma rocha sedimentar cujo mineral predominante é a dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ). Antes da percolação ocorrer, é necessário a injeção de  $\text{CO}_2$  na água para que as seguintes reações químicas ocorram e haja liberação de íons de cálcio e magnésio na água.



A dosagem destes minerais quando da utilização de cartuchos de calcário se dá na forma esquematizada abaixo. Em paralelo, temos uma tubulação com a presença do cartucho (com adição de CO<sub>2</sub>) e uma tubulação sem o cartucho. A partir de informações fornecidas pelo fabricante do cartucho a respeito da capacidade de liberação de magnésio e cálcio em mg/L, deve-se ajustar a vazão de água na tubulação com o cartucho de modo que a mistura subsequente tenha níveis adequados destes minerais.



**Figura 39: Esquema de remineralização e dosagem (Pozzani<sup>13</sup>)**



**Figura 40: Cartucho de calcita (Pozzani)**

### 9.7.2 Cloração

As normas do Ministério da Saúde estabelecem a obrigatoriedade de processo de desinfecção para toda água utilizada para consumo humano. A

<sup>13</sup> Disponível em <[http://www.pozzani.co.uk/product\\_info.php?products\\_id=495](http://www.pozzani.co.uk/product_info.php?products_id=495)>. Acesso em 27 de julho de 2015.

desinfecção é um processo no qual são utilizados agentes químicos ou físicos com a finalidade de eliminação de microrganismos patogênicos presentes na água. Podem ser utilizados no processo de desinfecção o cloro, o ozônio, o dióxido de cloro, a radiação ultravioleta, o iodo, sais de prata, etc. Dentre os agentes de desinfecção citados, o cloro é o mais vastamente utilizado para esta finalidade. Isso se deve ao seu fácil acesso, sua alta capacidade de oxidação de matéria orgânica e inorgânica e a sua grande permanência no sistema distribuição.

A respeito da sua persistência no sistema de distribuição, o Ministério da Saúde estabelece em sua Portaria N. 2.914: “É obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre ou 2 mg/L de cloro residual combinado ou de 0,2 mg/L de dióxido de cloro em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede)”. O Ministério da Saúde também estabelece nessa portaria a concentração máxima de cloro residual livre na rede em 2 mg/L.

A cloração pode ser feita com a utilização de cloro gasoso, cal clorada, hipoclorito de sódio ou hipoclorito de cálcio por exemplo. Há uma vasta gama de equipamentos dosadores de cloro no mercado: Bombas dosadoras, hidroejetores a vácuo, dosadores de nível constante, clorador de pastilha gerador de hipoclorito, etc.



**Figura 41: Exemplo de clorador de pastilha (Nautilus<sup>14</sup>)**

---

<sup>14</sup> Disponível em < <http://sistemamanutencoes.com/produto/clorador-automatico-nautilus/>>.

## 5.8 DEVOLUÇÃO DA SALMOURA

Como resíduo do processo de dessalinização, temos a salmoura. Esta água pode conter até o dobro do nível de salinidade em comparação com a água encontrada no mar. Após da dessalinização, a salmoura é normalmente despejada diretamente no próprio mar, todavia, alguns cuidados devem ser tomados neste processo.

Deve-se atentar para o posicionamento da tubulação de tomada d'água no mar em relação a tubulação de despejo da salmoura. O despejo deve ser feito longe o suficiente da tomada d'água da usina para que não se capte água com elevada concentração de sal – o que demandaria maior consumo de energia da usina. Informações quanto ao fluxo longitudinal de água na praia devem ser consideradas para que o despejo de salmoura ocorra a sotamar da tomada d'água evitando assim que as correntes levem os resíduos da dessalinização de volta para a captação.

Estudos realizados pelo *Centre for Water Research* mostram que a salinidade da água tende a retornar a níveis normais a aproximadamente 500 m do ponto de despejo da salmoura. Também foram estudados os impactos ambientais da deposição da salmoura da usina de dessalinização de Perth, na Austrália. A análise deste caso concluiu que os efeitos ambientais da deposição de água salgada fortemente concentrada têm impacto restrito e de pouca periculosidade à vida marinha.

Porém os pesquisadores alertam que o principal risco ambiental da deposição de resíduos da dessalinização no mar pode ter relação com os produtos químicos utilizados durante o pré-tratamento que ainda estão contidos na salmoura e também a presença de metais pesados dispersos na água devido à corrosão do material de fabricação dos dessalinizadores e tubulação. Ainda não existem estudos sobre os efeitos a longo prazo deste aspecto da deposição da salmoura, porém há recomendações para que a salmoura receba tratamentos como a descloação antes que seja devolvida ao mar. Outro cuidado importante diz respeito a sua temperatura da água, que não deve ser superior à do mar.

## 6 PLANTA DA INSTALAÇÃO

Desenvolveu-se um estudo preliminar para a elaboração de uma planta de instalação de uma unidade de dessalinização no município de Berberibe, Ceará.

Conforme visto anteriormente, o evaporador, para atender a 1.000 pessoas, requer uma superfície de 1.979,7 m<sup>2</sup> em contato com o ar. Para que ele absorva a maior insolação possível, é recomendado que esteja perpendicular à direção Norte, assim, tomando-se que a latitude da cidade de Berberibe é de 04°10'47" Sul, sua cobertura deverá apresentar inclinação de 4°. Desta forma, pode-se dimensionar um evaporador quadrado com 44,4 m de lado. O reservatório inferior teria, a princípio, as mesmas dimensões do evaporador, de forma a reduzir a profundidade de escavação necessária para sua instalação.

O evaporador será constituído basicamente de uma grade a 10,3 metros do nível do mar. Essa grade necessita de boa estrutura de apoio, para tanto considerou-se a utilização de pilares circulares pré-moldados de concreto, com distanciamento de 10 a 12 m entre eles. Assim, seriam necessários 5 pilares equidistantes em cada eixo, com espaçamento de 11,1 m entre eles, resultando um total de 25 pilares na estrutura. Para o transporte da água do reservatório inferior para o evaporador pode-se utilizar tubos embutidos nos pilares de concreto pré-moldados.

A determinação do diâmetro desses tubos é possível adotando-se que o escoamento será laminar (número de Reynolds  $\leq 2000$ ). Tendo a informação de que a vazão total de água para abastecer o evaporador é de 3,39 l/s e considerando a existência de 25 tubos (vazão por tubo = 0,14 l/s), é possível determinar um diâmetro de 150 mm. O número de Reynolds apresentado é relativamente baixo, sendo possível reduzir a quantidade de tubos para redução custos. A mesma vazão considerada deve ser considerada para a alimentação do reservatório inferior, resultando um diâmetro necessário de 750 mm. Para o transporte da água fresca à estação de tratamento utilizar-se-á um tubo com 1.000 de diâmetro.



**Tabela 2: Propriedades da água (Elaborada pelo autor)**

Propriedades da Água	Água Doce	Água Salgada
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1 025	1 000
Viscosidade cinemática da água a 25°C (kg/m <sup>2</sup> )	1 040 000	1 000 000

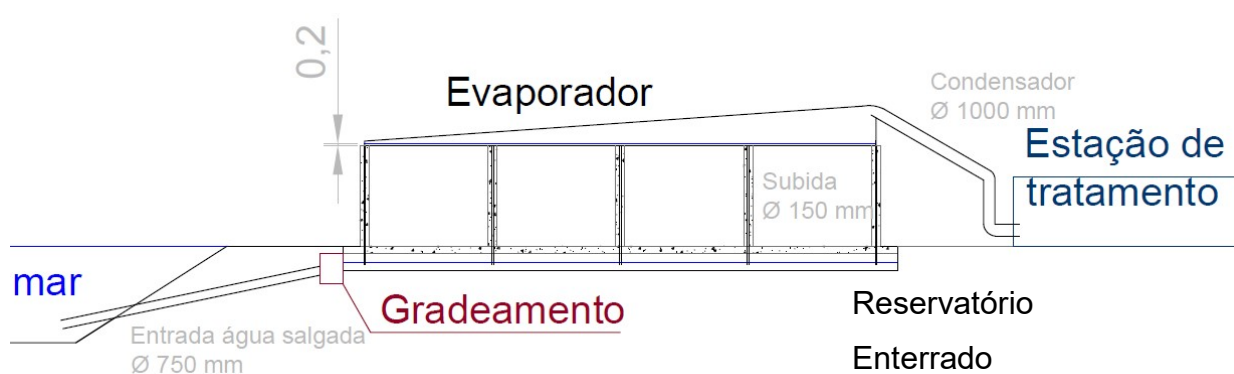


**Figura 42: Delimitação do município de Berberibe (Google Maps<sup>15</sup>)**

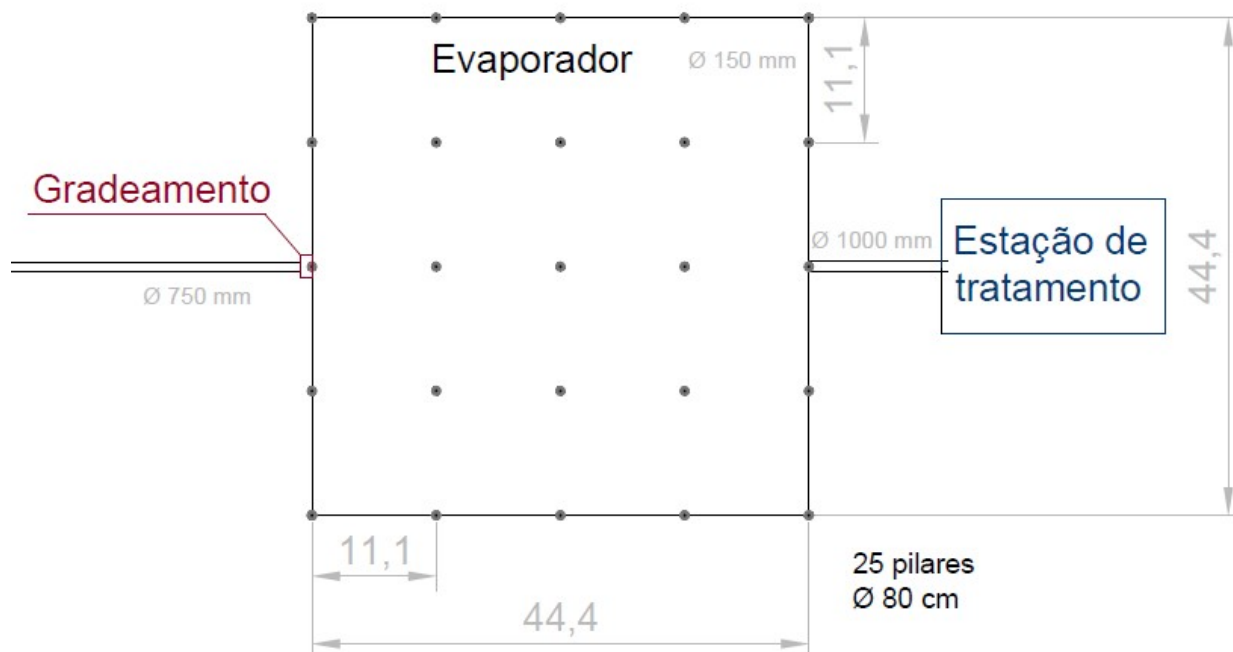
<sup>15</sup> Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/place/Beberibe+-+CE/@-4.3235841,-38.3726688,9.95z/data=!4m2!3m1!1s0x7b8f0ec014dbdc0d:0xf71792368617a860>>. Acessado em 29/11/2015.



**Figura 43: Possível local de instalação da planta de dessalinização (Google Maps)**



**Figura 44: Vista lateral da planta de dessalinização (Elaborada pelo autor)**



**Figura 45: Vista superior da planta de dessalinização (Elaborada pelo autor)**

## 7 MULTIDISCIPLINARIEDADE

O projeto de um dessalinizador, como a maioria dos projetos de engenharia, envolve a compreensão de diversas áreas do conhecimento. É fundamental o domínio de conceitos da termodinâmica e da hidráulica, uma vez que o processo de dessalinização envolve trocas de calor, mudanças de fase da água e transporte de líquido e de vapor entre diversos sistemas. A otimização do sistema requer análise de equacionamentos termodinâmicos das relações dessas trocas de calor; e estudos de minimização das perdas de carga, visando maior rendimento do sistema.

A garantia do abastecimento/desabastecimento adequado dos reservatórios é de extrema importância para o processo, pois ela evita alterações na concentração de sais na água a partir das alterações dos níveis dos reservatórios e perda de calor do sistema. Maiores concentrações de sais diminuem a pressão de vapor da água, acarretando maior necessidade de calor externo na câmara de evaporação. Entretanto, a remoção da salmoura diminui a quantidade de calor

sensível já presente no sistema, o que também influencia na quantidade de calor externo demandada por ele. O efeito dos dois contrapontos deve ser estudado para que o ponto ótimo seja encontrado.

Questões relativas ao saneamento também são contempladas na concepção do dessalinizador e análise da água obtida. Deseja-se que a água seja própria para o consumo humano e para isso ela deve atender aos padrões de potabilidade definidos pelo Ministério da Saúde e pela Organização Mundial de Saúde. À água desmineralizada devem ser incorporados quantidades mínimas de elementos minerais a base de magnésio e cálcio e, além disso, deve haver uma etapa de cloração para a total eliminação de micro-organismos patogênicos. Além disso, a determinação da forma de deposição da salmoura resultante do processo de dessalinização é de extrema importância para garantir a viabilidade de todo o processo, visto que um descarte imprudente pode causar graves impactos ambientais quando em larga escala.

A implantação de um sistema de dessalinização requer uma estrutura de apoio para seus elementos. As torres barométricas devem ter altura de aproximadamente 10 m para que seja atingido vácuo sem o auxílio de bomba, portanto, o sistema necessita de uma estrutura robusta e segura para suportar as cargas dos elementos suspensos, da carga de água, de possíveis cargas acidentais e cargas dinâmicas devido à vibração de bombas e do vento. O projeto estrutural também envolve a escolha do material para esta estrutura. Nas tubulações, o material deve ser resistente e apresentar isolamento térmico adequado, podendo, assim, diminuir as perdas de calor para o ambiente. Já nos trocadores de calor é necessária a utilização de material com boa condutividade térmica.

Por fim, há o tratamento quanto à questão energética. O dessalinizador pode necessitar de aquecedores e de bombas que devem utilizar ao máximo energia limpa e sustentável, uma diferencial de extrema importância atualmente.

## 8 CONCLUSÃO

O processo de dessalinização a baixas temperaturas aqui explorado apresenta como principal vantagem a possibilidade de redução no gasto energético quando em comparação com outros processos de dessalinização mais consolidados. A baixa temperatura de operação do sistema garante menores taxas de corrosão nos materiais utilizados nas câmaras, menor taxa de perda de calor para o meio externo, maior eficiência na inicialização do processo e a possibilidade de uso de energias renováveis ou calor reaproveitado de outros processos.

O estudo desenvolvido mostrou ser necessária grande área de evaporação para o abastecimento de uma pequena comunidade, cerca de 2,0 m<sup>2</sup>/pessoa. Vale lembrar, entretanto, que tal área poderia ser distribuída em módulos, facilitando ainda a manutenção, uma vez que não seria necessário interromper todo o sistema para realizar a manutenção dos módulos. Além disso, a possibilidade de industrialização de vários componentes da planta, tais como os pilares de sustentação e os reservatórios, pode garantir grande economia de escala e agilidade em sua instalação. Outros atrativos importantes do processo são a baixa necessidade de manutenção e possibilidade de desenvolvimento do sistema apenas com tecnologias nacionais, o que aumenta seu tempo de operação e diminui custos.

Como objeto de um trabalho de formatura o estudo foi muito rico, dado que na primeira etapa possibilitou o desenvolvimento de um conhecimento profundo quanto aos princípios que regem a dessalinização por mudança de fase e o quanto algumas modificações simples no processo poderiam melhorar a eficiência do sistema; e na segunda, tornou claras as dificuldades associadas à transformação do princípio em uma solução de engenharia, com produção em escala e fácil acesso à população. Os próximos passos estariam associados ao estudo da possibilidade de otimização da estrutura, analisando a necessidade de um reservatório enterrado, por exemplo, uma análise detalhada dos custos de construção e manutenção e da forma de implantação dos diversos elementos na cidade escolhida.

Este projeto pode não ter trazido as soluções técnicas que almejávamos ao início, mas com certeza cumpriu o objetivo de disseminar o conhecimento sobre o

princípio e introduzir a discussão sobre a possibilidade de utilização dos processos de dessalinização como solução aos problemas hídricos pelos quais passam diversas regiões no mundo atualmente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COHEN, Otavio, **O fundo do poço**. Disponível em < <http://super.abril.com.br/crise-agua/ofundodopoco.shtml> >. Acesso em 03 jul. 2015.

IKEGAMI, Y.; SASAKI, H.; GOUDA, T; UEHARA, H. Experimental study on a spray flash desalination (influence of the direction of injection). **Desalination**, Amsterdam, n. 194, p. 81-89, 2006.

JOYCE, A.; LOUREIRO, D.; COLLARES PEREIRA, M.; MOREIRA, M. Destilador com evaporação por “spray” para a dessalinização de água do mar. In: VII CONGRESO IBÉRICO DE ENERGÍA SOLAR, Vigo, 1994. p. 265-270.

KALOGIROU, S.A. Design of a new spray-type seawater evaporator. **Desalination**, Amsterdam, n. 139, p. 345-352, 2001.

MUTHUNAYAGAM, A.E.; RAMAMURTHI, K.; PADEN, J.R. Low temperature flash vaporization for desalination. **Desalination**, Amsterdam, n. 180, p. 25-32, 2005.

PETRUCCI, R.H.; HERRING, F.G.; MADURA, J.D.; BISSENETTE, C. **General Chemistry – Principles and Modern Application**. 10<sup>th</sup> ed. Toronto: Pearson, 2011. 1303p.

SPIEGLER, K.S.; LAIRD, A.D.K. **Principles of Desalination Part A**. 2<sup>nd</sup> ed. New York, London, Toronto, Sydney and San Francisco: Academic Press, 1980. 351p.

SPIEGLER, K.S.; LAIRD, A.D.K. **Principles of Desalination Part B**. 2<sup>nd</sup> ed. New York, London, Toronto, Sydney and San Francisco: Academic Press, 1980. 799p.

CLAWSON, Marion; LANDSBER, Hans H. **Desalting Seawater: Achievements and Prospects**. New York, London and Paris: Gordon and Breach Science Publishers. 227p.

WYLEN, Gordon J. V.; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 2ª ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1976. 565p.

KHANDAN, Nirmala N.; GUDE, Veera Ganeswar. Sustainable Recovery of Potable Water from Saline Waters. **WRI Technical Completion Report No.355**. New Mexico, September 2010.

KHANDAN, Nirmala N.; GUDE, Veera Ganeswar; DENG, Shuguang; MAGANTI, Anand. Feasibility study of a two-stage low temperature desalination process. **Energy Conversion and Management**. Volume 52, issue 1, January 2012.

SHARQAWY, Mostafa H.; LIENHARD V, John H.; ZUBAIR, Syed M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. **Desalination and Water treatment**, pp. 355 – 378, 2010.

An Introduction to Saturated Vapour Pressure. CHEMGUIDE. Disponível em <<http://www.chemguide.co.uk/physical/phaseseqia/vapourpress.html>>. Acesso em 21 abr. 2015.

PURDUE UNIVERSITY. **Liquids**. Disponível em <<http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch14/liquids.php>>. Acesso em 21 abr. 2015.



UNIVERSITY OF CALIFORNIA – DAVIS. **Vapor Pressure**. Disponível em <[http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical\\_Chemistry/Physical\\_Properties\\_of\\_Matter/Phases\\_of\\_Matter/Liquids/Vapor\\_Pressure](http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Physical_Properties_of_Matter/Phases_of_Matter/Liquids/Vapor_Pressure)>. Acesso em 2 mai. 2015.

MICHAEL BLABER – FLORIDA STATE UNIVERSITY. Vapor Pressure. Disponível em <<http://www.mikeblaber.org/oldwine/chm1045/notes/Forces/Vapor/Forces05.htm>>. Acesso em 4 mai. 2015.

**CANTAREIRA fica abaixo de 6% e Sabesp pede para usar novo volume morto. Folha de São Paulo.** Folha de São Paulo, 6 out. 2014. Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2014/10/1528038-cantareira-fica-abaixo-de-6-e-sabesp-pede-para-usar-novo-volume-morto.shtml>>. Acesso em 3 jul. 2015.

**NÍVEL de água no Cantareira se mantém estável neste domingo.** G1, 28 jun. 2015. Disponível em <<http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2015/06/nivel-de-agua-do-cantareira-se-mantem-estavel-neste-domingo.html>>. Acesso em 3 jul. 2015.

BRASIL. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto 2013.** Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS). Brasília, 22 abr. 2015. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=105>>. Acesso em 3 jul. 2015.

TOMAZELA, José Maria, **Água do mar para o Cantareira pode custar um terço do previsto.** Estadão, 26 mar. 2015. Disponível em <<http://sao-paulo.estadao.com.br/noticias/geral,agua-do-mar-para-o-cantareira-pode-custar-um-terco-do-previsto,1658637>>. Acesso em 3 jul. 2015.

**GOVERNO não descarta a dessalinização da água do mar para resolver crise hídrica.** O Dia Rio, 30 jan. 2015. Disponível em <<http://odia.ig.com.br/noticia/rio->

de-janeiro/2015-01-30/governo-nao-descarta-a-dessalinizacao-da-agua-do-mar-para-resolver-crise-hidrica.html >. Acesso em 3 jul. 2015.

**BRASIL. Ano começa com obras que garantem água no semiárido.** Portal Brasil, 28 jan. 2015. Disponível em <

<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/01/2015-comeca-com-obras-que-garantem-agua-no-semiarido> >. Acesso em 3 jul. 2015.

**SABESP. Sistema Produtor São Lourenço.** Disponível em <  
<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=485>>. Acesso em 3 jul. 2015.

**BRASIL. Programa água doce cria 15 sistemas de dessalinização no Ceará.** Portal Brasil, 21 ago. 2015. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/08/programa-agua-doce-cria-15-sistemas-de-dessalinizacao-no-ceara>>. Acesso em 17 set. 2015.

**PACIFIC INSTITUTE. The World's Water.** 2009. Disponível em <  
<http://12.000.scripts.mit.edu/mission2017/desalination-and-water-recycling/>>.  
Acesso em 17 set. 2015.

**CHINA Turns to the Sea for Fresh Water.** Bloomberg. Disponível em <  
<http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-04-09/china-embraces-desalination-to-ease-water-shortages> >. Acesso em 21 nov 2015.

**COSTLY drops.** The Economist, 9 fev. 2013. Disponível em <  
<http://www.economist.com/news/china/21571437-removing-salt-seawater-might-help-slake-some-northern-chinas-thirst-it-comes-high> >. Acesso em 21 nov. 2015.

**IS desalination the solution to water security?** The Economist, 18 mar. 2015.

Disponível em < <http://gelookahead.economist.com/desalination/> >. Acesso em 21 de novembro de 2015.

**TAPPING the oceans.** The Economist, 5 jun. 2008. Disponível em <

<http://www.economist.com/node/11484059> >. Acesso em 21 nov. 2015.

**HIGHWATER mark.** Financial Times, 20 mar. 2012. Disponível em <

<http://www.ft.com/cms/s/0/64228988-6e57-11e1-b98d-00144feab49a.html>>. Acesso em 21 nov. 2015.

**WORLD without water: six solutions to a shortage.** Financial Times, 8 dez.

2014. Disponível em <<http://www.ft.com/cms/s/2/87064ea8-7a52-11e4-a8e1-00144feabdc0.html>>. Acesso em 21 nov. 2015.

BRASIL. **Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água.** Agência Nacional de Águas. Brasília. 2010. 68p.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Water Desalination Using Renewable Energy: Technology Brief.** 2012. 28p

ZIOLKOWSKA, J. **Desalination – Prospective Technology for Mitigating Water Scarcity.** 2014.

FOUNDATION FOR WATER RESEARCH. **Desalination for Water Supply.** London. 2015. 52p

KOSCHIKOWSKI, J. **Water Desalination: When and Where Will it Make Sense?** American Association for the Advancement of Science. 2011.

BRASIL. **Municípios em situação de emergência por estiagem/seca de 2012 a 2015.** Secretaria da Defesa Pública e Defesa Social. Disponível em: <[http://www.defesacivil.ce.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=686:situacao-de-emergencia-por-estiagemseca-de-2012-a-2014&catid=14:lista-de-noticias&Itemid=81](http://www.defesacivil.ce.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=686:situacao-de-emergencia-por-estiagemseca-de-2012-a-2014&catid=14:lista-de-noticias&Itemid=81)>. Acesso em 28 nov. 2015.

**GOVERNO do estado decreta situação crítica de falta d'água no Ceará.** O Povo, 8 out. 2015. Disponível em <<http://www.opovo.com.br/app/opovo/cotidiano/2015/10/08/noticiasjornalcotidiano,3516050/governo-do-estado-decreta-situacao-critica-de-falta-d-agua-no-ceara.shtml>>. Acesso em 28 nov. 2015.

GOVERNO DO CEARÁ. **História de Berberibe.** Disponível em <<http://beberibe.ce.gov.br/historia/>>. Acesso em 28 nov. 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, Reginal Office for South-East Asia. **Minimum water quantity needed for domestics uses.** Technical Note No 9.