

Análise do processo de dessalinização solar com ênfase no método de umidificação e desumidificação

Analysis of the process of solar desalination with emphasis in the humidification and dehumidification method

Bruno Lacerda de Oliveira Campos^{1*} , **Mariana Myriam Campos Fraga¹** ,
Andréa Oliveira Souza da Costa¹ , **Esly Ferreira da Costa Junior¹** 

RESUMO

A falta de água é um problema que afeta muitas regiões do nosso planeta, especialmente ilhas e locais de clima muito seco. Especialistas dizem que essa situação irá se agravar e que, em 2025, cerca de 1,8 bilhão de pessoas sofrerão com essa escassez. Embora métodos tradicionais de dessalinização sejam alternativas bem conhecidas e implantadas para obtenção de água potável, eles não são sustentáveis ambientalmente, porque são geralmente supridos por combustíveis não renováveis, cuja queima intensifica o efeito estufa, trazendo desequilíbrios ao meio ambiente. Outra opção que vem sendo desenvolvida ao longo dos anos é a dessalinização por energia solar. Como se trata de uma forma de energia limpa, abundante e renovável, esse método já é muito indicado em regiões isoladas, de baixa e média demanda. Algumas técnicas são apresentadas neste trabalho, que foca o método de dessalinização por umidificação e desumidificação (DSUD). Essa técnica tem se mostrado a mais eficiente, devido ao seu reaproveitamento de energia. Há ainda muito o que melhorar para viabilizar a sua implantação em grande escala, principalmente em termos de produção de água, energia específica requerida e custo específico de produção de água. Entretanto, a DSUD já se mostrou uma técnica sustentável, promissora, de custo razoável e funcionamento simples. Dessa forma, os autores incentivam maiores investimentos em pesquisas no Brasil na área de dessalinização solar e aproveitamento dos rejeitos do processo, visando à produção de água purificada nas regiões brasileiras que têm deficiência em água potável.

Palavras-chave: dessalinização solar; umidificação; desumidificação; energia renovável; reaproveitamento de energia; eficiência energética.

ABSTRACT

The lack of water is a problem that affects many regions in our planet, specially in very dry places and isles. Experts say that this situation will worsen, and that by 2025 about 1.8 billion people will suffer with water scarcity. Although traditional desalination methods are well-known and implemented alternatives to obtain fresh drinking water, they are not environmentally sustainable, because they are generally supplied by non-renewable fuels, whose combustion intensifies the greenhouse effect, causing disequilibrium to the environment. Another option that has been developed along the years is the desalination by solar energy. Since it is a clean, abundant and renewable type of energy, it is already a good option to isolated regions, whose demand is low or medium. Some technics are shown in this work, which focuses on the humidification-dehumidification desalination method. This technique has shown to be the most efficient one, due to its energy reuse. There is still a long way to go in order to make it viable in large scale, especially in terms of water production, specific energy requirement and specific cost of water production. However, solar desalination by humidification-dehumidification has proven to be a sustainable, promising technic which is reasonably costly and simple to operate. Therefore, the authors encourage more investments in researches in Brazil in the area of solar desalination and use of its rejects, aiming at the production of fresh water in Brazilian regions lacking it.

Keywords: solar desalination; humidification; dehumidification; renewable energy; energy reuse; energy efficiency.

INTRODUÇÃO

O nosso planeta tem apresentado sinais do surgimento de uma crise hídrica. Em agosto de 2014, a parte leste do Mar de Aral, que já foi o quarto maior lago de água salgada do mundo, secou completamente pela primeira vez em 600 anos (ELIASSON, 2015). Ele já sofria com a seca em 2008, como mostrado na Figura 1. Um grande vilão nesse

desastre foi o desvio do curso de rios que o alimentavam para a irrigação de plantações (GUNTHER, 2016). Nesse mesmo ano, no Brasil, um regime anômalo de chuvas trouxe excesso de precipitações no Sul e severa seca no Sudeste e Centro-Oeste do país, levando inclusive à seca da nascente do rio São Francisco pela primeira vez na história. Estudiosos apontam para o desmatamento da floresta amazônica como

¹Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

*Autor correspondente: brunolacerdaoc@gmail.com

Recebido: 22/03/2017 - Aceito: 07/08/2018 - Reg. ABES: 177407

um grande causador desses eventos extremos no Brasil, pois ela regula o clima do continente e o regime de chuvas, e sua depredação para dar lugar a plantações e pastagens causa sérias alterações nesse sistema (ALMEIDA, 2014).

Além do consumo não sustentável de água para diversas atividades e do desmatamento, outros fatores têm contribuído para o surgimento dessa crise, como a demanda crescente de água pelo aumento populacional, a queima de combustíveis fósseis agravando o efeito estufa, o desperdício de água e a poluição de rios. Tudo isso leva a uma redução da disponibilidade de água potável por habitante. É estimado que, em 2025, por volta de 1,8 bilhão de pessoas viverão em regiões nas quais a água será escassa, e cerca de dois terços da população mundial terá alguma deficiência no acesso à água potável. Essas mudanças devem

encarecer progressivamente o preço desse recurso, tornando-o menos acessível, especialmente aos pobres e marginalizados (ELIASSON, 2015).

Essa escassez de água já está presente em zonas áridas, semiáridas, diversas regiões costeiras e ilhas. Nesses locais, não há água doce disponível no solo ou em rios que seja suficiente para a população. Na região semiárida do Nordeste brasileiro, por exemplo, a água contida nos lençóis freáticos tem concentração média de 3 g sal.L⁻¹ água (AGEITEC, 2016), muito acima do limiar entre a água doce e a salobra — de 0,5 g sal.L⁻¹ (BRASIL, 2005) — ou do limite máximo permitido de sólidos totais dissolvidos — de 1,0 g sal.L⁻¹ (BRASIL, 2011) —, sendo então considerada imprópria para consumo humano.

Buscando reverter esse horizonte nada favorável à humanidade, algumas ações urgentes a serem mais intensamente estudadas



Fonte: Gunther (2016).

Figura 1 - Mar de Aral em 1989 e novamente em 2008: (A) jul.-set. 1989; (B) 5 out. 2008. Foto tirada pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA).

e executadas são: a preservação do meio ambiente, a substituição de matrizes energéticas não renováveis por outras que são renováveis, a otimização do consumo de água levando a um uso sustentável desse recurso e a implantação de alternativas para a obtenção de água potável, especialmente em regiões onde ela já é escassa.

Na área de alternativas para a obtenção de água potável, uma opção já bem desenvolvida é o processo de dessalinização de água salgada e de água salobra. Desde meados de 1950, ele tem sido muito estudado, aprimorado e implantado, de forma que sua produção global no fim de 2015 foi superior a impressionantes 86 milhões de metros cúbicos de água por dia (KAPLAN *et al.*, 2017). Algumas das estratégias mais bem-sucedidas desse processo são: osmose inversa, destilação de múltiplos efeitos e destilação *flash* multiestágio.

A osmose inversa (OI) é uma técnica de separação que utiliza membranas semipermeáveis, ou seja, que permitem a passagem de água e impedem a de sal. Ao gerar uma pressão suficientemente grande para vencer a pressão osmótica, o fluxo de água na membrana ocorre da região mais concentrada para a menos concentrada. Essa operação produz águas concentrada em sais (resíduo) e com concentração muito baixa em sais (produto desejado). A qualidade da água doce e sua porcentagem de recuperação dependem muito da água salgada utilizada. Essa recuperação pode variar entre 35 e 50% da água de alimentação (GOMES, 2011).

A destilação de múltiplos efeitos (MED) e a *flash* multiestágio (MSF) utilizam os fenômenos de evaporação e condensação para separar a água dos sais. Como estas são operações que demandam muita energia, a estratégia adotada é dispor vários estágios conectados em série, de forma que o calor liberado em um estágio ou efeito seja utilizado no próximo, empregando a energia de forma eficiente (EL-DESSOUKY; ETTOUNEY, 2002). Nesses sistemas, a solução salina e o vapor de água se encontram em contra corrente.

Embora tenham obtido muito sucesso, esses processos tradicionais apresentam alguns problemas. Eles foram desenvolvidos para altas capacidades de dessalinização de água, de modo que possuem custos iniciais altos e demandam presença permanente de profissionais de manutenção qualificados (MACOUN, 2000), além de exigirem controle muito rígido de temperatura e pressão em cada estágio para manter as condições necessárias do processo de evaporação (EL-DESSOUKY; ETTOUNEY, 2002). Esses fatores tornam-se obstáculos para sua implantação em locais com baixos capital e tecnologia disponíveis, bem como em regiões distantes de grandes centros, que necessitam de pequenas quantidades de água, pois, para pequenas capacidades, não é economicamente viável implantar esses métodos tradicionais (XIONG; WANG; WANG, 2006).

Outro fator importante a ser considerado é a alta demanda de energias elétrica e/ou térmica desses processos. A dessalinização é o processo com maior gasto de energia na área de tratamento de água,

consumindo anualmente pelo menos 75,2 TWh, o que corresponde a 0,4% do consumo global de energia elétrica (BBC NEWS, 2019). Dessa forma, regiões que possuem pequena disponibilidade de energia têm um sério problema para implantar essas operações. Além disso, a maior parte dessa energia provém de fontes não renováveis, como carvão mineral e petróleo, as quais, por não estarem disponíveis para sempre, tornam esses processos não sustentáveis. Eles ainda contribuem para o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, um dos principais compostos causadores do efeito estufa. Esse fenômeno aquece a temperatura média do globo e intensifica os desequilíbrios ambientais, inclusive a própria escassez de água (HEIDARI; PEARCE, 2016). Sendo assim, o uso de combustíveis fósseis para a dessalinização da água salgada devido à disponibilidade insuficiente de água potável contribui para reduzir ainda mais essa disponibilidade.

A utilização de energia solar em processos de dessalinização pode contornar alguns problemas presentes nos processos tradicionais. Ela traz maior sustentabilidade a essa operação, por utilizar uma energia limpa e renovável, e possui grande importância social por ocasionar opções mais viáveis economicamente para regiões isoladas e frequentemente esquecidas, onde a água é escassa ou imprópria para o consumo, melhorando a qualidade de vida da população desses locais. Essas são as motivações que levaram ao desenvolvimento do presente estudo, focado na dessalinização solar, em especial no método de umidificação e desumidificação.

DESSALINIZAÇÃO POR ENERGIA SOLAR

As zonas descentralizadas, com pouca infraestrutura e carentes de água potável, como regiões costeiras, ilhas e o semiárido nordestino, geralmente possuem sol forte e acesso à água salgada ou salobra com relativa facilidade. Essas características parecem sugerir a utilização de processos de dessalinização por energia solar, pois apresentam fatores-chave para a implantação desses métodos alternativos que são obstáculos para os tradicionais.

A utilização da energia solar na dessalinização já é feita há mais de 200 anos. O químico Lavoisier concentrava energia solar em garrafas de destilação utilizando lentes de vidro em 1862. Na cidade de Las Salinas, em 1872, técnicas de destilação utilizando energia solar foram usadas para atender à demanda de água potável de mineiros da região (BISWAS; RUBY, 2012). Foram construídos 64 tanques de madeira cobertos com vidro, totalizando uma área de 4459 m² para disponibilizar 20 mil litros de água dessalinizada (RAY; JAIN, 2011). Isso mostra que há muito tempo a energia solar vem sendo considerada como opção para trazer água potável a regiões isoladas de baixa demanda.

Um fator importante no desenvolvimento desses métodos, que pode se tornar um grande obstáculo, é a variabilidade intrínseca da intensidade solar. A incidência solar sobre a superfície da Terra é variável.

Ela varia ao longo do dia, começando com pouca radiação, aumentando até um ponto máximo e depois caindo progressivamente até chegar a zero, onde permanece por toda a noite. A Figura 2 mostra a variação da intensidade solar ao longo de um dia de operação de dessalinização na cidade de Suez, no Egito (NEMATOLLAHI; RAHIMI; GHEINANI, 2013). Ela também pode sofrer mudanças devido ao tempo, que, ao estar nublado ou chuvoso, pode reduzi-la drasticamente. Há ainda a variação devido à sazonalidade, que aumenta os dias e a intensidade solar no verão e os diminui no inverno, sendo intensificada na medida em que se chega mais próximo aos polos do globo terrestre.

Outro fator essencial a ser observado é a energia específica consumida no processo, pois, ao alimentar uma planta de dessalinização com energia solar, a área dos coletores é diretamente proporcional à demanda energética do sistema (HERMANN; KOSCHIKOWSKY; ROMMEL, 2002). Sendo assim, devem-se minimizar as perdas térmicas e reaproveitar o calor absorvido, para que o custo com equipamentos e o espaço requerido possam ser reduzidos. Podem-se mensurar melhor essas grandezas pela eficiência energética. Ela é entendida como a energia útil do sistema (energia absorvida subtraindo-se as perdas térmicas) dividida pela energia total que incide sobre a placa solar.

Uma medida mais específica do reaproveitamento de calor, que é muito utilizado na área de dessalinização, é o *gain output ratio* (GOR). Para determinada quantidade de água salgada, o GOR é definido como o calor de evaporação somado ao de solução dividido pela energia real gasta para a destilação. Ele significa a razão da quantidade de água purificada produzida na planta em relação à que teria sido produzida caso não houvesse nenhum tipo de recuperação de energia, para um mesmo gasto energético. Em processos bem desenvolvidos como a destilação de múltiplos efeitos, na qual a presença de vários estágios favorece a recuperação de calor, o GOR pode chegar a 20 ou mais (HERMANN; KOSCHIKOWSKY; ROMMEL, 2002).

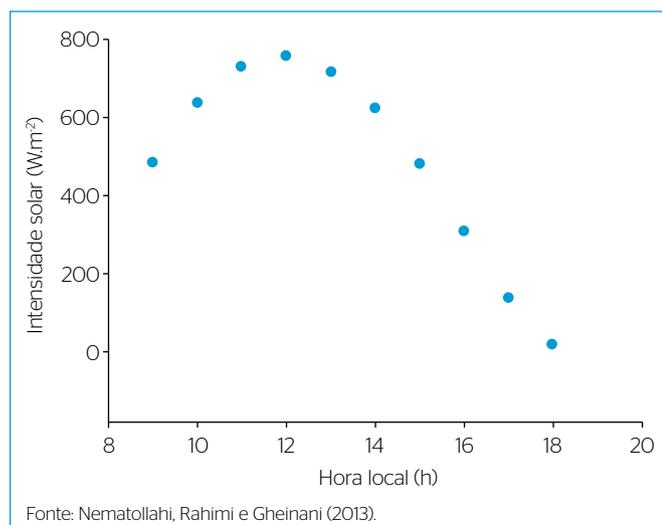


Figura 2 - Insolação solar na Cidade de Suez ao longo do dia.

Ao longo dos anos, várias estratégias foram desenvolvidas por pesquisadores ao redor do mundo, buscando métodos mais eficientes e que atendam às características locais. Alguns desses estudos serão descritos neste trabalho.

Destilação por células fotovoltaicas com coletor solar para pré-aquecimento

Um projeto desenvolvido por Lopes (2004), que teve como local a cidade de São Luís, no Maranhão, consiste em um dessalinizador solar híbrido composto de um coletor solar plano e um evaporador-condensador. A água a ser dessalinizada é pré-aquecida no coletor solar e alimenta o recipiente que funciona como evaporador e condensador, o qual possui resistência elétrica que é alimentada por módulos fotovoltaicos para continuar elevando a temperatura da água até o ponto de ebulição e vaporizá-la. O vapor é condensado e a água purificada é coletada. Esse projeto foi feito para ser ativado no período diurno e desativado no período noturno.

De acordo com os resultados de Lopes (2004), a temperatura média de entrada da água salobra no coletor solar foi de 34,5°C, o aumento médio de temperatura proporcionado por ele foi de 36,6°C, chegando a uma temperatura final média de 70,1°C. A eficiência energética do coletor solar foi significativa (60,1%), proporcionada por energia limpa e renovável. Entretanto, para aquecer essa água de 70,1 até 100,0°C e vaporizá-la, utilizou-se um resistor alimentado por módulos fotovoltaicos, cuja eficiência é baixa.

De acordo com o NREL (2017), que mantém um quadro com a eficiência das melhores células fotovoltaicas desenvolvidas ao longo dos anos, a eficiência de painéis fotovoltaicos medida em laboratório não ultrapassa 30% (com exceção de células de multijunção, utilizadas majoritariamente em satélites, devido ao alto custo). Além disso, Gaglia *et al.* (2017) obtiveram uma eficiência média anual em condições reais de apenas 8,7% para células multicristalinas de silício.

Aproximando a capacidade calorífica da água salobra para 1 kcal. (kg.°C)⁻¹ e seu calor latente de vaporização para 540 kcal.kg⁻¹, percebe-se que, para cada quilograma de água dessalinizada, utiliza-se 36,6 kcal do coletor solar e 569,9 kcal dos módulos fotovoltaicos. Considerando uma eficiência de 8,7% para os módulos fotovoltaicos, a eficiência energética global do processo é da ordem de 11,8%, que é relativamente baixa.

Dessalinização solar direta

A dessalinização solar direta (DSD) ocorre em uma base ou tanque contendo um volume de água salgada ou salobra coberto com uma superfície inclinada transparente, como mostrado na Figura 3. Quando a radiação solar atravessa essa superfície, aquece a água e eleva a taxa de evaporação. O vapor de água formado, ao encontrar com a superfície fria, tende a condensar, tornando possível a captura da água limpa, e deixa para trás sais minerais, particulados e microrganismos nocivos. (BISWAS; RUBY, 2012).

A eficiência do processo é avaliada em função dos parâmetros que influenciam a transmissão da radiação, a taxa de evaporação da água

e de condensação. Esses parâmetros vão desde formato e dimensões do tanque até os materiais de recobrimento.

A profundidade da água na célula foi analisada, e um aumento de 2 para 7 cm no nível da água resultou em uma queda na produtividade, como mostrado na Figura 4 (NAFEY *et al.*, 2000). Esse resultado é condizente com o fato de que, ao elevar o nível de água, se eleva a massa de água e, conseqüentemente, a energia requerida para aumentar a taxa de evaporação. A distância entre o nível da água na base e a cobertura não deve ser maior que 5 ou 6 cm (AL-ISMAILY; PROBERT, 1990).

O material utilizado para a construção tem impacto direto no fluxo de calor e nas equações de balanço de energia. Como superfície transparente, o vidro apresentou melhores resultados em longo prazo quando comparado ao polietileno, que apresenta vantagem em curto

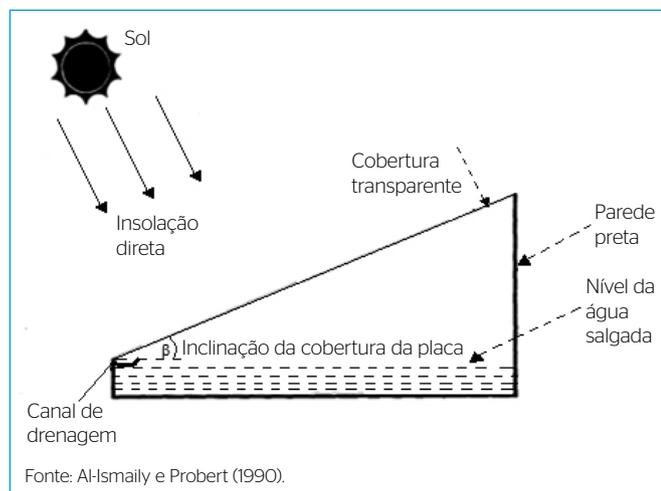


Figura 3 - Esquema de um dessalinizador solar direto.

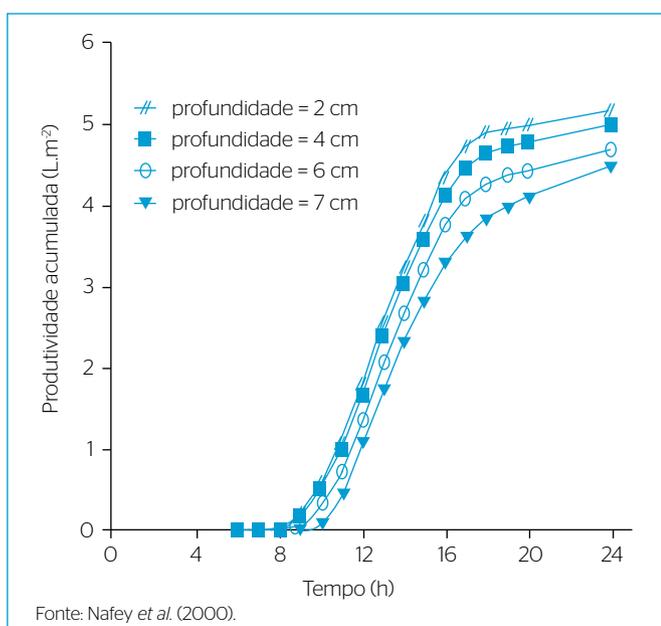


Figura 4 - Produtividade acumulada em função do tempo para diferentes profundidades.

prazo (QIBLAWEY; BANAT, 2008). O ângulo da superfície de recobrimento influencia tanto na transmissão da radiação quanto na drenagem do destilado. Os ângulos ideais variam de acordo com o mês do ano e a latitude (CERDA; GÁNDARA; ZAYAS, 2002).

Vários formatos vêm sendo testados para melhorar o desempenho dessas células. Wassouf *et al.* (2011) compararam dois tipos de células: piramidal de base quadrada e prisma triangular, ambos mostrados na Figura 5. Para uma taxa de radiação de $13,3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, uma área superficial e um período de 7 dias, obteve-se 920 mL no prisma triangular e 478,8 mL na pirâmide de base quadrada. Considerando o preço de construção de cada módulo e estimando seu tempo de vida em quatro anos, calculou-se o custo do litro de água em US\$ 0,046 para o módulo piramidal e US\$ 0,063 para o prisma. Ao se comparar com o preço da água em City West em setembro de 2009, de US\$ 0,0012 por litro, percebe-se que a água dessalinizada é bem mais cara. Entretanto, ao se comparar com o preço da água mineral, os resultados são encorajadores.

Além desses parâmetros, fatores externos, e muitas vezes incontroláveis, têm grande influência na dessalinização solar direta, como a incidência de radiação solar. Observa-se pequena produção nas primeiras horas do dia, que tende a aumentar à medida que a incidência de radiação vai chegando ao ponto máximo, isto é, entre meio-dia e três horas da tarde e, então, começa a cair com o anoitecer. Durante a noite, ocorre ainda cerca de 30% da produção total, já que as temperaturas vão abaixando e a condensação no vidro é favorecida (SILVA *et al.*, 2014).

Analisando a tecnologia do dessalinizador solar direto, existem pontos positivos que devem ser explorados e pontos negativos que precisam ser controlados. Os custos com transporte de água são reduzidos, uma vez que a produção ocorre no consumidor. No entanto, eles requerem grandes áreas para instalação, pois a razão produtividade por área é baixa. Sendo assim, destiladores solares diretos são economicamente viáveis para produções menores que $200 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, em áreas isoladas, porque, para baixa produção, o requerimento de área de instalação não é tão impactante (KUDISH; GALE; ZARMI, 1982).

Outro método de dessalinização que também utiliza energia solar, porém com maior razão produtividade por área, é o de umidificação e desumidificação. O reaproveitamento de energia, levando a níveis de GOR mais altos que os dois métodos solares já citados, aliado à simplicidade no processo, ao baixo custo de operação (WU *et al.*, 2016) e à possibilidade de implantar esse sistema para produções mais elevadas chamaram a atenção dos autores para um estudo mais aprofundado dessa técnica.

DESSALINIZAÇÃO SOLAR POR UMIDIFICAÇÃO E DESUMIDIFICAÇÃO

O método de dessalinização solar por umidificação e desumidificação (DSUD) consiste em um sistema composto de um desumidificador, um coletor solar e um umidificador. Ele divide-se em dois grandes grupos:

os que utilizam o coletor solar para aquecimento do ar e os que utilizam para aquecimento da água. A Figura 6 mostra um fluxograma do processo com aquecimento da água no coletor.

Nessa modalidade, a água do mar (ou salobra) é parcialmente aquecida, no trocador de calor do desumidificador, em contracorrente com o ar quente e úmido proveniente da câmara de umidificação. O aquecimento da água é completado no coletor solar. A água aquecida é alimentada no topo da coluna de umidificação em contracorrente com o ar frio, alimentado na base. A água aquece o ar e é parcialmente evaporada, perdendo calor sensível e latente, tendo seu conteúdo de sólidos aumentado e sendo descartada. O ar quente e úmido que sai da câmara de umidificação alimenta a câmara de desumidificação, fechando o seu ciclo. Esse ciclo pode ocorrer por convecção natural ou forçada, adicionando, no último caso, um ventilador ou um compressor, por exemplo. A água dessalinizada condensada no desumidificador é o produto do processo (FARID *et al.*, 2003; HERMOSILLO; ARANCIBIA-BULNES; ESTRADA, 2012; HAMED *et al.*, 2015).

Esse processo foi projetado para rodar durante o dia, por depender da luz solar, embora também possa ser alimentado por energias eólica e geotérmica ou uma mistura de várias fontes energéticas (MEHRGOO; AMIDPOUR, 2011). Dessa forma, caso a região estudada possua potencial energético em outras fontes renováveis, pode ser vantajoso combiná-las, embora um estudo de viabilidade econômica deve ser levado em conta.

Assim como na DSD, na DSUD, ocorre a evaporação e condensação subsequente da água a temperaturas mais baixas que as de ebulição, reduzindo o gasto com energia (HERMANN; KOSCHIKOWSKY; ROMMEL, 2002). Entretanto, o calor liberado na condensação do vapor na DSUD é reaproveitado para pré-aquecer a água salgada de alimentação, sendo que na DSD essa energia é perdida para o ambiente.

Para obter a produção ótima de água purificada na DSUD, o ar deve entrar na coluna de desumidificação o mais úmido possível e sair o mais

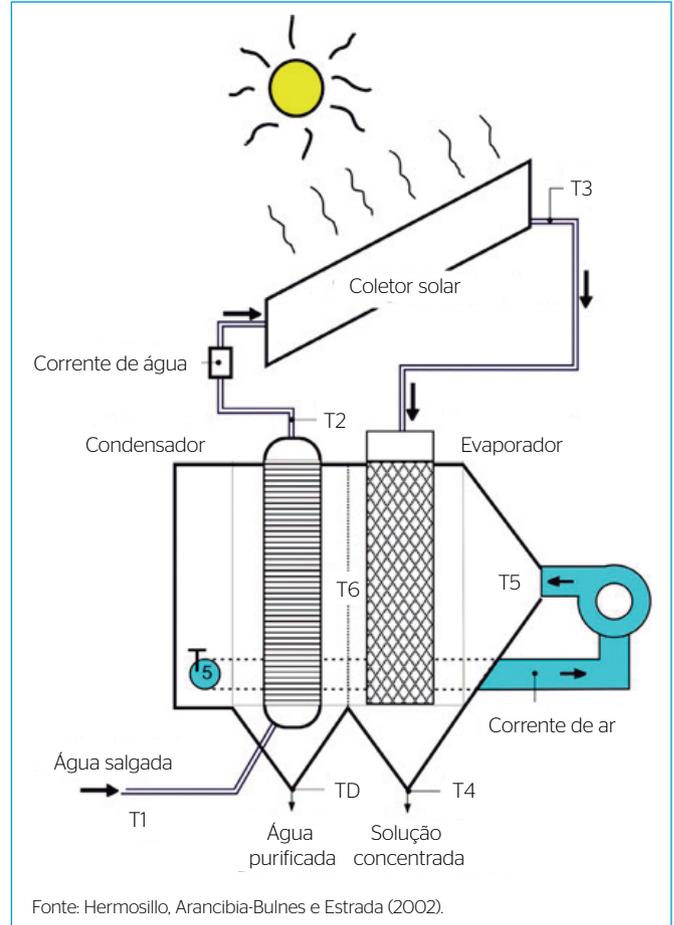


Figura 6 - Dessalinização solar por umidificação e desumidificação com convecção forçada.

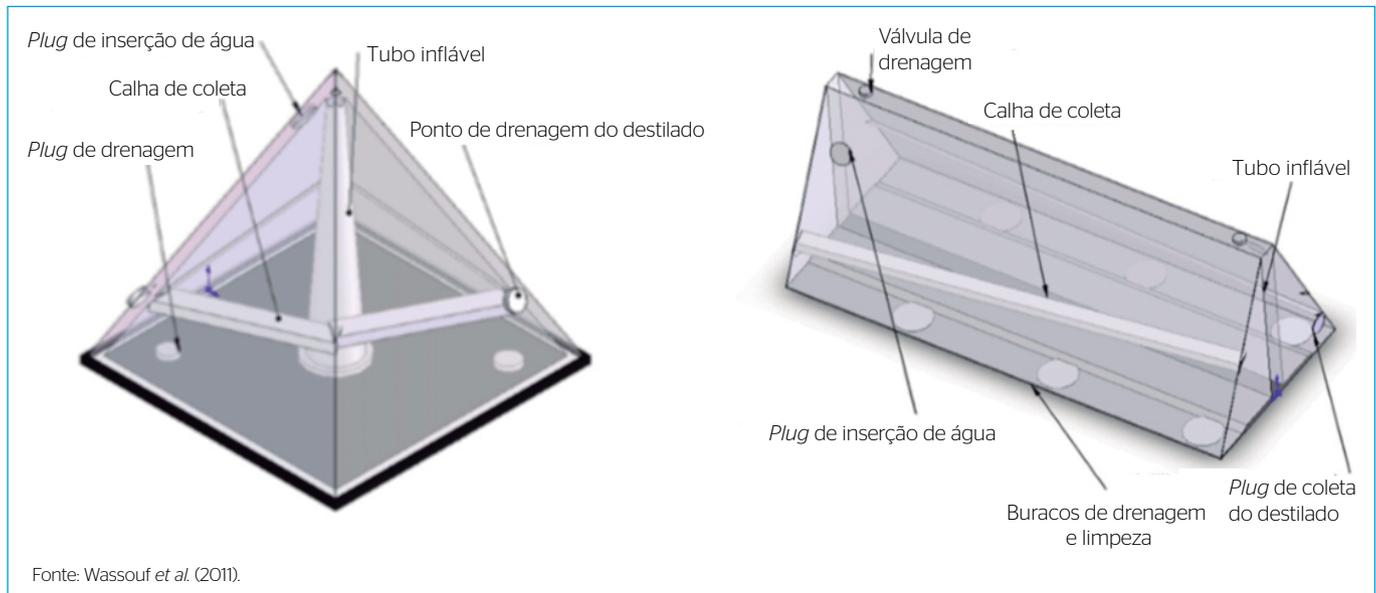


Figura 5 - Desenho esquemático de células piramidais de bases quadrada e triangular.

seco possível. De acordo com a carta psicrométrica do sistema ar-água, mostrada na Figura 7, a umidade de saturação aumenta muito com o aumento de temperatura. Dessa forma, como o ar sai da coluna de desumidificação saturado (FARID *et al.*, 2003), a sua temperatura de saída deve ser a menor possível, para que a condensação seja máxima. Como a força motriz da transferência de calor depende do gradiente de temperatura e da área superficial de troca térmica, o trocador de calor deve ter comprimento suficiente para garantir uma área superficial adequada.

Já na coluna de umidificação, deve-se otimizar a força motriz das transferências de calor e de massa para que o ar de saída seja o mais úmido possível. Sabe-se que ambas são muito favorecidas com o aumento da área superficial de contato entre os fluidos. Logo, um sistema de *spray* é colocado no topo da coluna para alimentar a água salina na forma de gotículas, aumentando a área superficial específica. Essa é outra vantagem da DSUD em relação ao DSD, cuja área de contato entre os fluidos se resume à superfície do líquido armazenado no fundo, limitando as transferências de calor e massa da fase líquida para a fase gasosa.

Por fim, a absorção de calor no coletor solar deve ser otimizada para que a água salina de saída tenha a maior temperatura possível, visando ao favorecimento da transferência de calor na câmara de umidificação. Para isso, a área superficial do coletor deve ser suficientemente grande para um aumento de temperatura adequado.

Além da otimização desses parâmetros para maior produção de água dessalinizada, muitos autores estudaram maneiras de modificar o processo para melhorar a produtividade e reduzir gastos ou de utilizar seu rejeito. Neste estudo estão descritos alguns desses trabalhos.

Modificações no processo

Vários autores utilizam recheio na coluna de umidificação para aumentar a área de contato entre as fases líquida e vapor, que podem ser anéis

plásticos, esferas porosas plásticas ou recheio estruturado (GIWA *et al.*, 2016; MEHRGOO; AMIDPOUR, 2011; WU *et al.*, 2016).

Abu Arabi e Reddy (2003) estudaram o uso de outros gases como fluido transportador do processo. Os resultados mostraram que os gases hélio e hidrogênio foram os que apresentaram melhor transferência de calor, enquanto argônio e gás carbônico apresentaram melhor transferência de massa. Concluiu-se que o gás carbônico é o mais recomendado, considerando ambas as transferências.

Hamed *et al.* (2015) compararam a produtividade de um sistema DSUD operado entre 9 e 17h com esse mesmo sistema tendo ficado em repouso para aquecimento da água no coletor solar pela manhã e operado entre 13 e 17h. O sistema que operou por 4 horas produziu 22 L.dia⁻¹, enquanto o de 8 horas, apenas 16 L.dia⁻¹. Como no primeiro sistema a solução salina que sai do coletor solar atingiu temperaturas maiores, principalmente no início da operação, as *performances* do umidificador e do desumidificador foram melhores a ponto de superarem a produção do sistema que esteve em operação pelo dobro do tempo. Sendo assim, além de um novo método de operação ter sido proposto, os resultados mostraram a grande influência do aumento da temperatura de saída da água do coletor solar na produtividade do sistema.

Hamieh, Beckman e Ybarra (2001) realizaram experimentos para um método conhecido como *dewvaporation*, no qual as câmaras de umidificação e desumidificação estão inseridas em uma única torre, sendo divididas por uma fina parede para permitir a troca de calor entre elas. Os resultados obtidos foram de GOR igual a 11 para água salobra (os valores teóricos de GOR são iguais a 16,8 para água salobra e 9,5 para água salgada). A diferença entre os resultados teóricos e experimentais foi creditada à incompleta molhabilidade e má distribuição da corrente de ar na superfície de transferência de calor (HAMIEH; BECKMAN; YBARRA, 2001). Valores tão altos de GOR têm potencial para competir com processos tradicionais de dessalinização em larga escala, como MSF ou MED (NARAYAN *et al.*, 2011b).

Narayan *et al.* (2011a) propuseram um sistema de variar a pressão do gás entre as colunas. A redução da pressão tem como efeito o aumento da umidade de saturação do ar, ou seja, a capacidade de absorção de água pelo ar. Logo, pressões mais baixas melhoram a umidificação do ar, porém prejudicam a condensação da água na coluna de desumidificação. Sendo assim, foi proposto a adição de um expansor ou uma válvula de estrangulamento na entrada do umidificador e de um compressor na saída dessa mesma coluna. Assim, o sistema pode operar em pressões mais baixas na etapa de umidificação e mais altas na etapa de condensação. Ghalavand, Hatamipour e Rahimi (2014) desenvolveram um modelo com essa estratégia e calcularam um GOR igual a 2,07 para a produção de 151 kg.h⁻¹ de água purificada.

Zamen *et al.* (2014) desenvolveram um modelo de DSUD composto de múltiplos estágios. A Figura 8 apresenta o fluxograma de um sistema composto de três estágios. A água salina proveniente do

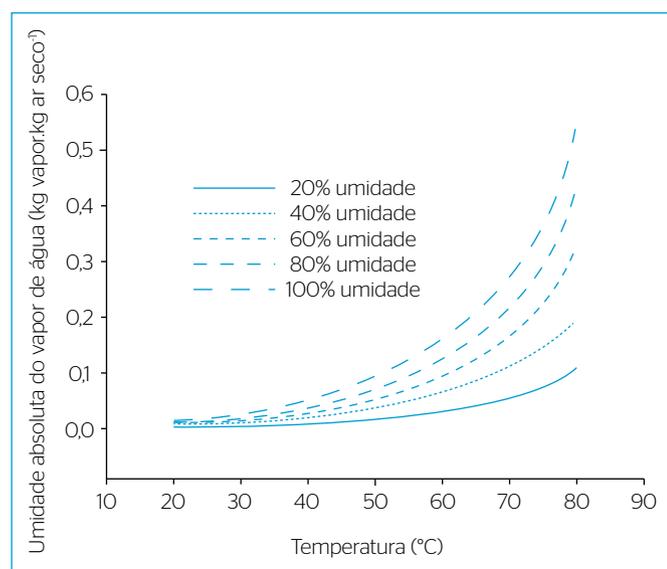


Figura 7 - Carta psicrométrica do sistema ar-água.

coletor solar entra no umidificador do primeiro estágio. Ao sair, ela alimenta o umidificador do estágio seguinte e assim por diante. Já a

água salgada que entra no sistema como um todo alimenta o desumidificador do último estágio, passa para o penúltimo e assim por diante.

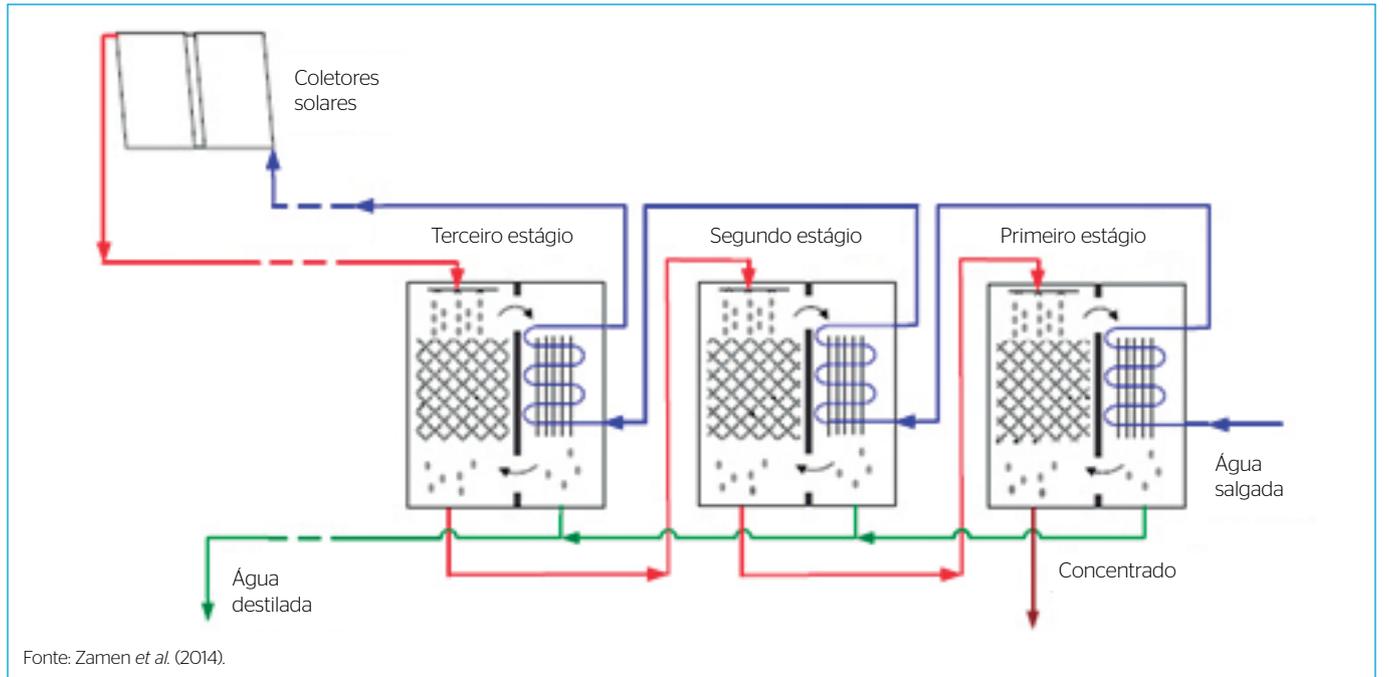


Figura 8 - Dessalinização solar por umidificação e desumidificação multiestágio.

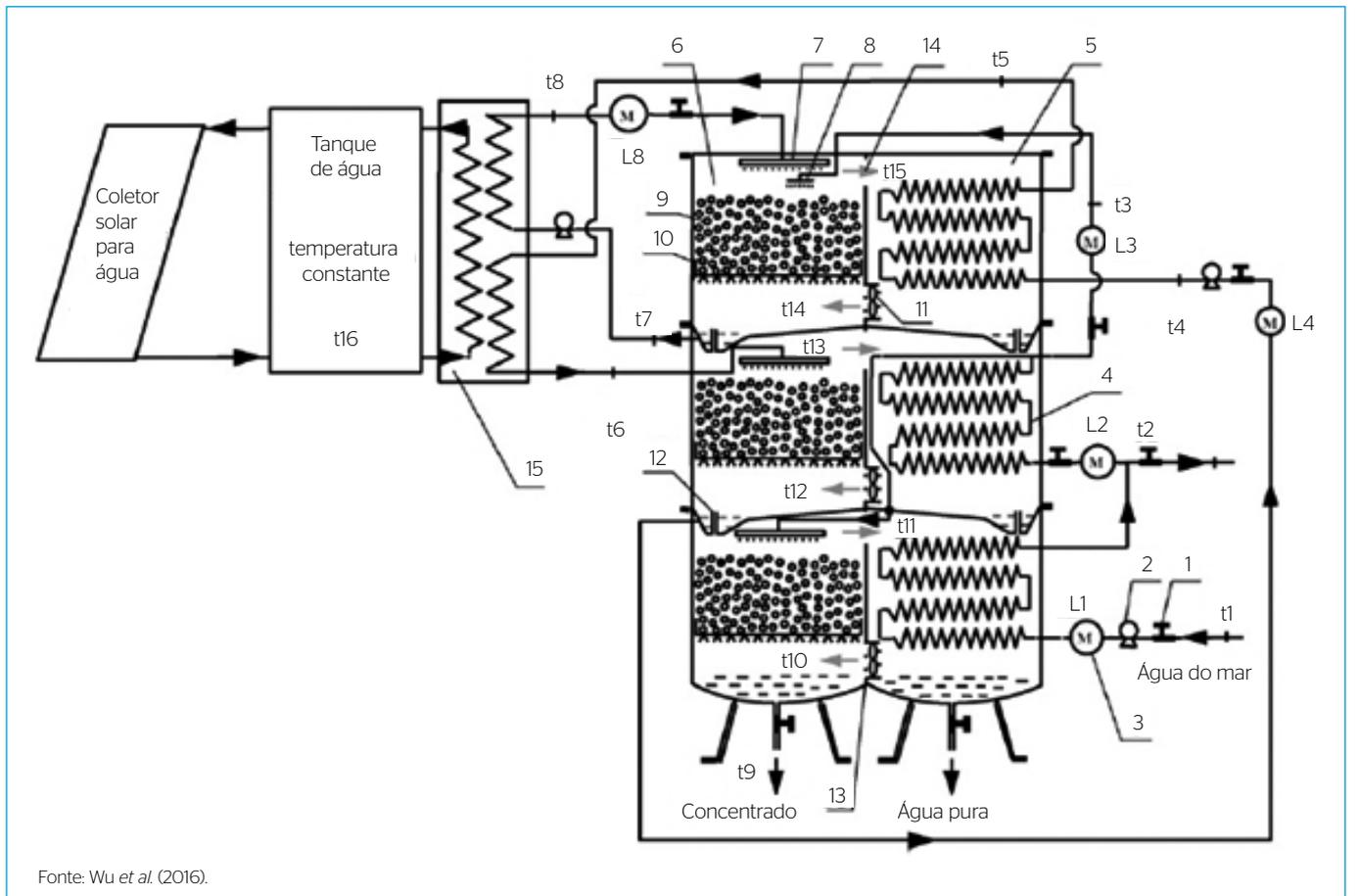


Figura 9 - Dessalinização solar por umidificação e desumidificação com três estágios e temperatura semelhante em cada estágio.

Um projeto piloto com dois estágios foi construído e um ganho de pelo menos 20% em produtividade foi alcançado em relação ao processo com estágio único. Por meio de modelos matemáticos, Zamen *et al.* (2014) concluíram que a adição de um terceiro ou mais estágios não traria ganhos significativos ao sistema deles, de forma que dois estágios pareceu ser a melhor escolha.

Houcine *et al.* (2006) estabeleceram uma pequena planta piloto composta de quatro estágios e aquecimento de ar no coletor solar. A produção média de água dessalinizada chegou a 355 kg.dia⁻¹ para uma intensidade solar média de 590 W.m⁻².

Wu *et al.* (2016) desenvolveram um dessalinizador multiefeitos que procura manter temperaturas semelhantes nos umidificadores de cada estágio, com exceção do primeiro, visando aumentar a produtividade. Quando a temperatura de aquecimento aumentou de 60 para 90°C, a produção média de água purificada subiu de 59,41 para 182,47 kg.h⁻¹, o que confirma que a temperatura influencia significativamente na produtividade de destilado. O fluxograma desse processo, que possui três estágios, é mostrado na Figura 9.

Esse processo utiliza água de circulação interna para absorver energia solar no coletor e abastecer um tanque isolado termicamente, que

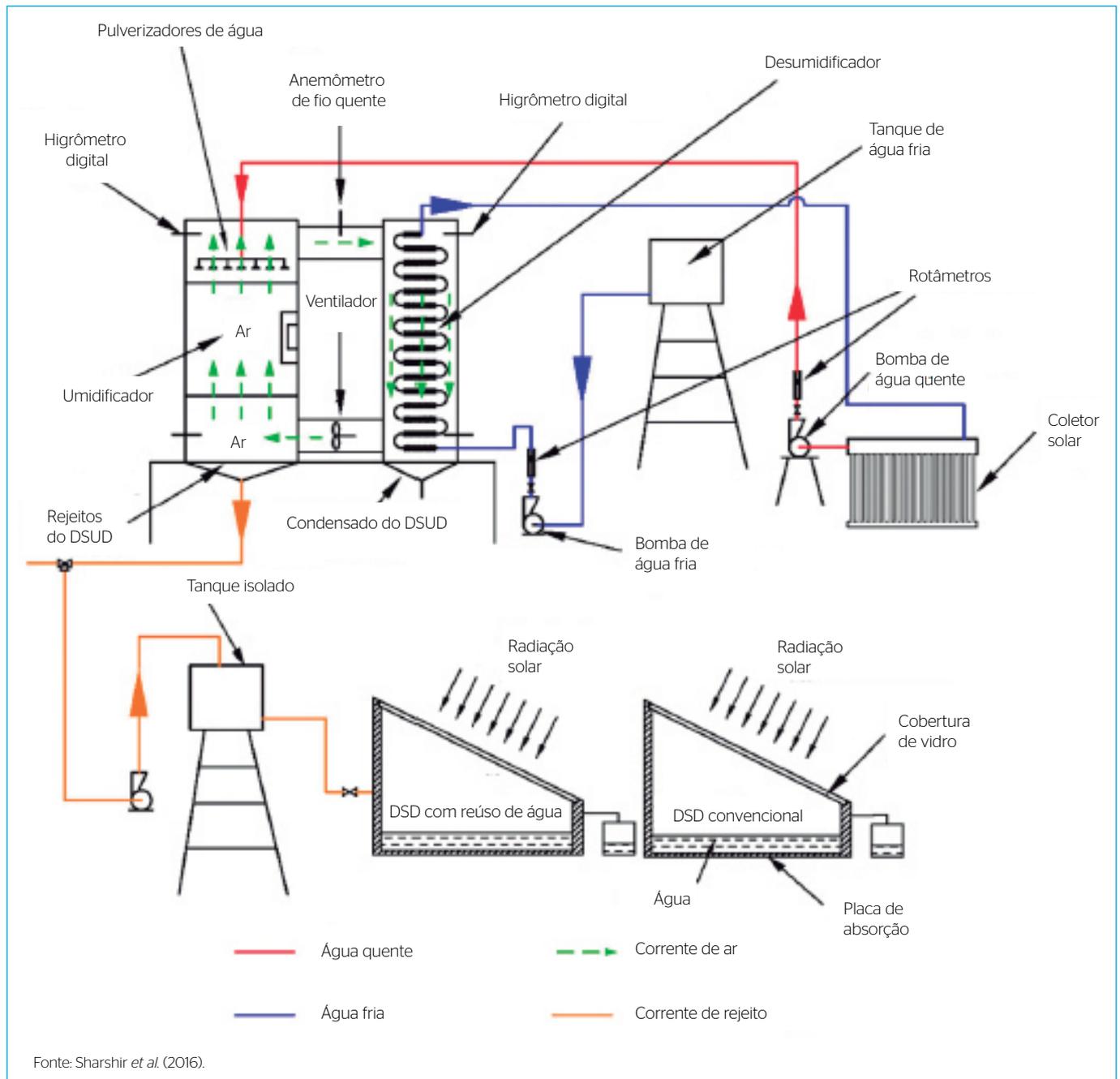


Figura 10 - Dessalinização solar por umidificação e desumidificação acoplada à dessalinização solar direta.

(D3) para condensar a umidade do ar proveniente do U3 e para ser aquecida, tendo seu aquecimento completado no trocador de calor e seu retorno ao topo da seção U2; a segunda entra no topo do U1 na forma de gotículas.

Métodos de dessalinização acoplados

Sharshir *et al.* (2016) utilizaram o rejeito da DSUD para alimentar um tanque isolado termicamente, que por sua vez alimenta um DSD. A Figura 10 mostra um fluxograma do processo. Como o tanque preserva o calor acumulado durante o dia, o DSD pode funcionar 24 horas por dia. Os resultados mostraram que a produtividade do DSD aumentou em 242% ao receber o rejeito do DSUD, e o GOR do sistema aumentou em 39%.

Narayan *et al.* (2011b) propuseram alimentar o rejeito do DSUD com variação de pressão em um dessalinizador por OI, aproveitando também a energia elétrica gerada pelo expansor para alimentar esse segundo dessalinizador. Dessa forma, o rejeito sairia ainda mais concentrado. A Figura 11 mostra um fluxograma do sistema. Esse sistema apresenta GOR de 20, tendo desempenho compatível com o de sistemas tradicionais. Entretanto, ele necessita de pressões superiores a 10 atm e manutenções mais frequentes, devido à OI, o que pode ser um obstáculo para regiões com pouco capital e pouca tecnologia.

Uso do rejeito

Matos *et al.* (2006) realizaram estudos para a produção de solução oxidante com base em rejeito de dessalinizadores de água por eletrólise. Como o rejeito geralmente é rico em íons cloreto, ele pode ser matéria-prima na produção de hipoclorito de sódio, cloro e outros oxidantes, para utilização na desinfecção geral de ambientes. Foi observado que a produção de cloro nas soluções oxidantes

está diretamente relacionada à concentração de íons cloreto, e o teor médio dessas soluções chegou a 0,27% m.m⁻¹. Além de destinar um uso para um rejeito que pode ser prejudicial ao meio ambiente, esse projeto apresenta outras vantagens em relação aos tradicionais por evitar o uso de produtos à base de cloro, que são tóxicos, corrosivos e de manuseio e transporte complicados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dessalinização solar é uma área que vem progressivamente ganhando a atenção do meio científico, principalmente devido à urgência na mudança de matrizes energéticas não renováveis para as renováveis e pela crescente falta de água potável em locais que antes não sofriam com esse problema. Muitos aprimoramentos foram propostos e validados experimentalmente, de forma que estratégias de produção em pequena e média escalas, ideais para regiões descentralizadas ou isoladas, estão disponíveis e são viáveis economicamente. Já a dessalinização em larga escala apenas por energias renováveis, visando à substituição de processos tradicionais movidos a combustíveis fósseis, é ainda objeto de estudo e pode virar realidade em um futuro próximo.

Sabe-se que a população de diversas regiões do país tem sofrido com a falta de água ou tem disponível apenas água imprópria para o consumo humano e que processos tradicionais de dessalinização de água não são ambientalmente sustentáveis. Sendo assim, a dessalinização solar por umidificação e desumidificação é uma opção para solucionar esse problema, além de ser um processo bem simples e de fácil controle, o que o torna mais acessível às regiões mais carentes. Portanto, incentiva-se o aumento de pesquisas no Brasil na área de dessalinização solar, bem como na de aproveitamento de rejeito desse processo, objetivando-se à implantação de plantas dessalinizadoras.

REFERÊNCIAS

ABU ARABI, M.K.; REDDY, K.V. (2003) Performance evaluation of desalination processes based on the humidification/dehumidification cycle with different carrier gases. *Desalination*, v. 156, n. 1-3, p. 281-293. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00359-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00359-X)

AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA (AGEITEC). *Disponibilidade hídrica subterrânea*. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g5twggziO2wx5okO1edq5s9s9b6a3.html>. Acesso em: 14 jun. 2016.

AL-ISMAILY, H.A.; PROBERT, S.D. (1990) *Solar-desalination prospects for the sultanate*. Bedford: Department of Applied Energy, Cranfield University.

ALMEIDA, C. (2014) O Brasil secou. *Superinteressante*, n. 339.

BBC News. (2019) Concerns over increase in toxic brine from desalination plants. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/science-environment-46863146>>. Acesso em: 02 out. 2019.

BISWAS, A.; RUBY. (2012) Distillation of water by solar energy. *VSRD International Journal of Mechanical Automobile and Production Engineering*, v. 2, n. 5, p. 166-173.

BRASIL. (2005) Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 357, de 17 de março de 2005*. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2016.

BRASIL. (2011) Ministério da Saúde. *Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011*. Ministério da Saúde.

- CERDA, E.R.; GÁNDARA, M.A.P.; ZAYAS, L.F. (2002) Thermal performance of the condensing covers in a triangular solar still. *Renewable Energy*, v. 27, n. 2, p. 301-308. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00196-3](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00196-3)
- EL-DESSOUKY, H.T.; ETTOUNEY, H.M. (2002) *Fundamentals of Salt Water Desalination*. Nova York: Elsevier.
- ELIASSON, J. (2015) The rising pressure of global warming shortages. *Nature*, v. 517, n. 7532, p. 6. <https://doi.org/10.1038/517006a>
- FARID, M.M.; PAREKH, S.; SELMAN, J.R.; AL-HALLAJ, S. (2003) Solar desalination with a humidification-dehumidification cycle: mathematical modeling of the unit. *Desalination*, v. 151, n. 2, p. 153-164. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00994-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00994-3)
- GAGLIA, A.G.; LYKOURDIS, S.; ARGIRIOU, A.A.; BALARAS, C.A.; DIALYNAS, E. (2017) Energy efficiency of PV panels under real outdoor conditions - An experimental assessment in Athens, Greece. *Renewable Energy*, v. 101, p. 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.051>
- GHALAVAND, Y.; HATAMIPOUR, M.S.; RAHIMI, A. (2014) Humidification compression desalination. *Desalination*, v. 341, p. 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.039>
- GIWA, A.; AKTHER, N.; AL HOUSANI, A.; HARIS, S.; HASAN, S.W. (2016) Recent advances in humidification dehumidification (HDH) desalination process: Improved designs and productivity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 929-944. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.108>
- GOMES, R.K. (2011) *A dessalinização térmica como alternativa para abastecimento de água: estudo da técnica de dessalinização térmica e avaliação econômica preliminar*. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GUNTHER, S. (2016) *Eight lakes and rivers that are drying up*. Mother Nature Network (MNN). Disponível em: <<http://www.mnn.com/earth-matters/wilderness-resources/photos/7-lakes-and-rivers-that-are-drying-up/aral-sea>>. Acesso em: 22 jun. 2016.
- HAMED, M.H.; KABEEL, A.E.; OMARA, Z.M.; SHARSHIR, S.W. (2015) Mathematical and experimental investigation of a solar humidification-dehumidification desalination unit. *Desalination*, v. 358, p. 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.005>
- HAMIEH, B.M.; BECKMAN, J.R.; YBARRA, M.D. (2001) Brackish and seawater desalination using a 20 ft² dewvaporation tower. *Desalination*, v. 140, n. 3, p. 217-226. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00371-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00371-X)
- HEIDARI, N.; PEARCE, J.M. (2016) A review of greenhouse gas emission liabilities as the value of renewable energy for mitigating lawsuits for climate change related damages. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 55, p. 899-908. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3334557>
- HERMANN, M.; KOSCHIKOWSKY, J.; ROMMEL, M. (2002) Corrosion-free solar collectors for thermally driven seawater desalination. *Solar Energy*, v. 72, n. 5, p. 415-426. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00006-3)
- HERMOSILLO, J.-J.; ARANCIBIA-BULNES, C.A.; ESTRADA, C.A. (2012) Water desalination by air humidification: Mathematical model and experimental study. *Solar Energy*, v. 86, n. 4, p. 1070-1076. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.016>
- HOUCINE, I.; BENAMARA, M.; GUIZANI, A.; MAËLEJ, M. (2006) Pilot plant testing of a new solar desalination process by a multiple-effect-humidification technique. *Desalination*, v. 196, n. 1-3, p. 105-124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.11.022>
- KAPLAN, R.; MAMROSH, D.; SALIH, H.H.; DASTGHEIB, S.A. (2017) Assessment of desalination technologies for treatment of a highly saline brine from a potential CO₂ storage site. *Desalination*, v. 404, p. 87-101. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.11.018>
- KUDISH, A.I.; GALE, J.; ZARMI, Y. (1982) A low cost design solar desalination unit. *Energy Conversion and Management*, v. 22, n. 3, p. 269-274. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(82\)90052-8](https://doi.org/10.1016/0196-8904(82)90052-8)
- LOPES, J.T. (2004) *Dimensionamento e análise térmica de um dessalinizador solar híbrido*. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica/Refrigeração e Condicionamento Ambiental) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MACOUN, A. (2000) Alleviating water shortages: lessons from the Middle East. *International Desalination Water Reuse Quarterly*, v. 10, n. 2, p. 14-20.
- MATOS, J.F.; MOTA, S.; AVELINO, F.F.; PÁDUA, V.L.; BRAGA, E.A.S.; MALVEIRA, J.Q. (2006) Solução oxidante gerada a partir de eletrólise de rejeitos de dessalinizadores de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 2, p. 143-152. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522006000200007>
- MEHRGOO, M.; AMIDPOUR, M. (2011) Constructural design of humidification-dehumidification desalination unit architecture. *Desalination*, v. 271, n. 1-3, p. 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.011>
- NAFEY, A.; ABDELKADER, M.; ABDELMOTALIP, A.; MABROUK, A.A. (2000) Parameters affecting solar still productivity. *Energy Conservation and Management*, n. 41, n. 6, p. 1797-1809. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00188-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00188-0)
- NARAYAN, G.P.; MCGOVERN, R.N.; LIENHARD V., J.H.; ZUBAIR, S.M. (2011a) Variable pressure humidification dehumidification desalination system. In: *ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, 8., 2011, Havaí. *Anais...*
- NARAYAN, G.P.; MCGOVERN, R.N.; THIEL, G.P.; MILLER, J.A.; LIENHARD V., J.H. (2011b) Status of humidification dehumidification desalination technology. In: *WORLD CONGRESS CONVENTION EXHIBITION CENTRE, Perth. Anais...*
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). *Quadro de eficiência de células fotovoltaicas desenvolvidas de 1976 até 2017*. NREL. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>>. Acesso em: 1º mar. 2017.
- NEMATOLLAHI, F.; RAHIMI, A.; GHEINANI, T.T. (2013) Experimental and theoretical energy and exergy analysis for a solar desalination system. *Desalination*, v. 317, p. 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.02.021>

- QIBLAWEY, H.M.; BANAT, F. (2008) Solar thermal desalination technologies. *Desalination*, v. 220, n. 1-3, p. 633-644. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.059>
- RAY, C.; JAIN, R. (2011) *Drinking water treatment*. Focusing on appropriate technology and sustainability. Londres: Springer. (Strategies for sustainability)
- SHARSHIR, S.W.; PENG, G.; YANG, N.; EL-SAMADONY, M.O.A.; KABEEL, A.E. (2016) A continuous desalination system using humidification-dehumidification and a solar still with an evacuated solar water heater. *Applied Thermal Engineering*, v. 104, p. 734-742. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.120>
- SILVA, M.C.C.; SENS, M.L.; SOARES, C.; ANDRADE NETO, C.O. (2014) Water purification by direct solar distillation process in isolated households. *Acta Scientiarum*, v. 36, n. 1, p. 75-80. <http://doi.org/10.4025/actascitechnol.v36i1.18737>
- WASSOUF, P.; PESKA, T.; SING, R.; AKBARZADEH, A. (2011) Novel and low cost designs of portable solar stills. *Desalination*, v. 276, n. 1-3, p. 294-302. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.069>
- WU, G.; ZHENG, H.; KANG, H.; YANG, Y.; CHENG, P.; CHANG, Z. (2016) Experimental investigation of a multi-effect isothermal heat with tandem solar desalination system based on humidification-dehumidification processes. *Desalination*, v. 378, p. 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.09.024>
- XIONG, R.; WANG, S.; WANG, Z. (2006) A mathematical model for thermally coupled humidification-dehumidification desalination process. *Desalination*, v. 196, n. 1-3, p. 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.01.012>
- ZAMEN, M.; SOUFARI, S.M.; VAHDAT, S.A.; AMIDPOUR, M.; ZEINALI, M.A.; IZANLOO, H.; AGHABABAIE, H. (2014) Experimental investigation of a two-stage solar humidification-dehumidification desalination process. *Desalination*, v. 332, n. 1, p. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.10.018>