

26º. Encontro Técnico AESABESP

INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE VÁCUO NA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUAS SALOBRAS E SALINAS POR MEIO DE DESTILAÇÃO TÉRMICA

Ana Paula Pereira da Silveira⁽¹⁾

Bióloga pela Fundação Santo André e Tecnóloga em Saneamento Ambiental, pela FATEC-SP. Mestre em Tecnologias Ambientais pelo Centro Paula Souza. Co-autora do livro *Ciclo Ambiental da Água*. Foi docente da FATEC-SP. É atualmente tecnóloga da SABESP e Membro do GEP - Dessalinização de águas salobras e salinas da FATEC-SP.

Ariovaldo Nuvolari

Tecnólogo em Construções Cívicas – Obras Hidráulicas, pela FATEC-SP, mestre e doutor em Recursos Hídricos e Saneamento, pela FEC-UNICAMP. Professor da FATEC-SP. Coordenador do GEP - Dessalinização de águas salobras e salinas da FATEC-SP. Coordenador e co-autor do livro: *Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola*, co-autor dos livros: *Reúso da água e Ciclo Ambiental da Água*. Autor do *Dicionário de Saneamento Ambiental*.

Francisco Tadeu Degasperi

Bacharel em Física pelo Instituto de Física da USP, mestrado e doutorado pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp. Trabalhou no Instituto de Física da USP. Professor em tempo integral na FATEC-SP. Montou e coordena o Laboratório de Tecnologia do Vácuo - LTV. É coautor de livro de física voltado à graduação de tecnologia. Atua também no programa de mestrado profissionalizante da pós-graduação do CEETEPS.

Wladimir Firsoff

Tecnólogo em Construções Cívicas – Obras Hidráulicas, pela FATEC-SP. Professor da Faculdade de Tecnologia de São Paulo. Membro do GEP - Dessalinização de águas salobras e salinas da FATEC-SP.

Endereço⁽¹⁾: Rua Graham Bell, 647 – Alto da Boa Vista – São Paulo - SP - CEP: 04737-030 - Brasil- Tel: +55 (11) 5682-9807 - e-mail: appsilveira@sabesp.com.br

RESUMO

A dessalinização já está sendo aceita como importante processo de tratamento de água para abastecimento público pelo mundo. Está se tornando um processo economicamente viável para diversas comunidades, pois seus custos estão diminuindo aos níveis dos processos de tratamento convencionais [1].

É de conhecimento de todos, que a água doce disponível no planeta é limitada. Mais de 97% da água é salgada, sendo que pelo menos 2% da água doce está indisponível nas geleiras e *icebergs*. Apenas 0,5% dos recursos hídricos estão disponíveis para consumo humano direto ou para uso agrícola e industrial [1].

Para entender melhor as questões relativas à dessalinização, foi criado um grupo de pesquisa chamado GEP – Dessalinização de Águas Salobras e Salinas, cujos membros pertencem à FATEC-SP. O grupo iniciou os estudos em 2011 com revisões bibliográficas e posteriormente iniciaram-se as pesquisas com a montagem de um protótipo para estudar o binômio vácuo-temperatura na dessalinização por destilação térmica, onde foram realizados ensaios de destilação sob vácuo, em triplicata, sob as seguintes pressões: atmosférica, 600, 500, 400, 300, 200 e 100 mmHg, para verificar a eficiência da utilização de vácuo no processo de destilação.

PALAVRAS-CHAVE: Dessalinização, vácuo.

INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico naturalmente dessaliniza água utilizando energia solar. A água evapora dos oceanos, lagos e superfícies de terra, deixando os sais para trás. Como resultado dessa evaporação, formam-se nuvens que produzem precipitação, que cai sobre a Terra como chuva e neve e percola pelos solos, dissolvendo os minerais e tornando-se cada vez mais salgada [2].

A tecnologia de dessalinização está em uso em todo o mundo para uma ampla gama de propósitos, incluindo o fornecimento de água potável para fins domésticos e de abastecimento público, água para processos industriais, e água tratada de emergência para refugiados ou operações militares [2].

A demanda por água doce e o crescimento populacional estão diretamente relacionados. A população mundial está em torno dos 7 bilhões de habitantes e projetada para dobrar nos próximos 50 a 90 anos, enquanto os recursos hídricos renováveis permanecem constante. Atualmente, mais de 400 milhões de pessoas vivem em regiões com escassez de água. Esta população é estimada para subir para 2,8 bilhões de pessoas até 2025. Isto é, aproximadamente 35% da população total projetada. Pelo menos 1 bilhão dessas pessoas estarão vivendo em países que enfrentam escassez de água absoluta, definida como menos de 500m³/hab/ano [2].

A escassez de água natural, juntamente com eventos como secas prolongadas, já estão afetando grandes áreas em países ao redor do mundo, desde os que mais precisam de água, localizados no Oriente Médio (região em que são geralmente incluídos 18 países: Afeganistão, Arábia Saudita, Bahrein, Qatar, Chipre, Egito, Emirados Árabes Unidos, Iêmen, Israel, Irã, Iraque, Jordânia, Kuwait, Líbano, Sultanato de Omã, Palestina, Síria e Turquia) para países como Austrália, Espanha, China, Sri Lanka, costa oeste dos EUA, a maioria das ilhas oceânicas e até mesmo partes do Reino Unido e do Nordeste do Brasil.

A dessalinização oferece o potencial de uma fonte ilimitada de água doce purificada a partir dos oceanos de água salgada. A população, políticos e gestores de recursos hídricos continuam com a esperança de que o custo-benefício e a segurança ambiental da dessalinização virá para o resgate de regiões carentes de água. Enquanto algumas usinas de dessalinização de água do mar já são vitais para o desenvolvimento econômico em muitas regiões áridas e carentes de água do mundo, muitas ainda são excessivamente caras, mal concebidas, com localização inadequada, e em última análise, inúteis. Os políticos e a população precisam ter um olhar cuidadoso sobre as vantagens e desvantagens da dessalinização e desenvolver uma orientação clara sobre como avaliar e julgar as propostas de novas instalações para evitar erros de projeto [2].

Os benefícios potenciais da dessalinização são grandes, mas os custos econômicos, culturais e ambientais de sua ampla comercialização continuam altos. Em muitas partes do mundo, as alternativas podem proporcionar os mesmos benefícios da dessalinização, com baixos custos econômicos e ambientais. Estas alternativas incluem o tratamento de fontes locais de água de baixa qualidade, transposições de bacias hidrográficas, a reutilização de águas residuárias, e implementação de planos de ordenamento territorial inteligentes. No momento, a única localidade que possui capacidade significativa de dessalinização está no Golfo Pérsico, em ilhas com fontes de água doce limitadas, e em outros locais onde as opções de água doce são limitadas e a população está disposta a pagar preços elevados [2].

Com os objetivos voltados a essa realidade, foi criado um grupo de estudos denominado: GEP – Dessalinização de águas salobras e salinas, cujos integrantes estão vinculados à FATEC-SP – Faculdade de Tecnologia de São Paulo. O grupo iniciou seus estudos no ano de 2011, tendo como objetivo estudar processos de dessalinização por destilação térmica, aliada à aplicação de vácuo, para futuramente estudar sistemas ambientalmente sustentáveis. A partir de 2012, foram coletados dados experimentais em laboratório que estão permitindo a caracterização dos sistemas em estudo, e o comportamento do tempo de destilação e da remoção de sais (com base na medida da condutividade) e com utilização de vácuo no sistema.

Deve-se ressaltar que a evaporação é um processo de perda de energia do sistema termodinâmico, neste caso, o estado energético do sistema deve ser considerado para continuar ocorrendo a evaporação de forma eficiente. Por isso o binômio vácuo-temperatura é empregado. No caso de usinas de dessalinização por destilação térmica, torna-se, então, mais econômica a coprodução, ou seja; unidades de dessalinização operando juntamente com usinas termoelétricas para produção de energia. Nestes casos, o vapor já utilizado para produzir energia elétrica (portanto à baixa pressão), pode ser utilizado para a dessalinização.

Tais arranjos, conhecidos como de dupla finalidade (*dual-purpose*), resultam em redução do custo do combustível principal da usina de dessalinização na faixa de 60 a 70 %, reduzindo assim, o custo da água produzida.

OBJETIVOS

O objetivo do presente estudo é entender os processos atuais da dessalinização, com revisão de literatura e estudar a influência da aplicação de vácuo em sistemas de dessalinização por destilação térmica.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa experimental foi realizada durante os anos de 2012-2014, onde foi definido um protótipo inicial que foi sendo aperfeiçoado a cada ano. O esquema básico utilizado em 2014, 2013 e 2012 é apresentado nas Fig. 1, 2 e 3, respectivamente. Os protótipos, basicamente, são compostos por um sistema de aquecimento (manta de aquecimento no ano de 2012 (650W) - 2013 (315W) e, em 2014, quatro lâmpadas de 250W cada, dirigidas para um balão de vidro). Este balão foi ligado a um sistema de arrefecimento, que por sua vez foi ligado a um Kitassato utilizado para receber o destilado. No Kitassato, foi instalada uma bomba de vácuo com um filtro de proteção.

O volume inicial de amostra foi de 500 mL. A pressão foi medida no manômetro instalado na bomba, o qual foi calibrado pelo manômetro de mercúrio. Os ensaios efetuados com este protótipo foram realizados em dias diferentes; definindo, assim, a temperatura inicial a 30°C para evitar a influência da variação de temperatura nos ensaios. A duração de cada teste foi ajustada aos 30 minutos, contados a partir do momento em que a temperatura no ponto 1 (no balão) atingiu os 30°C.

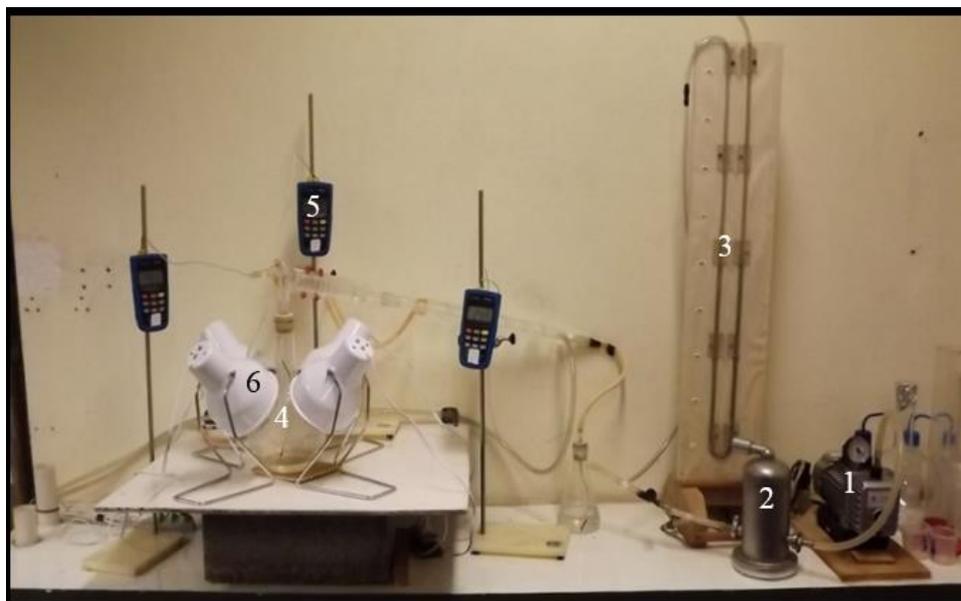
A partir de 2013, no decorrer de cada ensaio, a temperatura foi medida por três termopares colocados em pontos diferentes (em 2012, a temperatura foi medida apenas por um termômetro simples, na parte superior do balão):

P1 - Um ponto de medição de temperatura localizado no interior do balão contendo a água bruta em processo de aquecimento. Este líquido no fim de cada ensaio foi chamado salmoura ou concentrado salino; devido a salinidade dele ser muito maior do que a salinidade da água bruta;

P2 - Temperatura ponto de medição situado na parte superior do balão em processo de aquecimento da água bruta. De fato, este termopar mede a temperatura do vapor que passa para o sistema de arrefecimento;

P3 - Ponto de medição de temperatura localizado dentro do Kitassato que recebe o destilado.

Os ensaios foram realizados em triplicata, mantendo sempre a mesma pressão no Kitassato durante cada teste.



- 1- Bomba de vácuo
- 2- Filtro de proteção
- 3- Manômetro de mercúrio
- 4- Balão com a amostra
- 5- Termopar
- 6- Lâmpadas

Figura 1. Sistema de destilação usado em 2014

A bomba de vácuo, foi usada para fornecer as seguintes pressões: 700 mmHg (valor estimado da pressão atmosférica local em São Paulo), 600, 500, 400, 300, 200 e 100 mmHg. O tempo de ensaio foi medido quando a água no balão atingiu 30°C. As temperatura inicial e final, o volume inicial e final, o pH (O valor de pH da água é um fator muito importante em operações de pré-tratamento nas usinas de dessalinização, bem como um fator importante na prevenção de corrosão nas tubulações. Esta é uma característica química fundamental da água. As reações químicas, tais como a corrosão ou incrustação, dependerão da água ser ácida ou básica) e a condutividade da água bruta, do concentrado e do destilado foram usados como parâmetros de controle. A condutividade é um fator extremamente importante para a dessalinização, pois proporciona uma medida aproximada da quantidade de sais presentes na água. Quanto maior a concentração de sais dissolvidos, maior é

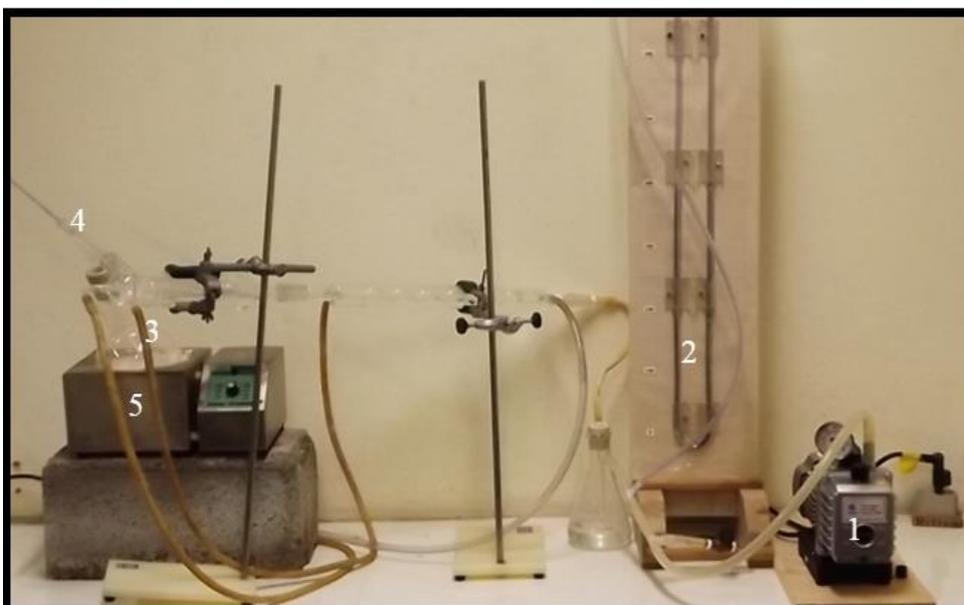
a capacidade da solução para conduzir eletricidade. A água pura é um condutor muito pobre, enquanto a água do mar é um bom condutor [1].



- 1- Bomba de vácuo
- 2- Filtro de proteção
- 3- Manômetro de mercúrio
- 4- Balão com a amostra
- 5- Termopar
- 6- Manta de aquecimento

Figura 2. Sistema de destilação utilizado em 2013

O sistema de vácuo (figura 4), foi construído principalmente de vidro. Mesmo com a instalação de tubos de pequeno diâmetro com cerca de 7 milímetros, o processo de transporte de gases e de vapor foi realizado de forma eficiente. O controle do bombeamento foi realizado através da abertura e fechamento de uma válvula instalada anterior à bomba de vácuo. Com este exemplo é mostrado em esboço um sistema de vácuo para a remoção de vapor de água. Vale ressaltar que os vapores em geral são difíceis de bombear, porque as bombas de vácuo, geralmente, apresentam alguma dificuldade em bombear vapores; as bombas mecânicas de palhetas têm seu funcionamento prejudicado, porque a água se mistura com o óleo da bomba e afeta a lubrificação. Para isso, foi instalado um filtro para reter o vapor de água e impedir a sua chegada à bomba de vácuo.



- 1- Bomba de vácuo
- 2- Manômetro de mercúrio
- 3- Balão com a amostra
- 4- Termômetro
- 5- Manta de aquecimento

Figura 3. Sistema de destilação utilizado em 2012

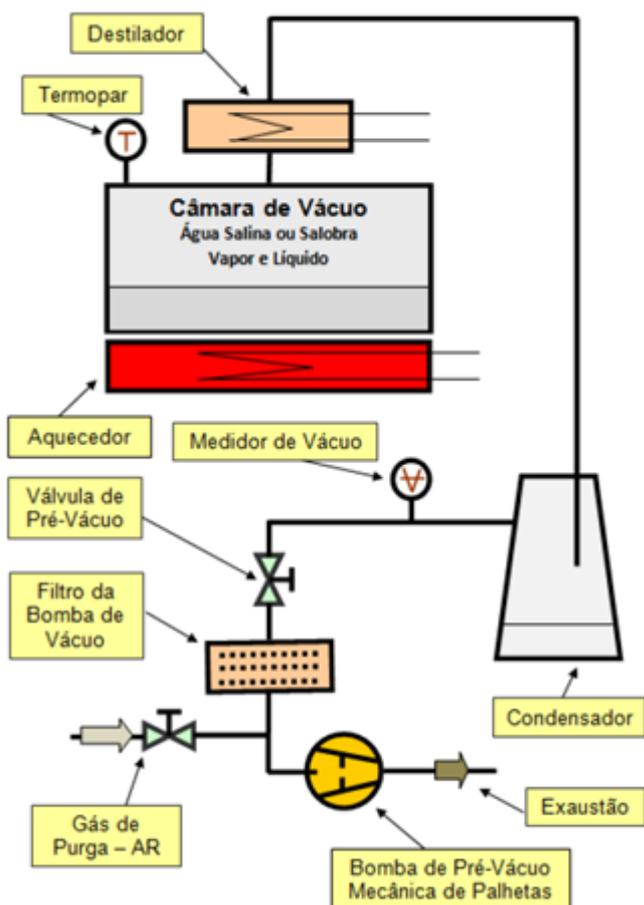


Figura 4. Sistema de vácuo

RESULTADOS

A Tabela 1 mostra as pressões aplicadas para os valores dos volumes de destilado e concentrado (média de três ensaios) obtidos durante os anos 2012, 2013 e 2014, e a tabela 2, compara os resultados de alguns parâmetros de controle para pressões de 700-100 mmHg nos anos de 2012-2014.

Tabela 1. Volumes de destilado e concentrado obtidos utilizando diferentes fontes de energia

P_{EFET} = pressão efetiva (mmHg)	700	600	500	400	300	200	100
V_{DEST} - Volume de destilado (mL) em 2014	89	89	96	101	106	107	111
V_{DEST} - Volume de destilado (mL) em 2013	120	118	138	125	153	150	153
V_{DEST} - Volume de destilado (mL) em 2012	235	222	246	236	245	248	270
V_{CONC} - Volume de concentrado (mL) em 2014	411	411	404	399	394	393	389
V_{CONC} - Volume de concentrado (mL) em 2013	385	387	383	370	355	352	342
V_{CONC} - Volume de concentrado (mL) em 2012	260	268	259	262	253	245	222

Analisando a Tabela 1, observa-se que houve alguma variação no volume de destilado produzido para os anos de 2012, 2013 e 2014. Isso ocorreu devido à manta de aquecimento utilizada em 2012 trabalhar com tensão de 220V e potência de 650W. A utilizada em 2013 trabalha com tensão de 110V e potência de 315W, que é uma potência 2,06 vezes menor do que a anterior. Já em 2014, 450W lâmpadas cada, foram usadas.

Observa-se também que quanto menor for a pressão aplicada ao sistema, maior será o volume do destilado e, conseqüentemente, menor o volume de concentrado.

As Figuras 4 e 5 mostram gráficos que relacionam a pressão efetiva aplicada aos volumes de destilado e concentrado, respectivamente (média de 3 testes), obtidas nos anos de 2012, 2013 e 2014.

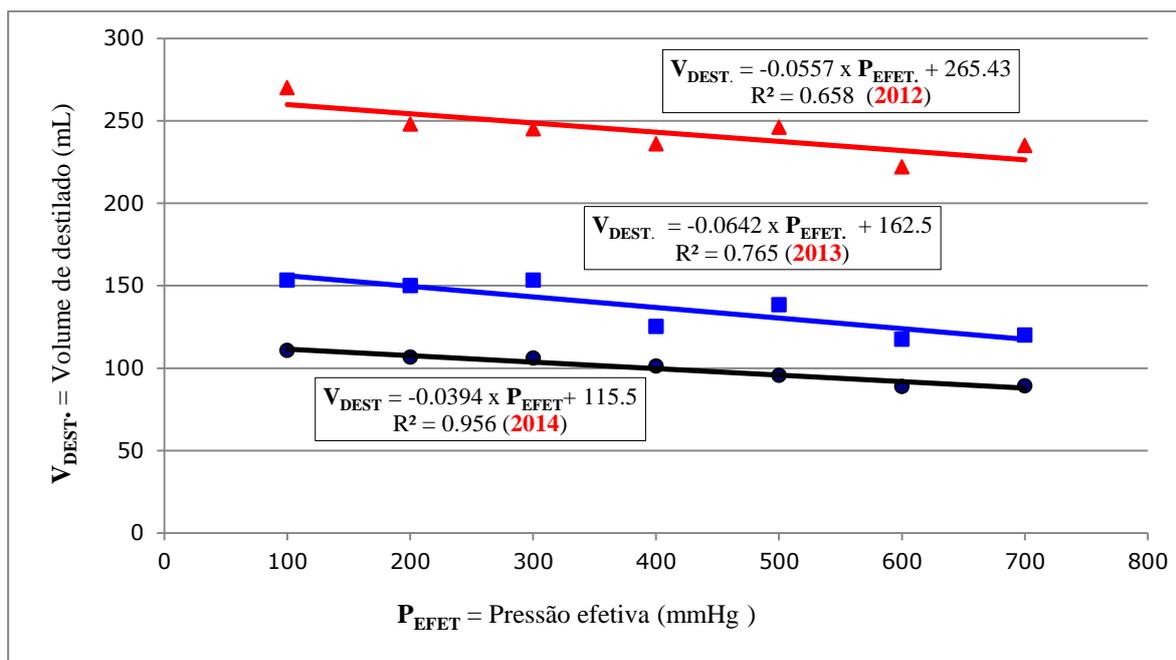


Figura 5. Comparação dos volumes de destilado obtidos em 2012, 2013 e 2014

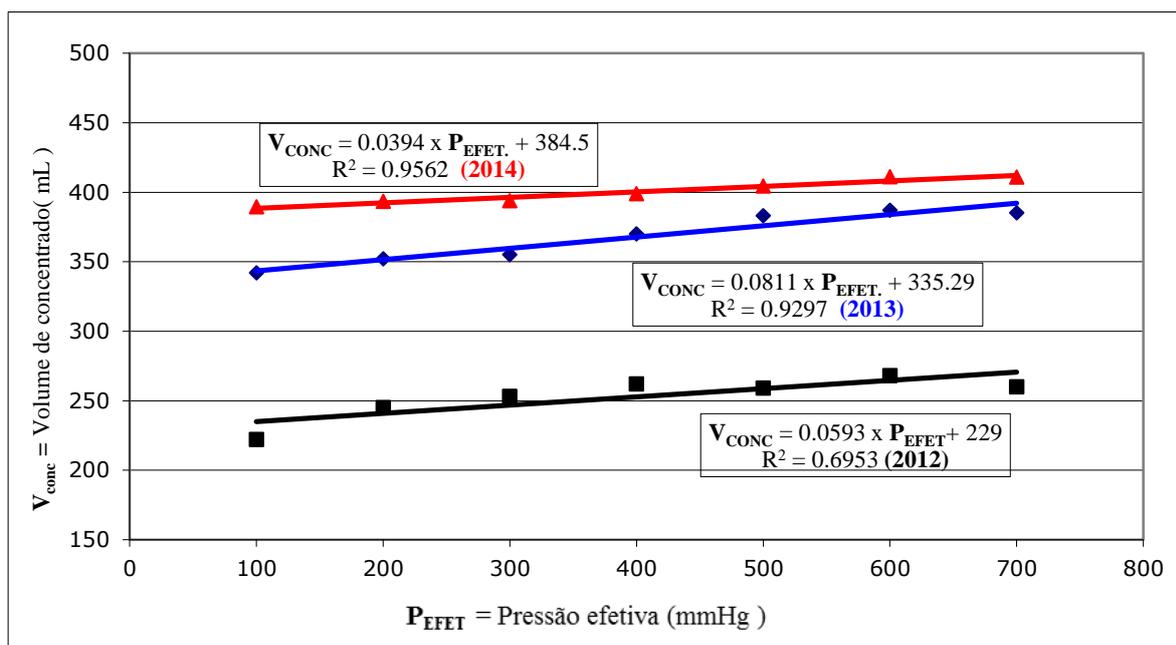


Figura 6. Comparação dos volumes de concentrado obtidos em 2012, 2013 e 2014

Analisando as figuras 5 e 6, é possível observar que houve boa correlação entre a pressão efetiva aplicada e o volume de destilado e concentrado durante os três anos, de modo que, quanto menor for a pressão aplicada ao sistema, maior será o volume de destilado produzido e consequentemente, menor será o volume de concentrado.

A Tabela 2 apresenta os valores médios de alguns parâmetros de controle que foram analisados nesta pesquisa. Observou-se que a porcentagem de remoção de sal foi maior do que 99% em todos os ensaios. Percebeu-se que quanto menor for a pressão aplicada ao sistema, maior será a quantidade de destilado produzida.

É possível ver alguns resultados de pH de destilado inferior a 4,0, e uma água com um pH de 4,2 ou menos, sem conter qualquer alcalinidade é considerada uma água ácida; contém ácido carbônico ($H_2CO_3 = \text{água} (H_2O) + \text{dióxido de carbono, } CO_2$) e pode conter ácidos minerais livres e precisam de ser corrigidos para evitar problemas de corrosão nos tubos.

Tabela 2. Temperaturas finais obtidas em 2012, 2013 e 2014

P_{EFET} = pressão efetiva (mmHg)	700	600	500	400	300	200	100
P2 = Temperatura final na parte superior do balão (°C) 2012	96	92	87	82	75	66	52
P1 = Temperatura final dentro do balão (°C) 2013	100	97	91	84	78	70	58
P2 = Temperatura final na parte superior do balão (°C) 2013	97	91	84	76	69	60	48
P3 = Temperatura final no Kitassato (°C) 2013	21	20	22	22	22	22	28
P1 = Temperatura final dentro do balão (°C) 2014	97	94	89	84	77	68	58
P2 = Temperatura final na parte superior do balão (°C) 2014	97	89	85	80	72	65	58
P3 = Temperatura final no Kitassato (°C) 2014	21	23	24	23	23	25	23

Obs. No ano de 2012, a temperatura foi medida apenas na parte superior do balão.

A Tabela 2 mostra que, quanto menor a pressão aplicada ao sistema, mais baixa será a temperatura final do sistema. Foi interessante notar que, em 2012 e 2013, a manta de aquecimento sempre foi usada na temperatura máxima de aquecimento para que não houvesse interferência na temperatura final. A temperatura final no concentrado variou de 100°C (para a pressão atmosférica local, = 700 mmHg) a 58°C (para a pressão de 100 mmHg) em 2013 e 97°C (para a pressão atmosférica local = 700 mmHg e 58°C (para a pressão de 100 mmHg) em 2014, que mostra que, com a aplicação de vácuo no sistema, pode-se trabalhar com temperaturas muito mais baixas, minimizando os problemas de incrustação. A temperatura final do destilado, que pouco variou, apenas mostrou uma pequena tendência para cima, com a diminuição da pressão.

Tabela 3. Comparação do resultado dos parâmetros de controle para as pressões 700 – 100 mmHg em 2012 - 2014

Pressão mmHg	Ano	Volume (mL)		Condutividade (microSiemens/cm)				pH		
		Concentrado	Destilado	Amostra	Concentrado	Destilado	% rem.	Amostra	Concentrado	Destilado
700	2014	411	89	55150	92300	159	99,7	7,5	8,2	4,6
	2013	385	120	64.567	88.500	352	99,5	6,2	7,3	10,5
	2012	260	235	50.550	81.633	117	99,8	6,2	7,5	8,4
600	2014	411	89	56100	93400	90	99,8	7,7	8,1	5,3
	2013	387	118	61233	93533	472	99,2	7,8	8,6	11,8
	2012	268	222	49400	76800	231	99,5	7,1	7,8	8,9
500	2014	404	96	57133	103367	93	99,8	8,1	8,2	5,0
	2013	383	138	49300	61833	182	99,6	6,5	7,6	7,4
	2012	259	246	50617	84833	491	99,0	7,0	6,8	9,3
400	2014	399	101	55833	106467	108	99,8	8,0	8,1	4,8
	2013	370	125	54400	84100	134	99,8	5,3	7,2	5,9
	2012	262	236	50983	85300	371	99,3	6,9	7,4	8,6
300	2014	394	106	53067	111767	114	99,8	7,5	8,2	4,4
	2013	355	153	56833	70367	122	99,8	4,8	6,8	6,6
	2012	253	245	50387	85633	293	99,4	6,7	7,4	9,5
200	2014	393	107	53067	112967	99	99,8	8,0	7,9	4,2
	2013	352	150	58933	84333	283	99,5	7,2	8,1	11,5
	2012	245	248	50747	87167	211	99,6	7,2	7,4	7,9
100	2014	389	111	52733	117767	150	99,7	7,7	7,8	4,1
	2013	342	153	64567	88500	352	99,5	6,2	7,3	10,5
	2012	222	270	50373	95167	365	99,3	7,2	7,6	9,9

CONCLUSÕES

O tempo de ponto de ebulição inicial diminui com a diminuição da pressão efetiva aplicada.

A temperatura final do concentrado diminui com a diminuição da pressão aplicada. A temperatura final do destilado não apresentou variações significativas com a pressão efetiva aplicada, o que comprova o bom funcionamento do sistema de refrigeração adotado.

O volume final do concentrado diminui e o volume final do destilado aumenta com a diminuição da pressão efetiva aplicada.

O vácuo está presente em muitas situações da vida cotidiana. Por exemplo, quando respiramos estamos realizando vácuo em nossos pulmões, devido à ação mecânica da caixa torácica. Tanto na indústria, ciência e tecnologia, o vácuo está presente e representa um papel importante na maioria dos casos.

Com base nos resultados, pode se chegar à conclusão de que a aplicação de vácuo ao sistema aumenta a produção de destilado sem prejudicar a remoção condutividade, como pôde ser visto na Tabela 3.

É significativo que todo o trabalho feito até agora teve como objetivo principal a confirmação da expectativa de quantificar a eficácia do uso de vácuo no sistema. Afinal de contas, apenas com um ganho no volume final do destilado é que a utilização de vácuo pode ser percebida como vantajosa, pois há sempre o gasto de energia para produzir o vácuo. No entanto, a utilização do vácuo oferece também uma outra vantagem; o fato de que eles podem trabalhar com temperaturas mais baixas no sistema, minimizando os problemas relacionados à incrustação.

Os processos de destilação térmica se tornam mais viáveis quando utilizados com a planta de dupla finalidade (produção de eletricidade e de destilação térmica).

Como continuidade dos trabalhos, está sendo proposto um estudo detalhado sobre o comportamento da pressão de vapor da água salgada, estudar os campos de temperatura, a melhor relação de temperatura e pressão para obtenção da água doce, e os aspectos da condensação durante o processo. Serão realizados também alguns cálculos de modelagem, ou simulação via software especializado para a análise da termodinâmica, melhor temperatura-pressão, campos de temperatura para posterior comparação com os resultados obtidos nos experimentos.

Também será estudada a influência dos níveis de vácuo aplicável, se o tipo de bomba de vácuo utilizada produz ou não melhor eficiência, e estudar a repetibilidade desse processo em caso de precisar ser feito em grande escala (tempo, tamanho dos recipientes, tipo de bomba de vácuo, entre outros fatores). Aprofundamento do estudo do processo de transporte de gases e vapores em baixa pressão; Determinar o campo de temperatura na amostra de água salina ou salobra durante a sua destilação em vácuo; Esses estudos fazem parte do projeto de mestrado do CEETEPS, da aluna Vanessa de Paula sob orientação do prof. Francisco Tadeu Degasperri.

REFERÊNCIAS

1. USBR – United States Bureau of Reclamation. Report n. 072 - Desalting Handbook for Planners. 3rd ed. USDI (United States Department of the Interior), 2003.
2. COOLEY, Heather; GLEICK, Peter H.; WOLFF, Gary. Desalination, with a grain of salt: a California perspective. California: Alonzo Printing, 2006.