# ESTUDO DO BINÔMIO VÁCUO-TEMPERATURA PARA DESSALINIZAÇÃO POR DESTILAÇÃO TÉRMICA

**Ana Paula Pereira da Silveira**[(1)]
Bióloga (CUFSA), Tecnóloga em Hidráulica e Saneamento Ambiental (FATEC-SP), Mestre em Tecnologias Ambientais (CEETPS), Doutora em Energia (UFABC). Tecnóloga (SABESP, d.2013), docente (graduação e pós, d. 2012), autora e coautora de livros em saneamento e meio ambiente.
**Luiz Eduardo Mendes** [(2)]
Tecnólogo em obras hidráulicas 1991 (FATEC-SP), Eng civil (FESP) 1997, mestre em Tecnologia Processos Produtivos.(CEETEPS), doutorando pela Unicamp área de recursos hídricos e energéticos.
**Francisco Tadeu Degasperi**[(3)]
Bacharel em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo - USP, mestrado e doutorado pela FEEC-UNICAMP. Trabalhou por quase 24 anos no Instituto de Física da Universidade de São Paulo - IFUSP. Desde 2000 trabalha em tempo integral na Faculdade de Tecnologia de São Paulo – (FATEC-SP) Professor de Ensino Superior III-N.
**Silvia Pierre**[(3)]
Possui graduação em Farmácia pela Universidade de São Paulo (1981), mestrado em Ciências Biológicas (Fisiologia) pela Universidade Estadual de Campinas (1988) e doutorado em Anatomia Patológica pela Universidade Estadual de Campinas (1994). Pós doutorado em Toxicologia (UNICAMP, 2011). Desde 2002 é professora da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, pesquisadora em regime de dedicação exclusiva do CEETEPS. Docente do Programa de Mestrado Profissional (CEETEPS) desde 2007.

**Endereço**[(1)]**:** Avenida Adolfo Pinheiro 2233 – São Paulo - SP - CEP: 20000-000 - Brasil - Tel: +55 (11) 98690-3772 - e-mail: **appsilveira@sabesp.com.br**.

## RESUMO

O processo de dessalinização de águas salinas e salobras já está amplamente difundido, ainda considerando a últimas crises hídricas em vários países, no contexto de obter-se uma alternativa de fonte de água doce para consumo. Um dos processos para obtenção de água doce é por destilação térmica. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência na retenção de sais no processo de dessalinização por destilação térmica em vácuo. Bem como avaliar aspectos microbiológicos da água dessalinizada.. Outro aspecto a ser avaliado foi a eficiência da energia utilizada no processo de destilação, buscando obter um ponto ótimo entre a relação da energia fornecida ao processo de destilação e a obtenção da qualidade adequada para atendimento da qualidade necessária para o abastecimento humano. Foram obtidos resultados que mostraram a eficiência do processo térmico e da retenção de sais. O arranjo experimental atualmente em funcionamento tem como fonte de aquecimento, lâmpadas apropriadas para simular a radiação solar. Atenção especial foi dada na estanqueidade do sistema de vácuo do arranjo experimental e também nas medições de temperatura e pressão tanto na câmara de vácuo como em partes importantes da linha de bombeamento de gases e vapores. O arranjo experimental foi construído dentro do conceito das boas práticas da tecnologia do vácuo, considerando as conexões em geral, válvulas, condensadores, filtros, bomba de vácuo e medidores de pressão. Além do detalhamento do arranjo experimental e do sistema de bombeamento de vácuo, têm-se também resultados sobre o desempenho do processo de dessalinização. Este trabalho também expõe a modelagem termodinâmica do processo de vaporização da água salgada e do processo de transporte de gases e vapores por meio da bomba de vácuo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dessalinização; Destilação térmica; Radiação infravermelha.

## INTRODUÇÃO

Muitas regiões ou países com escassez de água ou áridos estão aumentando seu abastecimento de água com água dessalinizada para atender ao aumento da demanda de água causada pelo crescimento da população, expansão industrial, turismo e desenvolvimento agrícola. Em algumas áreas, a dessalinização não é mais um recurso hídrico marginal ou suplementar em alguns países. Catar e Kuwait dependem 100% de água dessalinizada para abastecimento doméstico e industrial (GHAFFOUR et.al., 2013).

A dessalinização da água salina é um processo no qual o sal e outros constituintes são removidos para produzir água pura. Aproximadamente 75 milhões de pessoas em todo o mundo dependem da dessalinização e espera-se que esse número cresça à medida que os recursos de água doce são pressionados pelo crescimento populacional e outros milhões se mudam para cidades costeiras com recursos de água doce inadequados (UNITED NATIONS CLIMATE TECHNOLOGY CENTER E NETWORK, 2023). A dessalinização é mais amplamente utilizada em regiões áridas, sendo que mais da metade do volume de água dessalinizada do mundo está localizado no Oriente Médio e Norte da África (UNITED NATIONS CLIMATE TECHNOLOGY CENTER E NETWORK, 2023).
A dessalinização possui dois fluxos principais de água (1) o produto, ou água dessalinizada (2) um fluxo residual de alta concentração salina, a salmoura.
Os principais métodos de dessalinização se enquadram em duas categorias: processos térmicos e processos de separação por membrana. O tratamento térmico usa calor para evaporar a água, retendo os sais dissolvidos. Os processos de separação por membrana, usam alta pressão para forçar a água salgada através de membranas de porosos muito finos que retêm os sais, deixando água pura de um lado da membrana e o concentrado salino do outro lado. Como a grande maioria da água da Terra é encontrada nos mares e oceanos, a dessalinização cria uma oportunidade para as comunidades costeiras acessarem fontes de água doce virtualmente ilimitadas.
Além disso, as técnicas de dessalinização podem ser usadas para purificar a água salobra em áreas com intrusão de água do mar. À luz da adaptação às mudanças climáticas, este também é um recurso crucial para áreas onde os recursos de água doce existentes não podem mais sustentar as populações locais ou ser tratados para atender às demandas de água doce (UNITED NATIONS CLIMATE TECHNOLOGY CENTER E NETWORK, 2023).
A dessalinização pode ser uma das soluções mais promissoras para o problema de escassez da água, no entanto, é um processo que demanda intensamente de energia. Portanto, a integração das energias renováveis em sistemas de dessalinização de água tem-se tornado cada vez mais atrativa, além de diminuir a pegada de carbono dos sistemas (ALKAISI; MOSSAD; SHARIFIAN-BARFOROUSH, 2017).

## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência na retenção de sais no processo de dessalinização por destilação térmica em vácuo. Bem como avaliar aspectos microbiológicos da água dessalinizada.
Outro aspecto a ser avaliado é a eficiência energética a ser utilizada no processo de destilação, buscando obter um ponto ótimo entre a relação da energia fornecida ao processo de destilação e a obtenção da qualidade adequada para atendimento da qualidade necessária para o abastecimento humano.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a ciência, a definição de vácuo está relacionada a ausência de gases em um dado volume, ou recipiente, e trata-se de uma ordem de grandeza que pode ser medida, possui algumas unidades que podem representar. De acordo com o Sistema Internacional de Unidade, bem como comercialmente, as mais encontradas nesse meio são Torr e Bar (JOUSTEN, s/d).
A pressão a ser atingida, irá depender diretamente da aplicação em que é requerido. No caso da destilação, o vácuo, funciona como um catalizador do processo, uma forma de que aconteça mais rapidamente, e de maneira a ser possível de controlar.
No aspecto do vácuo nessa aplicação, é importante fazer a determinação do *throughput*, ou, quantidade de gás, ou vapor, a uma pressão conhecida, que passa em uma superfície, ou seção de tubo, em um determinado intervalo de tempo. Ou seja, fluxo de massa de gás, ou vapor, que atravessa essa seção (ATKINS, P; PAULA, 2011).
Considerando a equação de estado dos gases ideais, equação 1 de Clapeyron-Mendeleev temos:

$$Q(t) = \frac{d}{dt}[p(t).V(t)] = \frac{d}{dt}[N(t).k.T(t)] \quad \text{(Eq. 1)}$$

Na equação 1, p é a pressão, V é o volume ocupado pelo gás, ou vapor, N é o número de moléculas, k é a constante de Boltzmamm, T é a temperatura absoluta e t é o tempo. Assim como o vácuo, o *throughput* possui uma unidade de medida e a mais usada na área de tecnologia do vácuo seria mbar.L/s (JOUSTEN, s/d).
Para muitos dos estudos, mais importante que saber o valor de throughput, seria determinar o somatório desses valores, uma vez que diversas fontes de gases, e/ou vapores podem interferir em um sistema de vácuo, podendo ser demonstrado na equação 2 (ATKINS, P; PAULA, 2011).

$$Q_{Total} = \sum_{i=1}^{n} Qi = Q_{VR} + Q_{Vap} + Q_{VV} + Q_{Perm} + Q_{Des} + Q_{Sub} + Q_{FBV} + Q_{IC} + Q_{GVP}$$

(Eq. 2)

Os vazamentos mais críticos, do objeto de estudo em questão, seriam o $Q_{VR}$, que refere-se ao vazamento real, advindo das imperfeições construtivas no sistema de vácuo e o $Q_{GVP}$ onde a fonte de gases advém da vaporização, que ocorre devido ao fenômeno da pressão de vapor em líquidos.

De qualquer maneira, é interessante saber que existem outros vazamentos como descrito $Q_{VV}$ é o vazamento virtual, $Q_{Perm}$ fonte de gases provenientes da permeação, $Q_{Des}$ fonte de gases que provêm do fenômeno da desorpção, $Q_{Sub}$ originados pelo fenômeno da sublimação, $Q_{FBV}$ fonte de gases advindos da bomba de vácuo, $Q_{Vap}$ vapores oriundos da vaporização, $Q_{IC}$ se refere à injeção controlada de gases e vapores no sistema, de maneira controlada (JOUSTEN, s/d).

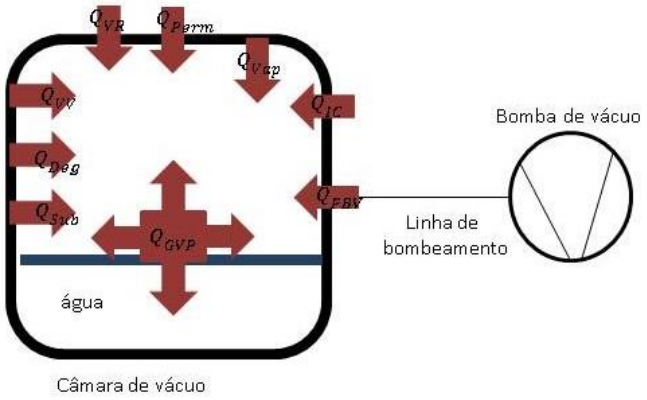


**Figura 1. Desenho ilustrativo de um sistema de vácuo, explicitando todas as possíveis fontes de gases e vapores em uma câmara de vácuo**

Ainda, de acordo com Atkins, P; Paula (2011) de maneira mais simplificada para o sistema em questão, é possível, determinar esse vazamento através da equação 3:

$$Q = \frac{(P_f - P_i)}{(t_f - t_i)} V \quad \text{(Eq. 3)}$$

Nessa situação Q seria a taxa de vazamento, o ar que entra no sistema quando cessa o funcionamento da bomba de vácuo, P é a pressão medida, inicial e final, t seria o tempo inicial e final da medida e o V é o volume, que nesse caso, é um valor fixo do sistema.

Do processo de destilação à vácuo, outro parâmetro importante a ser controlado é a temperatura fornecida ao sistema, para que haja a vaporização da água. Para tal, a figura 2 representa o sistema a ser estudado:

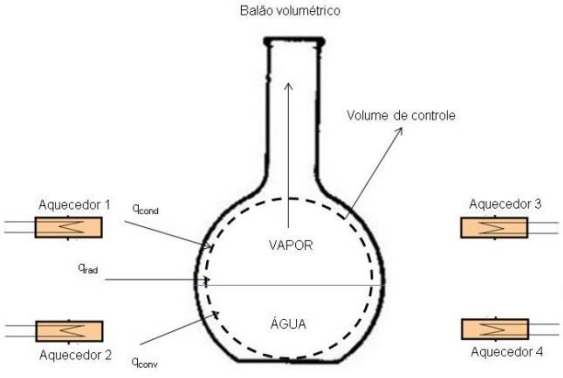


**Figura 2. Sistema de destilação, volume de controle.**

De acordo com o princípio de conservação de energia, para o processo de vaporização da água, em um volume de controle, a massa de água deverá ser a mesma do volume de vapor gerado, na transição de fase de líquido para vapor. Conforme a equação 4:

$$\Delta m_{água} = \Delta m_{vapor} \quad \text{(Eq.4)}$$

Além disso, para um sistema onde existe uma fonte externa de aquecimento, a transferência de energia é representada de acordo com a equação 5:

$$q_{total} = q_{condução} + q_{radiação} + q_{convecção} \quad \text{(Eq. 5)}$$

Entretanto, para presente estudo, considerando o fato de a fonte de aquecimento ser lâmpadas UV, a energia está sendo transferida por radiação. Portanto, para a energia transferida por radiação, considerando a primeira lei da termodinâmica tem-se a equação 6:

$$q_{radiação\ total} = m_{vapor} \cdot c_{vapor} \cdot \Delta T_{vapor} + m_{água} \cdot c_{água} \cdot \Delta T_{água} \quad \text{(Eq. 6)}$$

A energia transferida total será a soma da energia transferida para a água somada a energia transferida para o vapor. Tanto a água como o vapor possuem uma unidade de calor específico, que está relacionada a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura em 1ºC.
O que se pode perceber na equação 6 é que esse processo é bastante dinâmico. No início do processo, antes de se iniciar o aquecimento, pode-se adotar, por exemplo, que à temperatura ambiente, sistema fechado, não há transferência de calor para a água além da temperatura ambiente em um curto espaço de tempo, uma vez as lâmpadas estando desligadas, portanto adota-se que a geração de vapor é zero.
Em um segundo momento, em uma fonte de aquecimento, seja ela qual for, a energia é transferida para água, em forma de calor, fazendo com que haja o aumento da sua temperatura. Com o passar do tempo, as moléculas de água ganham energia suficiente para mudar de fase, líquida para vapor. Sendo gerado uma massa de vapor, há consequentemente, a diminuição da massa de água.
Chega-se então, de acordo com a equação 6, ao início das análises correspondentes ao processo de vaporização.

## METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo, será utilizado banco de ensaios desenvolvido no laboratório de Hidráulica da Faculdade de Tecnologia de São Paulo pelo GEP – Grupo de estudos e pesquisas em dessalinização, que é mostrado na figura 3.

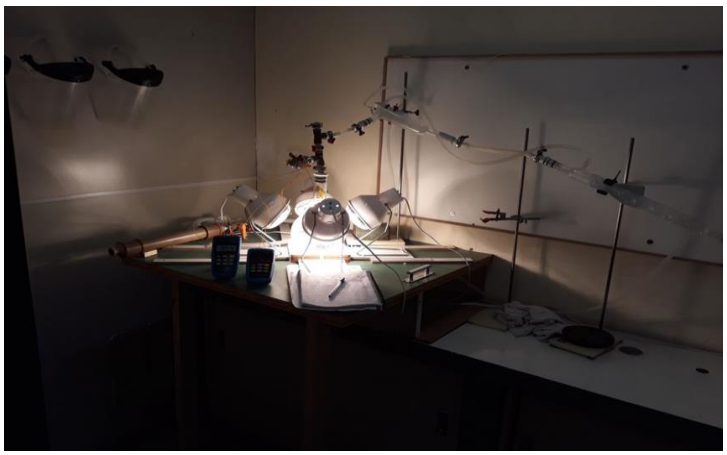

**Figura 3. Arranjo experimental**

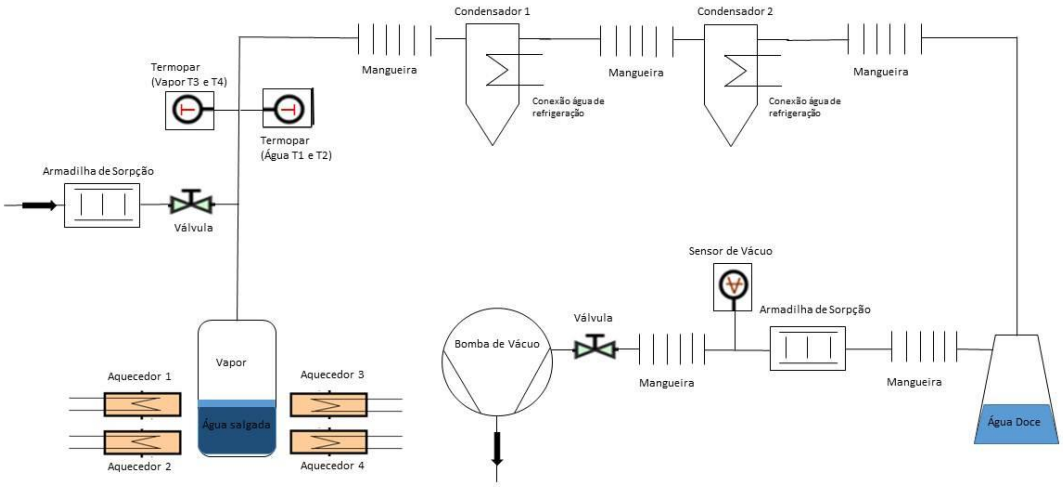


**Figura 4. Esquema do arranjo experimental**

Os ensaios foram realizados com a utilização de água salina natural, coletada no litoral de São Paulo. Foram avaliados os seguintes parâmetros físico-químicos e biológicos para acompanhar a eficiência no processo de dessalinização:

- ✓ Temperatura da água;
- ✓ Cor;
- ✓ Turbidez;
- ✓ Condutividade elétrica;
- ✓ pH;
- ✓ Ensaios microbiológicos;
- ✓ Consumo de energia no processo

O balão volumétrico utilizado para conter a amostra de água salgada possui capacidade para 1 litro, para o volume de amostra de 500 ml de água do mar. Utilizou-se 4 lâmpadas direcionadas para o centro do balão volumétrico, a uma distância de 4cm da parede do balão. Dois condensadores estão posicionados em série, inclinados, para que a água condensada em sua serpentina caia para o recipiente coletor por gravidade.
A água de circulação para resfriamento dos condensadores foi afixada a um fluxo de 3,5 litros/min. Todas as conexões de vidro possuem diâmetro de ½", enquanto as conexões padrão de sistema de vácuo possuem flange do padrão NW16, exceto o flange da bomba de vácuo NW25, com as adaptações pertinentes.
Todos os flanges adaptativos, vidro/NW, PVC/NW, foram produzidos pela Oficina Mecânica da FATEC-SP. Para as conexões vidro/NW foi providenciada uma vedação através de *oring*, enquanto que as conexões de

PVC/NW foram coladas. As conexões de PVC prontas, normalmente utilizadas para tubulação de água residencial, foram adquiridas em lojas especializadas. Para controle da pressão foi utilizado um sensor de vácuo do tipo pirani, a bomba de vácuo com capacidade de 10 m3/h, pressão final da ordem de $3.10^{-3}$ mbar. Foram disponibilizados 4 termopares, para a medida de temperatura na água salgada e no vapor durante o processo de destilação. As lâmpadas, fontes de aquecimento, são comerciais, 200 W cada lâmpada, normalmente utilizadas para estufas de animais ou aquecimento de ambientes.

**Figura 5. Arranjo experimental completo**

Entretanto, foi providenciado um anteparo, colocado imediatamente acima do balão. Isso porque, depois de ser feito teste da subida de temperatura da água, chegou-se a um valor de 18% de perda, sem o anteparo. Ou seja, com a utilização do anteparo, há uma concentração maior da energia transferida da lâmpada para à água, fazendo com que a temperatura da água fosse 18% maior, comparando o mesmo tempo de teste e sem a utilização do anteparo.
Detalhes da montagem do anteparo, podem ser vistos na figura 6.

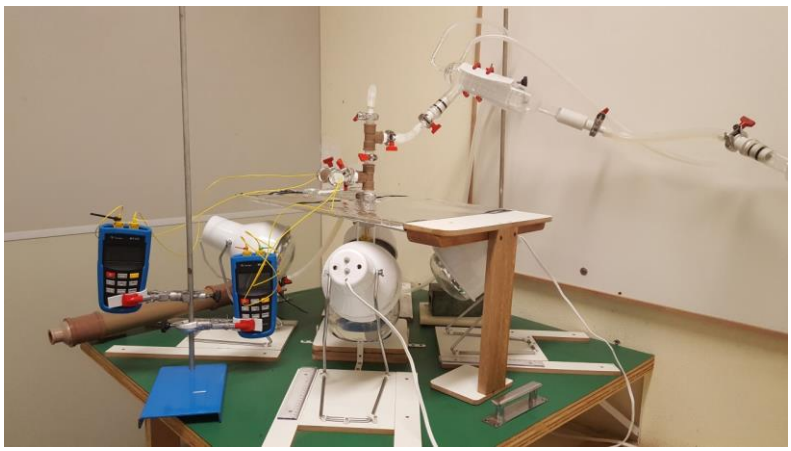

**Figura 6. Experimento pronto de destilação à vácuo adicionado anteparo.**

Outro ponto importante da construção, pelo fato de estar sendo utilizada uma bomba de vácuo mecânica de palhetas rotativas selada à óleo, foi colocar um filtro protetor da bomba de vácuo. Esse filtro foi construído usando tubos de PVC comercial, foi preenchido com sílica gel em grânulos, e colocados anéis com filtro para que não houvesse migração através do filtro para o sistema, ou para a bomba de vácuo.
Existe ainda outro filtro, porém preenchido com tecido de algodão, para quebrar o vácuo do sistema, também construído em tubo em PVC, com uma válvula do mesmo material, também comercial, para que não haja entrada de particulados maiores ou contaminações que venham influenciar no resultado dos testes.
Observando a figura 7, nota-se detalhes da construção e disposição das conexões, bem como, a construção da conexão adaptativa para os termopares (cada conexão contendo 2 pontos de medida, no vapor e na água), e detalhes do processo durante a dessalinização, efetivamente.

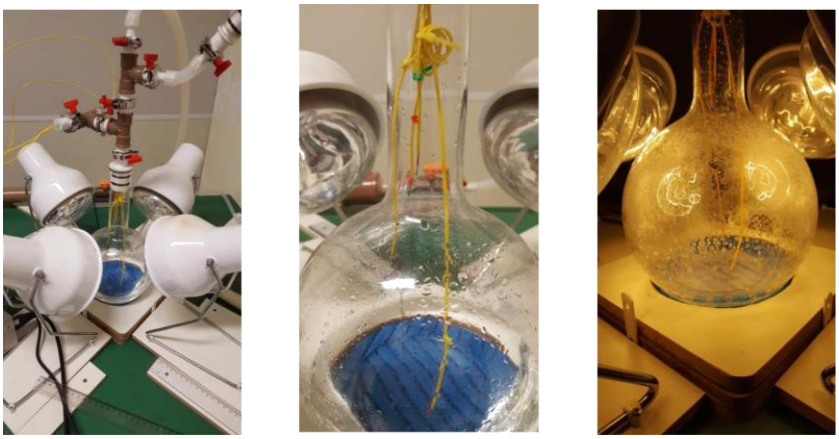

**Figura 7. Balão volumétrico com detalhes das conexões de PVC, da conexão do termopar, e durante o processo efetivo de dessalinização.**

Além do detalhamento do arranjo experimental e do sistema de bombeamento de vácuo, foi feita também a avaliação do desempenho do processo de dessalinização, desenvolvimento da modelagem termodinâmica do processo de vaporização da água salgada e do processo de transporte de gases e vapores por meio da bomba de vácuo.

**Teste de aferição dos termopares**

No processo de destilação, o acompanhamento do comportamento da temperatura é fundamental. Para o teste de aferição dos termopares foram posicionados um par de termopares denominados de T1/T2 no centro do balão, nas cores amarelo e preto, em contato com a água a ser aquecida sobre pressão atmosférica e dois termopares T1/T2 nas cores vermelho e verde, fixados na boca do balão com o intuito medir a temperatura do vapor produzido, funcionando simultaneamente, por segurança. O processo de verificação dos termopares, constituiu no acompanhamento e registro das leituras durante o processo de aquecimento em 3 ensaios:

1. Lâmpadas infravermelhas desligadas e balão vazio;
2. Lâmpadas desligadas e balão preenchido com 500 mL de amostra e;
3. As 4 lâmpadas ligadas e balão preenchido com 500 mL de amostra.

Os ensaios foram realizados de 5 em 5 minutos com duração de 60 minutos.

**Teste de estanqueidade do sistema**

Foi feito um teste de estanqueidade do sistema para garantir a ausência de vazamentos. Com o sistema vazio, sem adição da água, o sistema foi fechado e aplicado vácuo durante 30 minutos, chegando ao nível de vácuo da ordem de 0,9 Torr, sendo que nos primeiros 10 minutos o resultado já estava muito próximo ao resultado final. A partir desse momento, foi fechada a válvula da bomba de vácuo e o aumento da pressão foi acompanhado. Isso porque, caso houvesse algum vazamento pelas conexões do sistema, o ar de fora do sistema seria empurrado através desses orifícios por conta da pressão atmosférica. Depois de quase uma hora de teste, a pressão medida no sistema aumentou poucas ordens de grandeza, chegando a uma faixa de 2 Torr, o que é um valor de vazamento aceitável para um sistema como esse. Também foi calculado a estanqueidade do sistema, usando a equação 3, e se chegou-se a Taxa de vazamento Q é de $1{,}8.10^{-3}$ torr.l/s.

Uma vez feitos os testes de estanqueidade, partiu-se para os testes com água, para verificar a pressão de vapor, sem que houvesse o aquecimento, para atestar a veracidade dos resultados obtidos até o momento e chegou-se ao ponto onde a pressão de vapor da água obtida experimentalmente, tratou-se da mesma encontrada na literatura, conforme Tabela 1.

**Tabela 1. Teste de vácuo em sistema, incluso água salgada, sem fonte de aquecimento**

| tempo (min) | T1 água (ºC) | T2 vapor(ºC) | pressão (Torr) |
|---|---|---|---|
| 0 | 18,5 | 18,9 | 680 |
| 1 | 17,3 | 17,3 | 9,8 |
| 2 | 15,8 | 16,2 | 9,8 |
| 3 | 14,7 | 16 | 9,4 |
| 4 | 13,7 | 15,8 | 9,2 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5 | 13,1 | 15,7 | 9,1 |
| 6 | 12,4 | 15,6 | 9 |
| 7 | 11,9 | 14,4 | 8,9 |
| 8 | 11,4 | 14,7 | 8,8 |
| 9 | 11 | 15,4 | 8,7 |
| 10 | 10,5 | 15,7 | 8,6 |
| 11 | 10,2 | 15,7 | 8,5 |
| 12 | 10 | 15,7 | 8,4 |
| 13 | 9,7 | 15,8 | 8,3 |
| 14 | 9,4 | 15,8 | 8,2 |
| 15 | 9,2 | 15,6 | 8,2 |
| 16 | 9,1 | 15,7 | 8,1 |
| 17 | 8,8 | 15,1 | 8 |
| 18 | 8,6 | 15,3 | 7,9 |
| 19 | 8,5 | 15,2 | 7,9 |
| 20 | 8,3 | 15,1 | 7,8 |
| 25 | 7,6 | 14,5 | 7,6 |
| 30 | 7,5 | 13,5 | 7,4 |
| 35 | 6,7 | 12 | 7,3 |
| 40 | 6,4 | 12 | 7,2 |
| 45 | 6,2 | 9,9 | 7,1 |
| 55 | 5,8 | 13,6 | 6,9 |
| 60 | 5,7 | 14 | 6,9 |
| 65 | 5,6 | 13,7 | 6,8 |
| 67 | 5,5 | 13,6 | 6,8 |

Para tal, foi possível observar que com o passar do tempo, e durante o processo de bombeamento, consequentemente diminuição da pressão, a água perde energia, pois há geração de vapor. Entretanto esse processo se estabiliza depois de 67 minutos, uma vez que é atingido a pressão de vapor da água, conforme demonstra-se nas figuras 8 e 9.

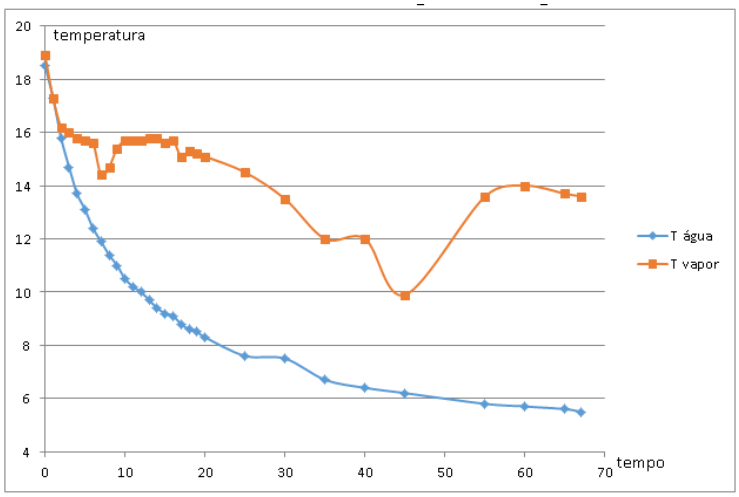


**Figura 8. Temperatura em relação ao tempo durante o processo de bombeamento com a amostra de água.**

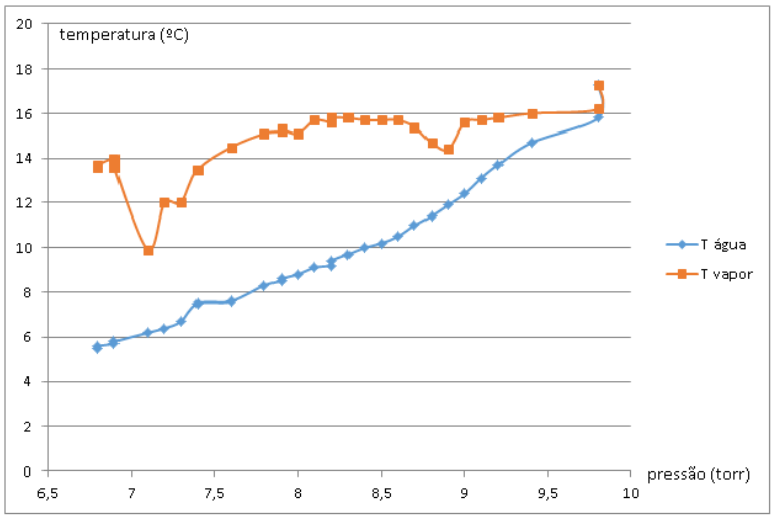


**Figura 9. Temperatura em relação à pressão durante o processo de bombeamento com a amostra de água.**

**Determinação do melhor arranjo experimental**

Das medidas de temperatura, foram obtidas as curvas respectivas ao uso de 1, 2, 3 e 4 lâmpadas ao mesmo tempo, como fonte de aquecimento da água salgada, sem fazer vácuo, sistema fechado, considerando distâncias de 4cm, 10 cm e 20 cm em relação ao balão volumétrico, conforme gráficos 10 a 13. O tempo do teste, foi inicialmente proposto para durar 90 minutos, entretanto, o tempo ficou mais diretamente relacionado a observação dos fenômenos, de acordo com que eles foram acontecendo, fazendo que os tempos dos testes fossem diferentes.

Para a figura 10, a energia transferida pela lâmpada em forma de calor, mesmo depois de 90 minutos de teste, não foi suficiente para a água atingir a temperatura de ebulição, em torno de 97,6ºC, em São Paulo. E com o aumento da distância da lâmpada, a transferência de calor é menor, de 4 cm para 10 cm, a transferência de calor é em torno de 28% menor, enquanto que de 10 cm para 20 cm seria em torno de 24%.

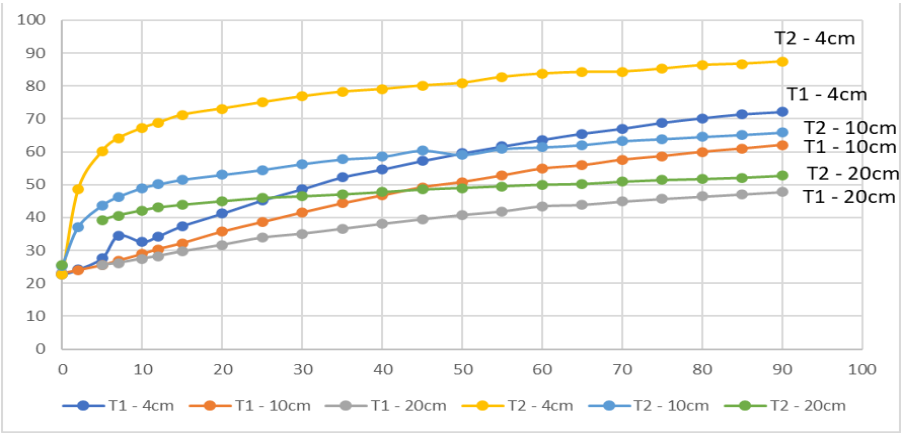


**Figura 10. Temperatura em relação ao tempo, 1 lâmpada, sendo T1 medida de temperatura feita na água e T2 medida feita no vapor (ºC)**

Na figura 11, ainda não foi possível atingir a temperatura de ebulição da água, usando 2 lâmpada como fonte de calor. E ainda, não foi possível continuar o teste, após 60 minutos, com a distância de 4 cm, isso porque a temperatura medida dentro do balão, na região onde estaria o vapor formado, excedeu a temperatura limite de trabalho do PVC, o que poderia gerar um risco de danificar a estrutura, por esse motivo o teste teve o tempo limitado.

De qualquer maneira, ainda considerando passados de 60 minutos de teste como referência, de 4 cm para 10 cm, a transferência de calor é em torno de 1% menor apenas, enquanto que de 10 cm para 20 cm seria em torno de 31%.

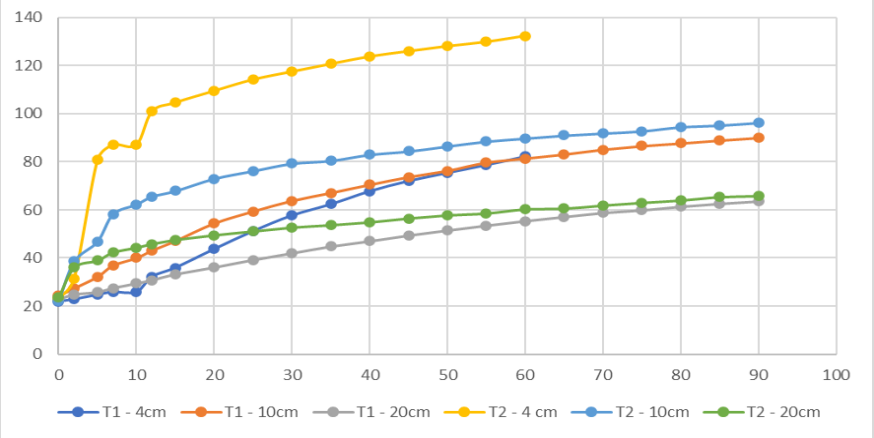


**Figura 11. Temperatura em relação ao tempo, 2 lâmpadas sendo T1 medida de temperatura feita na água e T2 medida feita no vapor (ºC)**

Nas figuras 12 e 13, tem-se os mesmos limitantes e relação a temperatura, tempo de teste e segurança para a integridade das conexões, entretanto, com a distância de 20 cm, foi possível chegar a temperatura de ebulição da água para ambos os casos.

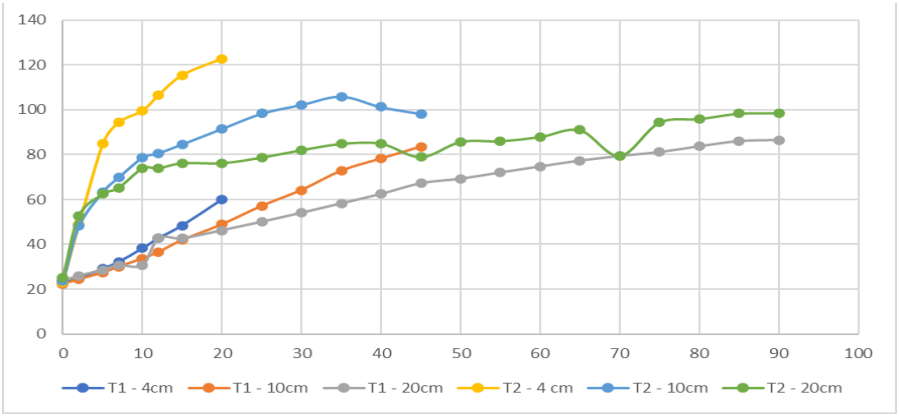


**Figura 12. Temperatura em relação ao tempo, 3 lâmpadas sendo T1 medida de temperatura feita na água e T2 medida feita no vapor (ºC)**

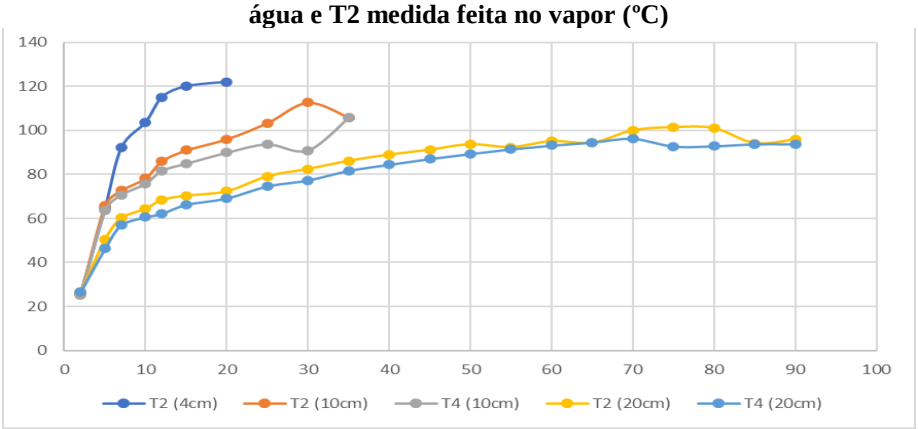


**Figura 13. Temperatura em relação ao tempo, 4 lâmpadas sendo T1 medida de temperatura feita na água e T2 medida feita no vapor (ºC).**

Depois de obter-se esses dados, foi possível verificar como se dá o aumento da temperatura da água com o uso das lâmpadas.
Portanto, com isso chegou-se a conclusão que para o desenvolvimento do estudo, o arranjo ideal seria com 4 lâmpadas de aquecimento, com sistema fechado, 500 ml de água salgada no balão, 60 minutos de teste, utilizando o melhor nível de vácuo da bomba, conforme figura 14.

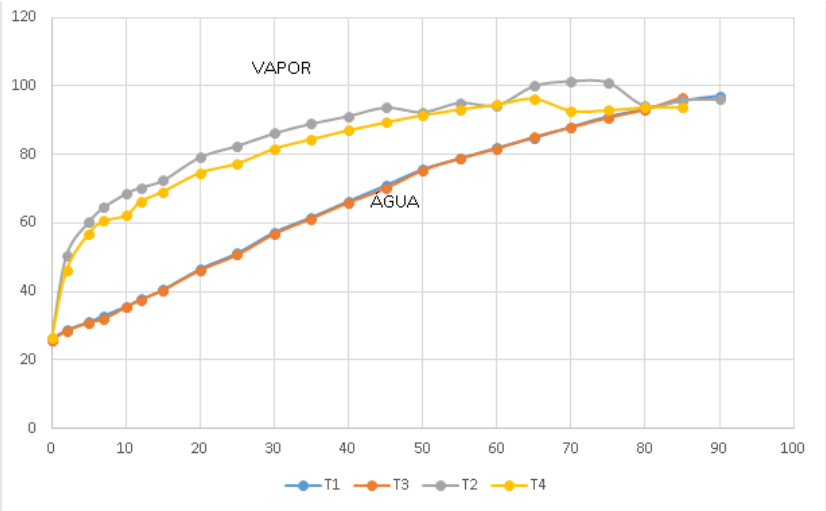


**Figura 14. Temperatura em relação ao tempo, 4 lâmpadas, sendo T1 medida de temperatura feita na água e T2 medida feita no vapor (ºC), vácuo de 9,6 Torr.**

Foi possível obter que, 1 minuto após ligar a bomba de vácuo, a pressão passou de 630 Torr (pressão atmosférica em São Paulo) para 47 Torr, e continua caindo. Passados 30 minutos de teste, o nível de vácuo se mantém constante até o final do teste, limitado à pressão de vapor da água.
Comparado com a figura 13, pode-se notar que aplicando o vácuo, conseguiu-se manter a temperatura da água e do vapor abaixo de 100 graus, sendo possível verificar a formação de gotículas nos condensadores, bem como, coletar água doce no recipiente coletor.

**Ensaio de verificação da eficiência energética**

Outro ensaio realizado, foi o de verificação da eficiência energética do sistema. O ensaio de eficiência energética se baseou nas leis da termodinâmica e fenômenos do transporte. O volume da amostra foi fixado em 500 mL para cada ensaio, fixou-se também o tempo de duração do ensaio para 30 minutos, onde as medições de temperatura da amostra e do vapor, feitas a cada 2 minutos pelos termopares.
Foram utilizados dois tipos de amostras: a água salina e água potável (da torneira), com o intuito de comparar os resultados e promover maior confiabilidade nos resultados. Realizaram 03 ensaios para cada amostra, usando 01, 02 e 04 lâmpadas. Para a medição, foram utilizados dois pares de termopar, um par em contato com a amostra (dentro do líquido) e outro no vapor. Foi utilizada também uma balança de precisão para pesar a amostra no início e no fim do experimento.
Nesta etapa da pesquisa, o objetivo principal foi a medição da eficiência energética do sistema, onde pretende-se determinar a irradiação infravermelha, determinando o seu potencial para compará-lo com a energia solar. Basicamente seria avaliar o quanto cada watt da lâmpada é eficaz para aquecer a amostra. Para isso o protótipo foi remodelado mantendo apenas o balão volumétrico, e as 4 lâmpadas e os termopares. Foram realizados ensaios para a comprovação da eficiência dos termopares e a eficiência da radiação da lâmpada está sendo estudada.
O fundamento físico do sistema seria o desenvolvimento da modelagem termodinâmica do processo de transporte da energia luminosa para a massa de água e o estudo da eficiência energética.
Para verificar a radiação luminosa em função do ângulo de emissão da luz emitida pela lâmpada utilizada no processo de dessalinização, foi construída uma mesa com um semicírculo, graduada de 0º a 180º para a medição da iluminância em função dos ângulos submetidos de uma lâmpada posicionada no centro do semicírculo. Para essa medição, foi utilizado um luxímetro digital da marca Minípa, modelo Digital Lux Meter MLM-1020.

## RESULTADOS

Na tabela 2, tem-se os resultados obtidos para os ensaios de dessalinização realizados, com a duração de 1 hora de destilação, 500 ml de volume de água do mar, nível de vácuo limitado à pressão de vapor da água da ordem de 8 Torr. Nesse período foram obtidos em média 175ml de destilado, mantendo-se ainda em média 250 ml de concentrado. Assim calculou-se uma perda média de 15% de destilado, no processo.
Os ensaios foram realizados em triplicata, e colhidas amostras dos três fluxos: água bruta, concentrado e destilado. O ensaio de coliformes totais foi realizado segundo a norma técnica CETESB L5.202.

**Tabela 2. Resultados físico-químicos e microbiológicos dos ensaios**

| | condutividade (µS/cm) | | | Turbidez (UT) | | | Cor (UC) | | | PH | | | Coliformes totais (NMP) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CONCENTRADO | 91100 | 91300 | 91000 | 0,63 | 0,39 | 0,65 | 38 | 33 | 30 | 8,85 | 8,96 | 8,99 | < 1,1 | < 1,1 | < 1,1 |
| DESTILADO | 79 | 79,1 | 79,1 | 0,52 | 0,41 | 0,45 | 5 | 3 | 4 | 4,21 | 4,18 | 4,19 | < 1,1 | < 1,1 | < 1,1 |
| ÁGUA BRUTA | 51900 | 51400 | 51400 | 0,39 | 0,39 | 0,49 | 25 | 22 | 18 | 8,70 | 8,76 | 8,78 | 4,6 | 2,6 | 4,6 |

Em relação ao estudo energético do arranjo experimental, além do detalhamento do mesmo e do sistema de fonte de aquecimento, têm-se também resultados sobre o desempenho do processo de aumento de temperatura da amostra, desenvolvimento da modelagem termodinâmica do processo de transporte da energia luminosa para a massa de água e do estudo da eficiência energética.
Com os resultados obtidos, observou-se que o comportamento da temperatura assim como o da radiação foi satisfatório, atendendo as expectativas de crescimento proporcional de acordo com a quantidade de lâmpadas usadas, do mesmo modo que a intensidade de radiação de acordo com a posição do luxímetro, sendo sempre mais intenso na posição central (90º) e diminuindo gradualmente de acordo com o posicionamento do luxímetro para o ângulo 0º ou 180º.
A relação de tempo versus aquecimento da massa de ar e água foi proporcional para o uso de uma lâmpada, sendo praticamente o dobro para o uso de duas e o quádruplo do uso de uma para as quatro.
A principal vertente para possíveis divergências nos resultados dos experimentos é a leitura das temperaturas. A leitura é feita de uma forma dinâmica pelo visor do termopar e precisa-se de muita cautela para anotar o valor exato no tempo. Outro fator que nos ocorreu foi a leitura da temperatura do vapor, que ao chegar em um estado de aquecimento elevado, começaram a formar gotículas condensadas da amostra no sensor do termopar, alterando o valor real da temperatura amostrada.
Foi implementado o estudo da eficiência energética usando o luxímetro para medição da radiação luminosa em função do ângulo de emissão da luz emitida pela lâmpada.
Para continuidade e evolução da pesquisa, pretende-se trabalhar na conversão desses resultados em lux para watts para estudar o consumo da energia e potencialmente, comparar com a radiação solar.

## CONCLUSÃO

Para os testes do protótipo, foi de suma importância a colocação do anteparo para que a transferência de energia em forma de calor, providenciada pelas lâmpadas acontecesse de maneira mais efetiva.
Pôde-se verificar por meio dos resultados, que o arranjo experimental proposto, proporcionou a retenção dos sais da água bruta, produzindo com principal produto, a água dessalinizada, livre da presença de coliformes totais nos ensaios realizados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. JOUSTEN, K.; *Handbook of Vacuum Technology*.
2. ATKINS, P; PAULA, de J.; *Físico-química, Fundamentos*, 5ª Ed. 2011.
3. ALKAISI, Ahmed; MOSSAD, Ruth; SHARIFIAN-BARFOROUSH, Ahmad. A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy. *Energy Procedia*, [S.L.], v. 110, p. 268-274, mar. 2017.

4. Curto D, Franzitta V, Guercio A. *A Review of the Water Desalination Technologies*. Applied Sciences, 2021.
5. Noreddine Ghaffour, Thomas M. Missimer, Gary L. Amy. *Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability*. Desalination. volume 309, 2013.
6. United Nations Climate Technology Center e Network. Seawater Desalination. Disponível em: https://www.ctc-n.org/technologies/seawater-desalination. Acesso em: 07. jan. 2023.
7. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Norma técnica L5.202: Coliformes totais, coliformes termotolerantes e Escherichia coli - Determinação pela técnica de tubos múltiplos.* São Paulo: Cetesb, 2018.