

República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) **PI0709878-2 A2**



(22) Data de Depósito: 30/03/2007
(43) Data da Publicação: 26/07/2011
(RPI 2116)

(51) *Int.Cl.:*
B01D 9/04 2006.01
C02F 1/00 2006.01
C02F 1/68 2006.01

(54) Título: **SISTEMA E MÉTODO PARA DESSALINIZAR ÁGUA DO MAR**

(30) Prioridade Unionista: 23/10/2006 US 11/585,023, 05/04/2006 US 60/789,415, 21/04/2006 US 60/794,190, 24/07/2006 US 60/832,777, 23/10/2006 US 11/585,023, 05/04/2006 US 60/789,415, 24/07/2006 US 60/832,777, 23/10/2006 US 11/585,023, 23/10/2006 US 11/585,023

(73) Titular(es): Ben Enis, Paul Lieberman

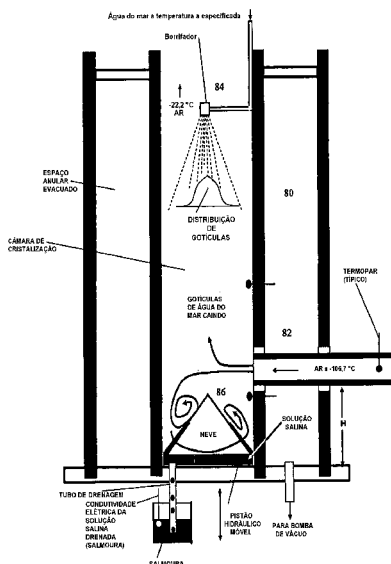
(72) Inventor(es): Ben Enis, Paul Lieberman

(74) Procurador(es): Antonella Carminatti

(86) Pedido Internacional: PCT US2007008183 de 30/03/2007

(87) Publicação Internacional: WO WO2007/120525 de 25/10/2007

(57) Resumo: SISTEMA E MÉTODO PARA DESSALINIZAR ÁGUA DO MAR A invenção se refere a um método e um sistema de dessalinização que utiliza tecnologia de cristalização no gelo que incorpora o uso de energia de ar comprimido como fonte de temperaturas de congelamento. Quando o ar comprimido é lançado por um turbo-expansor, o ar resfriado é produzido como um sub-produto, aonde o ar resfriado é introduzido em uma câmara de cristalização. Uma nuvem de 'spray' de gotas de água do mar também é injetada dentro da câmara, que foi pré-resfriada pela troca de calor com as paredes frias da câmara, e que então é circulada e exposta ao ar resfriado dentro da câmara. Os tamanhos das gotas podem variar, mas são preferencialmente predeterminados, juntamente com as temperaturas relativas, fluxos e velocidades do 'spray' e do ar resfriado, de forma que quando as gotas são circuladas por dentro do ar resfriado, e assentadas no fundo da câmara, elas são depositadas à uma temperatura levemente acima da temperatura eutética. Deste modo, a massa de gelo/neve que se forma no fundo da câmara vai consistir de cristais de gelo, e um resíduo de salmoura da água salgada, que pode ser escoada da massa, seja pelos lados, ou por meio de qualquer vazio ou canais que podem se formar por dentro da massa.



SISTEMA E MÉTODO PARA DESSALINIZAR ÁGUA DO MARCampo da Invenção

A presente invenção refere-se a sistemas de dessalinização e, em particular, a um sistema que utiliza
5 energia de ar comprimido, que pode ser liberado e expandido para, simultaneamente, gerar ar refrigerado que, por sua vez, pode ser usado para congelar água e produzir água doce potável.

Antecedentes da Invenção

10 Nos Estados Unidos, onde há diversas zonas climáticas e abundância de chuva em diversas áreas, é comum haver um suprimento adequado de água doce potável na maioria das regiões. Mesmo nas áreas em que o suprimento de água é escasso, há um esforço para transportar a água dos locais
15 onde ela está disponível para aqueles onde ela é necessária. Atualmente, por exemplo, uma quantidade significativa de água do Rio Colorado vem sendo transportada, através do Aqueduto Califórnia, para as regiões densamente povoadas, porém secas, do sul da Califórnia, de modo que há água
20 suficiente não só para beber, mas também para agricultura e irrigação. Existem também outras formas de transporte e suprimento de água, como aqueles através de redes públicas e dutos, a partir de lagos, reservatórios, rios, geleiras etc.

No entanto, há diversas áreas geográficas em que não é conveniente ou possível levar a água para onde ela é necessária, em bases economicamente viáveis. Tais áreas incluem regiões distantes em montanhas, zonas rurais afastadas e ilhas oceânicas, onde o custo de instalação de condutos e aquedutos longos para o transporte de água pode ser proibitivo. Há também a necessidade de água potável em embarcações de longo curso, como os navios de cruzeiro, os transatlânticos, os cargueiros, embarcações da Marinha etc. Existem ainda países como aqueles em que o clima é mais seco ou a população muito maior do que a água doce potável disponível pode atender. Ironicamente, muitas dessas áreas estão localizadas próximo aos oceanos ou a outros corpos de água salgada, onde esta é disponível, mas não há água doce suficiente para atender a demanda.

Assim, sistemas e métodos de dessalinização para produção de água doce potável a partir de água do mar foram desenvolvidos no passado. A chave para qualquer sistema de dessalinização é a capacidade de separar contaminantes, incluindo sal e outras impurezas, da água que, por sua vez pode ser tornada doce e potável.

Para simplificar, daqui em diante a expressão "água do mar" será usada para se referir a qualquer água contaminada que precise ser purificada, seja ela realmente água retirada do mar ou água salobra, ou água de qualquer outra fonte.

Pelo menos três tipos distintos de sistemas de dessalinização são usados atualmente, cada um deles com graus variáveis de sucesso. Estes tipos serão discutidos a seguir.

5 Método Térmico: utiliza calor, ou outro meio, para converter a água do mar em vapor d'água, como, por exemplo, por ebulição, deixando os contaminantes na água residual. Um exemplo de método térmico comum é a chamada destilação, em que a água do mar é aquecida progressivamente, em vasos
10 subseqüentes, sob pressão reduzida, para produzir vapor d'água puro.

O método térmico chamado de *destilação flash de múltiplo estágio* é o método de dessalinização mais usado atualmente em todo o mundo. Ele envolve o aquecimento da
15 água do mar até temperatura elevada e sua passagem através de uma série de vasos, com pressões decrescentes, para produção de vapor d'água. A água aquecida passa para um vaso, chamado "estágio", no qual a pressão externa é menor do que a do aquecedor. A introdução repentina de soluto e de
20 água em um "estágio" de pressão mais baixa provoca uma ebulição tão rápida da solução, que ela imediatamente se transforma em vapor (vapor d'água). Este, pela sua própria natureza, consiste em água pura, livre dos solutos. Esta água pode, então, ser condensada, recolhida e usada para
25 beber. Um processo semelhante, chamado de *destilação de*

múltiplo efeito, utiliza os mesmos princípios da *destilação flash de múltiplo estágio*, exceto pelo fato de utilizar temperaturas mais baixas. Em pressão mais baixa, a temperatura necessária para vaporizar determinada quantidade de água é menor. Há ainda outro método de destilação, chamado *destilação por compressão de vapor*, que é geralmente utilizada em combinação com outros processos. Neste método, o aquecimento provém da compressão do vapor, ao invés de vir de troca direta de calor.

Embora esses métodos sejam altamente eficientes e eficazes para remoção de contaminantes da água do mar, uma de suas desvantagens mais significativas é o alto custo de operação, incluindo-se aí o elevado custo da energia necessária para o aquecimento da água e/ou para redução da pressão, a fim de levá-la à ebulição. Devido a esses custos, tais métodos só são utilizados, em geral, quando não há água doce disponível, ou quando ela não pode ser disponibilizada a um custo mais baixo.

Processos de Membrana: um processo de membrana é aquele que utiliza uma camada permeável, relativamente fina, de um material que permita a passagem da água ou do sal através dele, permitindo a separação em duas porções com concentrações distintas. De um lado da membrana obtém-se água com contaminantes, e do outro, a água purificada.

Um dos tipos mais comuns de processos de membranas é a *osmose reversa*. Este é um processo governado pela pressão, que força a água salgada através de uma membrana, deixando o sal para trás. Apesar de a osmose reversa ter se mostrado econômica em termos do consumo de energia, que é relativamente baixo, o processo necessita, geralmente, de um investimento mais alto do que a maioria dos métodos térmicos para sua implantação. Há também um custo relativamente alto associado à substituição do material das membranas, que possui vida útil limitada.

Outro processo de membrana comum é chamado *Eletrodiálise*, processo governado pela voltagem, que utiliza um potencial elétrico para mover, seletivamente, os sais através de uma membrana, deixando água doce. Este processo tem algumas das mesmas desvantagens que a osmose reversa, no que toca ao capital necessário à implantação, que pode ser proibitivo.

Cristalização por Congelamento: processo que se vale do congelamento e do diagrama de fases da água do mar para produzir água doce potável. Essencialmente, a água do mar é submetida a temperaturas baixas, como, por exemplo, por meio de um refrigerante, que provocam seu congelamento. Este é usado para auxiliar na formação de cristais de gelo constituídos de água pura em forma sólida, que podem assim ser separados dos contaminantes salinos contidos na água

residual. Este processo e seu potencial têm sido investigados por sua maior eficiência, em comparação com a osmose reversa. Contudo, o processo de congelamento com a finalidade de dessalinização nunca foi implantado com
5 sucesso em larga escala.

O processo de cristalização por congelamento é diferente dos outros processos envolvendo, tipicamente, a formação de cristais de gelo a partir do congelamento da água salgada, de modo que os cristais constituídos de água
10 pura congelada podem ser separados da água original, salina. Durante o processo, quando os cristais de gelo puro se formam - pela exposição a temperaturas congelantes - eles sobem para a parte superior de um tanque, por flutuação; ao mesmo tempo, as impurezas afundam, devido à sua maior
15 densidade, separando-se. Desta forma, é possível separar a água pura, congelada, das impurezas - como o sal e outros minerais - e produzir água doce potável.

Além disso, a formação de cristais de gelo, em si, pode ser alcançada por dois métodos distintos: 1) por
20 resfriamento direto, e 2) por resfriamento indireto.

O resfriamento direto envolve o uso de um fluido refrigerante inerte, que é injetado fisicamente na água do mar, ou seja, borbulhado através dela. Isto faz com que a água do mar se vaporize na temperatura desejada. Este

processo resulta do calor de vaporização do refrigerante retirado da solução, fazendo com que a água do mar se resfrie até a temperatura eutética. Embora a mistura íntima entre o refrigerante e a água do mar torne este método eficiente, uma desvantagem importante do processo é o fato de que o refrigerante acaba intimamente misturado ao gelo. Ou seja, teoricamente o processo forma partículas distintas de água pura congelada, mas neste método de resfriamento um pouco do refrigerante, presente ao longo do equipamento, acaba sendo aprisionado nas partículas de gelo. Sendo assim, não se consegue produzir água doce potável pura, livre do refrigerante. Em consequência, o método de resfriamento direto não é usado para produção de água doce potável.

Um processo mais comum de dessalinização por congelamento é chamado resfriamento indireto. Neste processo, o refrigerante não é injetado diretamente na água do mar, mas sim introduzido em uma série de tubos ou camisas de arrefecimento, que passam através da água. Tipicamente, esses tubos e camisas de arrefecimento são feitos de um material com boa capacidade de condução de calor, como o alumínio, e ajudam a manter o refrigerante e a água separados durante o processo. De preferência, o refrigerante passa somente pelo interior dos tubos e camisas de arrefecimento; já a água do mar, é exposta apenas ao exterior deles, e não ao próprio refrigerante. Desta forma,

a água do mar é resfriada pelo contato direto com os tubos e camisas de arrefecimento, e não diretamente com o refrigerante. Isto evita os problemas associados ao método de resfriamento direto, apesar de a utilização de tubos e camisas de arrefecimento introduzir um nível adicional de resistência à transferência de calor da água ao refrigerante, o que torna o método menos eficiente.

Uma vez resfriados os tubos e camisas de arrefecimento, e passada a água do mar por eles, cristais de gelo são formados na face exterior. Torna-se necessário, então, retirar, fisicamente, o gelo da superfície utilizando-se, por exemplo, uma raspadeira. Uma vez removidos, os cristais de gelo, menos densos, tendem a flutuar rumo à superfície da solução salina, mais densa, e podem ser removidos, lavados para retirada de impurezas e, em seguida, serem descongelados para fornecer água potável purificada. A solução salina pode, então, ser descartada.

A área total da superfície de contato necessária para o congelamento indireto e o coeficiente de transferência de calor são os parâmetros-chave deste processo. Estes parâmetros estão relacionados à eficiência do refrigerante em resfriar e congelar a solução de água do mar em torno dos tubos ou camisas de arrefecimento que o contêm.

Um exemplo de método indireto usado atualmente é chamado um *Cristalizador de Superfície Raspada*, que consiste em um cilindro resfriado (evaporador) com um arranjo de facas ou raspadeiras que raspam os cristais de gelo da superfície resfriada. As raspadeiras se movem sobre a superfície, ou esta se move em contato com as raspadeiras, de modo a permitir que o gelo seja raspado e removido. Em ambos os casos, a fim de evitar fricção e dano às superfícies, o sistema é planejado de modo que há uma folga entre elas, o que acaba deixando uma camada de gelo residual sobre a superfície de resfriamento. Esta camada torna todo o sistema ineficiente quanto à sua capacidade de transferir calor para fora da superfície de resfriamento permitindo que mais gelo se forme sobre ela, além de causar um decréscimo acentuado no fluxo de calor através do cilindro e uma perda em sua capacidade. Também há a força de adesão entre a raspadeira e a superfície de resfriamento, que requer um gasto de energia para ser superada, ou seja, é necessária uma energia extra para raspar o gelo e removê-lo eficientemente. Esta energia precisa ser fornecida constantemente, por um longo período de tempo.

Também tem havido pesquisas envolvendo congelamento de águas residuais, para determinar como os cristais de gelo se formam em uma gota. Em uma pesquisa conduzida pela Dra. Wa Gao - discutida em sua tese, intitulada "Congelamento

Parcial por Pulverização como Tratamento Alternativo para Rejeitos Industriais Seleccionados" (em inglês, "Partial Freezing by Spraying as a Treatment Alternative of Selected Industrial Wastes") -, foi estudado o efeito das

5 temperaturas de congelamento em uma gota de água residual. Neste estudo, uma gota isolada (em temperatura em torno de -5°C , menor do que o ponto de congelamento da água pura) foi exposta a uma corrente ascendente de ar em temperatura de sub-congelamento, isto é, entre $-5,5^{\circ}\text{C}$ e $-17,7^{\circ}\text{C}$, em um

10 túnel de vento vertical com ar refrigerado. O teste foi repetido com gotas de mesmo tamanho e nas mesmas condições para obter informações estatísticas. A Dra. Gao observou que o congelamento das gotas começava na borda inferior e, em 0,23 segundo cobria toda a superfície externa das gotas. A

15 água no interior da gota congelava à medida que a camada de gelo ficava mais espessa. A gota inteira, com 2.800 micra, congelou completamente em um tempo médio de 7 segundos. No total dos experimentos, o congelamento se completou em 20 segundos. A porção gelada sólida da gota era formada por

20 água pura, enquanto a solução salina líquida remanescente, ao redor, consistia de água residual concentrada. As esferas de gelo se fragmentaram durante o processo de congelamento à medida que o líquido salino interior foi empurrado para fora devido ao estresse interno sobre o gelo, na proporção em que

25 este pressionava o líquido incompressível. Em outra pesquisa, águas residuais foram pulverizadas ao ar livre, em

condições atmosféricas do inverno ártico, a fim de produzir um grande amontoado de partículas de gelo diretamente sobre o chão. Embora o congelamento inicial ocorresse enquanto as gotículas ainda estavam no ar, elas acabavam de congelar e a
5 separação ocorria depois de elas terem atingido o solo. O montículo formado foi descongelado durante a primavera e utilizado para irrigação.

Devido aos inconvenientes dos métodos e sistemas de dessalinização existentes, e discutidos acima, há uma
10 necessidade por um método de dessalinização com alta eficiência e custo-benefício que permita a obtenção de água doce potável a partir de água do mar.

Resumo da Invenção

A presente invenção se refere ao uso de energia de ar
15 comprimido em conjunto com um sistema de dessalinização, em que a energia do vento, ou de qualquer outra fonte, pode ser utilizada para produzir ar comprimido; e em que, quando este ar é liberado e expandido - por exemplo, pelo uso de um turbo-expansor - ele produz, como sub-produto, ar altamente
20 refrigerado que, por sua vez, pode ser usado para congelar e dessalinizar a água do mar. Ou seja, ao invés de usar um refrigerante para reduzir a temperatura da água do mar para fins de dessalinização, como ocorre nos métodos de cristalização por congelamento descritos acima, a presente

invenção utiliza ar limpo refrigerado (obtido pela liberação e expansão de energia do ar comprimido) misturado, diretamente, com gotículas de água do mar, a fim de produzir partículas de gelo de água doce.

5 No geral, a abordagem abandona o método de dessalinização por osmose reversa e utiliza o processo de cristalização por congelamento, que funciona sob pressão atmosférica e em baixa temperatura (a de fusão do gelo), ao invés de pressão atmosférica e alto calor de evaporação,
10 como no caso do método de *destilação flash de múltiplo estágio*.

Geralmente a metodologia compreende as seguintes etapas:

1. Produção de um fluxo volumétrico de ar refrigerado
15 em temperaturas de -115 °C (-175 F) sob pressão ligeiramente menor que a atmosférica, e introdução deste ar refrigerado em uma câmara misturadora isolada. O ar refrigerado pode ser obtido pela expansão do ar comprimido (o qual é produzido por um
20 compressor) através de um turbo-expansor para produzir o ar refrigerado diretamente, ou através de um turbo-expansor e gerador que produz eletricidade e, como sub-produto, ar refrigerado.

2. Produção de um fluxo volumétrico de água do mar, que pode ser pulverizado no interior da câmara, sob a forma de uma nuvem de gotículas, e misturado ao ar refrigerado, a fim de reduzir a temperatura das gotículas de água do mar até próximo da temperatura eutética (ou um pouco acima) que, para a água do mar comum é de cerca de $-21,2^{\circ}\text{C}$ ($-6,2^{\circ}\text{F}$).

3. À medida que as gotículas de água do mar começam a se misturar com o ar refrigerado e a se congelar, devido à troca de calor, cristais de gelo de água pura começam a se formar, e a se separar da solução salgada. Com o passar do tempo, isto é, em poucos segundos, as partículas de gelo começam a cair no fundo da câmara onde, devido à troca de calor, a temperatura do ar é maior. Aí, o ar e a crescente massa de partículas de gelo que vão se depositando acabam por atingir o equilíbrio térmico que, de preferência, ocorre em uma temperatura pouco acima da eutética. Em seguida, as partículas de gelo, menos densas, começam a flutuar e se aglomeram na superfície da solução salina que, mais densa, é recolhida na parte de baixo. Forma-se, assim, uma massa de gelo/neve que continua a crescer e permanece flutuando na superfície da solução de água salgada; a solução salina, de maior densidade,

continua a se separar das partículas de gelo e a escorrer pelos lados e através dos poros e canais existentes na massa de gelo/neve. Uma coluna de lavagem, de água doce, que envolva o jato de água, pode ser usada para facilitar o escoamento da solução salgada pela massa de gelo/neve, e ajudar a limpar este gelo ainda mais. Observe que a densidade da solução salina deve estar entre $1,35 \text{ g/cm}^3$, quando concentrada, e $1,025 \text{ g/cm}^3$, na água do mar; a densidade da água pura é igual a 1 g/cm^3 ; a do gelo de água doce é igual a $0,917 \text{ g/cm}^3$, e a da neve é menor do que $0,1 \text{ g/cm}^3$. Sendo assim, a solução salina, de alta densidade, flui através dos poros da massa de gelo/neve e pelos espaços entre os fragmentos de gelo.

4. Ao final do ciclo, isto é, após a massa de gelo/neve ser formada, ela deve, de preferência, ser removida e deixada derreter para se obter a água potável purificada. A solução salina se torna mais densa e salgada com o tempo, e é removida da câmara juntamente com quaisquer sólidos salinos formados, de modo que o processo possa recomeçar. O sal e outros minerais depositados podem ser recuperados para uso industrial posterior ou devem ser tratados adequadamente, caso venham a ser descartados.

A presente invenção contempla, preferencialmente, o uso da expansão de ar comprimido como fonte de baixas temperaturas capazes de congelar e dessalinizar a água do mar. Há, pelo menos, três métodos distintos para produção de ar refrigerado, os quais são contemplados na presente invenção, a saber: (1) um sistema de estocagem de energia por ar comprimido formado por um compressor e um tanque de estocagem grande, de alta pressão, no qual um turbo-expansor é utilizado para liberar e expandir o ar comprimido quando necessário, e no qual a energia produzida é convertida em ar refrigerado e/ou energia elétrica; (2) um turbo-expansor com a dupla capacidade de gerar eletricidade e ar refrigerado, no qual a capacidade de geração de eletricidade é, de preferência, substituída por uma capacidade suplementar de compressão, que usa o trabalho do turbo-expansor para repor o ar comprimido liberado em um tanque de surto (*surge tank*) complementar, e (3) um turbo-expansor capaz de produzir ar refrigerado sem necessidade de estocar energia antes. Em cada um destes casos, o ar refrigerado é injetado na câmara de mistura a fim de resfriar a água do mar injetada nela.

A presente invenção refere-se, de preferência, a um sistema de dessalinização que possa ser feito em bateladas, no interior de uma câmara de mistura na qual se forma a massa de gelo/neve de água doce, que é, então, removida e deixada derreter para formar água pura. Para formar cada

batelada, a água do mar e o ar refrigerado na câmara devem ser adequadamente misturados e, em seguida, a água do mar deve ser, de preferência, pressurizada e passada por um conjunto de pulverizadores a fim de formar um jato, ou
5 nuvem, de gotículas. Ao injetar o ar refrigerado na câmara de mistura de modo que as gotículas de água do mar pulverizadas sejam expostas ao ar refrigerado e circulem com ele, cristais de gelo começam a se formar em cada gotícula. O volume de cada gotícula de água salgada e a temperatura
10 desta água e do ar refrigerado que são injetados na câmara, assim como o tamanho e a configuração da própria câmara devem ser, de preferência, pré-determinados cuidadosamente. De preferência, o modo como a água do mar pulverizada e o ar refrigerado são injetados na câmara e misturados também deve
15 ser pré-determinado, para garantir que a mistura resultante atinja rapidamente a temperatura ideal para congelamento e dessalinização.

Tipicamente, em relação a uma gotícula de água salgada, o congelamento ocorre de fora para dentro, mas com o tempo,
20 a estrutura do gelo formado força a água salgada para fora, isto é, rejeita a salmoura. Foi observado também, que a camada de gelo em torno do cerne de água salgada concentrada desenvolve tensões internas e se fragmenta, forçando o líquido concentrado para fora dela. O aglomerado de cristais
25 de gelo, que expulsa a água salgada, acaba por formar uma

estrutura única, que contém o cristal de gelo sob a forma de um monolito que, por sua vez, é recoberto com água salgada. Quando esses cristais de gelo recobertos colidem, uns com os outros, a solução salina é forçada a envolver o compósito de cristais de gelo recentemente formado. Este processo continua até que uma macroestrutura de gelo recoberto por solução salina se separe completamente. No fundo da câmara, a massa de gelo que se forma ao final assemelha-se a neve porosa, e permite a drenagem da água salgada por ação da gravidade. Como será discutido adiante, pode-se adicionar mais água doce para liberar mais água salgada presa no gelo. Essa água doce, que atua congelando e liberando mais água salgada, pode ser recuperada e re-usada.

A direção dos jatos de água do mar e do ar refrigerado que são introduzidos na câmara podem contribuir para a formação adequada dos cristais de gelo e, portanto, da massa de gelo. Com relação a este aspecto, a presente invenção contempla ambos os arranjos: 1) em contra-corrente e 2) em corrente paralela. Os fatores que determinam qual arranjo usar dependem da velocidade com que a água do mar precisa ser congelada que, por sua vez, depende da temperatura em que esta água e o ar refrigerado entram na câmara, do tamanho desta, do modo como as gotículas de água do mar são expostas ao ar refrigerado e circulam com ele, da quantidade

de cada um destes componentes que está sendo introduzida etc.

Na concretização em contra-corrente, o sistema tem, de preferência, uma câmara que pulveriza a água do mar para
5 baixo e que permite que o ar refrigerado oriundo do turbo-expansor seja soprado para cima, no sentido contrário ao das gotículas de água, fazendo com que elas circulem e se congelem, caindo, em seguida, para o fundo da câmara. Este processo é chamado em contra-corrente porque a água do mar
10 pulverizada e o fluxo de ar refrigerado fluem em direções opostas, a fim de aumentar o tempo de residência das gotículas na câmara. Em outra concretização, o sistema tem, preferencialmente, pelo menos um pulverizador que libera as gotículas de água do mar dentro da câmara, no sentido
15 descendente, mas que permite que o ar refrigerado proveniente do turbo-expansor seja soprado para dentro da câmara na mesma direção das gotículas de água. Este processo é chamado de correntes paralelas, pois a água do mar pulverizada e o ar refrigerado fluem na mesma direção, a fim
20 de permitir que o ar mais frio atue sobre as gotículas que chegam, com a maior taxa de transferência de calor.

Em outra concretização, as paredes da câmara são aquecidas, preferencialmente, com a água do mar morna que entra no interior da câmara e/ou com o calor oriundo do ar
25 comprimido, a fim de evitar que o gelo grude nas paredes, e

que a massa de gelo se fixe nelas. Quando a água do mar que está sendo injetada passa através das paredes da câmara, a troca de calor que ocorre ajuda, preferencialmente, a pré-resfriar a água antes de ela ser pulverizada para dentro da câmara. De preferência, a água do mar é transportada através de tubos ou cavidades envolvendo a câmara de cristalização, de modo que esta água do mar seja pré-resfriada a temperaturas quase de congelamento antes mesmo de entrar na câmara. Ou seja, o ar super refrigerado introduzido na câmara terá o efeito de resfriar as paredes dela, de modo que, passando os tubos ou cavidades em torno dessas paredes e fazendo a água do mar circular por eles, esses tubos ou cavidades atuarão como um trocador de calor, que irá pré-resfriar a água do mar. Deste modo, uma vez que a água do mar entre na câmara de cristalização ela congelará mais rapidamente e descera para o fundo, onde continuará o processo de congelamento, tornando-se sólida. Assim, a temperatura da água do mar será, de preferência, próxima à de congelamento ou mesmo ligeiramente menor do que a de congelamento da água destilada (0 °C ou 32 °F) mesmo antes de entrar na câmara.

O calor liberado pelos compressores também pode ser utilizado para um efeito semelhante. É desejável evitar que partículas de gelo grudem nas paredes da câmara de cristalização e se depositem nelas; uma das maneiras de usar

o calor liberado é distribuir o ar comprimido quente, ou a água aquecida por este calor, pelos tubos ou cavidades localizados ao redor da câmara de cristalização. Com relação a isto, os tubos ou cavidades podem, de preferência, 5 envolver a câmara já que é em torno dela que as partículas de gelo tendem a acumular. Como eles atuam como um trocador de calor, quando o ar quente oriundo do compressor passa através das paredes da câmara, o ar comprimido é, preferencialmente, pré-resfriado antes de ser mandado para o 10 turbo-expansor e expandido para produzir o ar refrigerado. Assim, o ar liberado pelo turbo-expansor pode ser tornado ainda mais frio.

A dessalinização ocorre devido ao fato de que a água do mar é resfriada a uma temperatura próxima da temperatura 15 eutética, cerca de $-21,1^{\circ}\text{C}$ (aproximadamente -6°F), e se separa em gelo (água doce congelada) e líquido salino (soluto, sal, altamente concentrado no solvente, água), onde a formação dos cristais de gelo força a água do mar para fora, promovendo também uma separação induzida pela grande 20 diferença de densidade no fundo da câmara. Sob este aspecto, o congelamento da água do mar ocorre, de preferência, em três estágios: (1) resfriamento da água do mar filtrada, bombeada através de tubos ou cavidades que envolvem as paredes da câmara de cristalização (forte efeito de 25 resfriamento), (2) resfriamento de gotículas de água do mar

durante sua passagem através do ar refrigerado dentro da câmara (tempo de residência curto, com resfriamento das gotículas), e (3) resfriamento das gotículas semi-congeladas após elas terem se depositado no fundo da câmara para formar
5 uma massa de gelo (tempo de residência mais longo).

Durante a passagem das gotículas através do ar refrigerado, elas vão, progressivamente, se tornando mais frias de fora para dentro até que, finalmente, cristais de gelo começam a se formar na parte externa da gotícula. Em um
10 exemplo, as gotículas de diâmetro maior que 4.000 micra podem ter uma porção interna ainda não congelada, e gotículas de diâmetro menor que 200 micra podem estar completamente congeladas, incluindo seu centro.

Foi observado que, mesmo se as gotículas tiverem o
15 mesmo tamanho algumas congelarão antes das outras devido ao processo pelo qual o gelo se forma em torno de um núcleo microscópico, que varia em número e tamanho, em cada uma das gotículas de mesmo tamanho. Observe que gotículas com diâmetro acima de 8.000 micra tendem a romper-se sob um
20 vento relativo originando pequenas gotículas. Portanto, a camada de gelo em torno de uma gotícula grande (definida como aquela com diâmetro igual ou maior que 4.000 micra) irá se fragmentar durante o espessamento da camada de gelo em torno do cerne líquido. Em experimentos utilizando ar
25 refrigerado a -17°C e gotículas de água do mar refrigerada

a +5 °C, e com gotículas suspensas de águas residuais de pocilgas com diâmetros de 4.200, 3.400 e 2.800 micra, observou-se que cada gotícula foi quase totalmente congelada no tempo médio de 7 segundos em pH = 7,1 (neutro), e 7,5 segundos em pH = 11 (o limite alcalino é pH=14), e o tempo de residência em trânsito das gotículas foi de cerca de 2,5 segundos. Logo, grande parte do congelamento acontece após a deposição da gotícula no fundo da câmara de cristalização. A superfície externa das gotículas congela em um tempo bem menor, em torno de 0,23 segundo.

É importante que as gotículas congelem para formar uma solução bifásica de partículas sólidas (gelo) e líquido salino; logo, é desejável que as gotículas atinjam a temperatura eutética, ou próximo, enquanto em movimento. Por outro lado, se as gotículas se tornarem muito frias (mais frias do que a temperatura eutética) enquanto se movem pela câmara, a água doce contida em cada gotícula pode congelar junto com os cristais de sal e com solução salina solidificada. Neste caso, poderá não ser possível separar o sal da água doce. Isto pode ocorrer, por exemplo, quando a nuvem de água do mar é formada por gotículas de diversos tamanhos, caso em que as gotículas menores podem atingir uma temperatura menor do que a eutética e congelar completamente assim que chegarem ao fundo da câmara. A esse respeito, considere que um pulverizador projetado para dispersar uma

nuvem de tamanho médio próximo a um diâmetro de 4.000 micra também irá gerar um fluxo de massa menor, mas um grande número de gotículas na faixa de diâmetro de 400 micra. Essas partículas menores têm uma velocidade de sedimentação dez
5 vezes menor e terão um tempo de residência dez vezes mais longo. Além disso, essas partículas menores congelarão mais rapidamente e em temperaturas bem abaixo da eutética quando interagirem com o fluxo de ar local, saindo dos pulverizadores com temperaturas de $-92,8^{\circ}\text{C}$ (-135°F) ou
10 -115°C (-175°F) na configuração em correntes paralelas.

Portanto, as pequenas gotículas em movimento descendente através deste regime de temperatura extremamente baixa certamente causarão cristalização indesejada das gotículas originando uma partícula sólida composta de
15 (1) gelo de água doce, (2) sal sólido, no qual cada molécula de sal estará ligada a duas moléculas de água com moléculas de água ligadas, e (3) cristais de sal. Durante a passagem das pequenas partículas pelo ar frio, não há separação entre água salgada e água doce. Mas, como será discutido adiante,
20 a separação ocorrerá quando a gotícula cair sobre a massa de gelo acumulada, criada pelas gotículas maiores no fundo da câmara, que tem, preferencialmente, uma temperatura de equilíbrio acima da temperatura eutética.

As partículas muito pequenas, com diâmetros da ordem de
25 poucas centenas de micron, podem congelar completamente

(inclusive seus centros) quando expostas ao ar em temperaturas muito mais baixas que a eutética, em condições próximas à de pulverização. Quando essas pequenas gotículas se depositam sobre a massa de gelo/neve, mais quente, no
5 fundo da câmara de cristalização, elas são preferencialmente aquecidas até uma temperatura de equilíbrio ligeiramente maior do que a do ponto eutético. Logo, se as gotículas pequenas congelarem abaixo da temperatura eutética, elas podem descongelar novamente em temperatura maior do que a
10 eutética. Nesse ponto, a separação usual entre a estrutura sólida porosa de neve/gelo e a solução salina líquida (água salgada) ocorrerá. Embora os pulverizadores típicos liberem partículas com diâmetros maiores, sempre haverá partículas menores, com uma distribuição de tamanhos em uma certa
15 faixa. As partículas menores tendem a estar em grande número, mas no conjunto não contribuirão para uma grande massa.

Com relação a isso, observou-se que é desejável que a massa de gelo no fundo da câmara permaneça em temperatura
20 ligeiramente maior (mais quente) do que a temperatura eutética, de modo que qualquer líquido salino que reste em torno de cada partícula de gelo irá drenar e escorrer pelos lados da massa gelada, ou através dos espaços vazios e canais formados na massa de gelo/neve ao invés de congelar e
25 ficar retido no interior do gelo. Sendo assim, para se obter

o resultado ideal é importante controlar a temperatura do ar refrigerado no interior da câmara, bem como dar tempo suficiente para que todo o líquido salino escorra, antes de remover a massa de gelo da câmara. Em alguns casos, poderá
5 haver algumas gotículas que se depositem durante os últimos segundos do ciclo e que não terão tempo suficiente para permitir a liberação do líquido salino. Esta é uma fração pequena, que irá contribuir para a pequeníssima quantidade de impurezas na água potável final.

10 O congelamento da água do mar permite, preferencialmente, a formação de partículas flutuantes de gelo de água pura com traços de água salgada aderidas a elas, com o objetivo de deixar o sal e outras impurezas no líquido salino no fundo da câmara. O sistema de
15 dessalinização remove, de preferência, as partículas de gelo da água salgada, mais densa, de modo que a gravidade auxilia na separação e limpa as partículas de gelo em um de, pelo menos, dois caminhos.

Primeiro, as partículas de gelo podem formar uma massa
20 de gelo/neve pelo acúmulo de partículas de gelo no fundo da câmara; isto é, à medida que elas caem umas sobre as outras. Com o tempo, na proporção em que as partículas caem e se agrupam, elas formam uma massa de gelo, que tenderá a flutuar sobre a solução salina, uma vez que a água salgada é
25 mais densa do que o gelo. Neste aspecto, o sistema deve ser

adaptado para que as partículas de gelo formem uma massa cônica; isto é feito, preferencialmente, introduzindo-se gotículas de água do mar no centro da câmara, de modo que as partículas de gelo formadas também se acumularão no centro da câmara. O jato de água do mar deve ser direcionado, de preferência, para o eixo central da câmara, de modo que as partículas de gelo não se fixem nas paredes e que a massa de gelo que se forma no fundo da câmara tenda a se formar no centro dela, ou seja, em forma de um cone invertido. Por um lado, isso tem a vantagem de permitir que a água salgada encapsulada ou aderida a cada partícula de gelo de água pura escorra para os lados, ao invés de ficar presa no interior da massa de gelo, ou seja, em bolsos ou fendas que podem se formar na massa à medida que ela se solidifica. Formando-se uma massa de gelo em formato de cone, a água salgada que adere a cada uma das partículas de gelo simplesmente escorrerá pelos lados, ao invés de ficar retida, permitindo que o líquido salino seja separado da massa de gelo de modo efetivo, como se deseja. Por outro lado, pesquisas demonstraram que a massa de gelo obtida pode formar canais e espaços vazios através dela de modo que qualquer líquido salino acumulado pode, simplesmente, atravessar a massa através desses espaços e canais, sem ficar retida. Sob este aspecto, a massa de gelo se parece mais com neve; ela é porosa para permitir que a água salgada a atravesse.

Além da formação de gelo durante a movimentação, especialmente em temperaturas extremamente baixas, há outro mecanismo para criar uma massa porosa no fundo da câmara de cristalização. Considere-se o caso ideal de gotículas

5 perfeitamente esféricas se acumulando no fundo da câmara. Na configuração de empacotamento mais denso, a densidade mais alta é a razão entre os volumes da esfera e o do cubo de ar que a circunda, ou seja, $[4/3 \cdot \pi \cdot r^3] / [8 r^3]$ ou 0,52 g/cm³. A densidade real deverá ficar entre este valor

10 teórico e a densidade da neve, que é de 0,10 g/cm³. Isto dá uma porosidade suficiente para que o líquido salino encontre passagem livre para o fundo da massa depositada. Uma vez que o denso líquido salino comece a fluir, as partículas de gelo se afastam, flutuando, e o líquido drena mais rapidamente.

15 Esta concretização também tem, preferencialmente, meios de lavar a massa de gelo com água doce, a qual congela sobre a massa congelada de gelo/neve liberando a camada salina aderida à medida que mais e mais gotículas são depositadas. Para remoção adicional da solução salina que se fixa na

20 superfície de cada partícula de gelo há, de preferência, uma injeção de água doce sobre a camada de gelo/solução salina depositada no fundo da câmara, para auxiliar a drenagem da solução salina, camada a camada, por ação da gravidade. A água doce congela à medida que adere a cada camada e, em

25 seguida, desloca a finíssima camada do viscoso líquido

salino dos interstícios entre as partículas de gelo. A água doce congelada sobre as partículas de gelo é, posteriormente, descongelada e, de preferência, recuperada para re-uso, sem necessidade de mais água doce. Se for

5 necessária uma água com pureza mais alta, pode-se acrescentar uma coluna de lavagem à jusante. Para isto, água doce adicional em temperatura ambiente, como 15,5 °C (60 °F), pode ser pulverizada sobre a massa de gelo para ajudar a remover o líquido salino dela, à medida que ela se forma.

10 A maior parte do líquido salino é deslocada dos espaços entre as partículas de gelo por ação da gravidade. De preferência, o líquido salino é retirado do fundo da câmara, através de um dreno.

A seção inferior da câmara contém, preferencialmente,

15 uma cesta perfurada para recolher as partículas de gelo que descem e formam a massa de gelo no fundo, mas que permite a circulação do ar refrigerado para fora da câmara. Em relação a isto, as paredes laterais da câmara têm, de preferência, um orifício de escape através do qual o excesso de ar

20 refrigerado pode sair da câmara, ser distribuído para o sistema de condicionamento de ar e usado como ar refrigerado. Outros métodos (além da cesta perfurada) para remoção da massa de gelo/neve, como pistões e pinças, também são possíveis. As partículas de gelo que se depositam no

25 fundo da cesta, de preferência formam uma grande massa de

gelo ou, em alguns casos, uma lama, e as perfurações na cesta permitem que a solução salina passe deixando para trás, na cesta, as partículas de gelo de água pura. Então, retirando-se a cesta, a massa de gelo e/ou lama de água pura
5 pode ser removida da câmara.

A massa de partículas de gelo que é removida pode, então, ser fundida para produzir água doce no fundo de um tanque de estocagem. Pode-se pulverizar água doce relativamente morna, neste caso em temperatura maior do que
10 15,5 °C (60 °F), sob a forma de uma coluna de lavagem descendente sobre as partículas de gelo, para lavá-lo e para provocar o seu derretimento. Como alternativa, ou em conjunto com a água de lavagem, ar local quente pode ser introduzido no tanque de estocagem para ajudar na fusão das
15 partículas de gelo. À medida que o gelo derreter, as gotículas de água doce podem passar pelos furos da cesta e se aglomerar no fundo do tanque de estocagem, sob a forma de água doce potável resfriada. Pode-se utilizar mais de uma cesta, de modo que os processos de dessalinização e
20 derretimento não precisem ser interrompidos durante a remoção de cada cesta da câmara. Outros métodos de remoção e fusão da massa de gelo, como o uso de uma porta do tipo *drop down*, que permite que a massa de gelo caia em uma esteira rolante e seja levada para onde possa ser mais facilmente
25 derretida, também são disponibilizados.

Devido ao fato da massa de gelo ser feita deste material e, portanto, gelada, a água doce produzida pelo seu derretimento é refrigerada. A partir daí, esta água doce fria pode ser distribuída para beber ou usada para outros
5 fins como, por exemplo, ser guardada para uso posterior em sistemas de condicionamento de ar, ou re-circular para dentro da câmara de cristalização, a fim de ser utilizada como jato da coluna de lavagem ou ser pulverizada no tanque de estocagem.

10 Breve Descrição das Figuras

A Figura 1 é uma representação esquemática de uma versão de um tanque de armazenagem de energia de ar comprimido do sistema de dessalinização da presente invenção, na qual a energia eólica, ou de outra fonte, é
15 utilizada na co-geração de ar refrigerado para fins de dessalinização.

A Figura 2 é uma representação esquemática que mostra a versão com tanque de surto do sistema de energia por ar comprimido da presente invenção.

20 A Figura 3 é uma representação esquemática da versão sem tanque do sistema de energia por ar comprimido da presente invenção.

As Figuras 3a e 3b são folhas de dados relacionados com o compressor secundário e com os trocadores de calor usados para manter o ar refrigerado frio.

As Figuras 3c e 3d são gráficos mostrando diferentes
5 descargas do turbo-expansor.

A Figura 4a é um fluxograma mostrando a configuração que fornece o máximo de eletricidade.

A Figura 4b é um fluxograma mostrando uma configuração que fornece uma combinação de eletricidade e ar refrigerado.

10 A Figura 4c é um fluxograma mostrando a configuração que fornece o máximo de ar refrigerado e nenhuma eletricidade.

A Figura 5 apresenta a termodinâmica de um turbo-expansor de 500 kW.

15 A Figura 6 mostra um gráfico de porosidade de neve, em que a densidade da neve é comparada com a temperatura do ar.

A Figura 7 apresenta uma composição padrão de água do mar, incluindo a porcentagem em peso e a temperatura eutética de cada componente.

20 A Figura 8 apresenta os requisitos da água potável limpa.

A Figura 9 apresenta regimes de temperatura para fases de gotículas de água.

A Figura 10 apresenta características de pulverizadores.

5 A Figura 11 apresenta uma faixa de tamanhos de gotículas possíveis por tipo de pulverizador.

A Figura 12 mostra um gráfico de temperatura de gotículas de água e tempo de residência, dentro de um jato de ar frio (1k e 2k micra).

10 A Figura 13 mostra a velocidade final de gotículas de água no ar.

A Figura 14 apresenta um corte da câmara de mistura principal com tubos e/ou cavidades em torno de suas paredes, para circulação da água do mar e/ou ar comprimido ou água
15 aquecidos através das paredes da câmara.

A Figura 15 mostra um corte da câmara de mistura principal, com ar refrigerado sendo injetado a partir do topo dela, conhecido como "em correntes paralelas".

A Figura 16 apresenta um corte da câmara principal,
20 com ar refrigerado sendo injetado no sentido ascendente, contrário ao das gotículas de água do mar que caem, conhecido como "em contra-corrente".

A Figura 17 mostra um corte da câmara principal com um arranjo em contra-corrente, mostrando a altura "H" de injeção do ar refrigerado.

5 A Figura 18 mostra um corte da câmara principal, com um arranjo em contra-corrente, mostrando a altura "H" de injeção do ar refrigerado e a abertura da coroa circular em torno da massa cônica de gelo.

10 A Figura 19 mostra a possível evolução da fração líquida durante o ciclo de resfriamento e aquecimento de uma solução salina.

A Figura 20 mostra um diagrama de equilíbrio de fases para uma solução salina aquosa abaixo da concentração eutética de 23,3%.

15 A Figura 21 mostra um gráfico de temperaturas do cerne de uma gotícula de água com tempo de residência de 0,2 segundo (1k e 4k micra).

A Figura 22 mostra um gráfico de temperaturas do cerne de uma gotícula de água com tempo de residência de 2,0 segundos (1k e 4k micra).

20 A Figura 23 apresenta variações nas densidades da água e do gelo em função da temperatura.

A Figura 24 apresenta variações na densidade da água salgada em função do percentual de cloreto de sódio.

A Figura 25 mostra um corte da câmara principal, mostrando um sistema em contra-corrente no qual o ar refrigerado é introduzido de modo que ele sobe através da câmara, contra as gotículas de água do mar que caem, e em 5 que um sistema hidráulico de levantamento é utilizado para remover a massa de gelo ao final do ciclo.

A Figura 26 apresenta um corte da câmara principal, mostrando o sistema em contra-corrente da Figura 25, em que o ar refrigerado é introduzido de modo que ele se desloca 10 para cima no interior da câmara, contra as gotículas de água do mar que caem, e em que uma massa de gelo começa a se formar no fundo da câmara onde se recolhe a solução salina concentrada.

A Figura 27 mostra um corte da câmara principal, 15 mostrando o sistema em contra-corrente da Figura 25, em que o ar refrigerado é introduzido de modo que ele se desloca para cima no interior da câmara, contra as gotículas de água do mar que caem, e em que uma massa de gelo se forma no fundo da câmara, se recolhe solução salina concentrada e se 20 formam depósitos de sal sólido.

A Figura 28 mostra um corte da câmara principal em uma concretização contendo pinças, que prendem a massa de gelo depois que ela se forma e o ciclo se completou.

A Figura 29 mostra um corte da câmara principal após o final do ciclo, em que o líquido salino frio que resta no fundo da câmara é introduzido em um trocador de calor, que ajuda a pré-resfriar a água do mar que entra na câmara.

5 A Figura 30 mostra um corte da câmara principal após o final do ciclo, em que os depósitos de sal sólido que ficam são removidos por um sistema hidráulico de levantamento.

10 A Figura 31 apresenta um esquema do sistema de dessalinização com uma câmara de cristalização que utiliza ar refrigerado para congelar partículas de água do mar injetadas na câmara sob a forma de névoa ou jato, e no qual o ar refrigerado é introduzido por cima, conhecido como em corrente paralela.

15 A Figura 32 é um esquema do sistema de dessalinização apresentado na Figura 31, mostrando como as partículas de gelo se agrupam no fundo da câmara para formar uma massa de gelo, e onde uma cesta perfurada é utilizada para remover o gelo.

20 A Figura 33 é um esquema do sistema de dessalinização apresentado na Figura 31, mostrando como as partículas de gelo podem ser removidas da câmara e fundidas, utilizando-se uma coluna de lavagem em um tanque de estocagem.

A Figura 34 é um esquema do sistema de dessalinização apresentado na Figura 31, mostrando como as partículas de

gelo podem ser removidas da câmara e fundidas, utilizando-se ar quente local, e em que uma cesta perfurada é utilizada para remover o gelo.

A Figura 35 mostra um gráfico de temperaturas do cerne
5 de gotículas de água com tempo de residência de 2,0 segundos (200 e 4k micra).

Descrição Detalhada da Invenção

O método de cristalização por congelamento para
dessalinização de água, discutido acima, requer um sistema
10 de resfriamento para o congelamento da água do mar,
necessário para separar a água doce das impurezas contidas
na água do mar. A presente invenção apenas incorpora o uso
de tecnologia de geração de energia por ar comprimido como
um meio de produzir também ar refrigerado, como sub-produto,
15 em que um turbo-expansor pode ser utilizado para liberar e
expandir a energia do ar comprimido, a fim de produzir uma
quantidade de ar refrigerado adequada ao objetivo de
dessalinização.

A. Sistemas de Energia de Ar Comprimido

20 A presente invenção contempla, preferencialmente, o uso
de um, entre pelo menos três diferentes métodos de produção
de ar refrigerado, incluindo (1) um sistema de armazenamento
de energia de ar comprimido contendo um compressor e um
grande tanque de estocagem sob alta pressão, em que um

turbo-expansor é usado para liberar e expandir a energia do ar comprimido, quando necessário, e no qual a energia pode ser convertida em ar refrigerado e/ou energia elétrica, (2) um turbo-expansor com a dupla capacidade de gerar energia e ar refrigerado, no qual a capacidade de geração de eletricidade é substituída, preferencialmente, pela capacidade suplementar de um compressor que utiliza o trabalho do turbo-expansor para alimentar o ar comprimido descarregado em uma câmara de equilíbrio suplementar, e (3) um turbo-expansor com capacidade de produzir ar refrigerado sem necessidade de estocar energia antes. Cada um destes sistemas será discutido em seguida.

1. Sistema de Tanque de Estocagem de Energia de Ar Comprimido

Esta concretização, como apresentado na Figura 1, contém preferencialmente um sistema de estocagem de energia por ar comprimido, 1, com um motor elétrico 3, um compressor principal 7, um tanque de estocagem 5, uma válvula de controle 9, um turbo-expansor 11 e um turbo-gerador 13 para geração de eletricidade. Na Figura 1, "A" designa a rota pela qual a energia elétrica é transmitida, a partir da fonte de energia 2 - que pode ser uma turbina eólica 4, uma central eólica, um motor a diesel, um gerador de potência, ou qualquer fonte de energia convencional como, por exemplo, um usina de geração geotérmica de potência, uma usina

nuclear, uma usina de geração de energia por combustíveis fósseis, ou a rede de distribuição de energia - ao motor elétrico 3. Algumas dessas fontes de energia, frequentemente, geram mais energia do que o necessário. O
5 excedente de energia pode ser armazenado sob a forma de ar comprimido. Quando a energia elétrica é recuperada deste ar comprimido, a fim de atender à demanda, o ar super-refrigerado que é gerado junto pode ser utilizado para dessalinização. De preferência, o motor 3 aciona o
10 compressor principal 7 para comprimir o ar que é, então, estocado no tanque 5.

A energia do ar comprimido pode ser guardada no tanque 5 por um longo período de tempo, até ser necessária. Então, na ocasião adequada, a válvula de controle 9 pode ser usada
15 para liberar o ar comprimido de modo a que ele seja expandido pelo turbo-expansor 11. Neste ponto, se desejado, em especial quando há necessidade de energia elétrica, o calor residual oriundo do compressor principal 7 pode circular pelo turbo-expansor 11, para reduzir e compensar o
20 efeito de temperaturas super baixas. Mas, se for preciso ar refrigerado, como será o caso quando o objetivo for dessalinização, será benéfico não utilizar o calor perdido, já que este irá apenas aumentar a temperatura do ar refrigerado. Ao mesmo tempo, a perda de calor pode ser

utilizada para regular a temperatura do ar refrigerado, se temperaturas precisas forem desejadas.

Um dos produtos que podem ser obtidos por este sistema 1 é eletricidade, a qual pode ser gerada diretamente pelo 5 turbo-gerador 13, à medida que o ar comprimido for sendo liberado do tanque 5 pelo turbo-expansor 11, para criar um fluxo de ar de alta velocidade. Outro produto produzido é ar refrigerado, o qual é gerado como um sub-produto à proporção que o ar comprimido do tanque 5 é liberado e expandido pelo 10 turbo-expansor 11. Em todos os casos, o presente sistema 1 é adaptado de modo que esses produtos podem ser gerados simultaneamente, isto é, o ar comprimido pode gerar 1) eletricidade, usando o turbo-gerador 13, 2) ar refrigerado utilizando o turbo-expansor 11, ou 3) ambos, eletricidade e 15 ar refrigerado, dependendo das necessidades do sistema.

O tanque de estocagem sob alta pressão 5 é, de preferência, disponibilizado e projetado para suportar as altas pressões passíveis de serem geradas pelo compressor principal 7, e isolado para manter uma temperatura constante 20 no tanque. Ele pode ser, também, em forma de duto ou de qualquer outro recipiente adequado para armazenar ar pressurizado. O termo "tanque" será usado para incluir tubos e outros meios de estocagem de ar comprimido. O tanque 5 deve, de preferência, ser colocado próximo ao compressor 7 e 25 ao turbo-expansor 11, de modo que o ar comprimido possa ser

transportado para o tanque 5 e depois circulado pelo turbo-expansor 11 sem perda significativa da pressão. Embora a presente invenção contemple a possibilidade de utilização de tanques de vários tamanhos, o presente sistema prevê, de preferência, que o tamanho do tanque seja baseado nas necessidades do sistema, no tamanho da instalação ou da demanda, no custo do sistema, etc., necessários para fornecer uma quantidade suficiente de energia de ar comprimido para estocagem. Quando não há espaço suficiente para um tanque, ou quando se considera uma aplicação específica, podem ser usadas as versões com câmara de equilíbrio, ou sem tanque, a serem discutidas.

A presente invenção contempla o fato de que quaisquer meios convencionais de liberação de ar e conversão de ar comprimido em energia elétrica e/ou ar refrigerado podem ser utilizados. Em uma concretização preferida, um ou mais turbo-expansores 11 são usados para liberar o ar comprimido e criar um fluxo de ar de alta velocidade, o qual pode ser utilizado para fazer funcionar o turbo-gerador 13, a fim de gerar energia elétrica. Esta eletricidade pode, então, ser usada para suplementar a energia elétrica fornecida diretamente pela fonte, se necessário, ou para acionar um compressor suplementar, que pode produzir mais ar comprimido que, por sua vez, pode ser reciclado e armazenado no tanque 5. Nessas concretizações, o turbo-expansor 11 fornece

energia, preferencialmente, a um alternador conectado a um conversor AC/DC, seguido por um inversor de corrente DC/AC e, em seguida, por um condicionador de potência para adequar as impedâncias aos circuitos utilizados. Essa cadeia de dispositivos assegura que as entradas variáveis de frequência resultem na frequência constante de saída necessária.

Opcionalmente, quando a dessalinização não é necessária, pode-se disponibilizar um ou mais meios de fornecimento de calor ao sistema de energia de ar comprimido para impulsionar a geração de energia pelo turbo-gerador 13. A presente invenção contempla que, pelo menos três tipos diferentes de sistemas de aquecimento podem ser utilizados para fornecer calor, incluindo 1) coletores termo-solares para utilizar a energia do sol, 2) coletores de calor residual para aproveitar o calor residual gerado pelos compressores, e 3) uma unidade separada de aquecimento, tal como um queimador de combustível fóssil, para injetar calor no sistema. Neste, devido ao fato de, normalmente, se deseja gerar ar refrigerado como um sub-produto para fins de refrigeração ou dessalinização, o calor residual e outros sistemas de aquecimento são, em geral, usados somente quando eletricidade está sendo gerada pelo turbo-gerador 13, e quando se necessita de pouco ou nenhum ar refrigerado, ou

ainda, quando este não está sendo utilizado para resfriamento ou dessalinização.

A presente invenção beneficia-se, preferencialmente, do fato do ar refrigerado estar sendo gerado pelo turbo-
5 expansor 11 para propósitos secundários, como dessalinização da água e condicionamento de ar, o que aumenta a eficiência do sistema. Por exemplo, além de usar o ar refrigerado para fazer um resfriamento direto para os condicionadores de ar e/ou redirecioná-lo pelos dutos até os compressores, a fim
10 de mantê-los frios, na concretização preferida da presente invenção, o ar refrigerado é usado para resfriamento em um sistema de dessalinização. O ar refrigerado que sai da dessalinização também pode ser utilizado para sistemas de condicionadores de ar e assemelhados.

15 O circuito lógico 6 contém, preferencialmente, um sistema de controle para gerenciar a operação do tanque de estocagem 5, do compressor 7, do turbo-expansor 11, do turbo-gerador 13, das unidades de aquecimento, dos componentes de refrigeração, etc. Uma das principais funções
20 desse sistema de controle é direcionar a energia imediatamente para onde necessária, sem passar pelo compressor, se desejado. Neste caso, a energia só é enviada ao compressor se a fonte de energia produzir excesso que não possa ser aproveitado pelo usuário. Por outro lado, quando
25 há falta de energia na central, mas o usuário necessita

dela, o ar comprimido pode ser liberado a fim de suprir o déficit. Nas circunstâncias em que haja deficiência de energia em relação à demanda e o tanque de estocagem esteja abaixo do mínimo necessário, pode ser preciso ligar a
5 energia de emergência. O sistema de controle deve ser projetado, de preferência, para ser capaz de manter o nível de energia do ar comprimido no tanque 5 em um nível apropriado, através da regulação do fluxo de ar comprimido que entra e que sai desse tanque. O sistema de controle deve
10 ter, preferencialmente, um microprocessador pré-programado, de modo que o sistema funcione automaticamente.

Um turbo-expansor comum de 500 kilowatt, 11, ou outro expansor convencional, pode ser acoplado ao tanque de estocagem 5, que armazena o ar comprimido produzido pelo
15 compressor 7. O ar retirado, associado ao trabalho realizado pela expansão do ar comprimido no tanque 5 pode gerar um ar extremamente frio, que é usado, então, para fins de dessalinização. Neste exemplo, o turbo-expansor 11 permite, de preferência, uma entrada de ar comprimido com pressão de
20 cerca de 13,6 atm (200-psia) e +21,1 °C (+70 °F) (entropia de entrada = 1,4552 BTU/#-°R) e uma pressão de saída de aproximadamente 1 atm (14,67-psia), que será isentropicamente expandida até cerca de -134,4 °C (-210 °F) (entropia de saída = 1,4552 BTU/#-°R). Se a eficiência
25 termodinâmica da expansão for de apenas 79%, devido à queda

de pressão excessivamente grande ao longo do turbo-expansor, a temperatura de descarga será de aproximadamente $-102,6^{\circ}\text{C}$ ($-152,7^{\circ}\text{F}$).

Similarmente, um turbo-expansor de 500 kilowatt com uma
5 pressão de entrada de ar comprimido de 13,6 atm (200-psia) e $21,1^{\circ}\text{C}$ (70°F) (entropia de entrada = $1,4552\text{ BTU}/\#^{\circ}\text{R}$) e saída sob pressão mais alta, de 2 atm (30-psia), irá expandir isentropicamente a $-102,9^{\circ}\text{C}$ ($-153,2^{\circ}\text{F}$) (entropia de saída = $1,4552\text{ BTU}/\#^{\circ}\text{R}$). Se a eficiência termodinâmica
10 da expansão com uma variação de pressão menor for de 85%, a temperatura de descarga será de aproximadamente $-84,8^{\circ}\text{C}$ ($-120,6^{\circ}\text{F}$).

Em ambos os casos considerou-se a termodinâmica do tanque de estocagem e seu efeito sobre a temperatura do ar.
15 A pressão dentro do tanque de estocagem irá cair à medida que o ar for sendo retirado. Espera-se que a temperatura do ar dentro do tanque de estocagem caia, quase adiabaticamente, a níveis inaceitáveis como de entrada para operação eficiente do turbo-expansor. No entanto, devido a
20 sua grossa parede de aço, necessária para suportar a alta pressão de ar, o tanque de estocagem atua também como armazenador de calor, já que as paredes de aço retêm calor suficiente mesmo a uma temperatura inicial de $21,1^{\circ}\text{C}$ (70°F), para evitar que a temperatura do ar residual caia
25 significativamente. Assim, à medida que a temperatura dentro

do tanque começa a cair, o calor sensível através das paredes começa a fluir na direção do gradiente negativo de temperatura, entre a parede de aço e o ar no interior do tanque. O resultado líquido é que o ar residual dentro do
5 tanque apresenta uma queda moderada de temperatura, aceitável para o turbo-expansor.

A energia termodinâmica de 510 kW (térmica) irá, provavelmente, gerar 450 kW (elétrica) devido à perda de 2% por atrito nas engrenagens e à perda de 10% da energia
10 durante a conversão pelo gerador elétrico. A termodinâmica de um turbo-expansor de 500 kW está mostrada na Figura 5.

Em ambos os casos, pode-se observar que o ar que sai do turbo-expansor 11 tem temperatura extremamente baixa, adequada a dessalinização. Essas temperaturas baixas, com
15 altíssimo potencial de refrigeração/congelamento, pode ser muito útil para a dessalinização de água do mar quando se emprega uma forma modificada da cristalização por congelamento eutética (CCE), discutida abaixo.

2. Sistema de Energia de Ar Comprimido com Tanque de 20 Surto

Outro sistema de energia de ar comprimido está mostrado na Figura 2, que apresenta detalhes de um compressor 15 e de um turbo-expansor 17 de uma concretização na qual há somente um pequeno tanque de surto 19, ao invés de um grande tanque

de estocagem. Neste sistema, a energia da fonte pode ser usada para acionar o compressor 15, de onde o ar comprimido é canalizado para dentro do tanque de surto 19. Uma válvula de controle, 21, controla a quantidade de ar comprimido que é liberada para o turbo-expansor 17. Como se pode ver na Figura 2, o ar pressurizado e expandido que sai do turbo-expansor 17 é canalizado, de preferência, de duas maneiras diferentes. Primeiro, o ar refrigerado co-produzido pelo turbo-expansor 17 pode ser canalizado através de um tubo, 20, e distribuído para o sistema de dessalinização, como será discutido adiante, ou para outra função de refrigeração. Segundo, a energia adicional proveniente do turbo-expansor 17 pode ser reciclada, através da conduta 18, para uma caixa de transmissão, 16 que, por sua vez, permite que um compressor alternativo de estágios múltiplos, 23, produza mais energia a ar comprimido. Esta pode ser reciclada para o tanque de surto 19, a fim de completar a descarga de ar comprimido nele. Desta forma, qualquer energia extra produzida pelo turbo-expansor 17, que não seja utilizada sob a forma de ar refrigerado, pode ser reciclada para produzir mais ar comprimido que, por sua vez, pode ser usado para produzir mais ar refrigerado e/ou eletricidade.

O ar atmosférico local pode, de preferência, ser comprimido pelo compressor alternativo 23 em um fluxo consistente com a pressão de retorno do ar estocado no

tanque de surto 19. Assim cria-se, preferencialmente, um fluxo positivo de ar vindo do primeiro compressor, 15, que se combina com aquele, também positivo, vindo do compressor alternativo 23 e encontra o fluxo negativo que sai da
5 alimentação do turbo-expansor 17. Este equilíbrio acontece sob uma pressão de equilíbrio, que depende das curvas SCFM/HP dos compressores 15 e 23, e do turbo expansor 17. A pressão para um dado conjunto comercial de equipamentos deve ser ligeiramente maior do que 20,5 atm (200-psig).

10 Observe-se que se quiser co-produzir eletricidade com este sistema, a caixa de transmissão 16 pode ser configurada de modo que a conduta giratória 18 do turbo-expansor 17 possa ser conectado a um gerador elétrico para produzir eletricidade, e desconectado do compressor alternativo 23.
15 Esta opção permite que a conduta 18 seja conectada e desconectada do compressor alternativo 23 acionado por turbina, que pode ser usado para reciclar o ar comprimido para o tanque de surto 19.

3. Sistema de Energia de Ar Comprimido Sem Tanque

20 A Figura 3 apresenta detalhes de um sistema de energia a ar comprimido "sem tanque", incluindo um compressor 31 e um turbo-expansor 33 de uma concretização na qual não há necessidade de um tanque de estocagem. Neste sistema, a energia da fonte pode ser usada para comprimir o ar usando

um motor elétrico, 32, um compressor secundário 34, e um turbo-compressor 31, em que o ar comprimido pode ser liberado utilizando-se o turbo-expansor 33, sem que a energia tenha sido primeiro armazenada. O motor elétrico 32
5 pode ser acionado diretamente pela eletricidade gerada pela fonte de energia 3. O ar comprimido pode ser gerado, também, diretamente pela fonte de energia 3 e, se desejado, levado para acionar o turbo-compressor 31.

Como pode ser visto na Figura 3, o motor elétrico 32 é
10 utilizado, preferencialmente, para acionar o compressor secundário 34, de modo que o ar pressurizado que sai deste compressor 34 seja refrigerado por um trocador de calor 35, que se estende ao longo da linha 36, e o ar que sai do compressor 34 é, então, levado para o turbo-compressor 31.
15 Este, preferencialmente, compartilha a conduta 39 com o turbo-expansor 33, de modo que o acionamento de um leva também a acionar o outro, de modo que o sistema possa atingir um estado estacionário de operação, como será discutido adiante.

20 Um segundo trocador de calor, 37, é colocado preferencialmente junto à linha 38, entre o turbo-compressor 31 e o turbo-expansor 33, de modo que à medida que o ar comprimido passa do turbo-compressor 31 para o turbo-expansor 33, também passa pelo segundo trocador de calor,
25 37, para resfriar o ar mais uma vez. Desta forma, o ar que

entra no turbo-expansor 33 é relativamente frio. Um pequeno tanque de surto, como o mostrado na Figura 2, pode ser colocado entre o segundo trocador de calor 37 e o turbo-expansor 33, se desejado. Os sistemas de troca de calor
5 utilizados podem ser incorporados nas paredes da câmara de mistura, sob a forma de tubos e/ou cavidades, como será discutido adiante.

Já que o turbo-compressor 31 e o turbo-expansor 33 são acionados pela mesma conduta 39, os dois são operados
10 simultaneamente, o que ajuda a reduzir o custo total de acionamento dos mecanismos. Na verdade, porque o motor elétrico 32 pode, inicialmente, comprimir o ar para criar uma pressão dentro do sistema e o ar comprimido é canalizado para o compressor 31 e, depois, para o turbo-expansor 33, a
15 força de acionamento do turbo-expansor 33 pode ser, a princípio, usada para acionar o compressor 31 eliminando, assim, a necessidade de usar energia adicional para acionar qualquer um desses mecanismos.

Por exemplo, quando o ar comprimido oriundo do
20 compressor secundário 34 passa do turbo-compressor 31 para o turbo-expansor 33, este começa a girar, levando o turbo-compressor 31, que está sobre a mesma conduta 39 a girar também. Assim, à medida que o turbo-compressor 31 aumenta a velocidade de rotação, ele aumenta a pressão de entrada do
25 ar vindo do compressor secundário 34 para o turbo-expansor

33, fazendo com que este acelere mais. O ciclo de aceleração dos sistemas turbo-expansor 33 e turbo-compressor 31 com a mesma conduta 39, usando a energia do compressor secundário 34 pode, ao final, alcançar um estado estacionário em que os fluxos através do compressor secundário 34, do turbo-compressor 31 e do turbo-expansor 33 se igualam. A energia rotacional através do turbo-compressor 31 também pode se igualar à do turbo-expansor 33. O ar comprimido gerado pela fonte de energia pode, também, alimentar diretamente o turbo-compressor 31, obtendo-se o mesmo efeito que se utilizasse o compressor secundário 34. Utilizam-se controles para gerenciar e operar os trocadores de calor, que ajudam a controlar a temperatura do ar que passa através do turbo-expansor 33. Esses controles determinam quais trocadores de calor serão usados em dado momento e o quanto eles podem ser efetivos.

A Figura 3a mostra o seguinte: primeiro, a descrição termodinâmica do compressor secundário 34 (identificado como compressor alternativo) durante sua operação entre 1 atm (14,67-psia) e 6 atm (90-psia). O processo de compressão é considerado isentrópico de forma que pode-se conseguir ar de 1 atm (14,67-psia) e 21,1 °C (70 °F) até 6 atm (90-psia) e 219,13 °C (426,44 °F) (entropia = 1,6366 BTU/(# R). Contudo, deve-se observar que o processo de compressão pode ter eficiência de 84% ou menos, fazendo com que mais energia

seja gasta para alcançar 6 atm (90-psia) e, portanto, a temperatura final seja, na verdade, mais alta; isto é, pode chegar aos 255,5 °C (492 °F) ou mais. Refrigeração a água no compressor e em fluxo descendente no trocador de calor 35
5 leva, de preferência, a uma temperatura de saída de cerca de 21,1 °C (70 °F). A água aquecida pode, então, ser enviada ao sistema de água quente como recuperação de calor residual, se desejado, ou às paredes da câmara de cristalização, como será discutido adiante. Considere-se, também, que pode haver
10 uma queda de pressão, de cerca de 0,3 atm (5-psi), entre o compressor secundário 34 e o turbo-compressor 31.

Um processo similar é repetido, preferencialmente, com o turbo-compressor 31 (identificado como compressor centrífugo) com 84% de eficiência. O resultado é que o ar
15 5,8 atm (85-psia) e 21,1 °C (70 °F) é comprimido a cerca de 14 atm (205-psia) e 121,1 °C (250 °F) usando-se cerca de 43,36 BTU/# de fluxo de ar. Mais uma vez, refrigeração a água no compressor e em fluxo descendente no trocador de calor 35 leva, de preferência, a uma temperatura de saída de
20 cerca de 21,1 °C (70 °F). A água aquecida pode, então, ser enviada ao sistema de água quente como recuperação de perda de calor, se desejado, ou às paredes da câmara de cristalização, como será discutido adiante. Considere também que há uma queda de pressão de cerca de 0,3 atm (5-psi)
25 entre o turbo-compressor 31 e o turbo- expansor 33. Este

aceita entrada de ar a 13,6 atm (200-psia) e 21,1 °C (70 °F) e pode liberar ar refrigerado a cerca de 2,1 atm (31,5 psia) e -81,5 °C (-114,8 °F). Isto libera 43,416 BTU/# de fluxo de ar, ligeiramente mais do os 43,36 BTU/# requeridos pelo

5 turbo-compressor 31.

Um exemplo é dado na Figura 3b, em que um sistema de 2.000 hp pode fornecer 10.857,6 SCFM de ar a -81,5 °C (-114,78 °F) para fins de refrigeração. Observe-se que isto foi alcançado alimentando-se apenas o compressor secundário

10 alternativo 34 de 2.000 hp com uma eficiência de 102,79 BTU/# ou 5,5 SCFM/HP. Na Figura 3a há alimentação elétrica de 2.000 e saída térmica de 844,3 hp , o que representa eficiência de 42,2%.

Esses números e quantidades são estimados e fornecidos

15 apenas como exemplos. No caso real, o sistema de dessalinização da presente invenção trabalha, de preferência, com ar refrigerado na faixa de temperaturas compreendida entre -92,8 °C (-135 °F) e -115 °C (-175 °F). Logo, sistemas com potencial de resfriamento maior, como os

20 obtidos pelo aumento da pressão liberada, também estão contemplados na presente invenção. Os números e quantidades reais podem variar.

A baixa temperatura disponível a partir do turbo-expansor pode ser generalizada considerando-se um exemplo de

pressão de entrada de 13,6 atm (200-psia) e duas pressões de descarga (1) 2 atm (30-psia) para um turbo-expansor de um estágio, e (2) 1 atm (14,67-psia) para um turbo-expansor de dois estágios. No primeiro caso, a pressão de descarga de 2 atm (30-psia) considera um processo de corrente descendente, no qual o ar resfriado precisará de pressão suficiente para passar pelo longo conjunto de tubos e válvulas e as perdas de pressão associadas a ele. No segundo caso, a pressão de descarga de 1 atm (14,67-psia) considera que não há conseqüência na tubagem de corrente descendente, e fornece a maior queda de pressão (queda de temperatura) ao longo do turbo-expansor.

A Figura 3c mostra a grande diferença entre os requisitos de fluxo de ar para produzir uma unidade de energia (SCFM/hp) nos dois casos específicos acima. A Figura 3c mostra que, quanto maior a temperatura inicial, menor o fluxo necessário para produzir uma unidade de energia. Assim, maiores temperaturas iniciais irão demandar menos energia de ar comprimido, e um tanque de estocagem menor, para produzir uma dada quantidade de energia no mesmo tempo de descarga energética. Por outro lado, a Figura 3d mostra que, menor temperatura inicial levará a uma temperatura de descarga mais baixa. A Figura 3d mostra ainda que descargas entre 13,6 atm (200-psia) e 1 atm (14,67-psia) (pressão atmosférica) produzem temperaturas extremamente baixas com

temperaturas iniciais menores. Assim, se o objetivo for dessalinização ou condicionamento de ar é preciso levar em consideração a maior queda de pressão e temperaturas iniciais mais baixas.

5 B. Aplicações do Presente Sistema de Dessalinização:

Este sistema de dessalinização pode ser usado em, virtualmente, qualquer aplicação onde seja necessário dessalinizar. Por exemplo, pode haver necessidade de um suprimento de água doce para uma cidade próxima ao litoral, durante um período de estiagem; ou pode haver grande quantidade de água salobra em poços abertos em um deserto. Na seção seguinte serão consideradas apenas duas aplicações: (1) a bordo de uma embarcação, e (2) insular ou "em terra". Na primeira aplicação, o objetivo é maximizar a produção de água doce em detrimento da produção de energia elétrica (ver Figura 4c, que apresenta o cenário #3). Qualquer energia elétrica produzida será reutilizada na operação do compressor de ar, tal como no caso da energia de ar comprimido no tanque de surto descrito anteriormente. Na segunda aplicação, deseja-se flexibilidade bastante para passar de um cenário a outro, seja maximizando a produção de energia elétrica, ou maximizando a dessalinização, ou mantendo um equilíbrio entre os dois (ver Figuras 4a, 4b e 4c, que mostram os cenários #1, #2 e #3).

1. Uso em Navios:

Como visto no cenário #3, na Figura 4c, o óleo diesel disponível a bordo de um navio pode ser usado para operar o compressor #1, 55. Este fornece, de preferência, ar comprimido para um tanque de surto muito pequeno, 57. Esta possui uma saída para o turbo-expansor 61 que, por sua vez, expelle ar extremamente frio. O tubo de exaustão do turbo-expansor 61 é ligado, de preferência, ao rotor de um turbo-compressor - Compressor #2, 59 -, que comprime o ar da atmosfera local e direciona este ar comprimido de volta à tanque de surto 57. Assim, o sistema utiliza óleo diesel para acionar o compressor #1, 55, produzindo ar super-resfriado como sub-produto. Como será discutido adiante, este ar super-resfriado pode interagir com água do mar e gerar água pura utilizando o sistema de dessalinização aqui descrito. Este dispositivo, em comparação com outros sistemas existentes utilizados em embarcações, como o método de osmose reversa, pode ser relativamente pequeno e gerar uma quantidade significativa de água doce.

Em uma variação desta concretização, o sistema para uso em embarcações também pode ser acionado por uma turbina eólica, 51, montada sobre a embarcação, a fim de utilizar a energia gerada pelo vento para acionar o compressor 55. A turbina 51 pode ser montada de modo que possa oscilar e ficar sempre a favor do vento; deste modo, o vento sozinho

ou combinado com a energia do motor da embarcação pode ser utilizado para gerar a energia que irá fazer o compressor funcionar. O compressor 55 é acionado diretamente por um sistema de transmissão, de modo que a energia da turbina de vento seja usada diretamente, sem necessidade de ser primeiro convertida em eletricidade, o que aumenta a eficiência do sistema.

2. Aplicação insular e em Mar Aberto:

A aplicação insular usa, de preferência, qualquer dos métodos de energia de ar comprimido descritos acima para co-gerar eletricidade e/ou ar refrigerado. Antes de mais nada, durante o período em que apenas eletricidade seja necessária, um aquecedor ou calor residual pode ser utilizado para pré-aquecer o ar comprimido que entra no turbo-expansor 61 (a cerca de 176,7 °C (350 °F)), a fim de otimizar a geração de eletricidade com consumo reduzido de ar comprimido e, essencialmente, sem ar refrigerado oriundo do turbo-expansor. Contudo, durante o tempo em que se necessita tanto de eletricidade quanto de ar refrigerado (para fins de dessalinização e condicionamento de ar), a entrada de calor é, preferencialmente, desligada. Neste caso, o turbo-expansor gera eletricidade com maior consumo de ar comprimido, e o ar refrigerado é expelido como um sub-produto que alimenta o sistema de dessalinização e/ou resfriamento. O ar frio que passa pelo sistema de

dessalinização pode, também, ser utilizado para resfriar um condicionador de ar.

Durante o período em que (a) não se necessite de eletricidade, e (b) haja necessidade de ar refrigerado com o objetivo de dessalinização e/ou condicionamento de ar, a entrada do aquecedor é, preferencialmente, desligada. De preferência, o sistema de reciclagem do tanque de surto descrito acima pode ser implementado. Neste caso, o turbo-expansor 61 gera, preferencialmente, menos energia elétrica, ou nenhuma, e o ar refrigerado é expelido pelo turbo-expansor 61 para o sistema de dessalinização e/ou de refrigeração. Além disso, qualquer energia elétrica produzida é reciclada para acionar o compressor alternativo #2, 59. Neste modo de operação, o volume do tanque de surto não é relevante. Uma pressão de equilíbrio é atingida no tanque 57 de modo que uma dada energia de entrada do compressor libera um fluxo constante de ar refrigerado. De preferência, os compressores #1 e #2 funcionam continuamente.

20 3. Cenários do Sistema:

No Cenário #1, mostrado na Figura 4a, há interesse na geração do nível máximo de energia elétrica ao mesmo tempo em que a exaustão do tanque de estocagem 57 é feita em um fluxo mínimo. Isto pode ser alcançado utilizando-se calor

residual de um equipamento próximo (ou radiação solar) ou o compressor 55 para aquecer o ar pressurizado que alimenta o turbo-expansor 61. A temperatura inicial mais alta, digamos cerca de 148,9 °C (300 °F), produzirá uma temperatura do ar que sai do turbo-expansor 61 ligeiramente menor do que a temperatura ambiente. Assim, embora haja geração de eletricidade, não há co-geração útil de ar refrigerado. O material do rotor do turbo-expansor 61 nas pontas de alta velocidade do impulsor rotativo deve ser titânio.

10 No cenário #2, mostrado na Figura 4b, há interesse na produção de energia elétrica e, simultaneamente, de ar extremamente frio liberado pelo turbo-expansor 61. Assim, há co-geração de ar refrigerado, que pode ser utilizado em sistemas de condicionamento de ar, refrigeradores, *food*
15 *lockers* e, em uma concretização preferida, sistemas de dessalinização. O turbo-expansor 61 pode trabalhar em temperaturas abaixo de 21,1 °C (70 °F), de modo que é aceitável que o rotor seja feito de alumínio resistente nas pontas de alta velocidade do impulsor rotativo.

20 No cenário #3, mostrado na Figura 4c, não há interesse em produzir energia elétrica, mas sim em obter ar refrigerado a partir do turbo-expansor 61. Sendo assim, há co-geração de ar refrigerado, que pode ser utilizado em sistemas de condicionamento de ar, *food lockers*,
25 refrigeradores e, em uma concretização preferida, sistemas

de dessalinização. O turbo-expansor pode trabalhar em temperaturas abaixo de $21,1^{\circ}\text{C}$ (70°F), de modo que é aceitável que o rotor seja feito de alumínio ultra-resistente nas pontas de alta velocidade do impulsor rotativo.

C. Processo de Congelamento Eutético:

Uma tecnologia existente, chamada de método de cristalização eutética por congelamento, chamou a atenção nos último anos. No contexto de dessalinização de água do mar contendo sais, o processo eutético de cristalização por congelamento beneficia-se do processo de congelamento e do diagrama de fases da solução de água salgada, como mostrado na Figura 20.

A água pura começa a solidificar em 0°C (32°F), enquanto uma solução de água do mar com uma concentração de sal de 3,5% começará a congelar perto de $-1,9^{\circ}\text{C}$, e o gelo que se forma é, essencialmente, livre de sal, com uma densidade aproximadamente igual ao formado por água doce. A menor temperatura na qual uma solução de água do mar permanecerá sob a forma líquida é $-21,2^{\circ}\text{C}$ ou cerca de $-6,2^{\circ}\text{F}$. A água doce contida na água do mar começa a congelar antes de atingida esta temperatura, formando cristais de gelo; naquela temperatura, porém, não só a água doce congela, mas a solução salina começa a cristalizar,

juntamente com o gelo, sob as formas de cristais de NaCl puro e diidratado ($\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), até que a parte líquida da solução congele totalmente. A solução congelada é uma mistura de cristais de NaCl puro e diidratado, $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, bem como dos cristais da água doce original congelada. Esta fronteira entre a mistura bifásica, mais quente, e a mistura monofásica heterogênea, mais fria, é chamada uma mistura eutética.

O ponto no qual uma mistura eutética está em equilíbrio com a solução é um ponto de calibração excelente para uma escala de temperatura quando há apenas um soluto salino na água. Cada soluto tem suas próprias temperatura e concentração eutéticas. Isto se deve ao fato de que uma mistura com duas fases (gelo-água doce-gelo e água do mar) e uma fase sólida é estável em uma dada temperatura, que é única para cada soluto em particular. Se existe uma transição de duas fases para uma fase sólida, a temperatura deve ser igual a $-21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ou $-6,2\text{ }^{\circ}\text{F}$).

A sequência de etapas no processo de cristalização por congelamento na temperatura eutética pode ser explicada com base em um diagrama de fases água-sal típico, como o mostrado na Figura 20. Se uma solução de água do mar for resfriada abaixo da temperatura de congelamento, identificada pela linha de equilíbrio *liquidus*, cristais de gelo começarão a se formar. Essa linha tem uma inclinação

que mostra que a temperatura de congelamento da água do mar depende da concentração de sal na solução. Por exemplo, quando a concentração de sal é igual a 0 (zero), a temperatura de congelamento é igual a 0 °C (32 °F). Mas, quando a concentração de sal aumenta, ao se percorrer a linha de equilíbrio de fases *liquidus* no sentido descendente, a temperatura na qual os cristais de gelo começarão a se formar diminui. Por exemplo, quando a concentração de sal na solução é igual a 10%, a temperatura de congelamento é menor, algo entre -9,4 e -6,7 °C (15 a 20 °F). Então, continuando-se o resfriamento, à medida que mais gelo se forma, a solução de água do mar se torna mais concentrada em sal. Sendo assim, sua composição varia ao longo da curva *liquidus* até atingir o chamado ponto eutético, no qual a solução está saturada em sal (concentração de sal igual a 23,3%). Nesta concentração, os cristais de gelo irão se formar quando a temperatura for igual à do ponto eutético, que é de cerca de -21,2 °C (-6,2 °F). Continuando o resfriamento abaixo de -21,2 °C (-6,2 °F), o resultado será a formação de uma mistura de três sólidos: 1) cristais de gelo de água pura, 2) cristais de sal puro, e 3) cristais de sal hidratado puro, formando uma só fase, que não permite separação. O ponto eutético do NaCl é -21,2 °C (-6,2 °F), e a composição eutética é de 23,3%.

Na presente invenção, a massa de gelo se forma, preferencialmente, em uma temperatura ligeiramente acima da do ponto eutético, para evitar a cristalização do sal. Logo, preferencialmente, é utilizada apenas a área acima da linha
5 de equilíbrio de fases *solidus* (abaixo da concentração de 23% de sal), que representa a região do diagrama de fases acima da temperatura EFC. A região mais à esquerda do diagrama de fases (0% de sal) representa a formação de gelo/neve puro, e a região central representa a solução
10 salina. A região na extrema direita do diagrama de fases e a região abaixo da linha de equilíbrio *solidus* incluem cristais de gelo puro, cristais de "sal e água de hidratação" puros e cristais de sal puro em uma única fase sólida, que não permite separação entre os componentes e não
15 é utilizada no presente sistema.

Análises de RMN realizadas pelo Dr. Herman Cho da
Pacific Northwest Laboratories mostraram que, quando uma
solução de sal é congelada abaixo da temperatura eutética, ela retorna "imediatamente" à sua condição bifásica se
20 aquecida a uma temperatura maior do que a eutética. Este é um dado importante para descrever o comportamento de gotículas muito pequenas na câmara de cristalização.

Deve-se considerar que a água do mar padrão, oriunda dos oceanos, contém outros minerais e impurezas, além do
25 sal, como mostrado na Figura 7, que apresenta a composição

padrão de água do mar. Para cada componente, é dada a porcentagem em peso e a temperatura eutética. Por outro lado, a Figura 8 representa os requisitos para uma água potável pura. Geralmente, quando uma água do mar contendo 3% de sal é tratada e atinge uma concentração de sal de 0,03% é considerada potável. Considera-se água doce toda aquela em que a concentração de sal é menor do que 0,05%, enquanto o termo água salobra, é utilizado para águas com concentrações de sal entre 0,05% e 3,0%. A expressão água salina é usada, geralmente, para águas com concentração de sal entre 3,0% e 5,0%, e o termo salmoura, para águas com concentração de sal acima de 5,0%. Como já dito, o termo "água do mar" está sendo usado neste documento para qualquer água que necessite ser purificada, seja oriunda do mar ou não.

Observe-se que, ao utilizar a temperatura eutética de -21,2 °C (ou -6,2 °F) para extrair cloreto de sódio (NaCl), o processo de cristalização deixará os seguintes minerais: cloreto de cálcio (1,36 g/litro de solução) e cloreto de magnésio (4,66 g/litro de solução). Estes são dois produtos, que podem ser retirados para benefício econômico posterior. Se houver interesse na remoção de outros minerais, tais como cloreto de potássio, sulfato de magnésio e bicarbonato de sódio, é necessário um controle mais cuidadoso da temperatura de derretimento para garantir que esses compostos não congelem junto com a água, mas permaneçam na

solução salina resultante, a fim de serem recuperados por meio de um processamento adicional. Quando o objetivo final é água doce potável, a presente invenção utiliza filtros para remover o máximo possível das impurezas contidas na
5 água do mar, antes dela passar pelo processo de dessalinização. A invenção permite o aproveitamento econômico de quaisquer dos outros minerais.

Muito pouca informação foi publicada sobre o método EFC, possivelmente devido à alegada complexidade desse
10 método em comparação com as técnicas convencionais que competem com ela, como a cristalização por evaporação e a cristalização por resfriamento. Com o avanço da tecnologia de coluna de lavagem e a aplicação em larga escala da cristalização por fusão como uma técnica de ultra-
15 purificação, as principais desvantagens previstas para a EFC, relativas a custo do investimento e limitações de escala, foram ultrapassadas. Chegou a hora de considerar sua aplicação comercial.

Como discutido acima, o processo de EFC da presente
20 invenção difere dos outros processos pelo fato de envolver a formação de cristais de gelo de água pura, que podem ser separados das impurezas que ficam na água-mãe. É importante que as gotículas congelem para formar uma solução bifásica de partículas sólidas de gelo e líquido salino. Por isto é
25 desejável que as gotículas alcancem a temperatura eutética,

ou próxima, ainda no ar. Por outro lado, se as gotículas se tornarem muito frias (temperatura abaixo da eutética) enquanto passam pela câmara, a água doce contida nelas poderá congelar junto com os cristais de sal e com a solução salina sólida. Neste caso, não será possível separar o sal da água doce.

Isto pode acontecer, por exemplo, quando a água do mar pulverizada consiste de gotículas de tamanhos variados, caso em que as gotículas menores podem atingir uma temperatura menor do que a eutética e congelar completamente ao atingir o fundo da câmara. Com relação a isto, considere-se que o pulverizador projetado para dispersar uma nuvem de gotículas com diâmetro médio próximo de 4.000 micra irá gerar também uma fração menor de massa flutuante, mas um número enorme de gotículas com diâmetro na faixa dos 400 micra. Estas partículas menores têm uma velocidade de sedimentação dez vezes menor e terão um tempo de residência dez vezes maior. Além disto, essas partículas congelarão mais rapidamente e em temperaturas bem abaixo da do ponto eutético quando interagirem com o fluxo de ar local que sai dos pulverizadores a $-92,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-135\text{ }^{\circ}\text{F}$) ou $-115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-175\text{ }^{\circ}\text{F}$) na configuração em fluxos paralelos. Embora os pulverizadores usuais espalhem partículas de diâmetro maior, sempre haverá partículas menores, com uma distribuição de tamanhos em uma

certa faixa. As partículas menores devem ser numerosas, mas não contribuirão para uma massa muito grande no final.

Assim, as pequenas gotículas que descem sob um regime de temperatura extremamente baixa irão, na verdade, causar
5 uma cristalização indesejada gerando uma partícula sólida composta por (1) gelo de água doce, (2) sal sólido, em que cada molécula de sal se liga a duas moléculas de água de hidratação, e (3) cristais sólidos de sal. Durante a
passagem das pequenas partículas pelo ar frio não há
10 separação da solução salina e da água doce. Mas, como será discutido adiante, a separação ocorrerá quando a gotícula se depositar sobre a massa de partículas de gelo acumulada, criada pelas gotículas grandes no fundo da câmara, que tem, preferencialmente, uma temperatura de equilíbrio maior do
15 que a eutética.

As partículas muito pequenas, com diâmetros da ordem de poucas centenas de micron, podem congelar completamente (até o seu centro) quando expostas ao ar com temperatura muito menor do que a eutética, na região próxima do pulverizador.
20 Quando essas pequenas gotículas se depositam sobre a massa mais quente, de gelo/neve, no fundo da câmara de cristalização, elas serão aquecidas, preferencialmente, em torno da temperatura de equilíbrio que é ligeiramente mais alta do que a do ponto eutético. Logo, se gotículas pequenas
25 são congeladas abaixo da temperatura eutética, elas irão

descongelar acima desta temperatura. Neste ponto, a separação usual entre a estrutura sólida porosa de neve/gelo e a solução salina líquida (salmoura) irá ocorrer. No processo desta invenção, portanto, pelo menos no fundo da
5 câmara, a temperatura de cristalização é mantida, de preferência, ligeiramente acima da temperatura eutética de cristalização para evitar que o sal cristalize. O resultado final é a formação de gelo/neve puro e líquido salino residual.

10 A operação da câmara de cristalização na temperatura eutética resulta na máxima conversão possível de água do mar em água doce, 85,7%. Mas, a porosidade da massa de gelo/neve pode ser maior em temperaturas ligeiramente mais altas. Sendo assim, sacrifica-se a eficiência da conversão, que
15 passa a ser menor do que 85,7%, para alcançar uma pureza maior na água doce obtida ao final.

A presente invenção representa uma nova variação do sistema de EFC, no qual ar refrigerado limpo é usado como refrigerante, e é misturado com uma nuvem de gotículas de
20 água do mar para fazer com que ela atinja uma temperatura próxima à do ponto eutético. Deste modo, cristais de gelo de água pura podem ser formados, e são removidos da solução salina que resta, após o congelamento. Na presente invenção, pretende-se que o sistema trabalhe, na maior parte do tempo,
25 acima do ponto eutético, em especial quando os cristais de

gelo começam a sedimentar, de modo que a formação de cristais sólidos de sal pode ser evitada.

Um dos objetivos da presente invenção é assegurar que a água do mar seja adequadamente congelada por exposição ao ar refrigerado introduzido em uma câmara de mistura, na qual ele é misturado com a água do mar. Para isto, a presente invenção contempla a introdução de ar extremamente frio na câmara de mistura, com a temperatura do ar preferencialmente entre $-92,8^{\circ}\text{C}$ (-135°F) e -115°C (-175°F), seguida de pressurização da água do mar e sua injeção na câmara de mistura, através de pulverizadores, sob a forma de microgotículas de água do mar, as quais podem ser mais facilmente misturadas, resfriadas e afetadas pelo ar refrigerado. Para assegurar que ocorra congelamento e separação adequados, é importante determinar o tamanho, a velocidade e a pressão das gotículas e como elas são formadas e introduzidas no fluxo de ar refrigerado. É importante também determinar a temperatura, o volume do fluxo e a direção relativa do ar refrigerado, assim como o tamanho da câmara de mistura.

A Figura 9 mostra os regimes de temperatura para as várias fases de uma gotícula de água. O *Processo Bergeron*, assim chamado devido a seu descobridor, Tor Bergeron, envolve gotículas de água super-resfriadas. O termo *super-resfriadas* se refere a água que ainda se mantém no estado líquido em temperaturas abaixo do ponto de congelamento, 0

graus Celsius ou 32 graus Fahrenheit. Pesquisas demonstraram que a água em gotas muito pequenas, como as que caem das nuvens, podem existir em temperaturas muito abaixo da de congelamento (tão frio como -40°C ou -40°F).

5 A presente invenção utiliza, de preferência, uma câmara de mistura como as mostradas nas Figuras 14-18 e 25-31, para misturar o ar refrigerado com as gotículas de água do mar. A câmara de mistura é, essencialmente, um recipiente, preferencialmente com paredes isoladas, no qual as gotículas
10 de água do mar e o ar refrigerado podem ser introduzidos e misturados até que, coletivamente, eles atinjam uma temperatura próxima (ligeiramente maior) à eutética que, como indicado acima, é de $-21,1^{\circ}\text{C}$ para a água do mar. O tamanho e a configuração da câmara podem variar, dependendo
15 das necessidades e das capacidades desejadas, como será discutido adiante.

 Para ajudar a garantir que ocorra uma mistura adequada, a água do mar é, preferencialmente, pressurizada e passada através de um ou mais pulverizadores a fim de formar um
20 jato, que gera uma "chuva" de gotículas de água do mar, ou uma névoa que, de preferência, é introduzida na câmara. Qualquer das várias configurações de pulverizador é possível, dependendo dos resultados que se deseja alcançar.

Pulverizadores de cone cheio formam um jato que cobre completamente uma área redonda, oval ou quadrada. Geralmente, o líquido é turbilhonado no pulverizador e misturado com um líquido que não gira e que passa por fora de uma hélice interna. O líquido, então, sai por um orifício formando um padrão cônico. O ângulo do jato e a distribuição do líquido neste padrão dependem do desenho da hélice e da localização relativa do orifício de saída. O desenho deste e as proporções geométricas relativas também afetam o ângulo e a distribuição do jato. Pulverizadores de cone cheio fornecem uma distribuição uniforme do jato, com gotículas de tamanho médio a grande dependendo do desenho de sua hélice, que apresenta características de passagem e controle de grande fluxo. A Figura 10 apresenta diversas características de pulverizadores. A configuração de cone cheio pode ser a que melhor se aplica à presente invenção. Em cada padrão de jato, as menores capacidades (sendo as capacidades definidas pela menor pressão da gota através do orifício) e o diâmetro do orifício pequeno, produzirão as menores gotas no jato. As maiores capacidades produzem as maiores gotas no jato, embora na maioria dos pulverizadores, uma gama de gotículas de diferentes tamanhos (distribuição) seja, inevitavelmente, formada. Por exemplo, um pulverizador com DVM de 4.000 micra terá a maioria das gotículas no fluxo com 4.000 micra. Mas haverá um fluxo bem menor de partículas com o diâmetro menor, de 400 micra. O diâmetro volumétrico

mediano (DVM) baseia-se no volume de líquido pulverizado sendo, portanto, uma medida amplamente aceita. A Figura 11 mostra a faixa de tamanhos de gotas possíveis por tipo de pulverizador.

5 Observe-se que em uma concretização da presente invenção, haverá mistura entre a água do mar que entra e o ar refrigerado, em que cerca de 113,4 kg/min (250 libras por minuto (250 #/min)) de água do mar podem ser processadas com uma quantidade pré-determinada de ar refrigerado, a qual foi
10 calculada como sendo aproximadamente 202,5 m³/min (7.151 pés cúbicos padrão por minuto (7.151 SCFM)). Neste caso, teoricamente, serão recuperados cerca de 97 kg/min (214 #/min) de gelo (água doce). Com base em uma eficiência do turbo-expansor de 9,9 SCFM/hp e uma eficiência do compressor
15 de 2,2 SCFM/hp, há uma energia de alimentação de 7,1 kW para gerar 453,6 g/min (uma libra por minuto) de água doce.

A fim de transferir cerca de 5 toneladas (11.000 libras) de água do mar em 120 minutos, o pulverizador escolhido deve passar um mínimo de 40,7 L/min (10,76 galões
20 por minuto). Assim, um pulverizador de cone cheio com capacidade de 45,4 L/min (12 galões por minuto) e 4.300 micra de DVM pode ser aplicado àquela concretização exemplificada. Observe-se que uma chuva forte consiste de partículas com DVM de 2.000 a 5.000 micra. Gotículas com
25 diâmetro maior do que 8.000 micra fragmentam-se sob um vento

relativo. Neste exemplo, o volume do fluxo pode determinar o projeto do equipamento, inclusive o tamanho dos pulverizadores e a pressão operacional deles; e, portanto, o tamanho das gotículas de água do mar, nos casos em que seja
5 necessária uma dada taxa de produção de água doce. Em outros exemplos, os tamanhos dos pulverizadores e das gotículas de água do mar podem ser determinados com base nas características otimizadas que se deseja atingir, para a máxima eficiência do equipamento na produção de água doce.

10 O tamanho das gotículas de água do mar deve ser controlado, tanto quanto possível, e pré-determinado, para garantir que ocorram uma mistura e uma transferência de calor adequadas, que auxiliem o congelamento apropriado. De preferência, as gotículas precisarão somente de um pouco de
15 tempo para congelar completamente, da superfície externa para o centro. Um exemplo disto pode ser observado na Figura 12. Isto pode ser função do tamanho da gotícula, assim como da temperatura, do volume do fluxo e da direção do ar refrigerado - que também é função do tamanho da câmara - e
20 do tempo durante o qual as gotículas são expostas ao ar refrigerado, ou seja, do tempo de residência. As gotículas devem ser suficientemente pequenas para serem rapidamente congeladas, mas grandes o bastante para cair no fundo da câmara, não obstante o fluxo de ar refrigerado.

De um modo geral, o tamanho da gotícula pode ser afetado pela pressão usada para forçar a água do mar através dos bicos do pulverizador. Quanto maior a pressão, menor tenderá a ser o diâmetro da gotícula; e, quanto menor a pressão, maior tenderá a ser o diâmetro da gotícula. Por exemplo, quando for usada uma pressão de 1,9 atm (28 psia) as gotículas tenderão a ser relativamente pequenas, resultando em uma velocidade de descida de, aproximadamente, 7,9 m/s (26 ft/s), sob pressão de 1 atm (14,67 psia). Por outro lado, a uma pressão menor, digamos, cerca de 1,1 atm (16 psia), as gotículas tenderão a ser maiores, resultando em uma velocidade de descida de aproximadamente 2,5 m/s (8,3 ft/s), em 1 atm (14,67 psia). No entanto, na maioria dos pulverizadores, nem sempre é possível controlar completamente o tamanho de cada gotícula de água do mar formada. Assim, a presente invenção tem que levar em consideração a possibilidade de que vários tamanhos de gotícula serão formados. Contudo, os pulverizadores são projetados para um determinado tamanho nominal de gotícula. Estatisticamente, o tamanho nominal da gotícula será o valor mediano (DVM), com uma distribuição em forma de sino típica. Para os pulverizadores de qualidade, a distribuição normal será relativamente estreita e alta, de modo que a maioria das partículas terão tamanho próximo ao valor mediano. A região externa à curva, acima e abaixo da média, não terá

efeito significativo sobre o desempenho do sistema de dessalinização.

Outra consideração necessária é relativa à velocidade do fluxo de ar refrigerado na câmara. Não só o tamanho da gotícula, mas também quanto tempo ela ficará exposta e suspensa no ar refrigerado e como ela circulará no interior da câmara de mistura, dependerão das velocidades relativas das gotículas e do ar refrigerado. Ou seja, a velocidade com que as gotículas caem no fundo da câmara pode ser modificada ajustando-se a direção e a velocidade do fluxo de ar refrigerado na câmara, como será discutido adiante. Com relação a isto, a direção relativa do jato de água do mar e do ar refrigerado que estão sendo introduzidos na câmara podem contribuir para a formação adequada de cristais de gelo. A este respeito, a presente invenção contempla tanto o arranjo em contra-corrente, quanto o arranjo em correntes paralelas.

D. Contra-Corrente:

Para se conseguir um arranjo em contra-corrente, o ar refrigerado e o jato de água do mar são introduzidos na câmara em direções opostas. Isto pode ser feito, por exemplo, pulverizando-se a água do mar para baixo, enquanto o ar refrigerado é introduzido no sentido da parte superior da câmara. Este arranjo é mostrado nas Figuras 16-18 e 25-

30. Com a contra-corrente, usando-se um jato descendente de água do mar e um fluxo ascendente de ar refrigerado, é importante considerar o efeito de fluxos opostos no caminho em que as gotículas circulam, congelam-se e se depositam na câmara. Em cada caso, a diferença entre as velocidades dos dois fluxos, levando-se em conta os efeitos da gravidade, o tamanho das gotículas, a temperatura e volume do fluxo de ar refrigerado, e o tamanho da câmara, pode ajudar a determinar a extensão em que as gotículas de água do mar devem circular a fim de se obter resfriamento, congelamento e deposição adequados das gotículas. Elas devem cair no fundo da câmara para começar a formar uma massa de gelo em tempo curto, isto é, em menos que uns poucos segundos.

Sendo assim, ao considerar um arranjo em contra-corrente, é necessário calcular a velocidade final de queda das gotículas de água do mar sujeitas ao fluxo ascendente de ar refrigerado. Uma correlação de velocidade final de queda de gotículas de água no ar é apresentada na Figura 13. As partículas de menor diâmetro (mostradas abaixo da linha), em vários casos, irão subir e poderão ser jogadas para fora do sistema. Logo, de preferência, o pulverizador deve ser configurado de modo a não produzir gotículas muito pequenas. Contudo, na maioria dos pulverizadores, uma certa quantidade de gotículas de água do mar será, inevitavelmente, pulverizada sob a forma de micro-gotículas, que tenderão a

subir, embora, preferencialmente, estas representem uma fração muito pequena da água do mar que está entrando.

Deve-se estar atento para utilizar cerca de 202,5 m³/min (7.151 SCFM) de ar refrigerado e uma câmara com área transversal da coluna vertical de 2,3 m² (25 ft²), na qual a velocidade de subida vertical do ar refrigerado foi determinada como sendo de cerca de 1,45 m/s (4,77 ft/s). Neste caso, considerando-se os dados que levaram à Figura 13, observou-se que as gotículas de água do mar maiores do que 325 micra tenderão a assentar-se adequadamente, devagar, através de um fluxo ascendente de ar refrigerado com aquela velocidade. Observando-se o gráfico da Figura 13, no entanto, chegou-se à conclusão de que gotículas de água do mar com diâmetro de 4.000 micra, com velocidade do ar refrigerado de 13,4 m/s (44 ft/s), serão mais aceitáveis. A Dra. Wa Gao relatou o congelamento de gotículas de águas residuais de pocilgas com tamanhos de 2.800 e 4.200 micra em um tempo médio de cerca de 7 segundos, utilizando ar refrigerado a -20 °C (-4 °F) no túnel de vento vertical utilizado por ela. Na presente invenção, contudo, as gotículas de água do mar congelam, preferencialmente, passando da temperatura ambiente - isto é, 4,4 °C (40 °F) -, até perto da temperatura eutética, -21,2 °C (-6,2 °F), em muito menos tempo, cerca de 0,2 segundo, desde que se use ar

refrigerado em temperaturas entre $-92,8^{\circ}\text{C}$ (-135°F) e -115°C (-175°F).

As gotículas maiores, com diâmetro da ordem de 4.000 micra, levarão mais do que 0,2 segundo para congelarem até o cerne, considerando-se a mesma temperatura do ar refrigerado. A princípio, quando a gotícula estiver à temperatura de $4,4^{\circ}\text{C}$ (40°F) e o ar entre -115°C (-175°F) e $-92,8^{\circ}\text{C}$ (-135°F), será possível haver uma grande transferência de calor e apenas 0,2 segundo será suficiente.

No entanto, este cálculo não é totalmente preciso, pois há troca de calor à medida que a temperatura das gotículas diminui e a do ar aumenta. Além disso, admite-se que as gotículas interagem com todo o ar necessário para garantir uma adequada troca de calor. Mas, os dados de congelamento de gotícula relatados pela Dra. Gao respaldam este pequeno tempo de congelamento para uma gotícula, isolada, em correntes de ar mais quentes. Considere-se o exemplo de tempo de residência na câmara em contra-corrente, onde uma gotícula com 4.000 micra de diâmetro e velocidade de descida de $13,4\text{ m/s}$ (44 ft/s), encontra o ar refrigerado que sobe a câmara com uma velocidade menor, de $1,2\text{ m/s}$ (4 ft/s). A gotícula descera através de uma altura vertical de $3,0\text{ m}$ (10 pés) durante $10\text{ pés} / (44\text{ ft/s} - 4\text{ ft/s}) = 0,25\text{ segundo}$. Assim, é de se esperar que as gotículas maiores não farão a troca de calor necessária antes de se depositar sobre a

massa de gelo/neve e completar a troca de calor para alcançar a temperatura de equilíbrio, que é de $-21,1^{\circ}\text{C}$ (-6°F).

Pode-se observar também que, quanto maior o tamanho da gotícula, maior poderá ser a velocidade usada na câmara em contra-corrente para subida do ar refrigerado, capaz de permitir que as gotículas caiam no fundo da câmara em um tempo relativamente curto que, nos exemplos aqui considerados foi de aproximadamente 2,5 segundos. Com um tamanho maior de gotícula, mais tempo ela levará para congelar até o cerne, considerando-se a mesma temperatura do ar refrigerado. É desejável que a temperatura do ar refrigerado seja relativamente baixa e que a velocidade do seu fluxo seja relativamente alta para que a taxa de transferência para a gotícula seja alta.

Embora os bicos do pulverizador sejam, geralmente, direcionados para a parte inferior da câmara, através de orifícios localizados nas paredes desta, como mostram as Figuras 16-18, o ar frio tenderá a subir devido ao respirador existente no topo da câmara. Sendo extraído pelo alto, o ar refrigerado introduzido na câmara flui somente para cima, de modo que este fluxo pode ser usado para criar a contra-corrente em relação às gotículas que descem. Esta trajetória fornece o tempo de residência mais longo e permite a coalescência das gotículas que colidem. A entrada

do ar refrigerado localiza-se nos lados da câmara de modo que as gotículas grudam no mecanismo de injeção. Na pesquisa feita com congelamento de gotículas, o ar refrigerado ascendente foi injetado com velocidade de subida igual à de descida da gotícula de modo que esta permanecesse fixa para 5 que se pudesse observar as propriedades da gotícula durante o congelamento.

A velocidade de sedimentação das gotículas e a rapidez do processo de congelamento também determinam a altura da 10 câmara de sedimentação. Usando-se o arranjo em contracorrente, quanto mais alta a câmara de mistura, mais tempo as gotículas levarão para chegar ao fundo e, portanto, maior será o tempo de exposição das gotículas ao ar frio para congelarem. Além disto, o diagrama de fases é um diagrama de 15 equilíbrio, que considera ter havido tempo suficiente para permitir a separação das diferentes fases. A construção final da câmara de sedimentação, portanto, é determinada, de preferência, com base na eficiência do sistema na separação de fases. Se a estimativa desta for muito otimista, pode ser 20 necessário reduzir a vazão de água do mar através do pulverizador, ou aumentar a altura da câmara de sedimentação, ou o volume do fluxo de ar refrigerado, etc.

É desejável assegurar também que as partículas de gelo se mantenham separadas no ar, de modo a congelarem 25 apropriadamente antes de se depositarem e coalescerem no

fundo da câmara para formar uma massa de gelo. Se duas ou mais partículas de gelo se agregarem durante a descida, elas tenderão a formar gotículas maiores, que necessitarão de mais tempo e mais resfriamento para congelar. Assim, ao
5 utilizar o arranjo em contra-corrente é desejável formar gotículas de água do mar suficientemente separadas para que, ao serem pulverizadas elas não se juntem no ar.

Outros pesquisadores já examinaram duas gotas de chuva colidindo devido à força de atração entre elas. Eles
10 consideraram gotículas com diâmetro de 20 micra e separação inicial de, aproximadamente, 10 vezes o diâmetro delas, ao invés da hipótese usual de 50 vezes o diâmetro. A separação de 10 diâmetros produz uma distribuição mais densa das gotículas, que levará a uma maior tendência à coalescência,
15 ao crescimento da gota e à formação de chuva.

Com base nestas proporções, se a separação entre as partículas for de 25 vezes seu diâmetro, e este for de 4.000 micra, a separação preferida será de 100.000 micra. Isto significa que haverá 1 partícula em um cubo de 10 cm X 10 cm
20 x 10 cm ou, 1 partícula por litro. O cálculo acima significa que a distribuição desta nuvem deverá ser alcançada em uma câmara com altura de 312,7 m (1.026 ft) e 2,3 m² (25 ft²) de área da seção transversal, onde esta nuvem estática terá uma densidade de 1 partícula por litro de ar. Se houver esta
25 distribuição de gotículas em uma nuvem em grande altitude,

as gotículas cairão no chão sem colidir durante seu trajeto de descida.

Se a separação entre as partículas for de 10 vezes o seu diâmetro, e este for de 4.000 micra, a separação entre elas será de 40.000 micra. Com base no cálculo acima, a distribuição desta nuvem deverá ser alcançada em uma câmara com altura de 79,2 m (260 ft) e $2,3 \text{ m}^2$ (25 ft^2) de área da seção transversal. Se houver esta distribuição de gotículas em uma nuvem em grande altitude, as gotículas cairão no chão, mas possivelmente irão colidir durante a trajetória de queda.

No entanto, ao se introduzir um pulverizador, que produz constantemente uma nuvem de gotículas de água do mar, e promover uma sedimentação contínua por meio de um fluxo de ar movendo-se lentamente para cima, com um fluxo de até 1,2 m/s (4 ft/s), observou-se que a altura da câmara de sedimentação pode ser bem menor. Além disso, quando se usa uma gotícula com diâmetro de 4.000 micra, ela não será afetada significativamente pela direção do fluxo ascendente de ar e, portanto, tenderá a se depositar no fundo da câmara de cristalização, onde completará sua troca de calor e sofrerá alguma drenagem em uns poucos segundos. Mas, quando se utilizam gotículas com diâmetros de 200 micra ou menos, elas tenderão a sedimentar muito lentamente, com uma velocidade de descida de cerca de 0,6 m/s (2 ft/s). Logo, as

gotículas poderão até não se depositarem no fundo da câmara de cristalização. Neste caso, portanto, poderá ser necessário garantir que as gotículas tenham diâmetros maiores do que, pelo menos, 400 micra. Apesar disto, na
5 extremidade mais baixa do espectro de tamanhos, essas gotículas menores terão um tempo de residência maior, ou seja, provavelmente maior do que 2,5 segundos. Além disto, como será discutido mais tarde, as gotículas formarão uma massa de gelo mais poroso quando depositadas nas
10 temperaturas mais baixas associadas ao ar que chega no fundo da câmara de cristalização.

Estas são desvantagens inerentes ao arranjo em contracorrente uma vez que o fluxo ascendente de ar refrigerado faz com que as gotículas sejam forçadas para cima e circulem
15 por mais tempo. Isto facilita a colisão entre as gotículas e a agregação delas se a câmara não for suficientemente grande e/ou se a densidade de gotículas for muito alta.

A Figura 16 mostra um exemplo de um sistema em contracorrente com remoção do gelo em batelada, no qual o ar
20 refrigerado é injetado do meio da câmara principal 141, e flui para cima. A Figura 16 mostra um corte da câmara principal 141, com tubos 143 e/ou cavidades se estendendo ao redor das paredes dela, 145, por onde circulam a água do mar e/ou ar comprimido aquecido com o objetivo de troca de
25 calor, como será discutido. Esta concretização mostra que o

ar comprimido pode ser gerado pelo turbo-compressor 148, e ser liberado e expandido pelo turbo-expansor 150, de modo que o ar resfriado produzido possa ser introduzido na câmara 141 próximo ao meio 140. Podem-se utilizar também outros 5 compressores, trocadores de calor, etc., como discutido anteriormente.

Preferencialmente, o ar refrigerado oriundo do turbo-expansor 150 é direcionado para cima, como resultado de sua aspiração no topo da câmara 141, ou seja, o fluxo de ar 10 refrigerado começa aproximadamente no ponto médio 140 da câmara 141 e é extraído pelo topo dela. A temperatura, a pressão e o fluxo de ar refrigerado são, preferencialmente, pré-determinados e dependem dos fatores aqui discutidos.

A água do mar pré-resfriada, que é filtrada e feita 15 circular pelas paredes da câmara, como será discutido, é introduzida na câmara 141, de preferência, através de um conjunto de um ou mais pulverizadores, 142, para formar um jato de gotículas de água do mar sob a forma de uma nuvem de gotículas. Esta é injetada na câmara, de preferência, por 20 cima, do topo 147 da câmara 141, em direção descendente. A temperatura, a pressão e o fluxo das gotículas de água do mar são, preferencialmente, pré-determinados, e dependem dos fatores aqui discutidos.

Esta configuração permite que o ar refrigerado e as gotículas de água do mar sejam introduzidas em direções opostas no interior da câmara 141, e circulem de modo que as gotículas podem ser resfriadas ainda mais pelo ar refrigerado, através de troca de calor dentro da câmara. Os pulverizadores 142 são projetados, preferencialmente, para distribuir as gotículas em direção ao centro, de modo que as partículas de gelo sejam mantidas longe das paredes da câmara, e que a massa de gelo tenda a se formar no centro da câmara, sob a forma de um cone invertido. Nesta concretização, permite-se que o ar refrigerado extraído deixe a câmara 141 através de um exaustor colocado no topo, 147, de modo que este ar purgado possa, então, ser utilizado para outros propósitos de refrigeração como, por exemplo, condicionamento de ar.

De preferência, a água do mar que entra com temperatura mais alta e/ou o ar aquecido que sai do turbo-compressor 148 circulam por dentro das paredes da câmara 145 para ajudar a evitar que as gotículas de gelo que se formam na câmara 141 se depositem nas paredes 145, e para regular a temperatura dentro da câmara 141, isto é, para ajudar a manter uma temperatura mais estável dentro dela.

A água do mar filtrada pode ser, por exemplo, bombeada para dentro de tubos 143 e/ou cavidades próximos ao ponto médio 152, de modo que ela circule no sentido ascendente

através da metade superior das paredes da câmara 145, e possa sair próximo ao topo, no ponto 153, onde esta água do mar pré-resfriada possa ser distribuída pelos pulverizadores 142, a fim de ser introduzida na câmara 141. De preferência, 5 faz-se com que a água do mar circule através dos tubos superiores 143 estendidos ao longo da câmara 141, de modo que esta água do mar circule e seja pré-resfriada por transferência de calor com as paredes frias da câmara 145, antes de ser liberada para dentro da câmara 141 via o 10 purificador 142. Com relação a isto, a água do mar é, de preferência (1) resfriada à medida que circula pelos tubos de entrada 143, que envolvem a câmara principal 141, (2) resfriada à medida que as gotículas de água do mar são lançadas pelo pulverizador dentro da câmara principal 141, e 15 (3) mais resfriada ainda, quando as gotículas congeladas de água do mar são depositadas sobre o montículo para formar uma massa de gelo no fundo da câmara 141.

O ar aquecido oriundo do turbo-compressor 148 pode ser introduzido nos tubos 155 e/ou cavidades, em um ponto baixo 20 154, de modo que ele circule no sentido descendente pela seção inferior das paredes da câmara 145, e possa sair pelo fundo 156, de onde o ar comprimido resfriado possa, então, ser distribuído de volta para o turbo-expansor 150, a fim de ajudar a manter o ar comprimido frio. Para isto, os tubos 25 155 são adaptados, de preferência, para manter o ar

comprimido neste estado permitindo que o ar expandido pelo turbo-expansor 150 seja pré-resfriado, de modo que o ar refrigerado resultante possa se tornar ainda mais frio. Com efeito, o ar comprimido aquecido oriundo do turbo-compressor 5 148 pode circular para evitar que a massa de gelo grude nas paredes da câmara, e para que, à medida que o ar circula, ele seja resfriado por transferência de calor das paredes frias da câmara. O ar pré-resfriado é, então, devolvido ao turbo-expansor 150, onde é super-resfriado e de onde é 10 introduzido na câmara principal 141, para congelar as gotículas de água do mar.

A localização dos tubos e/ou cavidades pode ser modificada, isto é, a água do mar pode circular por toda a câmara ou por sua seção inferior, e/ou o ar aquecido pode 15 circular pela câmara inteira ou pela sua metade superior, dependendo das necessidades do sistema. De preferência, a maior parte do pré-resfriamento da água do mar e do ar aquecido ocorre quando eles estão nos tubos e/ou cavidades. Há, portanto, um meio excelente de transferência de calor 20 dentro das paredes da câmara.

O fundo da câmara deve ser, preferencialmente, adaptado para permitir que a solução salina concentrada seja recolhida e, depois, removida pelo orifício de purga 158, de modo que a massa de gelo se formará na superfície da solução 25 salina e flutuará, devido à menor densidade do gelo e à

maior densidade da solução salina. Uma cesta 159 pode ser posicionada no fundo da câmara, de modo que a massa de gelo possa ser removida com facilidade, sem necessidade de interromper o sistema. Com relação a isto, o fundo da câmara 141 deve ser, de preferência, adaptado com uma abertura, que permita a remoção da cesta 159, na qual a massa de gelo possa ser fundida para produzir água doce potável. Alternativamente, o fundo da câmara 141 pode ser projetado com uma porta tipo *drop down*, por exemplo uma porta com dobradiças, de modo que, sem interromper o sistema a porta possa ser baixada para que a massa de gelo e qualquer resto de solução salina coletada possam ser removidos da câmara 141. Neste caso há, preferencialmente, um sistema de esteira rolante sob a câmara 141, que permite transportar a massa de gelo para o local onde ela será fundida a fim de produzir água doce potável.

As Figuras 17 e 18 também mostram um sistema em contracorrente com uma câmara similar, 80, com o ar refrigerado sendo introduzido próximo ao ponto médio 82, e no qual os pulverizadores 84 são adaptados para introduzir a água do mar por cima. Esses desenhos mostram mais claramente que a forma da massa de gelo 86 que se forma no fundo é a de um cone invertido, em virtude dos pulverizadores 84 estarem direcionados para o centro da câmara 80. Esta concretização também apresenta um tipo de pistão, que pode ser usado para

descer a massa de gelo da câmara quando se quiser removê-la. Ela mostra ainda, que o ponto de entrada, 82, do ar refrigerado deve ser mais alto do que o ponto mais alto que a massa de gelo pode alcançar. Esta é indicada pela
5 referência "H", que é a distância do fundo da câmara ao ponto de entrada do ar refrigerado. Isto é necessário para assegurar que o ar refrigerado injetado não interfira na massa de gelo e não transfira suas propriedades refrigerantes para esta massa ao invés de transferi-las para
10 o ar dentro da câmara de sedimentação 80. O ar injetado deve entrar na câmara de sedimentação 80 e, imediatamente, subir para o topo dela e interagir com as gotículas de água do mar que caem. A Figura 18 mostra também que uma unidade de aquecimento separada pode ser incorporada às paredes da
15 câmara, próximo ao fundo, para evitar que a massa de gelo e quaisquer partículas de gelo que caiam, congelem sobre as paredes da câmara.

Há uma zona no fundo da câmara de sedimentação, abaixo do ponto de injeção de ar refrigerado, que possui um regime
20 de ar morto, onde o ar forma redemoinhos. Estes irão consumir algum ar refrigerado e devolver ar turbilhonado para o fluxo principal de ar, ascendente. Devido ao fato de que os redemoinhos podem manter, de modo indesejado, a massa de gelo e a solução salina abaixo da temperatura eutética,
25 resultando em cristalização de uma parte do sal e seu

depósito no fundo da solução salina, o valor de H deve ser determinado de modo a garantir que a massa de gelo permanecerá na temperatura apropriada que, de preferência, deve ser ligeiramente maior do que a do ponto eutético.

- 5 Observe-se que a forma preferida para a massa de gelo que se forma é cônica, embora qualquer outra forma que permita a saída da solução salina pelos lados ou por baixo, pelos seus poros, possa ser utilizada, como será discutido adiante. Esta forma facilita o depósito dos cristais de gelo e a
- 10 liberação da solução salina associada a cada cristal.

É desejável, também, manter um intervalo anelar líquido em torno da borda da massa de gelo enquanto ela se forma, e para facilitar seu deslocamento durante a remoção. À medida que as gotículas se depositam sobre a massa de gelo, esta se

15 separa em duas fases: cristais de gelo e solução salina. Devido à superfície cônica da massa de gelo, o líquido pode escorrer pela massa e sair em direção às paredes da câmara de sedimentação. Sendo assim, é desejável que haja um espaço livre entre a massa de gelo e a câmara de sedimentação, a

20 fim de que o líquido drenado saia da massa de gelo em direção à solução salina embaixo. Além de construir um sistema de troca de calor utilizando tubos e/ou cavidades nas paredes da câmara, como discutido acima, pode-se colocar um aquecedor local na parede da câmara de sedimentação, no

25 fundo da câmara, o qual pode ser ligado para fornecer o

aquecimento local suficiente para manter o intervalo vazio necessário.

As Figuras 17 e 18 mostram um pistão, que pode ser utilizado para descer a massa de gelo, a fim de que ela possa ser removida da câmara 80, onde o intervalo anular vazio pode facilitar o movimento da massa de gelo através da câmara de sedimentação. A altura desta câmara é projetada, de preferência, para fornecer o tempo de residência que facilite a transferência de energia de resfriamento do ar para as gotículas de água do mar durante um período de tempo avaliado em segundos. Contudo, a separação principal do gelo da solução salina ocorre sobre a massa de gelo, onde ela permanece por intervalos de tempo maiores, de minutos até horas.

15 E. Arranjo de Correntes Paralelas:

Além de ar refrigerado subindo, no sentido contrário ao das gotículas que caem, ou seja, em "contra-corrente", como nos sistemas discutidos acima, outras concretizações foram desenvolvidas, nas quais o ar refrigerado é injetado na mesma direção das gotículas de água do mar, chamadas de "em correntes paralelas". Este arranjo é mostrado nas Figuras 14-15 e 31-34. As vantagens e desvantagens de ambos os arranjos são discutidas neste documento.

Um fluxo descendente de ar refrigerado na câmara é vantajoso porque o ar encontra a água do mar enquanto ele está na sua temperatura mais baixa, isto é, quando ele está sendo liberado no sentido ascendente, do topo da câmara.

5 Isto expõe as gotículas a temperaturas substancialmente mais baixas do que a eutética, e auxilia a iniciar rapidamente o processo de congelamento instantâneo da água do mar, além de ajudar a formar gelo mais rapidamente. Isto ajuda também a evitar que as gotículas se grudem caso colidam, o que
10 acontecerá se a densidade de gotículas for muito alta ou o tamanho da câmara pequeno demais.

À medida que as gotículas caem - o que é função da altura da câmara - e começam a absorver o ar frio, que congela as gotículas, o ar começa a se aquecer de modo que,
15 quando as gotículas chegam ao fundo, o ar já não está tão frio como estava ao ser introduzido na câmara. Isto é vantajoso porque evita que as partículas de gelo fiquem frias demais, o que poderia levar a água salgada a congelar inteiramente. Mantendo-se a temperatura da mistura no fundo
20 da câmara ligeiramente acima da do ponto eutético, evita-se que a água salgada congele completamente o que, como será discutido adiante, permite que maior quantidade do líquido salino que envolve as partículas de gelo escorra e se separe delas.

O fluxo descendente de ar refrigerado também evita que as gotículas fiquem suspensas no ar por um tempo excessivo, o que pode ocorrer quando o ar é soprado contra as gotículas que caem, como no caso do arranjo em contra-corrente. A
5 exposição das gotículas ao ar frio por um tempo muito longo torna difícil o controle e a regulação precisos da temperatura adequada na câmara, bem como da temperatura das gotículas, necessárias para manter a consistência adequada no fundo. Por exemplo, em diversas situações, o estado de
10 congelamento da água do mar pode não ser o mesmo em dois locais diferentes da câmara, ou seja, algumas partículas de gelo podem acabar sendo expostas ao ar refrigerado por um tempo excessivo e ficar frias demais. Enquanto isto, outras podem não ser expostas por tempo suficiente e não ficar
15 frias o bastante. Este problema pode ser amplificado quando os tamanhos das gotículas diferem ao sair do pulverizador, fazendo com que elas congelem em velocidades diferentes.

Com o processo de fluxos paralelos descendentes, alguns desses problemas podem ser evitados. No entanto, um ponto
20 fraco potencial é que, ao expor as gotículas de água do mar a um fluxo de ar refrigerado que tem a mesma direção das gotículas que caem, estas podem chegar muito rapidamente ao fundo da câmara, o que significa que elas não terão tempo de residência suficiente para congelar. Uma solução para este
25 problema é usar ar super-resfriado, que pode agir

rapidamente sobre as gotículas, assegurando que elas alcancem o fundo da câmara na temperatura adequada. Outra solução é usar água do mar pré-resfriada para formar a nuvem de gotículas, de modo que seja necessário menos tempo para
5 que elas congelem e/ou cheguem ao ponto eutético e, portanto, necessitem de menor tempo de exposição.

Outra solução, ainda, é regular o tamanho e a velocidade das gotículas de água do mar, e o fluxo de ar refrigerado, de modo que as gotículas não cheguem muito
10 rapidamente ao fundo. Por exemplo, em uma concretização, o ar refrigerado em fluxo paralelo pode ser introduzido na câmara em velocidade reduzida, por exemplo, em velocidade para baixo, de cerca de 1,2 m/s (4 ft/s). Assim, à medida que as gotículas são introduzidas na câmara, e se elas forem
15 suficientemente pequenas, elas poderão, de fato, desacelerar durante a descida. Isto ocorre porque, mesmo que as gotículas sejam emitidas a uma velocidade relativamente alta, se elas forem suficientemente pequenas podem ser afetadas, significativamente, pela massa de ar mais lenta
20 que desce. Assim, mesmo que elas tenham uma velocidade inicial de, digamos, cerca de 7,9 m/s (26 ft/s), sob 1 atm (14,67 psia), elas podem ser freadas por influência de um fluxo de ar muito mais lento.

Contudo, com esta velocidade de fluxo, o tempo de
25 residência das gotículas que se deslocam pela câmara (isto

é, o tempo que uma gotícula leva para cair do alto da câmara até o ponto no fundo, onde as gotículas se depositam para formar a massa de gelo) tenderá a ser relativamente curto. Independente de as gotículas serem relativamente grandes (até 5.000 micra) e ter uma velocidade de sedimentação de 16,8 m/s (55 ft/s), ou serem pequenas (200 micra) e ter uma velocidade de sedimentação de 0,6 m/s (2 ft/s), o fluxo descendente de ar de 1,2 m/s (4 ft/s) resultará em um tempo de residência de 0,16 segundo para a gotícula de 5.000 micra (10 ft ÷ (55 ft/s + 4 ft/s) = 0,16s), ou de 1,6 segundos para a gotícula de 200 micra (10 ft ÷ (2 ft/s + 4 ft/s) = 1,6s) em uma câmara com altura de 3,0 m (10 ft). Neste caso, ainda há necessidade de usar ar super-resfriado e/ou água do mar pré-refrigerada, como discutido.

Como já mencionado, o tempo de residência (o período de tempo durante o qual ocorrem interação e troca térmicas entre as gotículas de água do mar e o fluxo de ar refrigerado que as circundam) é um, entre os vários parâmetros chave para controlar o congelamento da água pura (um dos constituintes da gotícula de água do mar) e promover a separação dos cristais de gelo resultantes, da solução salina residual. O tempo de residência depende da velocidade de descida da gotícula de água do mar na câmara de dessalinização, assim como da altura da câmara. Esta altura é, assim, estabelecida com base nos requisitos de que o

congelamento da partícula de água seja completo e que sua separação da solução salina residual seja feita.

Considere-se o exemplo em que o turbo-expansor fornece um fluxo de ar a aproximadamente $150 \text{ m}^3/\text{min}$ (5.297 SCFM), e
 5 usa uma velocidade vertical de $1,2 \text{ m/s}$ (4 ft/s) na câmara de cristalização, de modo que esta tem um diâmetro necessário de $1,6 \text{ m}$ (5,3 ft). Considere-se que a altura da câmara seja de $3,0 \text{ m}$ (10 ft). O cálculo a seguir considera um tempo de residência de 2,5 segundos. O mesmo cálculo pode ser feito
 10 para outros tempos de residência.

Fluxo de ar de $150 \text{ m}^3/\text{min}$ (5.297 scfm)

Velocidade vertical na câmara, $1,2 \text{ m/s}$ (4 ft/s)

Velocidade vertical na câmara, $1,2 \text{ m/s}$ (240 ft/min)

$2,05 \text{ m}^2$ (22,1 ft²)

Diâmetro de $1,6 \text{ m}$ (5,3 ft)

Tempo de residência de 2,5 s

Comprimento do caminho de 3 m (10 ft) (altura da câmara)

15

Também é necessário garantir que as gotículas tenham espaço suficiente para assegurar que as colisões serão evitadas. No exemplo que está sendo usado, e fixando-se uma razão entre o diâmetro do ar e o da gotícula de 16:1, a
 20 tabela abaixo mostra os parâmetros da nuvem dentro da câmara de cristalização para gotículas grandes e pequenas.

A tabela superior abaixo mostra que, para uma velocidade de trânsito do fluxo descendente de ar refrigerado de 1,2 m/s (4 ft/s), a aproximadamente 150 m³/min (5.297 SCFM), requer um diâmetro da câmara de 1,6 m (5,3 ft). Para um tamanho de gotícula de 4.000 micra em fluxo de ar de aproximadamente 150 m³/min (5.297 SCFM), o espaçamento entre as gotículas é de 16 diâmetros de gotícula. Isto corresponde a uma descrição razoável da nuvem com percursos independentes. A tabela inferior abaixo mostra que o mesmo é verdadeiro para gotículas com diâmetro de 200 micra, exceto pelo fato de que há mais delas.

Água do mar 4.917 #/h	4.000 micra
Água do mar 1024,6 kg/m ³ (64 #/ft ³)	0,4 cm
Água do mar 76,8 ft ³ /h	1,57E-01 de diâmetro
Água do mar 0,04 m ³ /min (1,28 ft ³ /min)	Volume da gotícula 0,03 cm ³ (1,18E-06 ft ³)
Ar 150 m ³ /min (5.297 scfm)	1024,6 kg/m ³ (6,40E+01 #/ft ³)
16,1 ar padrão dia/ água do mar dia	7,57E-05 #/gotícula
Diâmetro da câmara 1,6 m (5,3 ft)	1,08E+06 gotículas por min
Ar 1,2 m/s (4,0 ft/s)	Ar a 150 m ³ /min (5.297 scfm)
	4,90E-03 ar scf/gotícula

Água do mar a 4.917 #/h	200 micra
Água do mar a 1024,6 kg/m ³ (64 #/ft ³)	0,02 cm
Água do mar a 76,8 ft ³ /h	7,87E-03 de diâmetro
Água do mar a 0,04 m ³ /min (1,28 ft ³ /min)	Volume da gotícula 1,48E-10 ft ³
	6,40E+01 #/ft ³
Ar a 150 m ³ /min (5.297 scfm)	9,47E-09 #/gotícula
16,1 ar dia/ água do mar dia	8,66E+09 gotículas por min
	Ar a 5297 scfm
Diâmetro da câmara 1,6 m (5,3 ft)	
Ar 1,2 m/s (4,0 ft/s)	6,12E-07 ar scf/gotícula

Para o sistema de fluxos paralelos, uma diferença de

5 pressão de 10-psid irá pulverizar uma gotícula para dentro

da câmara a 6,9 m/s (22,8 ft/s). Uma gotícula com diâmetro

de 4000 micra tem uma velocidade de sedimentação de 13,4 m/s

(44 ft/s). Logo, a gotícula grande irá ser pulverizada para

dentro da câmara com uma velocidade muito maior do que a

10 velocidade local do ar, de 1,2 m/s (4 ft/s), e tenderá a ser

momentaneamente acelerada de 6,9 m/s (22,8 ft/s) a 13,4 m/s

(44 ft/s). Para um caminho de comprimento de 3,0 m (10 ft)

no ar, o tempo de residência deverá ser, então, de cerca de

0,25 s. Assim, uma gotícula grande, de 4.000 micra, pode se

depositar rápido demais para que aconteça troca de calor entre a gotícula e o ar refrigerado, embora a maior parte desta troca possa ter ocorrido se o coeficiente de transferência de calor for grande. O fluxo contínuo de ar
5 frio sobre a massa de gelo depositada completará a troca de calor.

Para o sistema de fluxos paralelos, uma diferença de pressão de 40-psid irá pulverizar uma gotícula para dentro da câmara a 13,7 m/s (45 ft/s). Uma gotícula com diâmetro de
10 200 micra tem uma velocidade de sedimentação de 0,6 m/s (2 ft/s). Logo, a gotícula pequena irá ser pulverizada para dentro da câmara com uma velocidade muito menor do que a velocidade local do ar, de 1,2 m/s (4 ft/s), e tenderá a ser momentaneamente desacelerada de 13,7 m/s (45 ft/s) a 1,2 m/s
15 (4 ft/s). Para um caminho de comprimento de 3,0 m (10 ft) no ar, o tempo de residência deverá ser, então, de cerca de 2,5 s. Assim, a gotícula pequena irá se depositar no fundo da câmara de cristalização com completa troca de calor, a cerca de -21,1 °C (-6 °F).

20 Outra consideração que precisa ser feita para a construção do sistema é o fato de que pode ser difícil controlar com precisão o tamanho exato das gotículas de água do mar emitidas pelo pulverizador. Embora os fluxos e as velocidades possam ser controladas com precisão, o tamanho
25 real da gotícula de água do mar não é regulado facilmente.

Sendo assim, as características de regulação do sistema devem ser projetadas levando-se isto em conta. Ou seja, sejam as gotículas pequenas ou grandes, a velocidade da massa de ar, assim como a pressão e a velocidade das gotículas deve ser controlada, de modo que o resultado final seja tão consistente quanto possível. Quando as gotículas forem menores, elas tenderão a ser mais afetadas pela massa de ar, e menos afetadas pela velocidade original de emissão. Logo, o fato de que elas tenderão a ser carregadas para baixo a uma taxa menor do que gotículas relativamente maiores, deve ser levado em consideração. Ao mesmo tempo, quando as gotículas são maiores, elas tendem a ser menos afetadas pela massa de ar e mais afetadas pela velocidade de emissão e pela gravidade. Logo, é preciso considerar o fato de que elas tenderão a ser levadas para baixo a uma taxa relativamente maior.

A este respeito, a presente invenção contempla, preferencialmente, que mesmo gotículas relativamente grandes, com diâmetros da magnitude de até cerca de 4.000 a 5.000 micra, podem ser bastante afetadas pelo fluxo de ar e, portanto, seu tempo de residência pode ser controlado suficientemente. Embora a velocidade com que cada gotícula de tamanho distinto cai no fundo da câmara vá ser diferente, dependendo do tamanho e da massa delas; e, portanto, o tempo de exposição de cada gotícula possa diferir, de acordo com

seu tamanho, a presente invenção contempla o fato de que as características do sistema podem ser adaptadas para assegurar que cada gotícula seja suficientemente exposta ao ar refrigerado e, quando as partículas cheguem ao fundo
5 estejam próximo da temperatura eutética, formem cristais de gelo, coalesçam e formem uma massa de gelo; além disso, contempla o fato de que a solução salina seja liberada adequadamente, como será discutido adiante. Este sistema também permite o controle empírico do fluxo, pois pode-se
10 controlar o fluxo de ar comprimido de modo que as condições finais sejam as desejadas.

Um dos objetivos do sistema é que a temperatura de equilíbrio final, após as gotículas se depositarem no fundo da câmara, seja sempre ligeiramente maior do que a eutética.
15 Isto significa que, independente do tamanho das gotículas, a condição de circulação dentro da câmara deve ser tal que faça com que a razão de massa do fluxo de ar refrigerado acabe por se igualar à razão de massa do fluxo de gotículas de água do mar a fim de que haja a melhor troca de calor
20 possível. Com isto, o resultado final será que o ar na câmara e as partículas de gelo que se acumulam estarão na temperatura ideal, ou seja, próximo à temperatura eutética. Contudo, uma vez que não é provável que haja uma troca de calor perfeita, o cenário mais provável é aquele em que o ar
25 refrigerado está mais frio do que a temperatura eutética, e

a massa de gelo no fundo estará mais quente que a temperatura eutética, o que é um resultado aceitável.

Logicamente, uma troca de calor adequada tem que levar em consideração o coeficiente de transferência de calor das
5 gotículas de água do mar, o qual é difícil de determinar já que cada gotícula pode ter tamanho diferente. Mais que isto, no interior da própria câmara as gotículas caem, cada gotícula vai se tornando mais fria enquanto o ar vai se tornando mais quente. Com isto, a cada instante durante o
10 processo, o coeficiente de transferência de calor se modifica. Este coeficiente de transferência entre as gotículas de água do mar e o ar refrigerado em torno delas é um parâmetro crítico para o controle do congelamento da água pura contida nas gotículas de água do mar, e de sua
15 separação do líquido salino residual. O coeficiente de transferência de calor é função do diâmetro das gotículas de água do mar e de sua densidade, da densidade do ar refrigerado, da temperatura de ambos, das gotículas de ar refrigerado e de água, das velocidades relativas das
20 gotículas de água do mar e do fluxo de ar refrigerado em torno delas, e do tempo de residência das gotículas de água do mar no fluxo de ar em torno delas. Os valores destes parâmetros mudarão ao longo do caminho das gotículas, assim como também mudará o coeficiente de transferência de calor
25 resultante.

A tabela na Figura 35 mostra que a gotícula grande, de 4.000 micra, terá uma temperatura interna entre $-49,2^{\circ}\text{C}$ ($-56,6^{\circ}\text{F}$) e $-13,0^{\circ}\text{C}$ ($+8,59^{\circ}\text{F}$) em um trajeto de 0,2 segundo, dependendo do coeficiente de transferência de calor. O valor
5 deste coeficiente deverá ser próximo de $50 \text{ BTU}/(\text{HR SQFT } ^{\circ}\text{F})$.
A gotícula pequena, de 200 micra, terá uma temperatura interna entre $-84,9^{\circ}\text{C}$ ($-120,8^{\circ}\text{F}$) e $+4,4^{\circ}\text{C}$ ($39,9^{\circ}\text{F}$) em um trajeto de 0,2 segundo, dependendo do coeficiente de transferência de calor. O valor deste coeficiente deverá ser
10 próximo de $50 \text{ BTU}/(\text{HR SQFT } ^{\circ}\text{F})$. Assim, pode-se prever que as gotículas, grandes e pequenas, estarão entre $-49,2^{\circ}\text{C}$ ($-56,6^{\circ}\text{F}$) e $-84,9^{\circ}\text{C}$ ($-120,8^{\circ}\text{F}$), embora seja improvável que isto ocorra, uma vez que a temperatura da câmara é mais alta próximo ao fundo, Logo, a hipótese de uma temperatura do ar
15 constante, de -85°C (-121°F) é falsa. O que o cálculo pretende demonstrar, contudo, é que um trajeto de 4 segundos na câmara de cristalização deve ser capaz de permitir uma mistura do ar e das gotículas suficiente para que a temperatura final de equilíbrio do ar seja um pouco menor
20 que $-21,1^{\circ}\text{C}$ (-6°F), e que as gotículas estejam a uma temperatura ligeiramente acima de $-21,1^{\circ}\text{C}$ (-6°F) ao se depositarem no fundo da câmara de cristalização. Assim, o resultado final do processo de dessalinização é que as gotículas que entram diminuem gradativamente suas

temperaturas até pouco mais de $-21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-6\text{ }^{\circ}\text{F}$) e o ar seja gradualmente aquecido até pouco menos que $-21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-6\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Deve ficar claro que as gotículas menores irão congelar por completo em tempo relativamente curto, já que o ar é
5 mais frio no topo da câmara, de modo que não deve haver demora na conversão da água do mar líquida em sólido. Embora não seja desejável que as gotículas fiquem frias demais, é aceitável que, ao atingirem o fundo da câmara, as gotículas congeladas se aqueçam um pouco acima da temperatura do ponto
10 eutético devido à temperatura do ar e da massa de gelo. Isto evita o congelamento de cristais de sais e permite que a solução salina seja drenada adequadamente, ao invés de ficar retida na massa de gelo.

No caso das gotículas maiores, contudo, elas serão mais
15 afetadas pelas diferenças de temperatura entre o topo e o fundo da câmara. Mais que isto, com as gotículas maiores, há uma variação maior no modo como as gotículas irão congelar. Ou seja, em relação à exposição a baixas temperaturas, as gotículas maiores serão mais expostas à temperatura mais
20 fria do exterior para o interior, isto é, o exterior da gotícula ficará mais frio mais rapidamente do que o seu interior. De um lado, isto pode indicar que o sal tenderá a ser forçado em direção ao centro, enquanto a água doce no exterior da gotícula começará a congelar. Por outro lado,
25 pesquisas mostraram que, quando a gotícula de água atinge

uma certa temperatura dentro de seu volume, a água doce no interior da gotícula realmente congela primeiro no centro, e a solução salina mais concentrada fica na superfície externa do cristal de gelo.

5 Outras pesquisas indicam que as gotículas grandes congelarão a partir do exterior, formando uma capa de gelo externa. À medida que esta camada fica mais espessa, devido ao avanço do congelamento, ela aumenta a pressão sobre o núcleo central, líquido, resultando em fissura e
10 fragmentação da frágil capa de gelo. O líquido salino, então, flui para o exterior desta capa enquanto o congelamento avança pelo interior da gotícula. O núcleo interno líquido, então, cobre o exterior da gotícula de água doce congelada. A conclusão é que, para as gotículas grandes
15 o núcleo líquido, contendo sal, fluirá para o exterior da partícula congelada de água doce, e se depositará sobre outras configurações semelhantes de partículas de gelo cobertas por líquido salino. A junção dessas esferas congeladas produz uma estrutura porosa, que permite ao
20 líquido salino sair da massa depositada e escorrer, pela superfície perfurada, para o recipiente de coleta.

Embora a água pura congele a 0 °C, seu ponto de congelamento pode ser abaixado dissolvendo-se sal na água. Assim, se a mistura for resfriada abaixo do novo ponto de
25 congelamento, cristais de água começarão a se formar. Como

resultado, a solução salina remanescente ficará mais concentrada, até que o ponto de saturação seja atingido. Esta interseção entre a linha de congelamento e a linha de saturação é chamada de ponto eutético, como mostrado na

5 Figura 6. Abaixo do ponto eutético, além dos cristais de gelo, também se formarão cristais de sal. Por isto, na formação da massa final de gelo, a presente invenção trabalha, preferencialmente, acima do ponto eutético, para evitar a formação de cristais de sal.

10 Quando a solução congela, se não houver partículas estranhas presentes, as moléculas de água tendem a formar o arranjo cristalino mais estável. Quando uma solução contendo minerais é resfriada até o ponto de congelamento, as moléculas de água começam a formar cristais de gelo que

15 tendem a excluir as partículas diferentes das moléculas de água. Por exemplo, à medida que a água do mar congela, o sal é excluído porque sua estrutura cristalina é diferente da da água. Isto é chamado, algumas vezes, de rejeição salina. O sal forma cristais cúbicos (com quatro lados), enquanto os

20 de gelo são hexagonais, ou de seis lados. Entre todas as moléculas em um volume de água salgada fria, há algumas que estão próximas às outras, longe dos íons Na^+ ou Cl^- . Essas moléculas tendem a se unir, enquanto aquelas com íons Na^+ ou Cl^- têm menos tendência a se agregar, ou a permanecerem

25 unidas. Isto produz cristais de gelo de água doce, que se

separam da água líquida ligeiramente salgada. Há 13
formações cristalinas diferentes de água congelada,
dependendo da temperatura. Algumas delas são bastante
porosas e permitirão que o líquido flua através dos canais
5 que se abrem nelas.

Em temperatura ambiente, a água líquida se torna mais
densa à medida que a temperatura diminui, exatamente como as
outras substâncias. Mas a 4 °C, logo acima da temperatura de
congelamento, a água alcança sua densidade máxima. Assim, à
10 proporção que a água se resfria mais, até seu ponto de
congelamento, a água líquida se expande, sob condições
padrão, tornando-se menos densa. A razão física para isto
está relacionada com a estrutura cristalina do gelo comum,
conhecido como gelo hexagonal. Esta propriedade especial da
15 água é boa para o processo da presente invenção. À medida
que os cristais de sal se formam próximo à temperatura do
ponto eutético, eles começam a afundar rumo ao fundo da
solução, enquanto os cristais de gelo sobem para a
superfície. O resultado do processo é uma separação física,
20 que permite que os dois componentes da solução sejam
isolados com facilidade.

No processo de fluxos paralelos descendentes mostrado
nas Figuras 14 e 15, o ar refrigerado é mantido, de
preferência, em temperatura extremamente baixa, em torno de
25 -111,1 °C (-168 °F) com uma pressão de descarga de

aproximadamente 1 atm (14,67 psia). A faixa preferida fica -92,8 °C (-135 °F) e -115 °C (-175 °F). Um turbo-expansor de um estágio gerará -92,8 °C (-135 °F) enquanto um de dois estágios gerará -115 °C (-175 °F). Este ar refrigerado, de preferência, entra em contato com as gotículas de água do mar, que também são injetadas a uma temperatura reduzida, por exemplo, entre -18 °C (30 °F) e 4,4 °C (40 °F), no topo da câmara de cristalização 101. À medida que a mistura de ar refrigerado e gotículas de água do mar se movem para baixo na câmara 101, o ar frio é aquecido pelas gotículas de água do mar e estas são resfriadas pelo ar circulante em fluxo paralelo. Os fluxos de ar refrigerado e de gotículas de água do mar são projetados para resultar em uma temperatura final de equilíbrio ligeiramente maior do que -21,2 °C (-6,2 °F), a temperatura eutética da água do mar. Contudo, uma vez que não há troca de calor perfeita, pelas razões discutidas acima, é provável que o ar refrigerado que sai da câmara seja mais frio do que a temperatura eutética, e que as gotículas sejam ligeiramente mais quentes do que a temperatura eutética, o que é desejável.

Pode haver um intervalo de tempo até que o congelamento se complete. Assume-se que o sistema seja adaptado, a fim de que a água do mar injetada possa alcançar a temperatura de

-21,1 °C (-6 °F) ao alcançar o fundo, com um tempo de residência em torno de 2,5 segundos. Algumas irão congelar mais rápido, outras precisarão dos 2,5 segundos completos, mas o sistema é adaptado, preferencialmente, para que quando
5 as gotículas cheguem ao fundo, sua temperatura residual e a da massa de gelo resultante estejam ligeiramente acima de -21,1 °C (- 6 °F). Boa parte do processo de troca de calor acontecerá antes que a gotícula congele completamente. Outra
vantagem do sistema em fluxos paralelos é que a câmara de
10 cristalização pode ser menor, já que as gotículas congelarão mais rapidamente.

Nas figuras 14 e 15, são apresentados exemplos do sistema de dessalinização em correntes paralelas da presente invenção. A Figura 14 mostra um corte da câmara principal
15 101 com os tubos 103 e/ou cavidades em redor das paredes 105, por onde a água do mar e/ou o ar comprimido aquecido circulam através das paredes da câmara. A maior temperatura da água do mar e/ou do ar aquecido vindo do compressor ajuda a evitar que o gelo fique retido nas paredes da câmara, e a
20 regular a temperatura dentro da câmara, ajudando a manter uma temperatura estável dentro dela. Por exemplo, a água do mar filtrada pode ser introduzida nos tubos 103 e/ou nas cavidades no fundo 110, de modo a circular para cima e ao redor da metade inferior das paredes da câmara, e sair
25 próximo ao ponto médio 112, de onde a água do mar pré-

resfriada pode ser distribuída para o interior da câmara 101, em sentido ascendente, pelo pulverizador 108. O ar aquecido, proveniente do turbo-compressor pode ser introduzido nos tubos 103 e/ou nas cavidades, mais ou menos
5 na altura do ponto médio 114, de modo a circular para cima e ao redor da metade superior das paredes da câmara, e pode sair pelo topo 116, de onde o ar refrigerado pode ser enviado de volta ao turbo-expansor, para ajudar a manter o ar comprimido frio.

10 O calor transferido da temperatura fria dentro da câmara para os tubos e/ou cavidades que a circundam ajuda a resfriar a água do mar e/ou o ar aquecido, o que auxilia no pré-resfriamento da água do mar antes dela ser pulverizada para dentro da câmara, e/ou a pré-resfriar o ar aquecido
15 antes de ele ser refrigerado pelo turbo-expansor e introduzido na câmara. De preferência, muito do pré-resfriamento da água do mar e do ar aquecido ocorre enquanto eles estão dentro dos tubos e/ou cavidades e, portanto, há um excelente meio para transferência de calor. A localização
20 dos tubos e/ou cavidades para água do mar e/ou ar aquecido pode ser modificada, ou seja, a água do mar pode circular pela câmara inteira, ou pela sua metade superior; e/ou o ar aquecido pode circular por toda a câmara, ou pela sua metade inferior, dependendo das necessidades do sistema.

O ar resfriado vindo do turbo-expansor é direcionado, preferencialmente, para baixo e introduzido na câmara 101 por cima, do topo 107 da câmara 101. A temperatura, a pressão e o fluxo de ar refrigerado são, preferencialmente, pré-determinados e dependem dos fatores discutidos aqui. A água do mar pré-resfriada, que foi filtrada e circulou pelas paredes da câmara é introduzida nesta, de preferência, através de um conjunto de um ou mais pulverizadores, 108, formando um jato de gotículas de água do mar sob a forma de uma nuvem de gotículas. Esta, preferencialmente, é injetada pela parte de cima da câmara, do topo 109. A temperatura, a pressão e o fluxo das gotículas de água do mar são, preferencialmente, pré-determinados e dependem dos fatores discutidos aqui.

Esta configuração permite que, tanto o ar refrigerado quanto as gotículas de água do mar sejam introduzidas na câmara 101 com a mesma direção e circulem de modo que as gotículas possam ser resfriadas pelo ar refrigerado, por troca de calor no interior da câmara. O pulverizador 108 é projetado, de preferência, para distribuir as gotículas em direção ao centro, de modo que as partículas de gelo são afastadas das paredes e a massa de gelo tende a formar-se no centro da câmara, sob a forma de um cone invertido. Na concretização da Figura 14, deixa-se que o ar refrigerado aspirado saia da câmara 101 por um ponto de escape mais

baixo, 111, para a câmara lateral 113, o que permite que o ar refrigerado circule pela câmara 101 no sentido descendente. O ar saído para o exterior pode, então, ser usado para outros fins de refrigeração como, por exemplo, condicionamento de ar. Esta concretização foi desenvolvida para uso com uma sonda rotativa de extrusão contínua, que ajuda a remover a massa de gelo do fundo da câmara. Este é adaptado para permitir que a solução salina concentrada seja recolhida e depois, removida. A massa de gelo se formará acima da solução salina e permanecerá flutuando devido à menor densidade do gelo em relação à da solução.

A Figura 15 apresenta um corte do sistema em fluxos paralelos e do sistema de remoção do gelo em bateladas, em que o ar refrigerado é injetado pelo topo da câmara principal. Esta Figura apresenta um corte da câmara principal 121 com os tubos 123 e/ou cavidades que se estendem ao redor das paredes 125 para a circulação da água do mar e/ou do ar comprimido aquecido pelas paredes da câmara. Esta concretização mostra o ar comprimido sendo gerado pelo turbo-compressor 118, e um turbo-expansor 120 para liberação e expansão do ar comprimido, com o ar refrigerado sendo introduzido na câmara 121 pelo topo. Compressores e trocadores de calor, etc. adicionais também podem ser incluídos, como já discutido anteriormente.

A maior temperatura da água do mar e/ou do ar aquecido que sai do compressor ajuda a evitar que o gelo fique preso nas paredes da câmara, e a regular a temperatura no interior dela, a fim de manter a temperatura estável dentro da câmara. Por exemplo, a água do mar que foi filtrada pode ser introduzida nos tubos e/ou cavidades no ponto médio 130, por meio de uma bomba, de modo que ela circule no sentido ascendente em torno da metade superior das paredes da câmara, e saia próximo ao topo, no ponto 132, onde a água do mar pré-resfriada pode ser distribuída pelos pulverizadores 122, para introdução na câmara 121. No topo da câmara principal a água do mar circula, de preferência, pelos tubos superiores 123 estendidos ao redor da câmara 121, onde o calor relativo da água do mar ajuda a evitar que o gelo fique retido nas paredes, 125, da câmara. Deste modo, à medida que a água do mar circula, ela é pré-resfriada pela troca de calor com as paredes frias, 125, da câmara, antes de ser liberada na câmara principal 121, através do pulverizador 122.

Embora as gotículas de água do mar sejam resfriadas e congeladas por meio da interação com o ar refrigerado, uma porção significativa da queda de temperatura da água do mar pode ser alcançada passando-a através dos tubos 123, que circundam a câmara 121.

Ar quente vindo do turbo-compressor 118 pode ser introduzido nos tubos 133 e/ou nas cavidades no ponto baixo 134, de modo a circular no sentido descendente e através da seção inferior das paredes da câmara (onde a massa de gelo se junta) e sair pelo fundo 136, de onde o ar comprimido resfriado pode ser re-distribuído para o turbo-expansor 120, a fim de ajudar a manter o ar comprimido mais frio. Com relação a isto, os tubos 133 são adaptados, de preferência, para manter o ar comprimido neste estado, e permitindo que o ar seja expandido pelo turbo-expansor 120 para ser pré-resfriado. Assim, o ar refrigerado resultante pode ser resfriado ainda mais. O ar comprimido aquecido, vindo do turbo-compressor 118 ajuda a evitar que o gelo se grude nas paredes da câmara. À medida que o ar circula, ele é resfriado por transferência de calor com as paredes frias da câmara, de onde o ar pré-resfriado retorna ao turbo-expansor 120. Este ar super-resfriado é, então, introduzido na câmara principal 121 para congelar as gotículas de água do mar.

A transferência de calor da temperatura fria no interior da câmara para os tubos e/ou cavidades ao redor dela ajuda a resfriar a água do mar e/ou o ar aquecido. Isto auxilia a pré-resfriar a água do mar antes dela ser pulverizada no interior da câmara, e/ou a pré-resfriar o ar comprimido antes de ele ser liberado e refrigerado pelo turbo-expansor e introduzido na câmara. De preferência,

grande parte do pré-resfriamento da água do mar e do ar aquecido ocorre enquanto eles estão nos tubos e/ou cavidades, e há um excelente meio para transferência de calor da água do mar e do ar aquecido para as paredes e para o ar na câmara. A localização dos tubos e/ou cavidades por onde passam a água do mar e/ou o ar quente pode ser modificada, isto é, a água do mar pode circular pela câmara inteira ou por sua porção inferior; e/ou o ar quente pode circular pela câmara inteira ou pela sua porção superior, dependendo das necessidades do sistema.

O ar frio oriundo do turbo-expansor é dirigido, preferencialmente, para baixo e introduzido na câmara 121 por cima, no topo 127 da câmara 121. A temperatura, a pressão e o fluxo de ar refrigerado são, de preferência, pré-determinados e dependem dos fatores aqui discutidos. A água do mar pré-resfriada, que foi filtrada e circulou pelas paredes da câmara é introduzida nela, de preferência, por meio de um conjunto de um ou mais pulverizadores 122, para formar um jato de gotículas de água do mar sob a forma de uma nuvem de gotículas. Este é injetado na câmara, de preferência, por cima, do topo 127 da câmara 121. A temperatura, a pressão e o fluxo de gotículas de água do mar são, de preferência, pré-determinados e dependem dos fatores aqui discutidos.

Esta configuração permite que, tanto o ar refrigerado quanto as gotículas de água do mar sejam introduzidas e circulem na câmara 121 segundo a mesma direção, de modo que as gotículas possam ser ainda mais resfriadas pelo ar refrigerado, através de troca de calor no interior da câmara. O pulverizador 122 é projetado, preferencialmente, para distribuir as gotículas em direção ao centro, de modo que as partículas de gelo sejam mantidas longe das paredes da câmara, e que a massa de gelo tenda a se formar no centro dela sob a forma de um cone invertido. Nesta concretização, o ar refrigerado aspirado sai da câmara 121 através de uma ou mais saídas 137. Isto permite que o ar refrigerado circule pela câmara 121 no sentido descendente e que o ar que escapa possa ser utilizado para outros fins de refrigeração como, por exemplo, condicionamento de ar. O fundo da câmara é adaptado para permitir que a solução salina concentrada seja recolhida e, em seguida, removida através da saída 139. A massa de gelo se formará na superfície da solução salina e ficará flutuando devido à menor densidade do gelo em relação à da solução.

Uma cesta 138 pode se colocada no fundo, de modo que a massa de gelo possa ser removida da câmara com facilidade, sem precisar interromper o sistema. Com relação a isto, o fundo da câmara 121 é adaptado, preferencialmente, com uma abertura pela qual a cesta 138 pode ser removida, para que a

massa de gelo possa ser fundida produzindo água doce potável. Alternativamente, o fundo da câmara 121 pode ser projetado para ter uma porta do tipo *drop down*, por exemplo uma porta com dobradiças, de modo que, sem interromper o sistema a porta possa ser baixada para permitir a retirada da massa de gelo e de qualquer solução salina restante da câmara 121. Neste caso, deve haver, de preferência, um sistema de esteira rolante sob a câmara 121, que permita o transporte da massa de gelo para o local onde ela será fundida para produzir água doce potável.

Nas Figuras 31-34, o sistema de dessalinização 40 da presente invenção é adaptado, preferencialmente, para remover o sal e outras impurezas da água do mar 60. Nesta concretização, o sistema 40 engloba, de preferência, uma câmara de cristalização 41, que pode ser utilizada para remoção do sal e de outras impurezas e onde a água purificada pode ser produzida. Esta câmara 41 deve ser, de preferência, um recipiente isolado, especialmente adaptado para manter baixas temperaturas em seu interior, e para permitir que a água do mar 60 e o ar refrigerado 50 sejam introduzidos e misturados dentro dela, assim como para permitir que o gelo e a solução salina concentrada se formem em seu fundo. A câmara de cristalização 41 pode ser semelhante às aquelas descritas nos pedidos de depósito de patente norte-americana de n. 60/789,415 (depositado em 5 de

abril de 2006), 60/794,190 (depositado em 21 de abril de 2006) e 60/832,777 (depositado em 24 de julho de 2006) os quais são incorporados a este documento por referência.

De preferência, o sistema de dessalinização 40 injeta a
5 água do mar 60 na câmara de cristalização 41,
preferencialmente sob a forma de uma névoa ou jato 62. O ar
refrigerado 50, oriundo do turbo-expansor é introduzido na
câmara 41, de preferência, de modo a expor a névoa ou jato
62 ao ar muito frio. Isto faz com que as gotículas de água
10 do mar 62 sejam super-resfriadas e congelem rapidamente
formando, assim, as partículas de gelo super-resfriadas 63
que caem para o fundo 64 da câmara. As gotículas de água do
mar 62 são introduzidas, de preferência, mas não
necessariamente, pelo topo 65 da câmara; já o ar refrigerado
15 50 é introduzido 1) próximo ao meio da câmara e direcionado
para cima, ou 2) por cima da câmara, criando uma corrente
descendente, que força as gotículas de água do mar 62 mais
rapidamente para o fundo. Os fatores que determinam qual dos
métodos usar depende da rapidez com que a água do mar
20 precisa ser congelada que, por sua vez, depende de quão fria
a água do mar 60 estiver, antes de entrar na câmara 41, da
temperatura do ar refrigerado 50, do tamanho da câmara 41,
de como as gotículas de água do mar são expostas ao ar
refrigerado e como circulam por ele, assim como da

quantidade de ar e água do mar que estão sendo introduzidos, entre outros fatores.

O congelamento da água do mar 60 permite, preferencialmente, que se formem partículas flutuantes de gelo de água pura 63 contendo traços de solução salina 67 aderidas a elas. O objetivo disto é deixar o sal e outras impurezas para trás, na solução salina 67 no fundo da câmara 41. O sistema de dessalinização 40 remove, preferencialmente, as partículas de gelo 63 da solução salina 67, mais densa, de modo que a gravidade ajuda a separá-las e limpa as partículas de gelo 63, através de um, de pelo menos dois caminhos possíveis.

Primeiro, as partículas de gelo 63 podem formar uma grande massa de gelo 66, acumulando-se no fundo da câmara 41, isto é, à medida que elas caem umas sobre as outras. Com o tempo, à proporção que as partículas 63 caem e se juntam, elas formam uma massa de gelo 66, que tende a flutuar sobre a solução salina 67, mais densa. Com relação a isto, o sistema é adaptado, de preferência, para que as partículas de gelo 63 formem uma massa de gelo cônica 66, pela introdução de gotículas de água do mar 62 no centro da câmara 41, de modo que as partículas de gelo 63 formadas também se acumularão no centro da câmara. Isto permite, com vantagem, que a solução salina 67, que encapsula ou se adere a cada partícula de gelo de água pura 63, escorra pelos

lados ao invés de ficar retida na massa de gelo 66, em bolsos ou fendas que, de outra forma se formam na massa 66 à medida que ela se solidifica. Pela formação de uma massa de gelo cônica 66, a solução salina 67 que adere a cada

5 partícula de gelo 63 irá, simplesmente, escorrer pelos lados, ao invés de ficar retida na massa 66. Deste modo, a solução salina 67 pode ser efetivamente separada da massa de gelo 66, como necessário. Por outro lado, pesquisas

mostraram que a massa de gelo formada pode ter canais e

10 espaços vazios em seu interior; assim, qualquer solução salina 67 acumulada pode, simplesmente, passar por eles sem ficar retida no interior da massa. A massa de gelo, a este respeito, se assemelha mais a neve e forma poros, que permitem a passagem da solução salina. As partículas de gelo

15 que se formam e caem sobre a massa de gelo estão, tipicamente, à temperatura de $-21,1^{\circ}\text{C}$ (-6°F).

A concretização possui, também preferencialmente, meios para lavar a massa de gelo 66 com água doce. Deixando-se que esta massa 66 se funda, pode-se produzir água doce. Com

20 relação a isto, como mostrado na Figura 31, água doce adicional em temperatura ambiente, $15,5^{\circ}\text{C}$ (60°F), pode ser pulverizada pelo pulverizador 68 sobre a massa de gelo 66, em sentido descendente, para servir como uma coluna de lavagem, que ajude a remover a solução salina 67 da massa de

25 gelo 66 à medida que esta se forma. A maior parte da solução

salina 67 é deslocada dos espaços entre as partículas de gelo 63 por ação da gravidade. Para remoção de mais solução salina aderida à superfície de cada uma das partículas de gelo 63 é preferível injetar água doce sobre a camada de gelo/solução salina depositada na base da câmara de cristalização 41, a fim de ajudar a drenagem da solução salina 67 por gravidade, camada a camada. Esta água doce congela à medida que ela se liga a cada camada e desloca a solução salina muito fina e viscosa, nos interstícios entre as partículas de gelo 63. A água doce congelada sobre as partículas de gelo é, mais tarde, derretida e, de preferência, recuperada para re-uso sem necessidade de mais água doce. Se for necessária água com pureza maior, pode-se acrescentar uma coluna de lavagem descendente.

Observe-se que um jato de água pode ser introduzido para ajudar a aumentar a drenagem, por gravidade, da solução salina 67, como uma pré-lavagem. Devido à tensão superficial, pode haver alguns minerais indesejáveis e impurezas dissolvidas, que são atraídos para a superfície dos cristais de gelo e, portanto, pode ser necessário lavar a massa de gelo com água doce. Esta congela sobre a massa de gelo e nos canais internos e poros nesta massa, à medida que esta libera os minerais e outras impurezas das superfícies interna e externa da massa. A água congela, preferencialmente, sobre a camada de partículas de gelo 63

que estão cobertas com solução salina e, à medida que as partículas se depositam sobre a massa de gelo 66, elas deslocam a solução salina, de alta viscosidade, da superfície das partículas de gelo 63 e permitem que a
5 solução salina 67 flua para a superfície externa da massa de gelo 66. A solução salina 67 é drenada, de preferência, para o fundo da câmara 41, através de um dreno 69, como mostrado nas Figuras 31 e 32.

A seção inferior 64 da câmara 41 possui,
10 preferencialmente, uma cesta perfurada 71, capaz de aparar as partículas de gelo 63, que caem para formar a massa de gelo 66, mas que permite a circulação do ar refrigerado para fora da câmara 41. Com relação a isto, as paredes laterais 72 da câmara 41 têm, de preferência, canais ou espaços 73
15 pelos quais o excesso de ar refrigerado pode fluir. Este excesso de ar passa, preferencialmente, através da saída 74, mostrada na Figura 32, de onde é, então, distribuído para o sistema de condicionamento de ar e utilizado como ar refrigerado.

20 O lado direito da Figura 32 mostra como as partículas de gelo 63 se formam no fundo da cesta 71, para formar uma massa de gelo maior 66, ou, em alguns casos, uma lama 74. As perfurações da cesta permitem que a solução salina 67 saia, deixando para trás, na cesta 71, as partículas de gelo de
25 água pura 63. Em seguida, removendo-se a cesta 71, a massa

de gelo 66 e/ou a lama 74 de água pura pode ser retirada da câmara 41.

A massa de gelo 66 formada pelas partículas de gelo 63 removida com a cesta 71 pode, então, ser fundida para
5 produzir água doce no fundo de um tanque de estocagem 76, como mostrado na Figura 33. Como apresentado, a água doce 75 em temperaturas relativamente amenas, no caso 15,5 °C (60 °F), pode ser pulverizada de novo, como uma coluna de lavagem, sobre as partículas de gelo 63, a fim de lavar o
10 gelo e provocar sua fusão. Como mostrado na Figura 34, o ar quente local 81 também pode ser injetado no tanque de estocagem 76, para ajudar a derreter as partículas de gelo 63. À medida que o gelo funde, as gotículas de água doce 78 passam através das perfurações da cesta 71, e são recolhidas
15 no fundo 77 do tanque de estocagem 76, sob a forma de água doce potável resfriada. Pode-se usar mais de uma cesta 71 de modo que os processos de dessalinização e fusão não precisem ser interrompidos enquanto cada cesta 71 é removida da câmara 41.

20 Porque a massa 66 é feita de gelo e, portanto é fria, a água doce produzida quando ela se funde é refrigerada. O gelo estará, de preferência, na temperatura de aproximadamente -21,1 °C (- 6 °F) e, passando-se água a cerca de 15,5 °C (60 °F) sobre o gelo, a água doce

resultante estará, de preferência, em cerca de 4,4 °C (40 °F). Dali, a água doce resfriada pode ser distribuída para beber, ou ser levada através da saída 79 para um tanque de separação e guardada para uso futuro no sistema de condicionamento de ar, ou através da saída 80 para ser recirculada para a câmara de cristalização 41 para ser utilizada como o jato 68 da coluna de lavagem, ou ainda como o jato 75 no tanque de estocagem 76. Em qualquer caso, a água pode ser usada para propósitos secundários, incluindo fornecer frio para um sistema de condicionamento de ar, ou lavagem das partículas de gelo 63 na câmara de cristalização 41, antes da água ser reciclada e distribuída como água doce potável 52.

Assim, o sistema de dessalinização tem meios de separar as partículas de gelo 63 da solução salina 67, para assegurar que qualquer sal, ou outra impureza, deixado sobre elas seja removido das partículas de gelo. Por exemplo, essas partículas de gelo 63, que são refrigeradas de preferência a cerca de -21,1 °C (-6 °F), para assegurar que as duas fases formadas, gelo sólido e solução salina líquida, sejam distribuídas de preferência, dentro do tanque de estocagem 76, ou outro recipiente, e pulverizado ou misturado com mais água doce 75, como água previamente purificada pelo sistema (que pode estar em temperatura ambiente) e, então ser deixada para fundir. Misturando-se as

partículas de gelo super-resfriadas 63 com a água adicional 75 em temperatura ambiente, o sistema pode produzir água doce potável muito fria, isto é, em temperatura de congelamento ou próximo dela.

5 F. Troca de Calor Imbutida nas Paredes da Câmara:

Na concretização preferida, as paredes da câmara são aquecidas, preferencialmente, com a água do mar quente, que entra, e/ou com o ar comprimido aquecido do compressor, para evitar que o gelo se deposite nas paredes e que a massa de
10 gelo se fixe nelas. Deste modo, quando a massa de gelo estiver de tamanho suficiente, ela pode ser removida facilmente da câmara e deixada para fundir em um ambiente mais quente, para produzir água pura, isto é, em um processo em batelada.

15 Na concretização preferida, as paredes da câmara são adaptadas, de preferência, com tubos e/ou cavidades de modo que a água do mar que entra e/ou o ar aquecido que vem do compressor podem passar através das paredes da câmara. Estes servem, efetivamente, como um trocador de calor, que não
20 apenas deixa as paredes da câmara relativamente quentes para 1) evitar que o gelo se deposite nas paredes, 2) evitar que a massa de gelo se fixe nelas, e 3) ajudar a regular a temperatura na câmara; mas também ajuda a reduzir a temperatura da água do mar antes dela ser introduzida no

interior da câmara, e a resfriar o compressor. Este duplo efeito de troca de calor permite regular tanto a temperatura da câmara quanto da água do mar, sem necessidade de usar energia extra. Os tubos são colocados, de preferência, em torno da câmara para aumentar a eficiência da transferência de energia entre a água do mar e/ou ar aquecido, e a câmara. Também pode-se usar uma cavidade, que é, essencialmente, um espaço entre uma parede interna e outra externa, ou seja, a câmara pode ser feita com parede dupla, de modo que a água do mar e/ou o ar aquecido possa passar no interior da parede. Este melhoramento pode ser usado em conexão com o processo em batelada e está relacionado com o uso de tubos e/ou cavidades em torno das paredes da câmara, que ajuda a regular a temperatura na câmara, mas também a temperatura da água do mar e/ou do ar que passa pelos tubos.

G. Formação da Massa de Gelo:

À medida que as partículas de gelo se formam e caem no fundo da câmara, elas começam, de preferência, a coalescer e formam uma massa de gelo, que tem a aparência de neve, mais do que de um bloco de gelo, na superfície da solução salina recolhida. Esta massa de gelo tem densidade relativamente baixa, devido aos numerosos canais de ar e poros que contém, assim como pela natureza porosa de sua formação. A densidade desta massa é, tipicamente, na faixa entre 0,5 e 0,6 g/cm³, (relembre que neve fresca tem densidade < 0,1 g/cm³), quase

a metade da do gelo puro. Uma inspeção cuidadosa da massa revela que ela se parece mais com neve, e tem uma rede de canais e espaços vazios, que permitem que qualquer excesso de solução salina que se deposite sobre as partículas de gelo escorram facilmente e sejam drenadas através da massa para a solução salina recolhida. Mantendo-se a massa de gelo e o fluxo de ar refrigerado que a circunda em temperatura ligeiramente maior do que a eutética, a solução salina aderida aos cristais de gelo pode ser facilmente lavada para fora deles, isto é, não formará cristais de sal.

À medida que a massa de gelo cresce, um fluxo consistente de solução salina continuará a fluir e drenar pelos canais, espaços vazios e poros, permitindo sua remoção e a purificação da massa de gelo. A este respeito, vale a pena observar que a temperatura da massa de gelo de água doce propriamente dita permanecerá em torno 0 °C ou 32 °F, devido à quantidade significativa de calor gerado, associado à mudança de fase.

A princípio, devido à diferença de densidade entre as gotículas de água do mar congeladas e a água do mar no fundo da câmara, as partículas de gelo começarão a flutuar. Como mostrado na Figura 23, quando a água líquida forma gelo, há uma queda de 9% na sua densidade e, quando as concentrações mais altas de sal da água do mar líquida em condições próximas da eutética provocam a formação de gelo, a queda na

densidade é de 71% e o gelo se torna fortemente flutuante, tornando a separação mais rápida. Observe que a solução de água salgada com concentração de 24% tem densidade de 80 libras/ pé cúbico. Neste caso, o gelo se separa rapidamente da solução de água salgada. A Figura 24 apresenta variações na densidade da água do mar em função do percentual de cloreto de sódio contido nela.

Após tempo suficiente para que as partículas de gelo se acumulem e a massa de gelo se forme, o qual na concretização em questão é de duas horas, mas que pode ser de apenas 10 minutos ou menos, os pequeníssimos cristais de gelo começam a flutuar no topo do denso líquido salino e coalescem sob a forma de uma massa de gelo. Mas à medida que novas gotículas se depositam sobre esta massa, ela começa a criar uma superfície áspera em cima, com pequenos picos e vales. Isto pode fazer com que mais gotículas que caíam no meio do bloco se separem em gotículas salinas e cristais de gelo nos vales. Se a massa de gelo era sólida, isto pode fazer com que algumas gotículas do líquido salino sejam suspensas e fiquem retidas no bloco de gelo pois esta forma, tipicamente, canais e espaços vazios em seu interior, por onde a solução salina tende a sair, rumo à solução salina recolhida.

Contudo, para assegurar que mais partículas de gelo tendam a se formar no centro, os bicos do pulverizador podem

ser posicionados com um padrão de cluster denso próximo ao eixo central da câmara de sedimentação, como mostrado nas Figuras 17 e 18. A organização do gelo ocorrerá, então, de preferência, em direção ao centro da câmara, formando uma
5 massa de gelo cônica ou em formato de cone invertido. Sendo assim, à medida que cada nova gotícula salina combinada adere externamente a uma cristal de gelo, elas irão de depositar na superfície da massa cônica, e a gotícula de líquido salino fluirá sobre a superfície de contenção, se
10 houver, e descera o cone em direção à solução no fundo. Outra alternativa é usar o padrão de posicionamento dos bicos do pulverizador acima, mas controlar também o fluxo através deles, de modo que o bico dirigido para o eixo central da câmara de sedimentação tenha o fluxo mais
15 volumoso e mais longo.

A massa de gelo, quando removida, deve ainda ser lavada para remover qualquer sal e outras impurezas de sua superfície. Ao sair da área da câmara para uma zona temperada, essa massa irá fundir e formar água pura.

20 O mecanismo fundamental para ligação da solução salina concentrada e da água congelada é a tensão superficial. Assim, toda a solução concentrada no centro de um canal aberto na massa de gelo se comportará como um líquido pesado e sairá. Por outro lado, as poucas moléculas de solução
25 salina aderidas ao gelo se grudarão nele devido à tensão

superficial. Esta é vencida quando a água doce alcança esta camada grudada, congela sobre o gelo e força a camada grudada a ser rejeitada e lavada para fora. Na câmara de cristalização proposta, à medida que as partículas
5 congeladas (cobertas com líquido salino de alta densidade) se acumulam no topo das camadas anteriores em um depósito cônico, um fluxo de baixa intensidade de água doce é, preferencialmente, pulverizado sobre a camada mais recente. Esta água doce se deposita sobre a massa de gelo e libera
10 uma camada muito fina de solução salina da superfície de gelo/neve. Assim, há um fluxo gravitacional de líquido salino além de uma solução salina lavada (por pressão), que sai da massa cônica de gelo.

O jato de água doce refrigerada sobre a massa de
15 gelo/neve congela sobre ela à medida que cada camada é depositada. A água doce congelada desloca a solução salina aderida à superfície dessa massa e faz com que ele drene pelas fissuras. Quando a massa de gelo/neve lavada é recuperada e derretida, a água doce pulverizada é recuperada
20 para re-uso, enquanto a água doce purificada é utilizada como produto.

A porosidade das partículas e da massa de gelo é um parâmetro importante no processo proposto. Felizmente, é um fenômeno natural que as partículas de gelo tenham porosidade
25 alta. Os canais porosos e os espaços vazios no interior da

estrutura do gelo permitem que a solução salina residual aprisionada nela seja drenada, especialmente durante a fase de lavagem do processo. A contaminação residual na água limpa é, portanto, minimizada a um nível aceitável para
5 beber.

Considere-se que o gelo tenha uma densidade de 0,92 g/cm³ e a água, de 1,0 g/cm³ cm de modo que o gelo flutue na água. Mas, o mais importante é que há uma hipótese antiga de que a densidade da neve é cerca de 10% da água, ou 0,10
10 g/cm³. Foi demonstrado experimentalmente que, em temperaturas mais baixas, a neve forma uma estrutura ainda mais porosa. Ver a Figura 6, que apresenta uma comparação da densidade da neve em relação à temperatura do ar.

H. Cálculo de Exemplo:

15 O cálculo a seguir mostra os requisitos para um fluxo de ar gerar 0,5 L/s (12.000 galões/dia) de água doce a partir do processamento de 0,6 L/s (13.793 galões/dia) de água do mar. Neste exemplo, utilizou-se um turbo-expansor de dois estágios, de 535 HP, operando com uma eficiência
20 termodinâmica de 85%, o qual irá liberar 10,9 toneladas (24.155 libras) de ar refrigerado a -111,1 °C (-168 °F). Este ar refrigerado absorverá 939.146 BTU/HR se aquecido a -21,1 °C (-6 °F), a temperatura eutética da água do mar.

AR REFRIGERADO

	535,07 HP
	9,9 SCFM/HP
Fluxo	150 m ³ /min (5.297,15 SCFM)
Fluxo	3,0 kg/s (24.155,00 #/HR)
Calor Específico	0,24 BTU/(#F)
Temperatura de entrada	-111,1 °C (-168 °F)
Temperatura de saída	-21,1 °C (-6 °F)
	(939.146,40) BTU/HR

5 Para mostrar por que pode ser necessário pré-resfriar a água do mar a cerca de -18 °C (30 °F) a 4,4 °C (40 °F), a análise a seguir começará utilizando uma água do mar a 15,5 °C (60 °F) a 1024 kg/m³ (64 libras/ft³), que será resfriada a -21,1 °C (-6 °F) com base no cálculo aproximado:

10

ÁGUA DO MAR

	Fluxo	0,6 kg/s (4917 #/HR)
	Calor Específico	1 BTU/(#F)
	Temperatura de entrada	15,5 °C (60 °F)
	Temperatura de saída	0 °C (32 °F)
	Fusão	114 BTU/(#F)
	Calor Específico	0,5 BTU/(#F)
	Temperatura de entrada	0 °C (32 °F)
	Temperatura de saída	-21,1 °C (-6 °F)

(939.147,00) BTU/HR

15

Neste exemplo, uma câmara de cristalização relativamente pequena, com 1,2 m (4 ft) de diâmetro, recebe um fluxo de ar refrigerado de aproximadamente 150 m³/min (5.297 SCFM) injetado a uma velocidade de 2,1 m/s (7 ft/s), em sentido descendente vertical. A gotícula do exemplo, esférica, com diâmetro de 4.000 micra tem uma velocidade de sedimentação de 13,4 m/s (44 ft/s) em ar puro. Logo, há um

20

transporte vertical da gotícula, para baixo, de 2,1 m/s + 13,4 m/s = 15,5 m/s (7 ft/s + 44 ft/s = 51 ft/s). Se a câmara tiver 2,4 m (8 ft) de altura, existe um tempo de residência de menos que 8/51 segundo na trajetória. Obs.: Os
5 tamanhos de câmara, gotículas, etc. acima, e a velocidade do fluxo de ar, a velocidade de queda das gotículas, etc. são aproximadas e podem ser modificadas o quanto for necessário, levando-se em consideração os fatores aqui discutidos. Assim, pode ser necessário considerar o pré-resfriamento da
10 água do mar que entra, de 15,5 °C (60 °F) para cerca de -18 °C (30 °F), antes dela ser injetada na câmara, forçando essa água que entra a circular em torno da câmara de cristalização, como será discutido.

É reconhecido que as gotículas de água do mar terão que
15 ser super-resfriadas a -32,2 °C (-26 °F) ao invés de a -21,1 °C (-6 °F) para realmente iniciar a formação de gelo (água doce). O decurso de tempo para o início da formação de gelo é reduzido quando a temperatura do ar é muito menor que -32,2 °C (-26 °F). Por esta razão, o presente sistema inicia,
20 de preferência, com ar refrigerado na temperatura de -92,8 °C (-135 °F) a -115 °C (-175 °F), dada ou medida, ou qualquer temperatura que funcione, dados os fatores aqui discutidos. Quando o gelo (água doce) começa a se formar, ele se forma em menos que uns poucos segundos. Logo, para
25 que as gotículas iniciem seu processo de congelamento na

câmara de cristalização, usando uma grande diferença de temperatura de sub-resfriamento, é necessário que o processo de solidificação se inicie enquanto as gotículas estão descendo, mas o processo de congelamento deve ser concluído
5 depois que elas tiverem se depositado no montículo crescente de gelo no fundo da câmara.

Em algumas circunstâncias, a superfície externa da gotícula de 4.000 micra de diâmetro pode alcançar temperaturas bem abaixo da temperatura eutética e formar
10 gelo de água doce, cristais de sal e cristais de sal em que cada molécula de NaCl está ligada a duas moléculas de água. Poderá haver também líquidos metaestáveis nesta mistura de sólidos. Mas, quando aquecida a uma temperatura ligeiramente acima da eutética, a mistura termodinâmica de gelo de água
15 doce e solução salina altamente concentrada e muito densa se estabelece conforme o diagrama de equilíbrio.

Espera-se que a gotícula esteja sujeita ao ambiente congelante durante um tempo que vai de uma fração de segundo a uns poucos segundos durante sua trajetória vertical
20 descendente. Já na massa acumulada no fundo da câmara de cristalização, este ambiente perdurará por um tempo que varia de 10 segundos a 10 minutos ou mais. No processo em batelada de, digamos, 6 a 10 minutos, haverá tempo mais do que suficiente para a mistura atingir as condições de
25 equilíbrio a partir do momento em que a massa de gelo comece

a se formar até se configurar de acordo com o diagrama de fases.

Quando a temperatura da água do mar permanece ligeiramente acima de $-21,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($251,8\text{ K}$), ou $-21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-6,02\text{ }^{\circ}\text{F}$), a água do mar separa-se totalmente em duas fases:

5 (1) gelo puro que, por descongelamento posterior se transforma em água pura, e (2) solução líquida concentrada de água do mar. O gelo (densidade menor) flutua sobre a solução concentrada de água do mar, de alta densidade. Esta

10 é a situação desejada. A Figura 20 mostra o diagrama de equilíbrio de fases para uma mistura de cloreto de sódio (NaCl) e água. O cloreto de sódio é chamado soluto, e a água, solvente. Quando a região de duas fases alcança temperaturas baixas, aparecem as duas fases seguintes: (1)

15 gelo puro (sólido), e (2) solução salina líquida com cristais de sal, em que os cristais de sal são o soluto e a água líquida, o solvente.

Quando a temperatura da água do mar permanece em torno de $-21,12\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou $-6,02\text{ }^{\circ}\text{F}$, a água do mar se separa em três

20 fases: (1) gelo puro, que ao ser derretido se transforma em água pura, (2) cristais de sal em que há duas moléculas de água ligadas a cada cristal de sal ($\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e (3) cristais de sal puro. Embora o diagrama de equilíbrio mostre apenas estas três configurações em temperaturas menores que

-21,1 °C (-6 °F), existem outros estados líquidos metaestáveis neste regime de temperatura. Este é um estado indesejável para nossa operação.

Também são apresentados os dados para uma amostra água
5 do mar (com [Na⁺] igual a 0,46 M). A grande fração líquida para esta amostra abaixo do ponto eutético se deve, presumivelmente, à presença de outros sais com temperatura eutética menor do que o NaCl (em particular, MgSO₄ e MgCl₂). Para uma amostra 0,5 M (~ água do mar) mais de 99% do NaCl
10 precipita sob a forma de NaCl.2H₂O no ponto eutético, mas para soluções mais diluídas, geralmente, mais da metade do Na⁺ inicial permanece sob a forma iônica livre abaixo de -45,15 °C (228 K).

De acordo com uma interpretação idealizada da regra de
15 fases de Gibbs e do diagrama de fases da mistura de NaCl e água, soluções de NaCl(aq) se solidificam completamente em temperaturas abaixo do ponto eutético (252 K ou -6°F) como uma mistura de (1) gelo de água pura, (2) NaCl(sólido), e (3) NaCl.2H₂O(sólido), para qualquer concentração inicial de
20 sal. A observação de que uma fase salina líquida pode coexistir com grandes quantidades de gelo e sais de sódio sólidos em temperaturas mais do que 20 K abaixo do ponto eutético representa, portanto, uma aparente desvio do comportamento de equilíbrio ideal. Para diferenciar esta
25 fase não congelada de solução salina da camada "quasi-

líquida" (QLL) encontrada em pesquisas anteriores com gelo de água pura pesada, nos referiremos à fase solução como uma "camada quasi-solução salina", ou QBL.

A co-existência de uma fase de solução salina líquida com gelo de água pura em temperaturas abaixo do ponto eutético é indicada em experimentos relatados por Thurmond and Brass¹⁷ e Koop et al.¹⁸ Usando calorimetria diferencial exploratória (DSC), Koop et al. observaram duas emissões térmicas separadas durante o congelamento de soluções diluídas de NaCl, que eles atribuíram a transições de líquido super-resfriado para fase sólida associadas com (1) formação de gelo puro (água pura sólida) e (2) precipitação de NaCl.2H₂O. As temperaturas dessas transições de duas fases convergem à medida que a concentração de NaCl aumenta e se tornam, essencialmente, iguais para concentrações acima de 16 % em peso de NaCl.

Quando a solução de água do mar é, progressivamente, resfriada até a temperatura de congelamento da água pura, depois para a temperatura eutética do NaCl e, em seguida, para temperaturas mais baixas, aparecem outras formas metaestáveis descritas acima como QLL e QBL. Espera-se, então que, quando as gotículas saídas do pulverizador encontrem o ar super-resfriado forme-se gelo puro (água pura congelada) com uma série de outras estruturas de cristais de NaCl e água. Mas, à medida que as gotículas se aquecem

novamente até ligeiramente acima da temperatura eutética, forma-se a solução de equilíbrio entre gelo (sólido) e solução concentrada de NaCl, associada ao diagrama de equilíbrio usual para solução salina.

5 A Figura 19 mostra este *loop* de histerese e o retorno à condição inicial. O tempo cresce na direção indicada pelas setas; as temperaturas de congelamento (T_f) e eutética (T_e) são indicadas pelas linhas descontínuas verticais tracejadas. Quando o líquido salino sofre o primeiro
10 resfriamento (C1), não se observa transição de fase; portanto, o líquido é metaestável abaixo de T_f . Durante o resfriamento C2, gelo puro precipita repentinamente, liberando calor, e a fração líquida cai, mas não a zero. A MBL restante é resfriada durante C3 até que uma segunda
15 transição de fase ocorra (C4), resultando em um segundo evento exotérmico e uma queda na fração líquida. Apesar disso, uma fase líquida, a QBL, permanece como mostrado por experimentos de RMN, e pode ser resfriada durante C5. Após aquecimento (W1), a fração líquida aumenta gradualmente até
20 atingir T_e ; a partir daí, começa uma fusão rápida e a fração líquida cresce. Esta fusão repentina cessa quando a solução salina resultante alcança a concentração aproximada dada pela curva de abaixamento do ponto de congelamento. A fração líquida, então, cresce suavemente à medida que a temperatura
25 sobe (W3) e a fusão continua. Deve-se registrar que estas

discussões foram retiradas de "NMR Investigation of the Quasi-Brine Layer in Ice/Brine Mixtures" by Cho, Shepson, Barrie, Cowin and Zaveri.

Esta discussão indica que pode haver transferência de calor entre o ar refrigerado, oriundo do turbo-expansor, e a água do mar, nos tubos e/ou cavidades, suficiente para levar os dois fluidos a atingir sua temperatura de equilíbrio, -21,1 °C (-6 °F), ou próximo disto, antes da injeção de água do mar na câmara de cristalização, através do pulverizador.

Logicamente, será necessário que os tubos e/ou cavidades compartilhem uma superfície comum para melhor troca de calor. Estes tubos e/ou cavidades, assim como as paredes da câmara são feitos, de preferência, de materiais com excelentes propriedades de troca térmica como, por exemplo, alumínio, cobre, etc. O fluxo necessário nos tubos e/ou cavidades é tal que o estado super-resfriado da solução salina seja sustentado até sua pulverização na câmara de cristalização. A única razão para a formação da gotícula é permitir que o sólido salino forme um líquido salino e seja forçado para fora da partícula de gelo. O sucesso desta abordagem resultará no menor tamanho da câmara de cristalização, interessante para os usuários que dispõem de pouco espaço.

A mudança de fase ocorre em menos de uns poucos segundos, de modo que o tempo de residência da gotícula no

ar refrigerado e sobre o montículo de gelo precisa ser menor do que uns poucos segundos (Figura 19). O progresso do congelamento pode ser acompanhado a intervalos curtos, observando-se a linha da água líquida no RMN ^1H e monitorando seu desaparecimento à medida que a temperatura cai abaixo dos pontos de transição de fase. Observou-se que a maior parte das soluções utilizadas no presente estudo não começaram a solidificar até que a temperatura foi reduzida abaixo de 257 K (ou $-16\text{ }^\circ\text{C}$ ($+3,2\text{ }^\circ\text{F}$)). Deve-se lembrar que a temperatura eutética é $-21,1\text{ }^\circ\text{C}$ ($-6\text{ }^\circ\text{F}$). Uma vez iniciado o congelamento, o processo foi rápido, com as maiores alterações no sinal de RMN completando-se em poucos segundos.

Água do mar na sua temperatura usual (digamos $15,5\text{ }^\circ\text{C}$ ou $60\text{ }^\circ\text{F}$), foi filtrada e bombeada através dos tubos e/ou cavidades que circundam a superfície inferior e as paredes laterais da câmara de cristalização. A água do mar bombeada circulou em uma direção tal que, inicialmente, aqueceu a superfície inferior e, depois, as paredes laterais da câmara antes de ser pulverizada para dentro da câmara de cristalização. Assim, há dois efeitos importantes: (1) a água do mar pulverizada na câmara de cristalização é pré-resfriada entre $-18\text{ }^\circ\text{C}$ ($30\text{ }^\circ\text{F}$) e $+4,4\text{ }^\circ\text{C}$ ($40\text{ }^\circ\text{F}$) antes de entrar em contato com o ar refrigerado dentro da câmara de cristalização, e (2) o fundo e as paredes laterais da câmara

de cristalização são suficientemente aquecidos para evitar qualquer formação de gelo.

O limite mais externo do jato pulverizado é limitado radialmente, de modo que poucas gotículas (ou nenhuma) atingem as paredes laterais, mesmo quando a altura do gelo depositado cresce, ao longo do tempo. As gotículas pulverizadas são produzidas em uma faixa de tamanhos, com a maioria das gotículas, preferencialmente, com diâmetro em torno de 4.000 micra. Isto ocorre devido ao tamanho dos orifícios dos bicos do pulverizador e à diferença de pressão. É possível, também, selecionar gotículas de água do mar com diâmetro de 1.000 micra e, até mesmo 250 micra, ou de outros tamanhos.

A gotícula começa, preferencialmente, entre -18°C (30°F) e $+4,4^{\circ}\text{C}$ (40°F) e entra em contato com o ar refrigerado, de preferência, a -85°C (-121°F) ou mais frio. A Figura 21 mostra as temperaturas no cerne das gotículas após 0,2 segundo de exposição ao ar a -85°C (-121°F). A superfície da gotícula irá atingir, imediatamente, uma temperatura ligeiramente maior do que aquela. Considere-se que o coeficiente de transferência de calor na interface ar/água seja de 1 a 5 BTU/ (Hr Sq-Ft F) para convecção livre. Se há um fluxo no sentido da convecção mais forçada,

o coeficiente de calor será maior e as temperaturas do cerne, mais frias.

Mas, as temperaturas do cerne de gotículas grandes, com diâmetro de 4.000 micra, deverão estar entre $-4,44^{\circ}\text{C}$ ($+24^{\circ}\text{F}$) e 0°C ($+32^{\circ}\text{F}$) para taxas de transferência de calor de $h = 5 \text{ BTU}/(\text{Hr Sq-Ft F})$ e $1 \text{ BTU}/(\text{Hr Sq-Ft F})$, respectivamente, em 0,2 segundo de trajeto (primeiras duas colunas da Figura 21). Não há congelamento neste curto espaço de tempo. Contudo, ainda há o caso em que um coeficiente de transferência de calor plausivelmente mais alto só consegue elevar essas temperaturas de cerne a valores menores. Se o modelo de massa partida utilizado aqui for abandonado, espera-se que o processo de congelamento ocorra de fora para dentro, de modo que se formará uma casca de gelo. As duas primeiras colunas da Figura 22 mostram que o congelamento da gotícula toda ocorrerá cerca de 2 segundos após a deposição. O ar refrigerado só tem um curto tempo de residência em sua descida, mas precisará de cerca de mais 2 segundos para liberar completamente a energia estocada nele após a gotícula ter se depositado.

No entanto, as temperaturas do cerne de gotículas com diâmetro de 1.000 micra ficarão entre $-49,2^{\circ}\text{C}$ ($-56,6^{\circ}\text{F}$) e $-13,4^{\circ}\text{C}$ ($+7,8^{\circ}\text{F}$) para taxas de transferência de calor de $h = 5 \text{ BTU}/(\text{Hr Sq Ft F})$ e $1 \text{ BTU}/(\text{Hr Sq Ft F})$ em 0,2 segundo de

trajetória (terceira e quarta colunas da Figura 21). Assim, o congelamento da gotícula toda ocorrerá cerca de 2 segundos após a deposição. O ar refrigerado só tem um curto tempo de residência em sua descida, mas precisará de cerca de mais 2
5 segundos para liberar completamente a energia estocada nele após a gotícula ter se depositado. (ver as terceira e quarta colunas da Figura 22).

É óbvio que se forem usadas gotículas de 250 micra, mesmo esse tempo menor de trajeto na câmara de cristalização
10 congelará as gotículas completamente.

É importante observar que esses cálculos consideram que a temperatura de $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-121\text{ }^{\circ}\text{F}$) é mantida durante todo o percurso de descida. Deve-se lembrar que a troca de calor já vinha ocorrendo com a água do mar nos tubos e/ou cavidades e
15 durante a descida da água. Esta troca estará completa quando o ar e a mistura bifásica atingirem $-21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-6\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Se forem usadas gotículas de tamanho muito pequeno, a maior parte do congelamento só ocorrerá depois da deposição. Partes das gotículas estarão super-resfriadas em seus raios
20 externos e esses regimes super-frios conterão estruturas metaestáveis. Mas no equilíbrio, após a deposição, as partículas de gelo irão se compactar e flutuarão na superfície do denso líquido salino. Quando este líquido sair

da massa de gelo, espaços vazios se formarão. Com isto, o propulsor levará uma massa espumosa para o plano de saída.

I. Exemplo de Sistema Proposto:

Uma concretização do sistema proposto está descrita, mostrando instantâneos da configuração do sistema em seis tempos chave de sua operação.

1. Primeira Etapa:

A primeira etapa no arranjo em contra-corrente, apresentada na Figura 25, mostra a pulverização de água do mar a $+21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($+70\text{ }^{\circ}\text{F}$) com gotículas de diâmetro mediano de 4.000 micra, e ar refrigerado introduzido a 7.151 SCFM e temperatura de $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-157\text{ }^{\circ}\text{F}$). A velocidade de subida das gotículas que saem do pulverizador atinge, finalmente, um valor mínimo relativo devido à gravidade e, então, elas sedimentam-se rumo à base da coluna. A mistura final de gotículas de água do mar e ar refrigerado resulta em $-21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-6\text{ }^{\circ}\text{F}$), a temperatura eutética da mistura. Pode-se controlar a temperatura final da mistura, para que ela fique acima ou abaixo da temperatura eutética, ajustando-se os fluxos de entrada de água do mar e ar refrigerado.

2. Segunda Etapa:

Como mostrado na Figura 26, a mistura de gotículas de água do mar e ar refrigerado ocorre com algumas gotículas

(1) que descem através do ar refrigerado, com gelo e água do mar resfriada formando uma só peça, mas com gelo separado da solução salina; (2) colidindo e coalescendo com gotículas próximas e prosseguindo com o processo de separação dentro
5 dessas novas e maiores gotículas; e (3) que atingem o fundo da poça de fluido, de modo que a solução salina na gotícula se incorpora à poça de fluido e o cristal de gelo liberado flutua para o topo, onde pode se fundir com outros cristais de gelo.

10 À medida que novas gotículas se depositam, continuamente, sobre a massa de gelo, esta pode apresentar uma superfície superior rugosa, com pequenos picos e vales. Isto pode fazer com que mais gotículas que caem no meio da massa se separem em gotículas salinas e cristais de gelo
15 dentro dos vales, fazendo com que algumas gotículas do líquido salino sejam suspensas e fiquem retidas na massa de gelo, apesar de pesquisas mostrarem que esta massa possui canais e espaços vazios pelos quais a solução salina pode sair em direção à solução recolhida.

20 Para evitar isto e permitir que o líquido salino escorra pelas beiradas, os bicos do pulverizador podem ser posicionados com um padrão de cluster denso, mais perto do eixo central da câmara de sedimentação. A formação do gelo ocorrerá, então, preferencialmente, em direção ao centro da
25 câmara, formando um cone invertido (ver Figuras 17 e 18).

Sendo assim, à medida que cada nova gotícula combinada se liga externamente a um cristal de gelo, eles irão se aderir à superfície do cone e a gotícula de líquido salino fluirá sobre sua superfície de contenção, se houver, e escorrerá
5 pela cone até a solução no fundo. Outra alternativa é usar o mesmo padrão dos bicos do pulverizador acima, mas controlar, também, o fluxo através deles de modo que o fluxo de material pulverizado no eixo central da câmara de sedimentação tenha o maior volume e o maior tempo.

10 A altura da injeção de ar refrigerado deve ser maior do que a da massa de gelo, como discutido acima para a Figura 17, o que significa produzir um anel vazio entre a massa de gelo e as paredes da câmara, como discutido para a Figura 18.

15 3. Terceira Etapa:

Se muito pouca água do mar for pulverizada na câmara de sedimentação, a mistura no fundo da câmara cairá abaixo da temperatura eutética e, não somente haverá gelo saindo da solução, mas o sal também irá se separar e se depositará sob
20 a forma de cristais de sal. Isto é mostrado na Figura 27. Ver a forma cônica do bloco de gelo da concretização preferida nas Figuras 17 e 18.

4. Quarta Etapa:

As 2 horas de operação continua terminaram e chegou a hora de retirar o bloco de gelo. A estrutura do pulverizador é deslocada para o lado, e a solução é suspensa a um nível
5 no qual ela não respingue sobre as bordas das paredes da câmara.

Durante o período de 2 horas, os cristais de gelo se reuniram no topo da solução salina, mais densa, e se juntaram formando um bloco de gelo. Por este tempo, todo o
10 conteúdo interior da câmara de sedimentação é levantado por um pistão hidráulico até que a parte superior da solução salina alcance a borda superior da câmara de sedimentação. Há, então, acesso ao bloco através de pinças, que o suspendem e levam para a posição seguinte, onde ele é
15 cortado e lavado, como mostra a Figura 28. A solução fria será guardada para etapas posteriores da operação. As superfícies do bloco de gelo precisam ser raspadas, ou enxaguadas com água doce, para remover qualquer solução salina de suas interfaces. Ele é, então, deixado em um
20 tanque para derretimento em temperatura ambiente e utilização posterior como água potável pura.

Alternativamente, após o montículo de gelo ter chegado à altura planejada, o dreno de água salgada localizado no fundo da câmara de cristalização é aberto para drenagem da

água do mar. Quando toda esta água for removida, o dreno será fechado e o fundo abaixa e vira em torno de uma dobradiça, passando da posição horizontal para a vertical. A dobradiça suporta a superfície inferior da câmara de cristalização. Quaisquer tubos ou dutos envolvendo a superfície inferior da câmara é configurado, preferencialmente, para acomodar o eixo em torno da dobradiça. Assim, o montículo de gelo pode escorregar pelo fundo movediço e passar para uma esteira de transporte. Esta conduz o montículo de gelo para o tanque onde o montículo anterior está sendo derretido.

Uma vez que a transferência do gelo para fora da câmara seja feita por gravidade, o ar refrigerado que chega pode ser ajustado para cerca de 14,67-psia (pressão de 1 atmosfera). Esta pressão de saída de 1 atm (14,67-psia) para o turbo-expansor e de 13,6 atm (200-psia) para entrada nele permite alcançar temperaturas muito baixas no ar que sai do turbo-expansor para a câmara de cristalização. Contudo, esta grande queda de pressão exige um turbo-expansor de dois estágios.

5. Quinta Etapa:

A água do mar morna, que entra, passará por um trocador de calor, em contra-corrente com a água salina que sai, como mostrado na Figura 29. A economia de energia permitirá uma

taxa de dessalinização maior, para o mesmo fluxo de ar refrigerado.

6. Sexta Etapa:

A operação do sistema a uma temperatura ligeiramente
5 acima da eutética é conveniente, no sentido de que a densa
solução salina leva o gelo a flutuar e pode-se utilizar
Teflon sobre a superfície interna das paredes da câmara para
evitar que o bloco de gelo grude nelas. No estágio final,
após a remoção do bloco de gelo, é conveniente baixar a
10 temperatura abaixo da temperatura eutética para depositar os
cristais de gelo que podem ser removidos. Este processo
deverá ser iniciado antes da última etapa.

Como mostrado na Figura 30, o elevador hidráulico é
deslocado de sua posição inicial para remover o sal. Há,
15 então, duas condições: (1) o termopar indica que a solução
salina está ligeiramente mais quente que a temperatura
eutética. Neste caso, quando a solução salina for removida,
todo o sal sairá com ela. Esta solução salina resfriada
retorna ao trocador de calor para pré-esfriar a água do mar
20 que entra. (2) o termopar indica que a solução salina está
ligeiramente mais fria que a temperatura eutética. A solução
salina é drenada e processada como descrito no primeiro
caso. Em seguida, o pistão hidráulico é abaixado abaixo do
fundo da câmara de sedimentação e o sal solidificado é

raspado fora da superfície do pistão. Este sal pode ser descartado, ou pode-se encontrar uma utilização para ele.

J. Comparação com Outros Métodos:

A discussão a seguir pretende mostrar que o presente
5 método é capaz de produzir água doce potável a um custo mais
baixo, isto é, libras por minuto, do que os processos
anteriores de dessalinização. A análise abaixo descreve a
metodologia e as hipóteses usadas para avaliar a utilidade e
a eficiência deste método. A análise a seguir consiste de
10 duas etapas básicas:

(1) Definição da termodinâmica do processo, que
envolve adequar a capacidade de
resfriamento/congelamento do ar refrigerado com a
energia que se precisa remover da partida de água do
15 mar, a fim de fazer com que o sal e água pura nela
contidos cristalizem.

(2) Definição do início e especificação das etapas do
processo necessárias para alcançar a separação física
dos cristais de sal e de gelo, e para conseguir a
20 dessalinização da partida de água do mar.

Como relacionado abaixo, neste processo em bateladas
determinou-se que a quantidade de água do mar seria de
4.988,5 kg (11.000 libras) e a duração do processo de
dessalinização, estimada em 2 horas. A temperatura inicial

da água do mar foi considerada como de +21,1 °C (+70 °F). O ponto eutético do NaCl é -21,2 °C (-6,2 °F) e a composição eutética 23,3%. A quantidade total de frio necessária para o resfriamento desta partida é de 2.211.000 BTU. Isto inclui a

5 fase de formação do gelo (163 BTU/# fusão).

Formação de Gelo Incluída

120 min
 4.988,5 kg (11.000 #) de água salgada
 1 BTU/(#F)
 +21,1 °C (70 °F)
 0 °C (32 °F)
 163 BTU/# fusão a -6,2 °F
2.211.000,00 BTU de resfriamento necessários

10 Se a fase de formação de gelo não for incluída, consegue-se água super-resfriada, e a capacidade de resfriamento disponível pode acomodar 13,6 toneladas (30.000 #) de água do mar.

Sem Formação de Gelo (ÁGUA SUPER-RESFRIADA)

120 min
 13,6 t (30.000 #) de água salgada
 1 BTU/(#F)
 +21,1 °C (70 °F)
 -21,2 °C (-6,2 °F)
 0 BTU/# sem gelo
2.286.000,00 BTU de resfriamento necessários

1,88 kg/s (250 # água salgada/min)
0,857 fração de água doce
1,62 kg/s (214 # água doce/min)

O turbo-expansor de 500 kW processa 202,5 m³/min

20 (7.151 scfm) de ar e libera a pressão atmosférica de ar a -102,8 °C (-153 °F) para dessalinização. A temperatura de -

21,2 °C (-6,2°F) é a temperatura eutética para formação de gelo e separação de cristais de gelo. Logo, usaremos o ar para dessalinização em uma faixa de temperatura entre -102,8 °C (-153 °F) e -21,2 °C (-6,2°F). O cálculo mostrado abaixo indica a energia de resfriamento disponível como sendo de 2.297.508 BTU se os processos de fluxo forem operados durante 120 minutos. A entrada de 4988,5 kg (11.000 libras) de água do mar a +21,1 °C (+70 °F), levada a -21,2 °C (-6,2 °F) requer 2.211.000 BTU.

10

500 kW (térmico)
 670 hp
 10,67 scfm/hp
 7.151 scfm/hp
 120 min
 858.177 scf
 1,2 kg/m³ (0,076 # pés cúbicos)
 29,6 t (65.211 # ar)
 0,24 BTU/(#F)
 -21,2 °C (-6,16 °F)
 -102,8 °C (-153 F)
(2.298.508,17) BTU de resfriamento disponível

15

A iteração dos cálculos acima para o sistema de 500 kW mostra que a cristalização por congelamento proposta produzirá, teoricamente, 36,17 kg (79,75 #) de água doce por minuto. Assim, necessita-se de 6,27 kW para produzir 450 g (uma libra) de água doce por minuto. Isso é comparável com o cristalizador de superfície raspada, que requer 11,4 kW para produzir aquela quantidade de água doce por minuto; e ao dessalinizador por osmose reversa que requer 68,2 kW para produzir 450 g (uma libra) de água doce por minuto.

20

As concretizações discutidas e apresentadas aqui são meramente exemplificativas e não pretendem, de modo algum, serem limitantes. A presente invenção contempla vários métodos e sistemas, que podem ser adaptados e que possuem as
5 intenções e objetivos da invenção, os quais podem ser considerados uma variação das concretizações aqui apresentadas.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema para dessalinizar água do mar, caracterizado pelo fato de que compreende:

5

um compressor para comprimir ar;

um expensor para expandir o ar comprimido para co-
gerar ar resfriado;

10

uma câmara, com pelo menos um bocal pelo qual a água do mar pode ser injetada para dentro da câmara, e no qual o ar resfriado do expensor pode ser introduzido, aonde a exposição da água do mar ao ar resfriado permite que
15 partículas de gelo compostas de água pura se formem na câmara;

um dispositivo que auxilia a remoção de partículas de gelo da câmara, com isso ajudando a separar a água pura de
20 partículas de gelo de impurezas da água do mar.

2. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o referido sistema compreende pelo menos um dos seguintes:

25

i) é fornecido um tanque de armazenamento para permitir que o ar comprimido seja estocado neste, e aonde o expensor é adaptado para liberar e expandir o ar comprimido no referido tanque, para produzir ar resfriado;

ii) é fornecido um gerador elétrico que é adaptado para produzir eletricidade quando o ar comprimido está sendo liberado pelo expansor, aonde o ar resfriado é produzido como um sub-produto da produção e eletricidade;

iii) um tanque de compensação, aonde, quando o ar comprimido é expandido pelo expansor, a energia por este produzida é usada para excitar um segundo compressor que produz energia de ar comprimido adicional que pode ser introduzida no tanque de compensação;

iv) pelo menos um trocador de calor para auxiliar a reduzir a temperatura do ar comprimido antes deste ser expandido pelo expansor, ou

v) pelo menos um eixo comum entre o compressor e o expansor que permite que ambos operem em associação um com o outro.

3. Sistema de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que a temperatura do ar comprimido introduzido na câmara é inferior à temperatura eutética da água do mar, e aonde partículas de gelo são deixadas depositar no fundo da câmara na forma de uma massa, aonde a temperatura da massa no fundo da câmara é superior à temperatura eutética da água do mar.

4. Sistema de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que a temperatura do ar resfriado está entre menos 92,8°C (-135°F) e 79,4°C (175°F), e a temperatura da massa de partículas de gelo está acima de menos 21,2°C (-6,2°F, tal que uma salmoura líquida consistindo de impurezas na água do mar pode escoar da massa.

5. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o sistema compreende pelo menos um dos seguintes:

i) o sistema é adaptado de tal modo que a água do mar pode ser borrifada de cima para baixo para dentro da câmara, e o ar resfriado pode ser introduzido de modo que este flui subindo para dentro da câmara;

ii) o sistema é adaptado de tal modo que a água do mar pode ser borrifada de cima para baixo para dentro da câmara, e o ar resfriado pode ser introduzido de modo que este flui para baixo, para dentro da câmara, na mesma direção que a água do mar.

6. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o ar resfriado é introduzido à uma temperatura entre menos 92,8°C (-135°F) e 79,4°C (175°F).

7. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que em pelo menos um bocal é adaptado e configurado para produzir um 'spray' centralmente

direcionado de água do mar que tende a manter as gotas que são formadas pelo 'spray' distantes das paredes externas da câmara, e direcionadas para o centro da câmara, aonde as partículas de gelo caem, elas tendem a cair próximo ao centro da câmara, par formar uma massa de gelo que permite a água do mar escorrer pelos lados da massa de gelo, sem ser capturada para dentro da formação de massa de gelo enquanto esta coalesce e resfria.

10 8. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que as paredes da câmara são adaptadas com tubos ou passagens que permitem que a água do mar circule por estes, para auxiliar a regular a temperatura das paredes dentro da câmara.

15

9. Sistema de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que a água do mar é passada através de tubos ou passagens nas paredes da câmara para auxiliar no aquecimento das paredes da câmara, e em contrapartida, a temperatura fria dentro da câmara pode ajudar a resfriar a água do mar enquanto esta circula antes de ser borrifada para dentro da câmara, aonde a água do mar que é introduzida na câmara é pré-resfriada até menos do que 4,444°C (40°F).

25

10. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que as paredes da câmara estão adaptadas com tubos ou passagens que permitem o ar aquecido do compressor

ser usado para regular a temperatura das paredes dentro da câmara.

11. Sistema de acordo com a reivindicação 10,
5 caracterizado pelo fato de que o ar aquecido é passado através dos tubos ou passagens nas paredes da câmara para auxiliar a aquecer as paredes da câmara, aonde as temperaturas frias dentro da câmara podem ajudar a pré-resfriar o ar aquecido enquanto este circula para o
10 expansor.

12. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a localização aonde o ar resfriado é introduzido na câmara está acima da altura que é esperada a
15 ser atingida pela formação de massa de gelo que é formada dentro da câmara quando as partículas de gelo coalescem e congelam juntas no fundo da câmara.

13. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado
20 pelo fato de que um aquecedor é fornecido em conexão com as paredes da câmara próxima onde partículas de gelo acumulam, em que as paredes da câmara podem ser aquecidas para prevenir que partículas de gelo congelem nas paredes, e/ou para permitir que qualquer massa de gelo que é produzida
25 como partículas de gelo que coalescem e congelam dentro da câmara sejam facilmente removidas.

14. Método para dessalinizar água do mar, caracterizado pelo fato de que compreende:

comprimir ar para produzir energia de ar comprimido;

liberar o ar comprimido com um expansor para co-gerar
5 ar resfriado;

borrifar água do mar na forma de gotas dentro de uma
câmara;

10 expor as gotas de água do mar ao ar resfriado dentro
de uma câmara , formando, assim, partículas de gelo
compostas de água pura dentre as gotas; e

formar uma massa com as partículas de gelo dentro da
15 câmara, ajudando, portanto, a separar a água pura nas
partículas de gelo, das impurezas na água do mar.

15. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado
pelo fato de que o método compreende pelo menos um dos
20 seguintes:

i) armazenar a energia de ar comprimido em um tanque
de armazenamento antes de liberar a energia de ar
comprimido;

25

ii) co-produzir eletricidade usando um gerador,
enquanto o ar comprimido está sendo liberado pelo expansor,
aonde o ar resfriado é produzido como um subproduto da
produção de eletricidade;

iii) usar a energia de ar comprimido para excitar um compressor suplementar que produz energia de ar comprimido adicional que pode ser introduzida no tanque de
5 compensação.

iv) usar pelo menos um trocador de calor para reduzir a temperatura do ar comprimido antes deste ser expandido pelo expansor; ou
10

v) usar pelo menos um eixo comum entre o compressor e o expansor que permite que ambos operem em associação um com o outro.

15 16. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que introduzir o ar resfriado compreende introduzir ar resfriado à uma temperatura menor do que a temperatura eutética da água do mar, e aonde formar a massa de partículas de gelo compreende manter a temperatura da
20 massa no fundo da câmara acima da temperatura eutética da água do mar.

17. Método de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que a temperatura do ar resfriado está entre
25 menos 92,8°C (-135°F) e 79,4°C (175°F), e a temperatura da massa de partículas de gelo está acima de menos 21,2°C (-6,2°F, tal que uma salmoura líquida consistindo de impurezas na água do mar pode escoar da massa.

18. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que compreende as seguintes etapas:

5 i) borrifar água do mar de cima para baixo para dentro da câmara, e introduzir o ar resfriado de modo que este flui subindo para dentro da câmara;

10 ii) borrifar água do mar de cima para baixo, para dentro da câmara, e introduzir o ar resfriado de modo que este flui para baixo, para dentro da câmara, na mesma direção que a água do mar.

15 19. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que pelo menos um bocal é adaptado e configurado para produzir um 'spray' centralmente direcionado de água do mar que tende a manter as gotas que são formadas pelo 'spray' distantes das paredes externas da câmara, e direcionadas para o centro da câmara, aonde as partículas de gelo caem, elas tendem a cair próximo ao
20 centro da câmara, para formar uma massa de gelo que permite a água do mar escorrer pelos lados do bloco de gelo, sem ser capturada para dentro da formação de massa de gelo enquanto esta coalesce e congela.

25 20. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que o método compreende circular água do mar através de pelo menos um tubo ou passagem dentro pás paredes da câmara para auxiliar no aquecimento das paredes de câmara, e em contrapartida, provocam a temperatura fria

dentro da câmara para auxiliar a resfriar a água do mar antes de ser vaporizada dentro da câmara, aonde a água do mar que é produzida dentro da câmara é pré-resfriada até menos do que 4,444°C (40°F).

5

21. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que o método compreende circular ar aquecido do compressor através de pelo menos um tubo ou passagem nas paredes da câmara para auxiliar no aquecimento de paredes da câmara, em que as temperaturas frias dentro da câmara podem ajudar a pré-resfriar o ar aquecido enquanto este circula para o expensor.

10

FIGURA 1

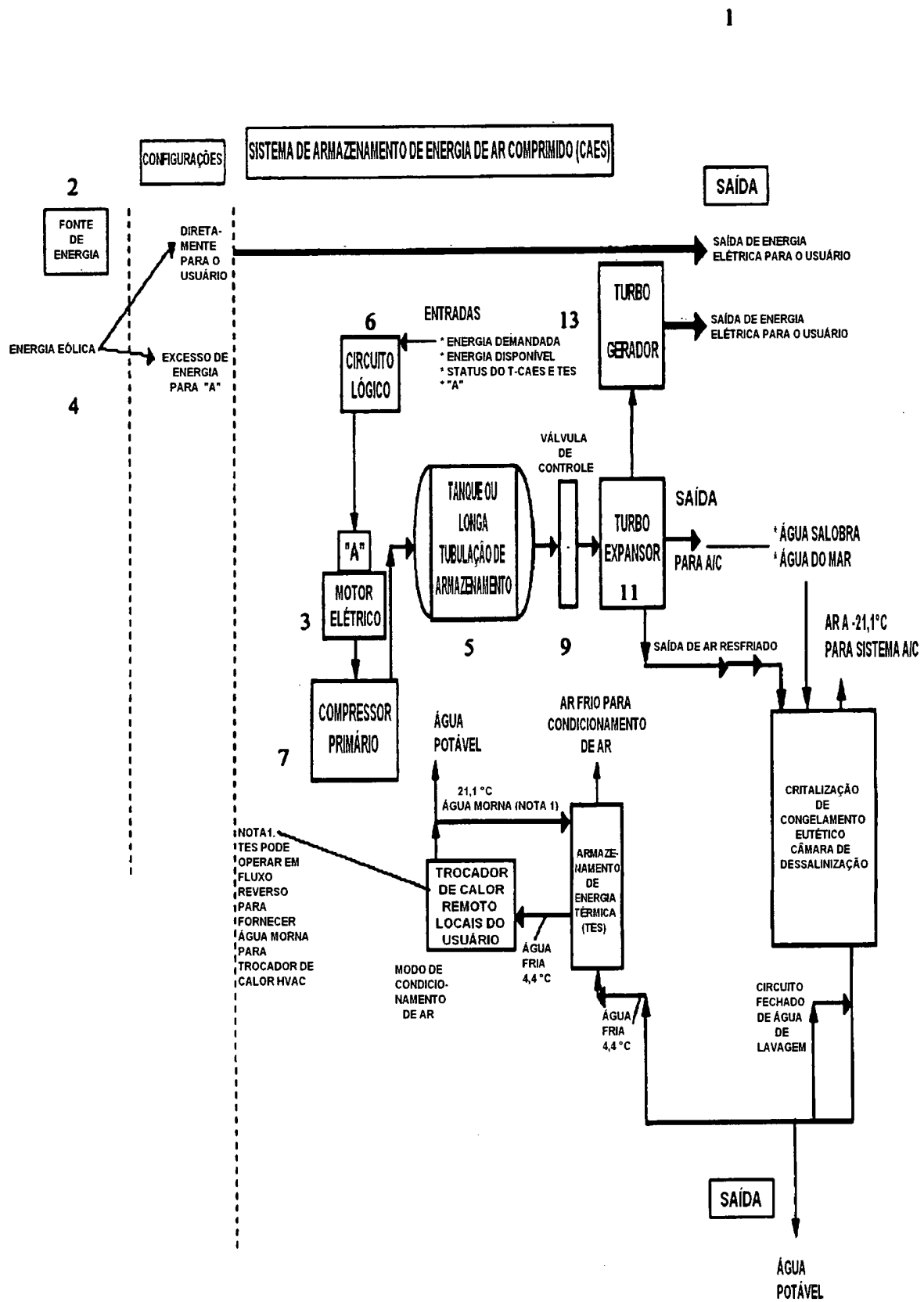


FIGURA 2

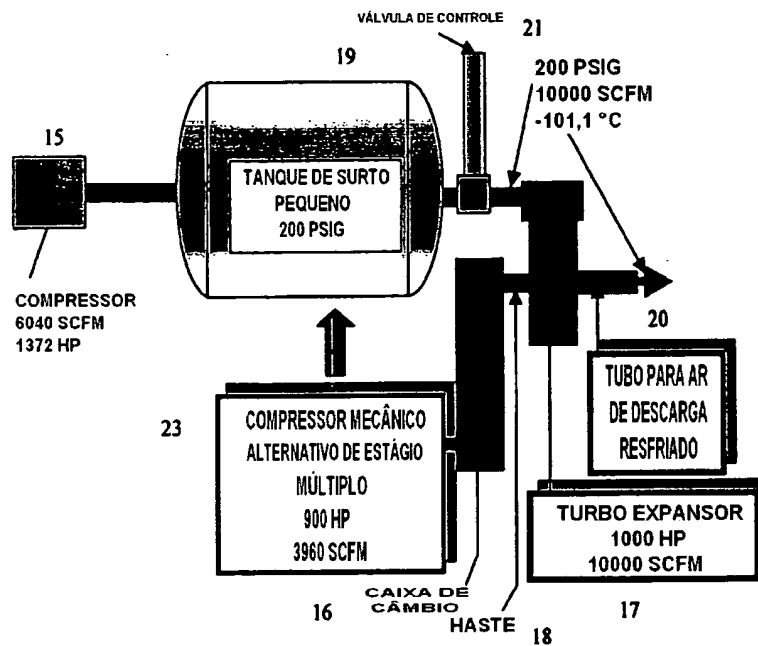
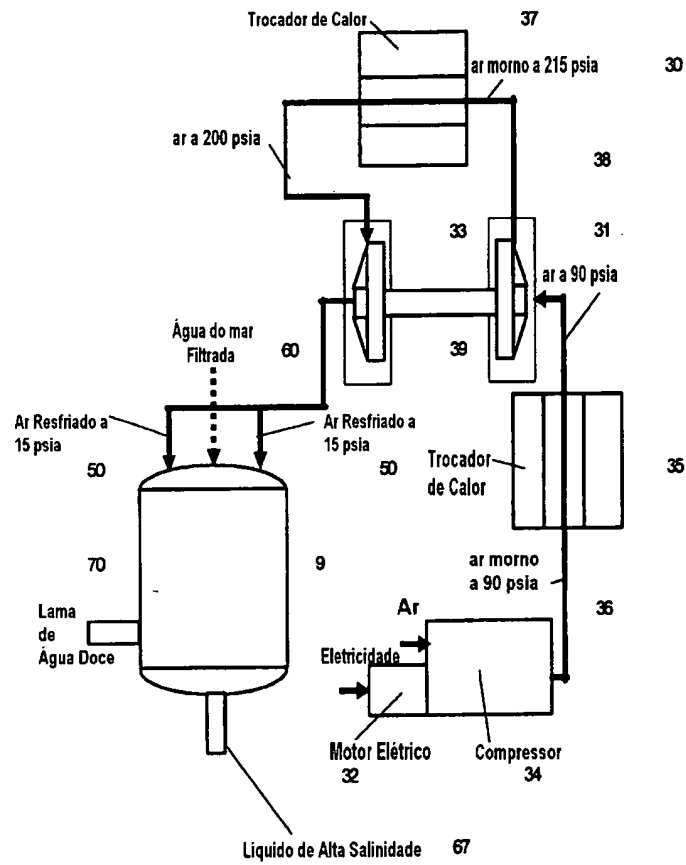


FIGURA 3



Cristalizador de Congelamento Eutético

FIGURA 3A

COMPRESSOR ALTERNATIVO	PRESSÃO (PSIA)	TEMPERATURA (°F)	DENSIDADE (#/FT³)	ENTALPIA (BTU/#)	ENTROPIA (BTU/(# R))
ENTRADA	14,67	70	0,074764	126,71	1,6366
ISENTRÓPICO	90	426,44	0,27351	213,05	1,6366
				-86,34	
EFICIÊNCIA				0,84	
SAÍDA	90	492,95	0,25438	229,5	1,6545
				-102,79	
COMPRESSOR CENTRÍFUGO	PRESSÃO (PSIA)	TEMPERATURA (°F)	DENSIDADE (#/FT³)	ENTALPIA (BTU/#)	ENTROPIA (BTU/(# R))
ENTRADA	85	70	0,43391	126,22	1,5153
ISENTRÓPICO	205	222,06	0,80974	162,64	1,5153
				-36,42	
EFICIÊNCIA				0,84	
SAÍDA	205	250,4	0,77695	169,58	1,5253
				-43,36	
TURBO EXPANSOR	PRESSÃO (PSIA)	TEMPERATURA (°F)	DENSIDADE (#/FT³)	ENTALPIA (BTU/#)	ENTROPIA (BTU/(# R))
ENTRADA	200	70	1,0235	1,2542	1,4552
ISENTRÓPICO	31,5	-148,87	0,27586	73,734	1,4552
				51,686	
EFICIÊNCIA				0,84	
SAÍDA	31,5	-114,78	0,24795	82,004	1,4804
				43,41624	

FIGURA 3B

	HP	SCFM
COMPRESSOR ALTERNATIVO	2.000,0	10.857,6
TURBO COMPRESSOR	844,3	10.857,6
TURBO EXPANSOR	844,3	10.857,6

FIGURA 3C

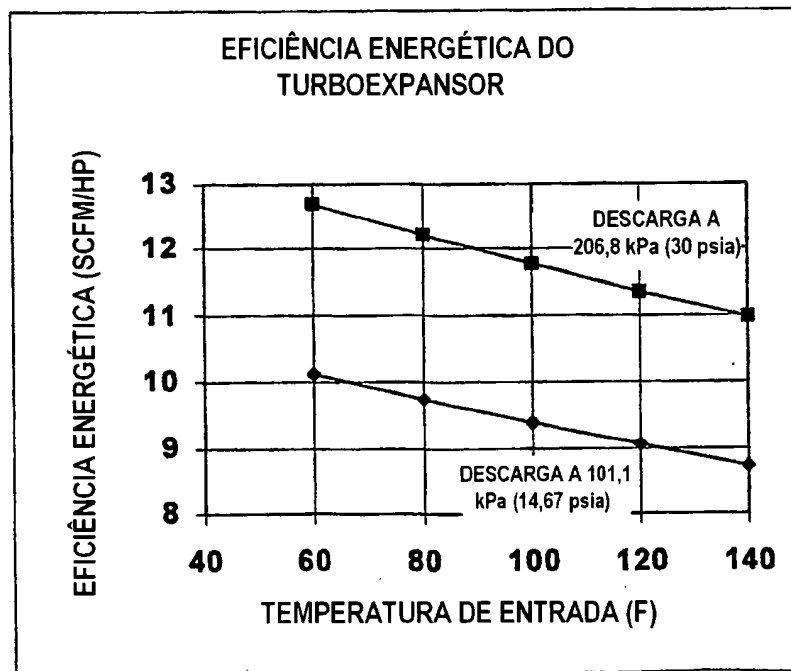


FIGURA 3D

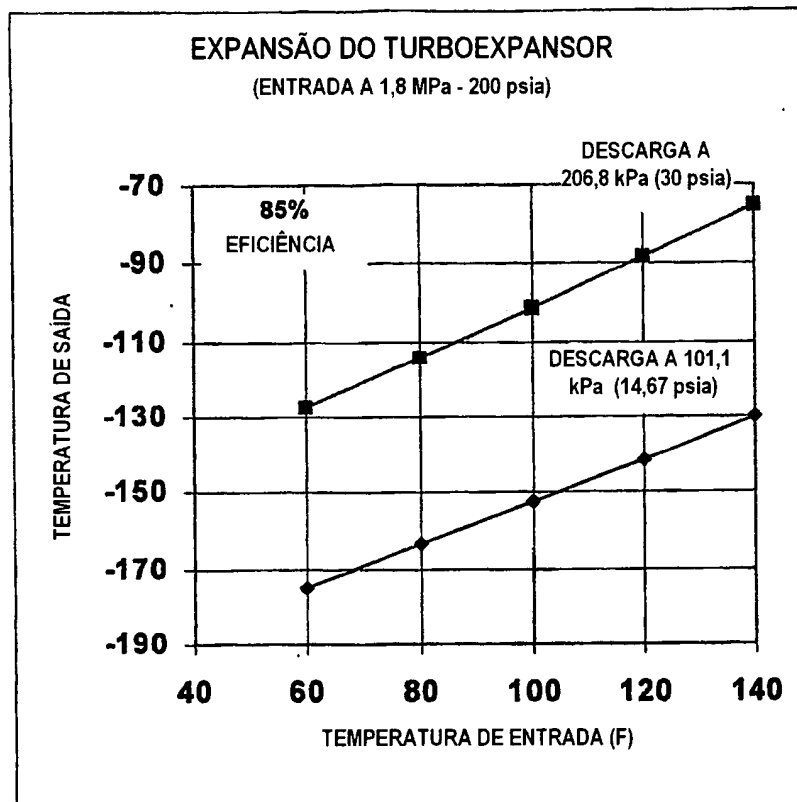


FIGURA 4A

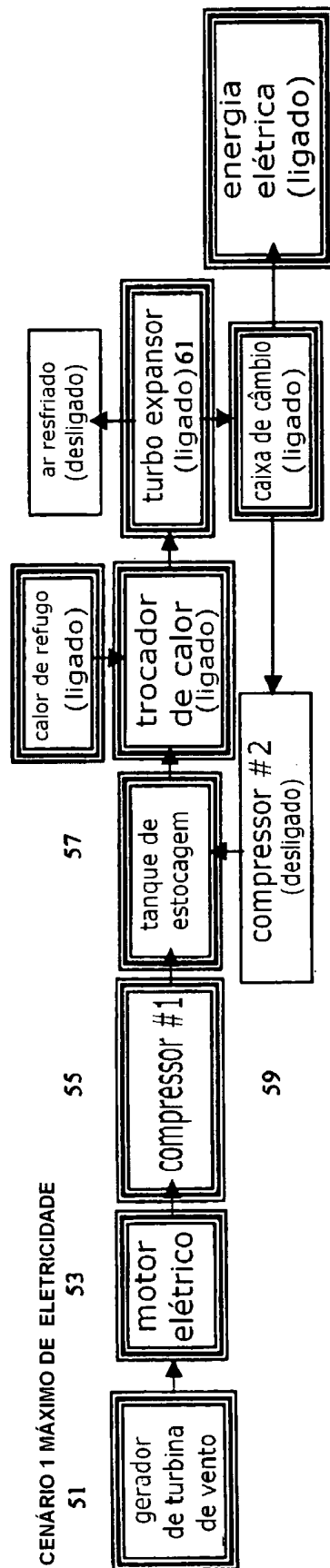


FIGURA 4B

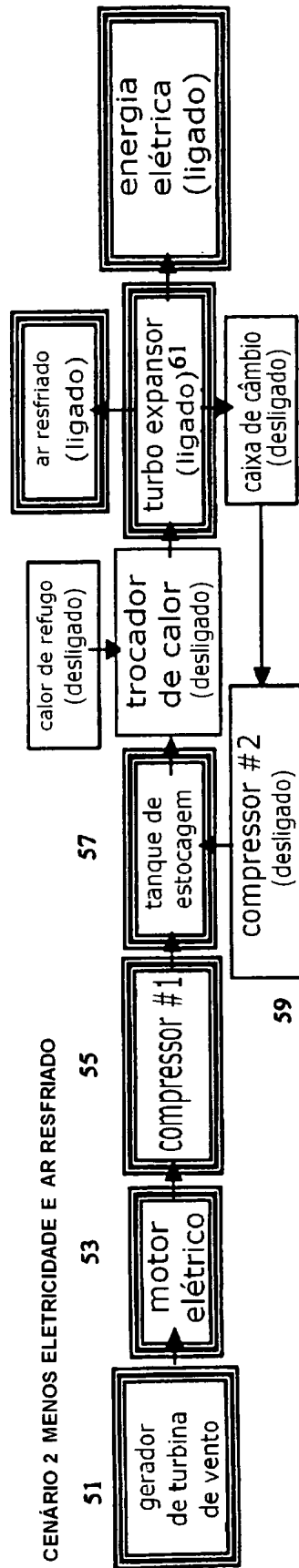


FIGURA 4C

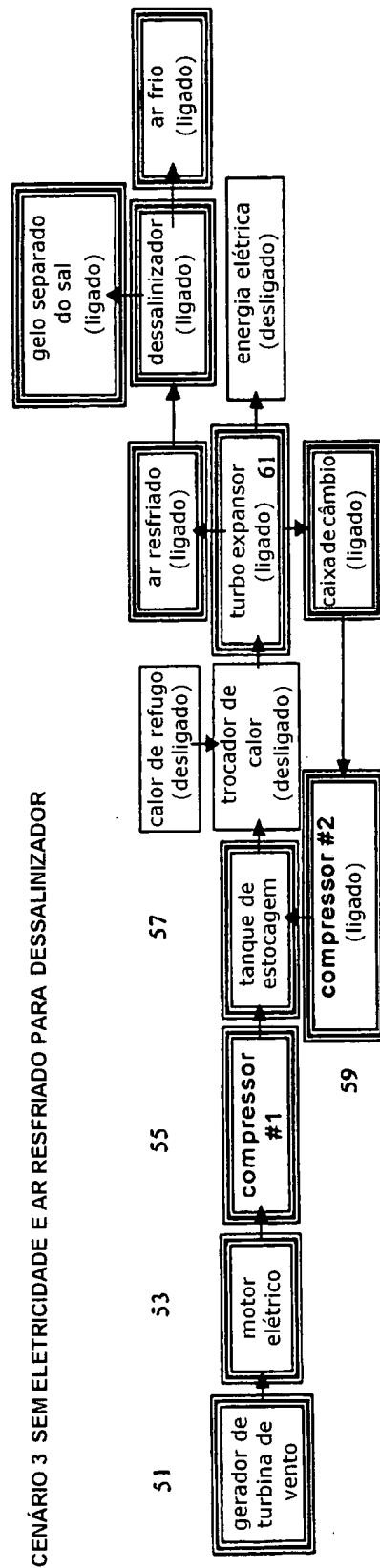


FIGURA 5
TERMODINÂMICA DE UM TURBO EXPANSOR DE 500 kW

	PRESSÃO PSIA	TEMP °F	DENSIDADE #/FT ³	ENTALPIA BTU/#	ENTROPIA BTU/(# R)
ENTRADA	200	70	1,0235	125,42	1,4552
EXPANSÃO ISENTRÓPICA	14,67	-210,22	0,15997	59,225	1,4552
				66,195	
EFICIÊNCIA				0,79	
				73,12595	
SAÍDA	14,67	-152,73	0,12951	73,126	1,5054
	<div>10,67 SCFM/HP</div> <div>510,65 kW(térmico)</div>				

ENTRADA	200	70	1,0235	125,42	1,4552
EXPANSÃO ISENTRÓPICA	30	-153,21	0,26643	72,71	1,4552
				52,71	
EFICIÊNCIA				0,85	
				80,6165	
SAÍDA	30	-120,61	0,12951	80,616	1,4797
	<div>12,45 SCFM/HP</div> <div>510,07 kW(térmico)</div>				

FIGURA 6

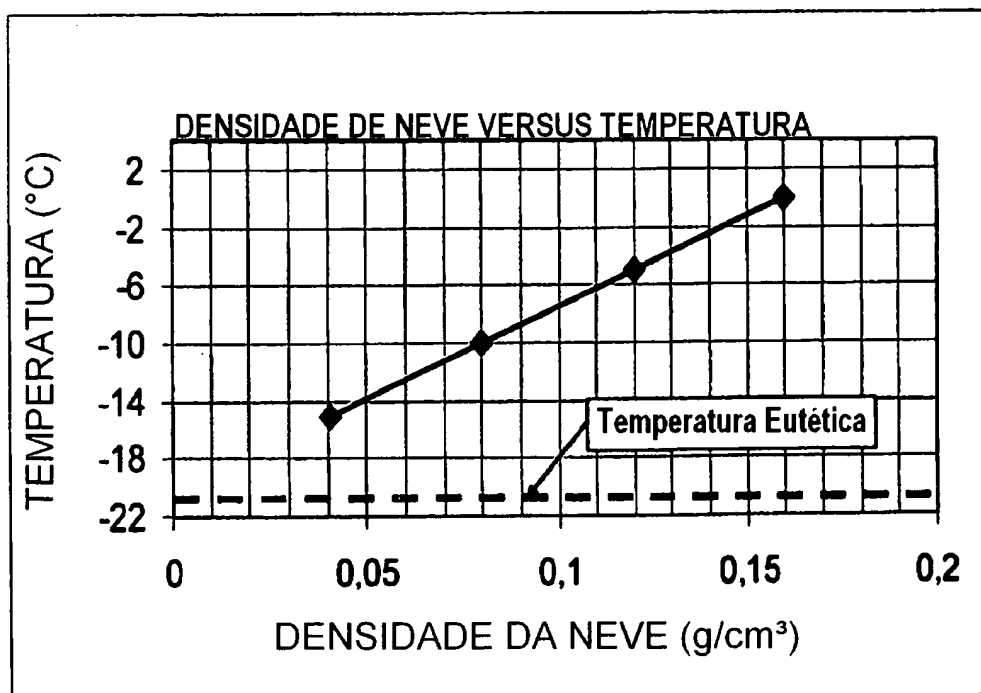


FIGURA 7

Molar	Sal	Concentração em (g/L)	Temperatura Eutética (°C)	Composição Eutética (% peso)
0,425	cloreto de sódio	24,6	-21,2	23,3
0,009	cloreto de potássio	0,67	-11,1	19,8
0,0093	cloreto de cálcio*2H ₂ O	1,36	-55	29,8
0,0255	Sulfato de magnésio*7H ₂ O	6,29	-3,9	19
0,023	cloreto de magnésio*6H ₂ O	4,66	-33,6	21,6
0,002	Bicarbonato de sódio	0,18	-2,1	5,9

FIGURA 8

Substância	Concentração máxima desejada em mg/L	Concentração máxima permitida em mg/L	Solução isotônica em mg/L
sólidos totais dissolvidos	500	1500	9000
Mg	30	150	-
Ca	75	200	-
Cloreto	20	60	3550-3800
Sulfato	200	400	-
Sódio	-	-	3050-3400
Potássio	-	-	150-210
conteúdo total em mmol/L	aprox. 10	aprox. 30	aprox. 150

FIGURA 9

pH até 8,0

<u>Temperatura da Nuvem</u>	<u>Gotículas</u>
Acima de 0°C (32°F)	Água líquida
-10 a 0 °C (12 a 32 °F)	Água super resfriada
-40 a -10 °C (-4 a 14 °F)	Água super resfriada e cristais de gelo coexistem (nuvens misturadas)
Abaixo de -40 °C (-4°F)	Principalmente cristais de gelo (nuvens glaciais)

FIGURA 10

Tipo de Spray	10 psi		40 psi		100 psi	
	Capacidade (gpm)	VMD µm	Capacidade (gpm)	VMD µm	Capacidade (gpm)	VMD µm
Cone Oco	0,05	360	0,10	300	0,16	200
	12	3400	24	1900	38	1260
Hélice Plana	0,05	260	0,10	220	0,16	190
	5	4300	10	2500	15,8	1400
Cone Completo	0,10	1140	0,19	850	0,30	500
	12	4300	23	2800	35	1720

FIGURA 11

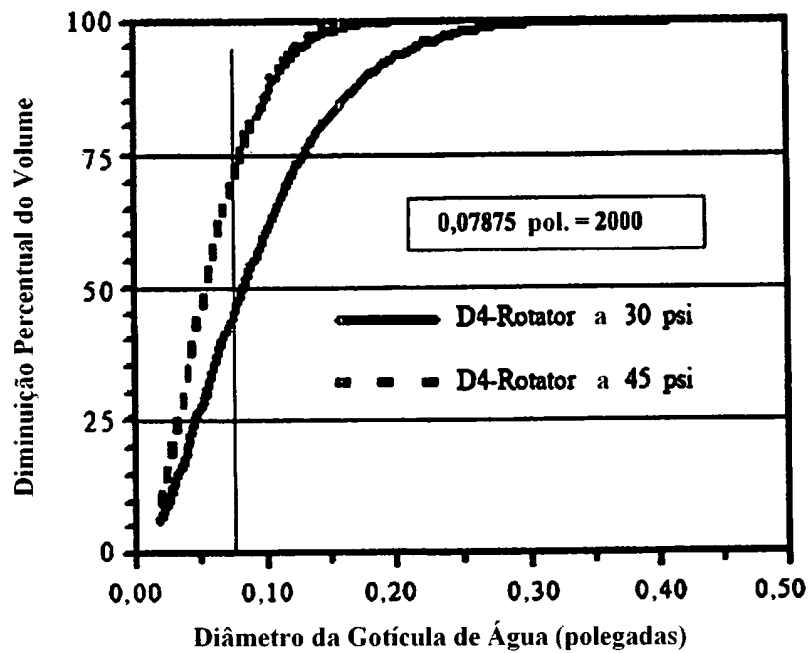


FIGURA 12

Número de Biot

hR/k

2000	2000	2000	1000	microns raio	R
0,00656	0,00656	0,00656	0,00328	ft	R
0,25	0,25	0,25	0,25	BTU/(h ft °F)	k
5	1	1	1	BTU/h ft² °F)	h
0,1312	0,0262	0,0262	0,0131		Bi
7,62	38,1	38,1	76,2		1/Bi

Número de Fourier

alfa*t/R²

0,75	0,75	0,75	0,75	ft²/h	alfa
2	2	10	2	s	tempo
0,00056	0,00056	0,00278	0,00056	h	tempo
4,30556E-05	4,30556E-05	4,30556E-05	1,07639E-05	ft²	raio quadrado
9,68	9,68	48,39	38,71		Fo

$$\frac{(T_c - T_i)}{(T_s - T_i)}$$

Ts

Ti

Tc

0,025	0,4	0,025	0,2	
70	70	70	70	°F
-157	-157	-157	-157	°F
-151,325	-66,2	-151,325	-111,6	°F

através da esfera
inicialmente
temperatura do ar
sustentada
centro da esfera

exp(-Bi*Fo) 0,280831622 0,775691802 0,280831622 0,601697772
3*h*t/(w*Cp*R) 0,020352564 0,004070513 0,020352564 0,008141026

FIGURA 13

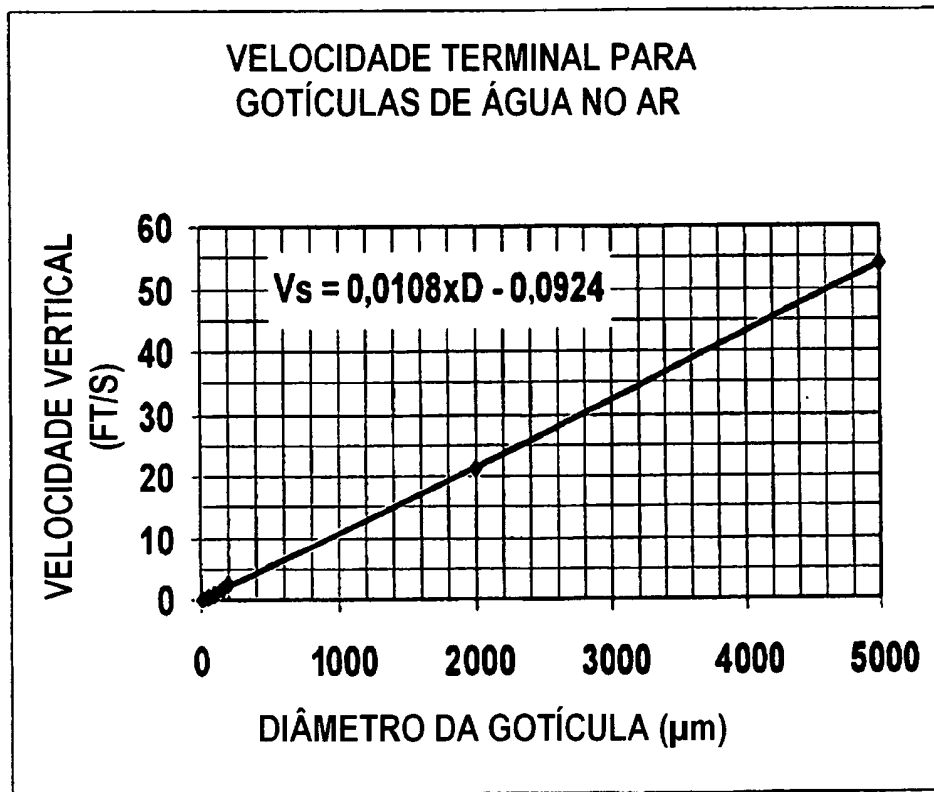
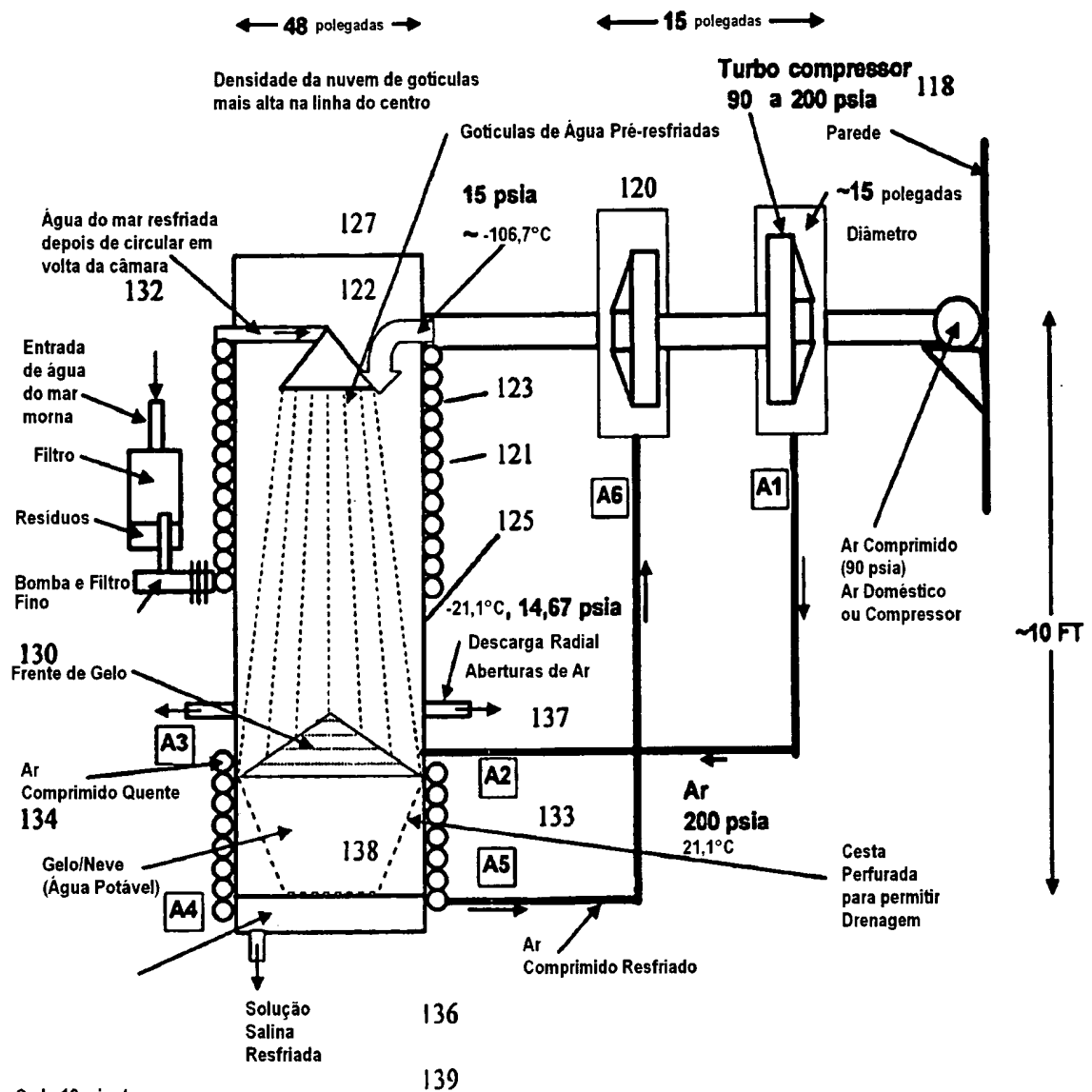


FIGURA 15

**DESSALINIZAÇÃO POR PROCESSAMENTO EM BATELADA
AR RESFRIADO FLUI EM PARALELO COM GOTÍCULAS PULVERIZADAS**



Cada 10 minutos:

Continuar Turbo expansor
Parar Momentaneamente Entrada
de Água do Mar
Drenar Solução Salina

MÉTODO #1

Soltar o Fundo (giro com dobradiça)
Soltar Massa de Gelo sobre Transportador
Trazer o Fundo de volta (giro com dobradiça)

MÉTODO #2

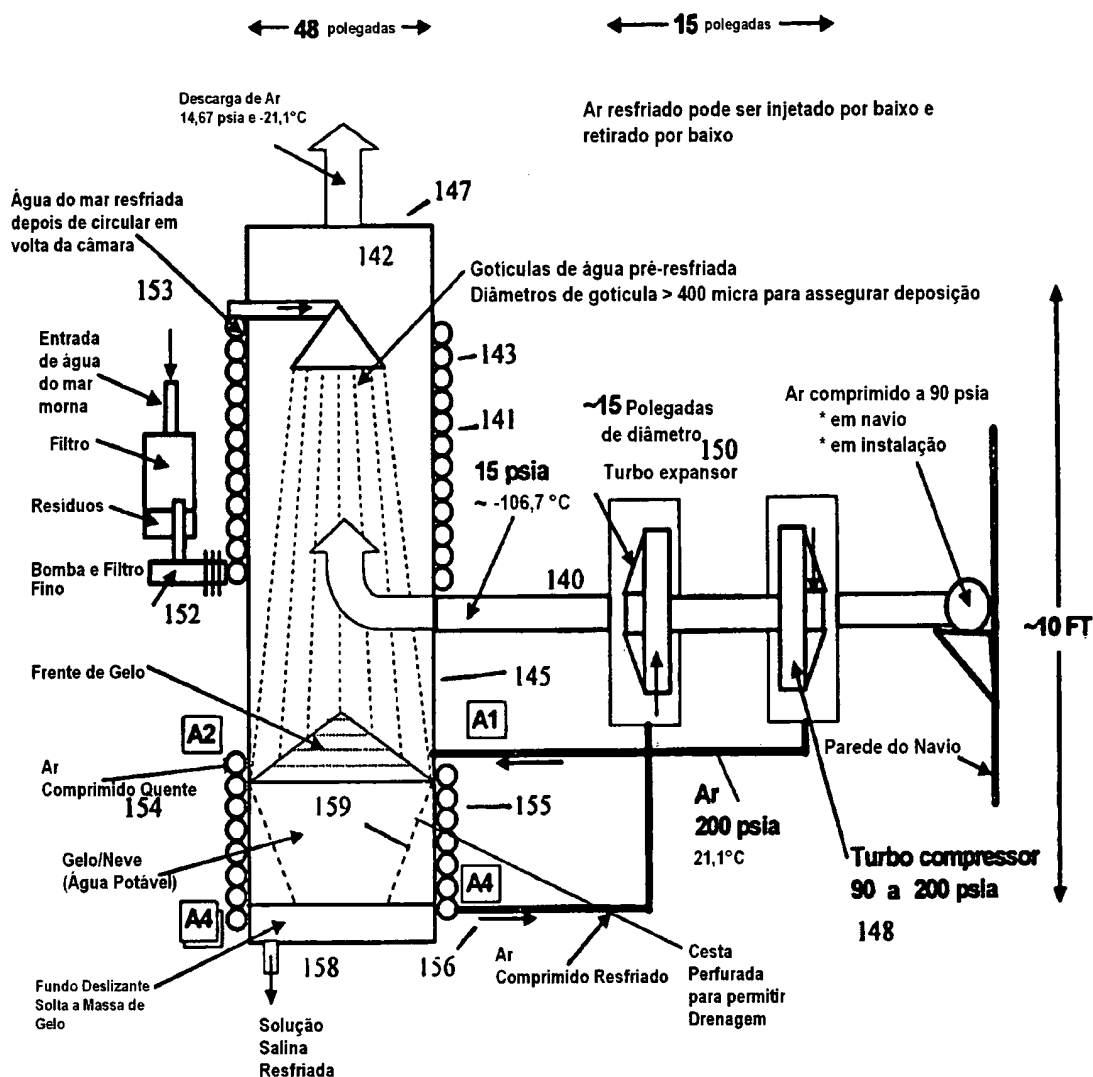
Primeira cesta perfurada com gelo/neve é removida para lavagem/descongelamento
Segunda cesta perfurada (vazia) introduzida na câmara para encher

Objetivo:

**Sistema em Batelada de Câmara Única
Compacto e Robusto**

FIGURA 16

DESSALINIZAÇÃO POR PROCESSAMENTO EM BATELADA
FLUXO DE AR RESFRIADO PARA CIMA EM CONTRA CORRENTE COM ÁGUA BORRIFADA PARA BAIXO



Cada 10 minutos:

Continuar Turbo expensor
Parar Momentaneamente Entrada
de Água do Mar
Drenar Solução Salina

MÉTODO #1

Soltar o Fundo (giro com dobradiça)
Soltar Massa de Gelo sobre Transportador
Trazer o Fundo de volta (giro com dobradiça)

MÉTODO #2

Primeira cesta perfurada com gelo/neve é removida para lavagem/descongelamento
Segunda cesta perfurada (vazia) introduzida na câmara para encher

Objetivo:

Sistema em Batelada de Câmara Única
Compacto e Robusto

FIGURA 17

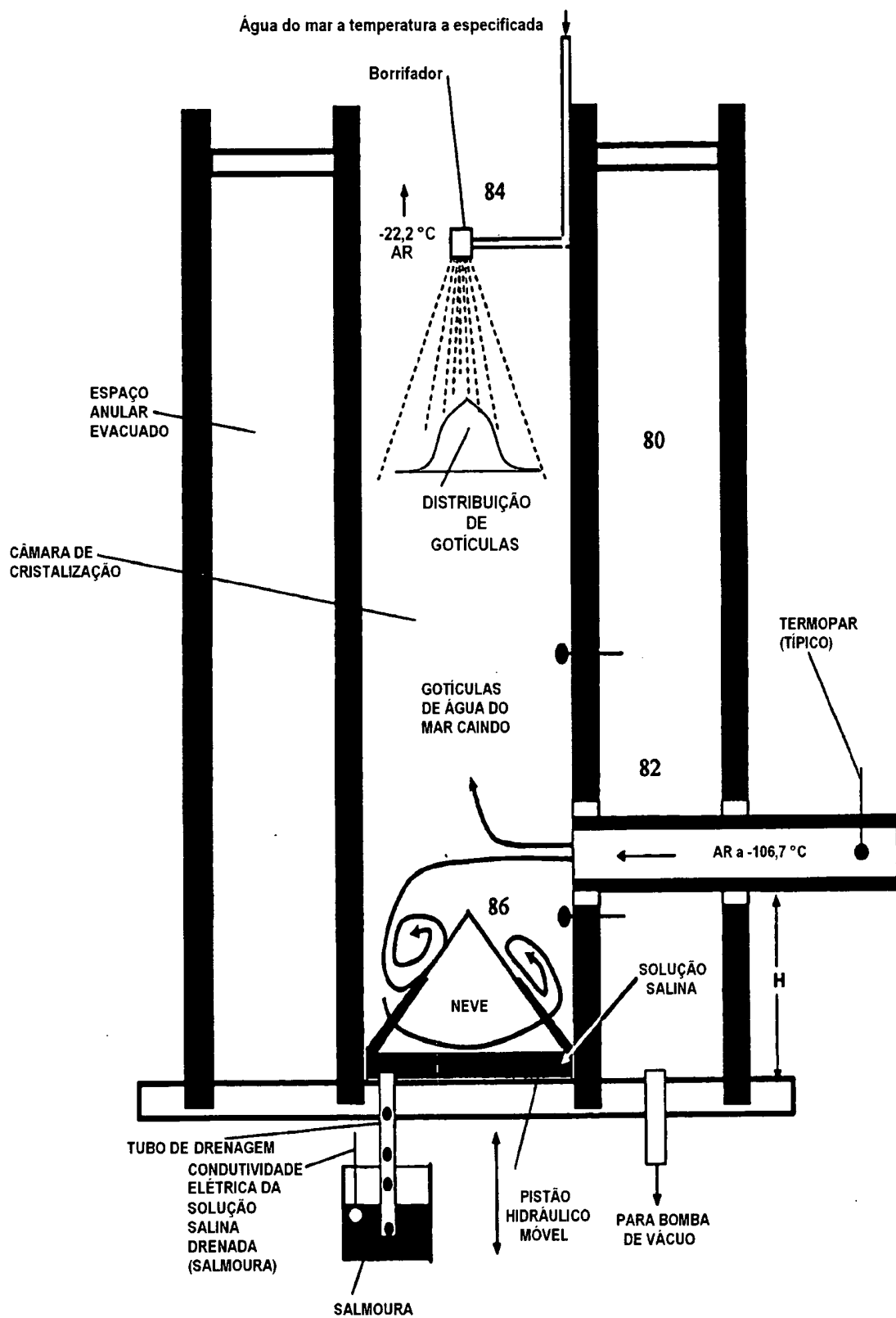


FIGURA 18

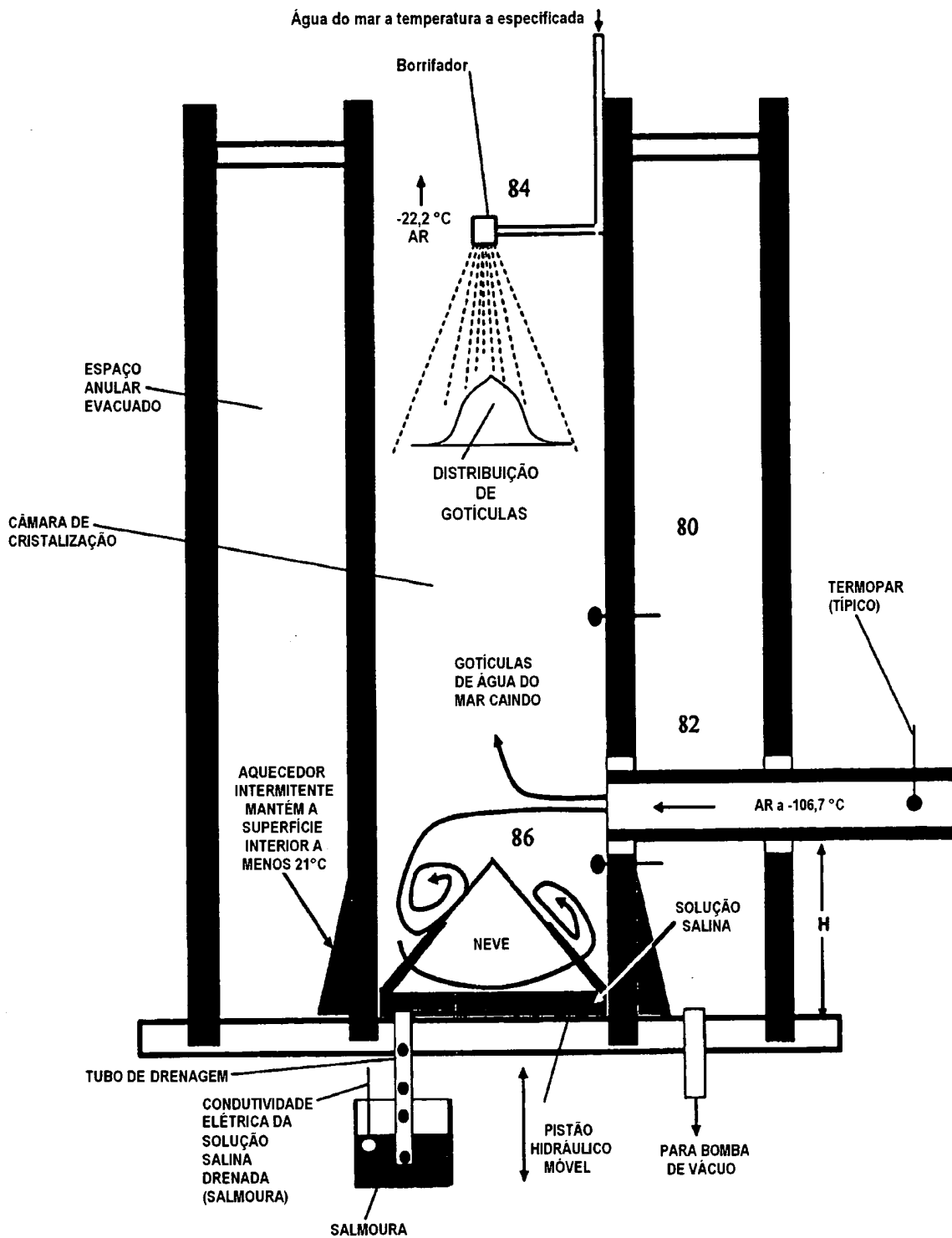


FIGURA 19

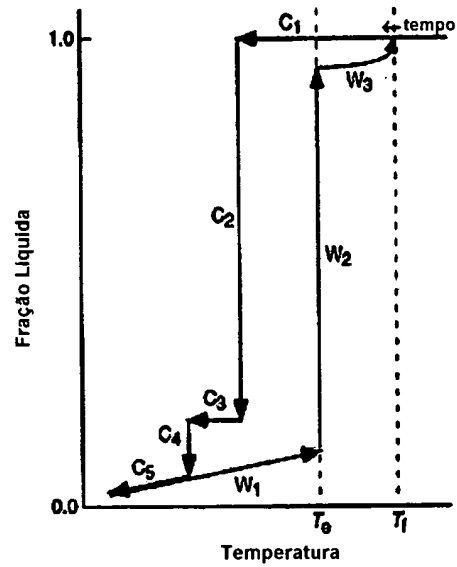


FIGURA 20

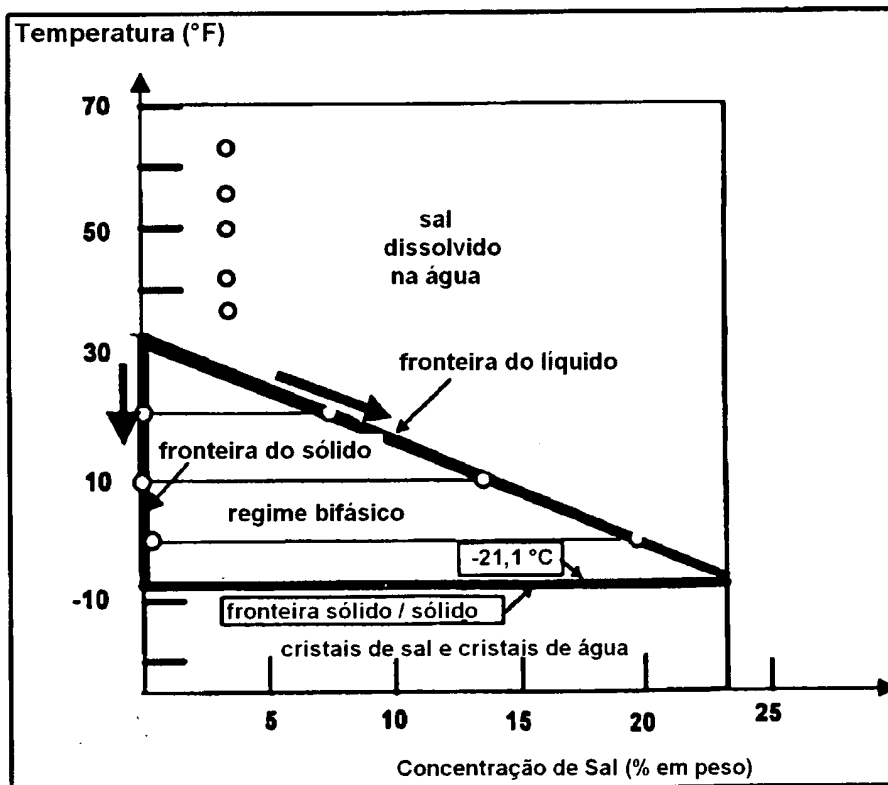


FIGURA 21

Número de Biot

4000	4000	1000	1000	microns raio	R
0,01312	0,01312	0,00328	0,00328	ft	R
0,25	0,25	0,25	0,25	BTU/(h ft °F)	k
5	1	5	1	BTU/h ft² °F)	h
0,2625	0,0525	0,0656	0,0131		Bi
3,81	19,05	15,24	76,2		1/Bi

Número de Fourier

alfa*t/R2

0,75	0,75	0,75	0,75	ft²/h	alfa
0,2	0,2	0,2	0,2	s	tempo
0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	h	tempo
0,000172223	0,000172223	1,07639E-05	1,07639E-05	ft²	raio quadrado
0,24	0,24	3,87	3,87		Fo

$\frac{(T_c - T_i)}{(T_s - T_i)}$	0,9	0,95	0,4	0,8		
Ts	40	40	40	40	°F	através da esfera inicialmente
Ti	-121	-121	-121	-121	°F	temperatura do ar sustentada
Tc	23,9	31,95	-56,6	7,8	°F	centro da esfera

FIGURA 22

Número de Biot

hR/k

4000	4000	1000	1000	microns raio	R
0,01312	0,01312	0,00328	0,00328	ft	R
0,25	0,25	0,25	0,25	BTU/(h ft °F)	k
5	1	5	1	BTU/h ft² °F)	h
0,2626	0,0525	0,0656	0,0131		Bi
3,81	19,05	15,24	76,2		1/Bi

Número de Fourier

alfa*t/R2

0,75	0,75	0,75	0,75	ft²/h	alfa
2	2	2	2	s	tempo
0,00056	0,00056	0,00056	0,00056	h	tempo
0,000172	0,000172	1,08E-05	1,08E-05	ft²	raio quadrado
2,42	2,42	38,71	38,71		Fo

$\frac{(T_c - T_i)}{(T_s - T_i)}$	0,18	0,8	0,001	0,27		
Ts	40	40	40	40	°F	através da esfera inicialmente
Ti	-121	-121	-121	-121	°F	temperatura do ar sustentada
Tc	-92,02	7,8	-120,839	-77,53	°F	centro da esfera

FIGURA 23

água	Temp °F	Densidade #/ft ³
líquido	70	62,3053
líquido	32	62,41418
gelo	32	57,24098
gelo	-6	57,43825

FIGURA 24

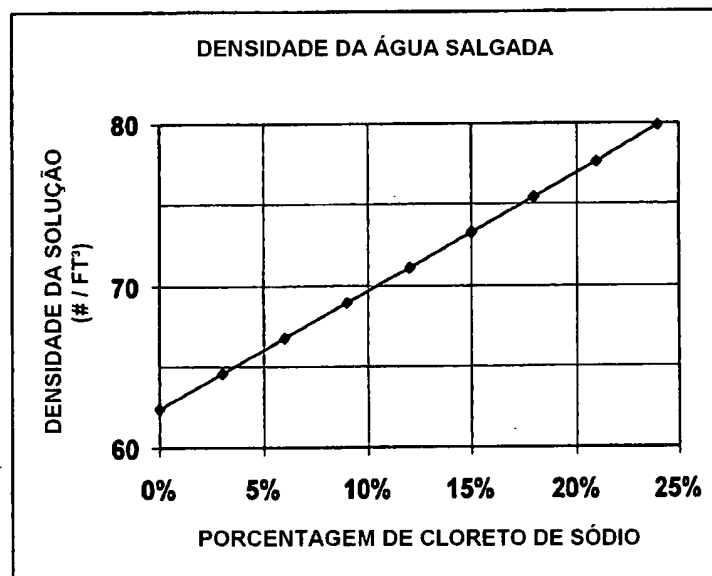


FIGURA 25

PRIMEIRA ETAPA: FORMAÇÃO DE GOTÍCULAS EM AR RESFRIADO

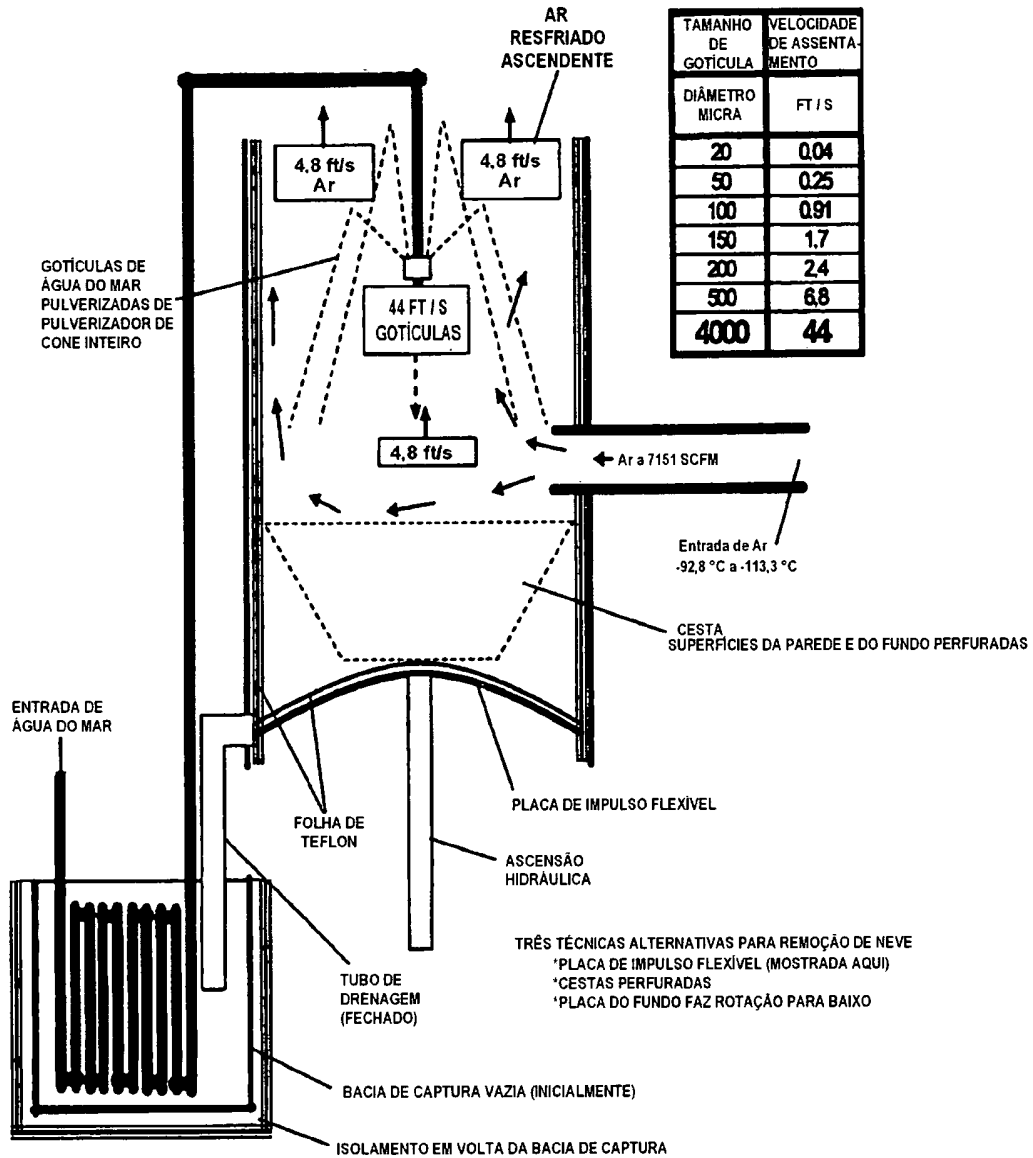


FIGURA 26

SEGUNDA ETAPA: FORMAÇÃO DA MASSA DE NEVE E DRENAGEM DA SALMOURA LÍQUIDA

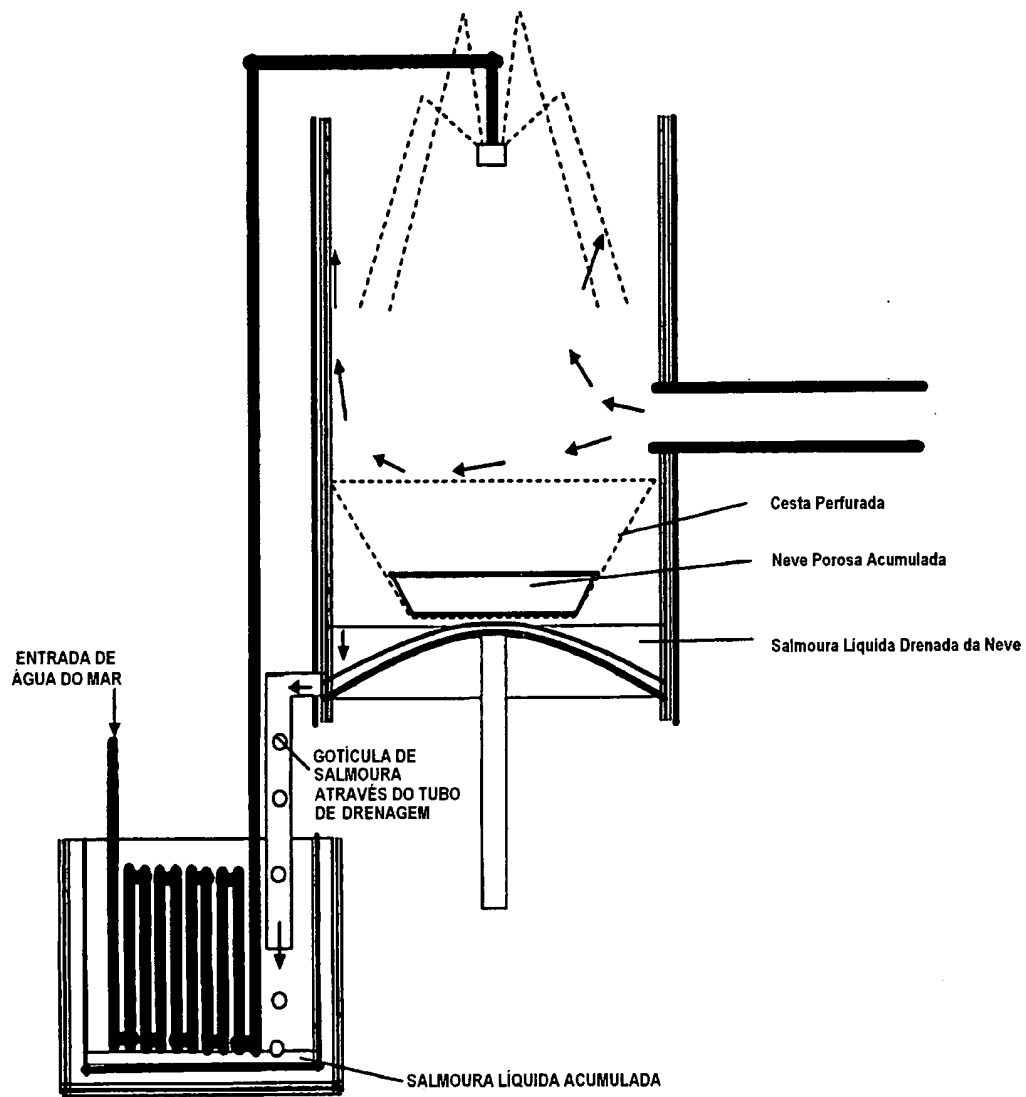


FIGURA 27

TERCEIRA ETAPA: FLOTAÇÃO DA MASSA DE NEVE SOBRE A SALMOURA E DEPOSIÇÃO DE SAL

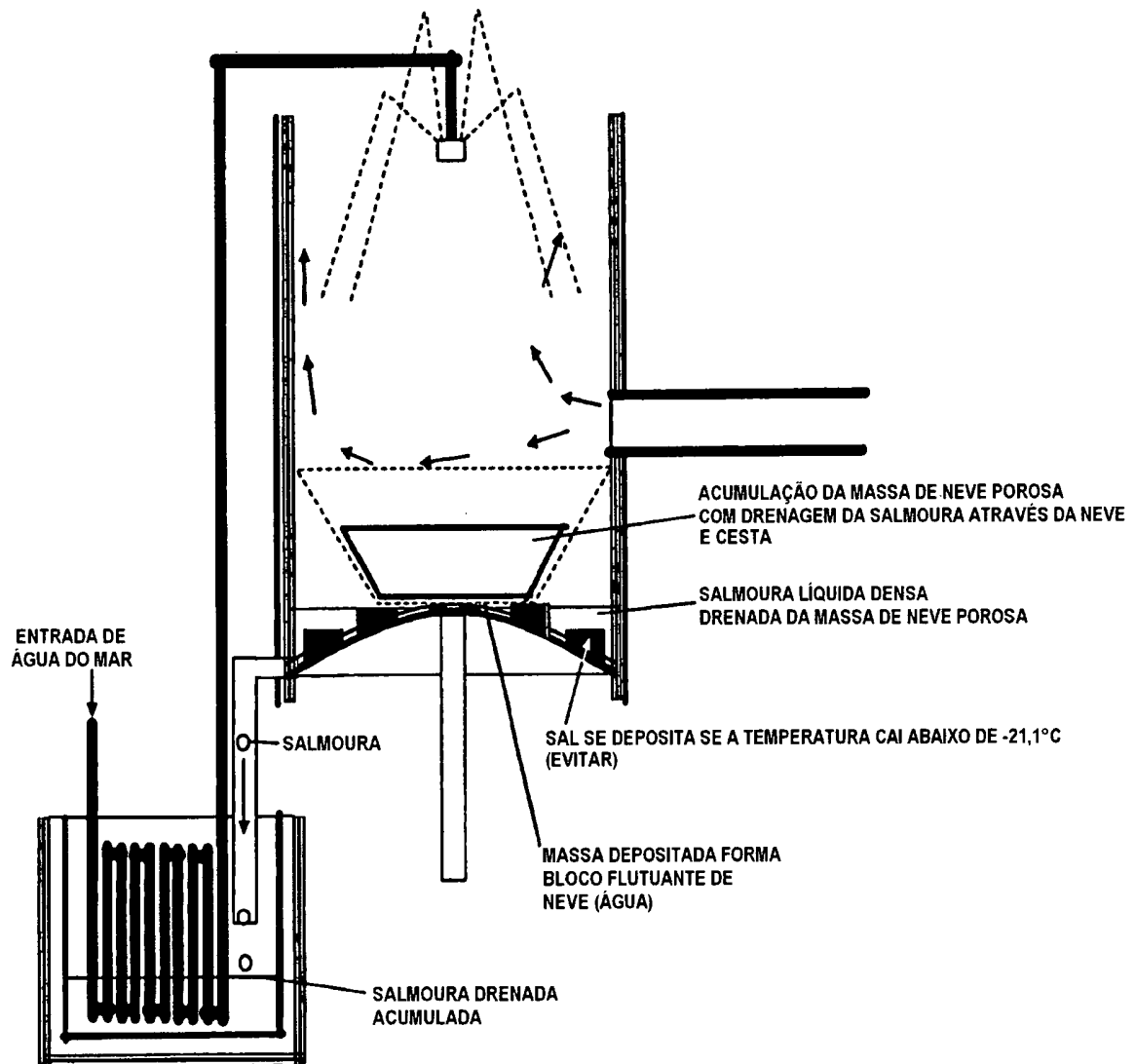


FIGURA 28

QUARTA ETAPA: CESTA PARA APANHADOR DE CESTA PARA REMOÇÃO DA NEVE E LAVAGEM

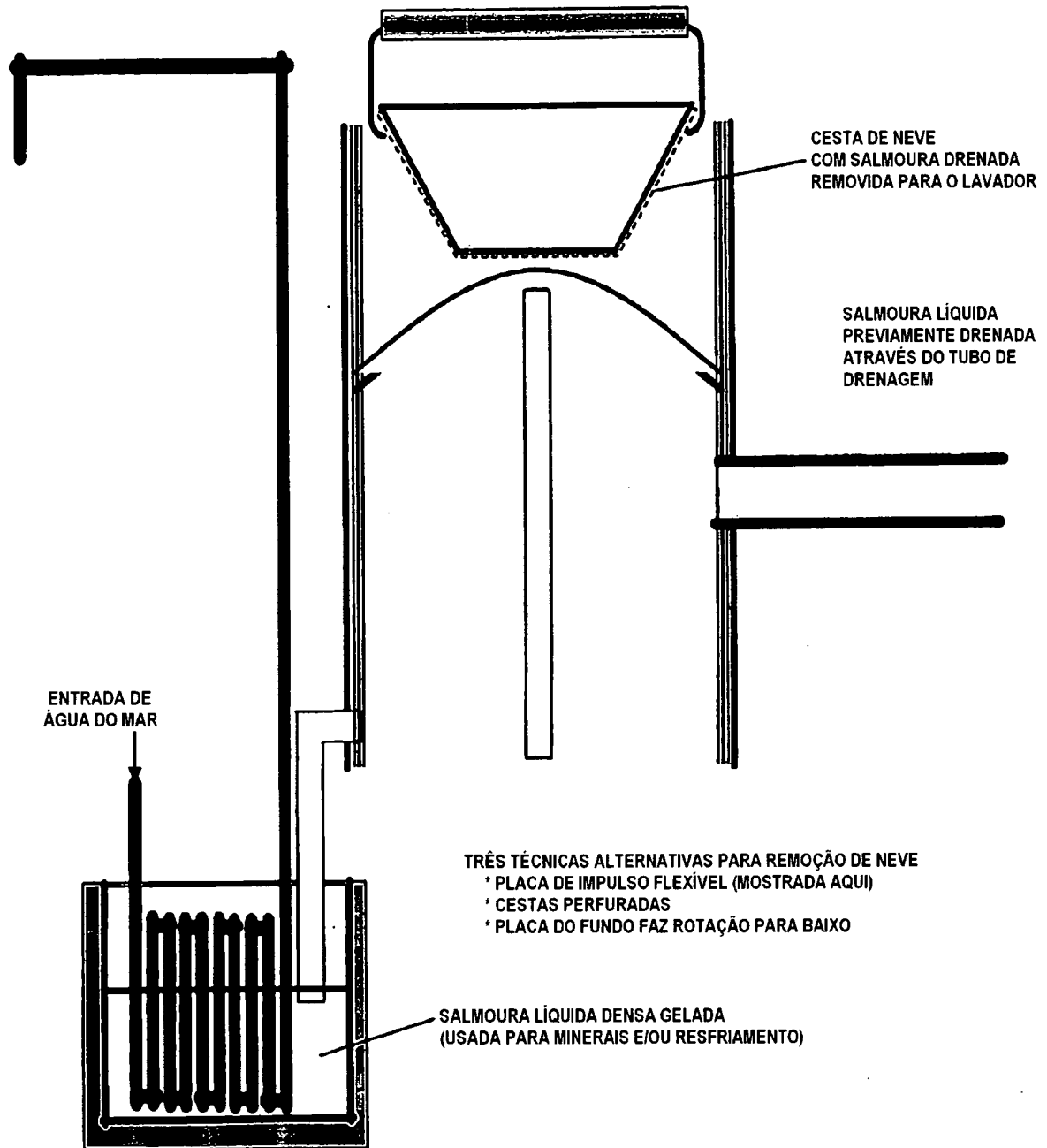


FIGURA 29

QUINTA ETAPA: RECUPERAÇÃO DA SALMOURA RESFRIADA PARA O TROCADOR DE CALOR

- * COM ENTRADA DE ÁGUA DO MAR
- * RESFRIAMENTO À JUSANTE
- * RECUPERAÇÃO DE MINERAIS A PARTIR DA ÁGUA DO MAR

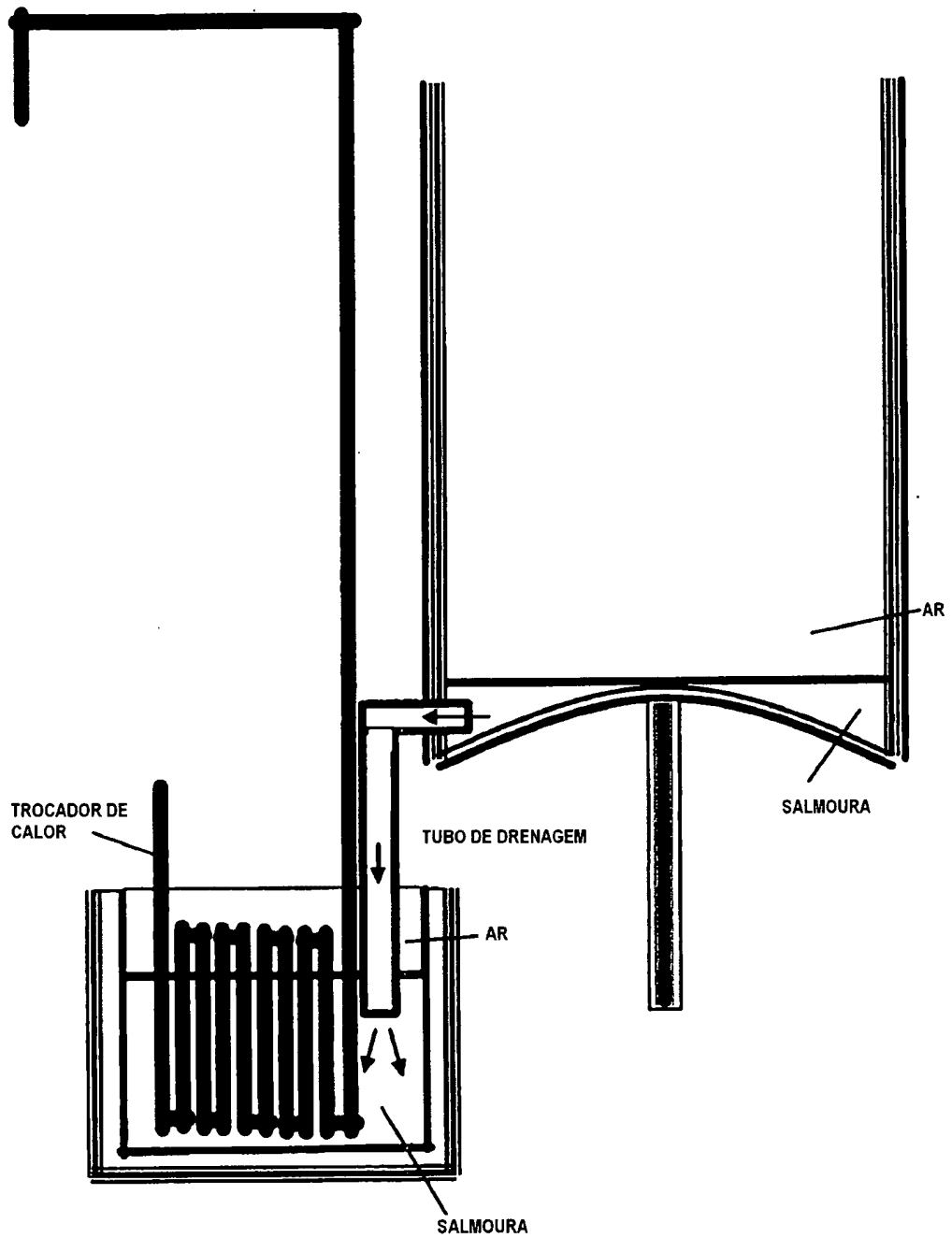


FIGURA 30

QUINTA ETAPA: RECUPERAÇÃO DA SALMOURA RESFRIADA PARA O TROCADOR DE CALOR

- * COM ENTRADA DE ÁGUA DO MAR
- * RESFRIAMENTO À JUSANTE
- * RECUPERAÇÃO DE MINERAIS A PARTIR DA ÁGUA DO MAR

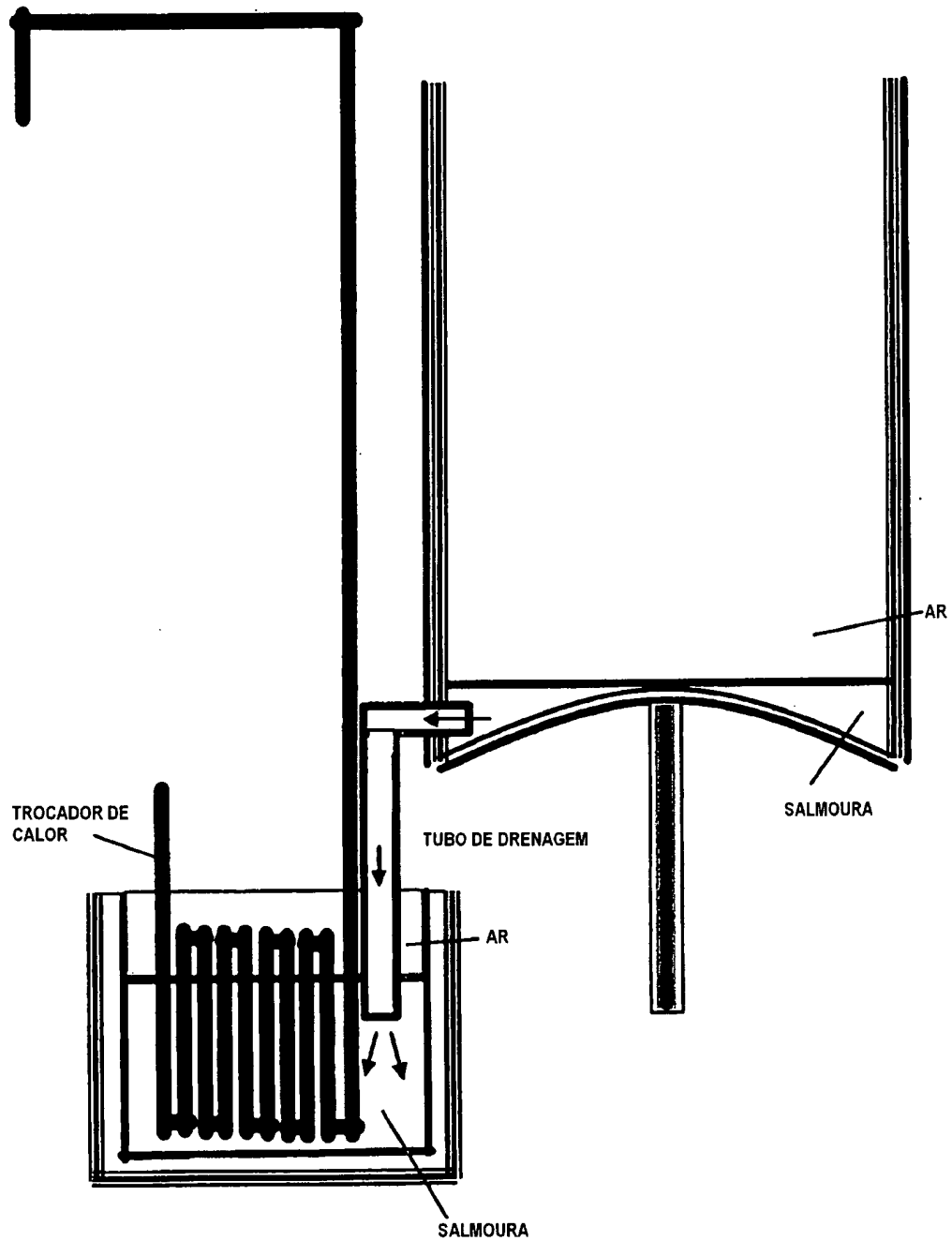


FIGURA 31

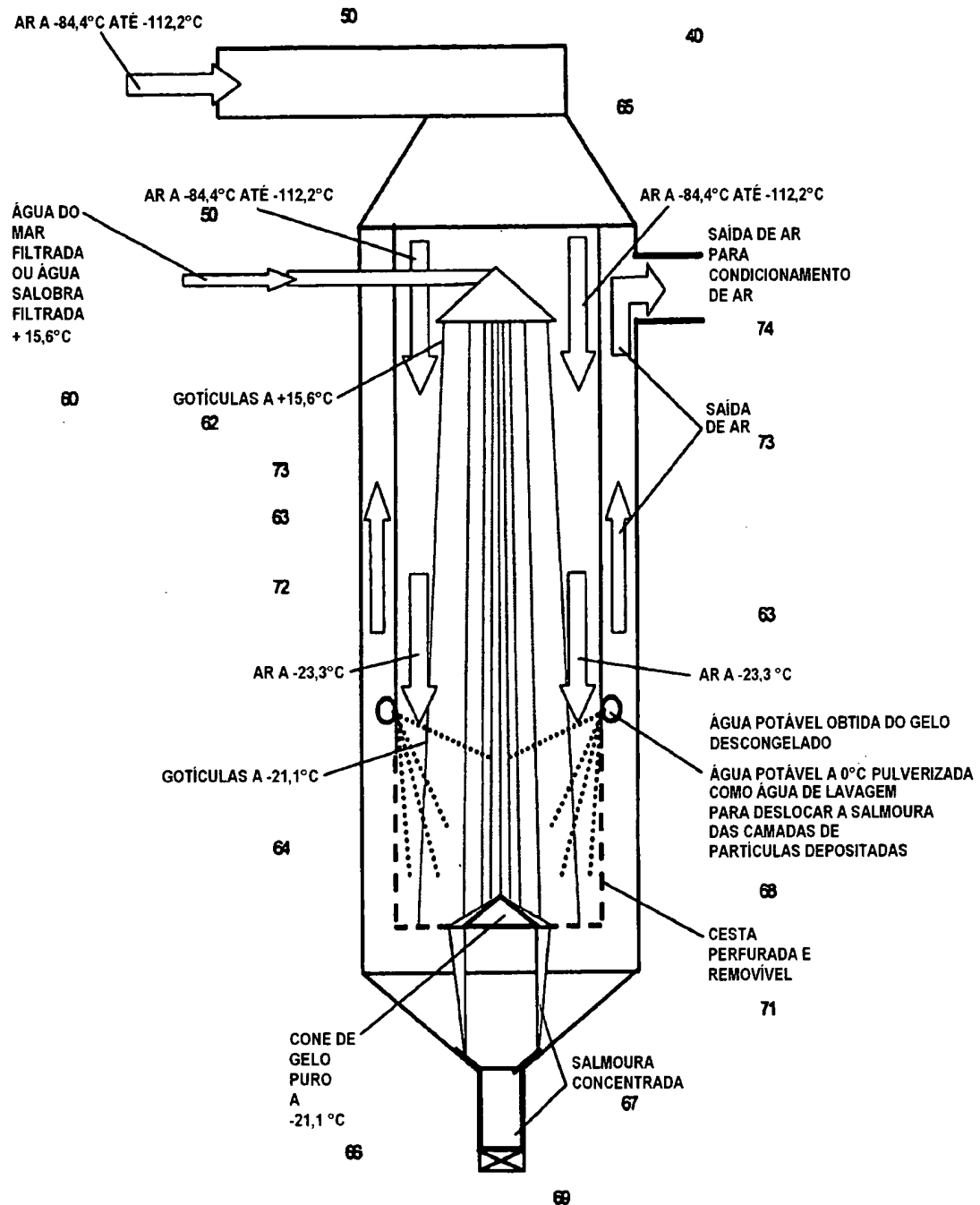


FIGURA 32

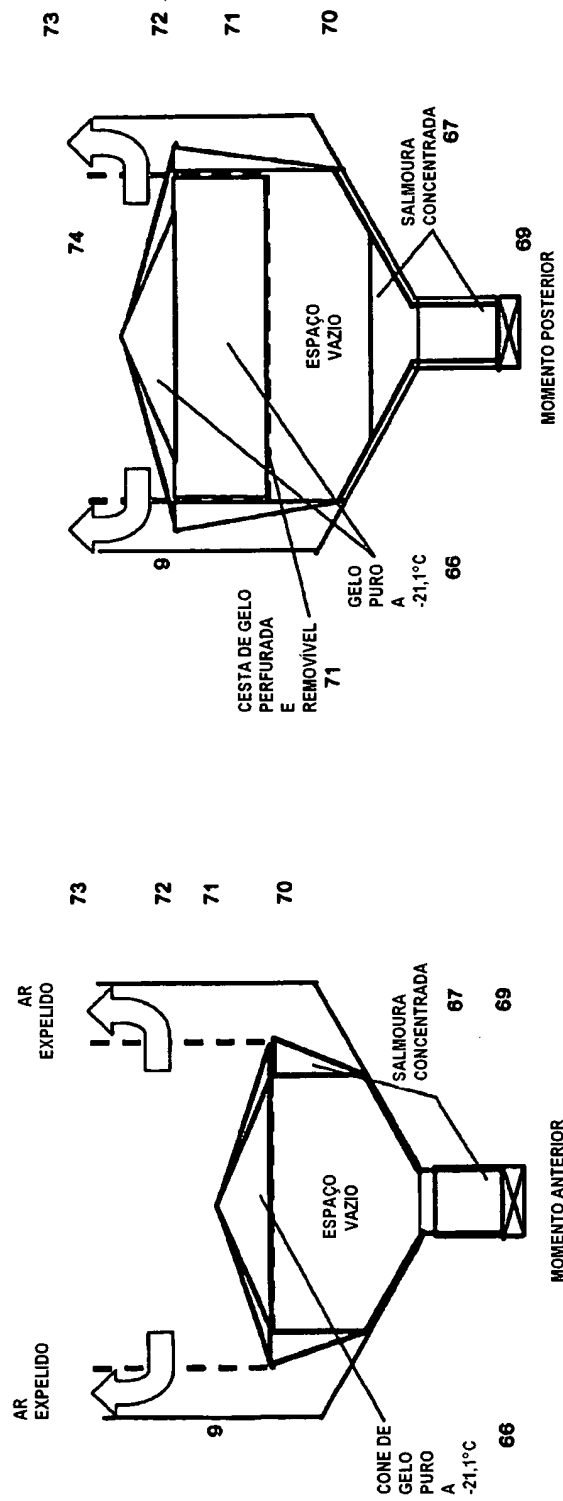


FIGURA 33

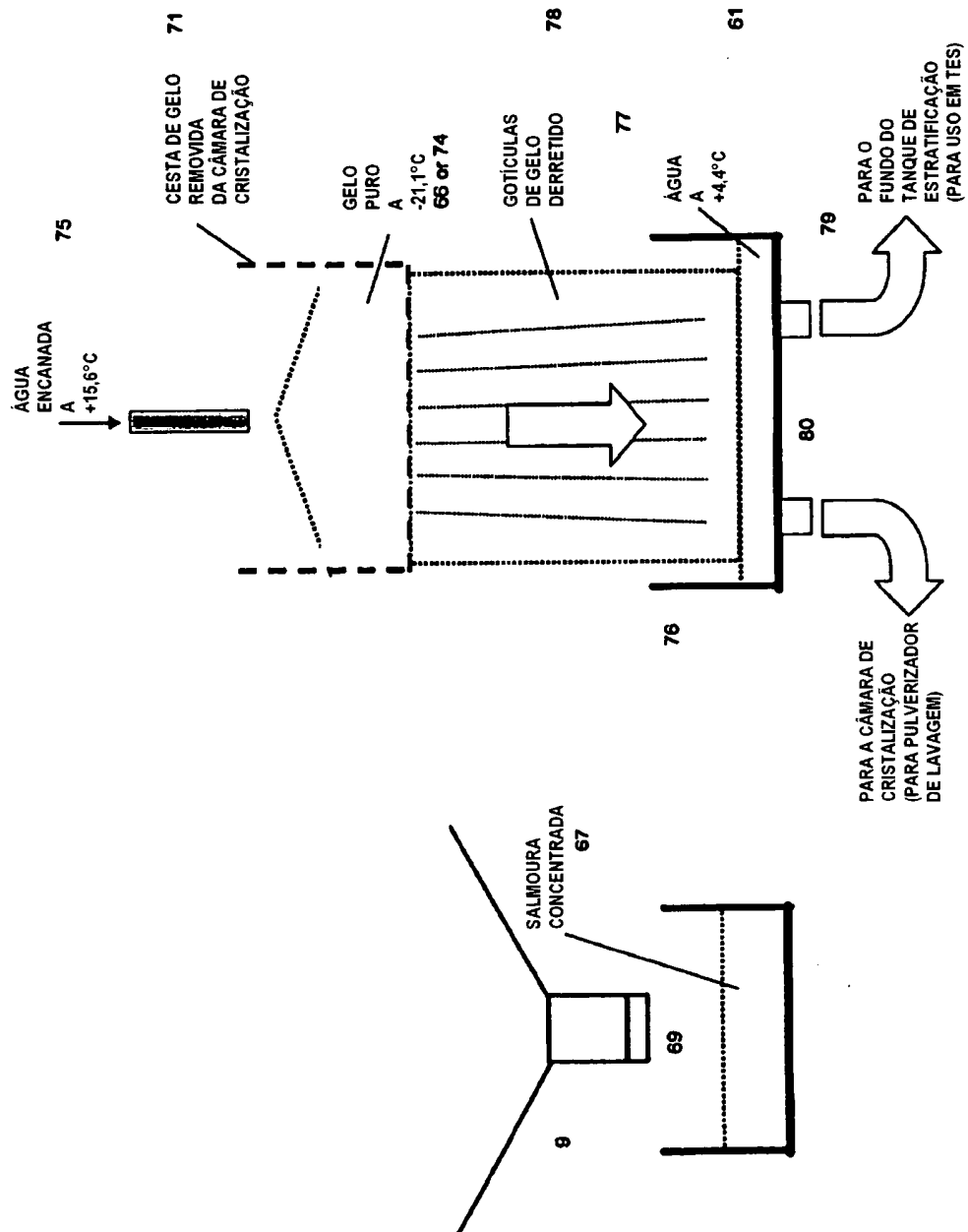


FIGURA 34

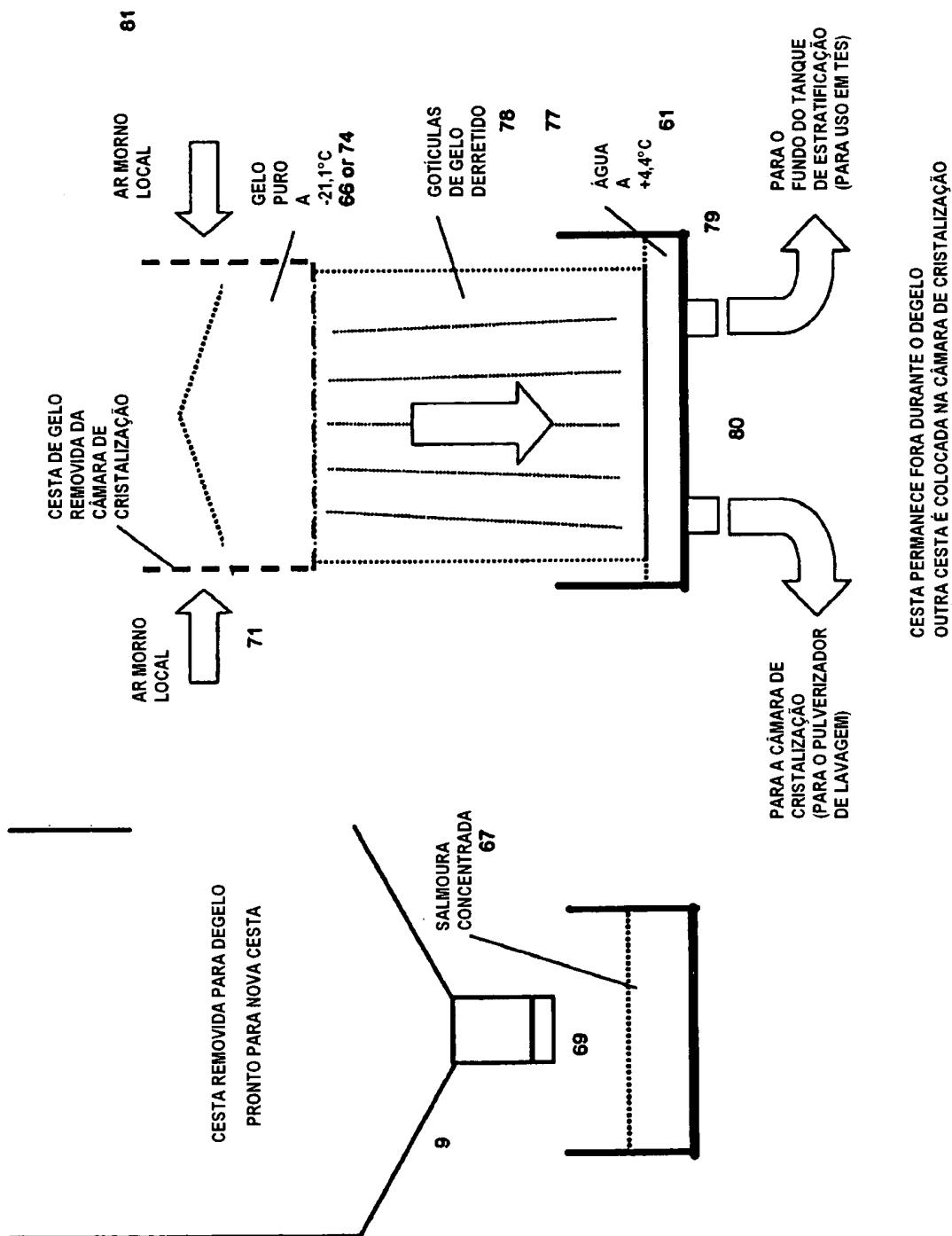


FIGURA 35

Número de Biot = $h R / k$

4000	4000	200	200	microns raio	R
0,01312	0,01312	0,00066	0,00066	ft	R
0,25	0,25	0,25	0,25	BTU/(h ft °F)	k
50	1	50	1	BTU/h ft² °F)	h
2,6247	0,0525	0,1312	0,0026		Bi
0,381	19,05	7,62	381		1/Bi

Número de Fourier = $\text{difusividade} \cdot \text{tempo} / \text{raio ao quadrado}$ $\text{alfa} \cdot t / R^2$

0,75	0,75	0,75	0,75	ft²/h	alfa
0,2	0,2	0,2	0,2	s	tempo
0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	h	tempo
0,000172	0,000172	4,31E-07	4,31E-07	ft²	raio quadrado
0,24	0,24	96,77	96,77		Fo

$$\frac{(T_c - T_i)}{(T_s - T_i)}$$

Ts

Ti

Tc

0,4	0,804951	0,001	0,999973	
40	40	40	40	°F
-121	-121	-121	-121	°F
-56,3	8,597184	-120,8	39,99563	°F

através da esfera
inicialmente
temperatura do ar
sustentada
centro da esfera

RESUMO**SISTEMA E MÉTODO PARA DESSALINIZAR ÁGUA DO MAR**

A invenção se refere a um método e um sistema de
5 dessalinização que utiliza tecnologia de cristalização no
gelo que incorpora o uso de energia de ar comprimido como
fonte de temperaturas de congelamento. Quando o ar
comprimido é lançado por um turbo-expansor, o ar resfriado
é produzido como um sub-produto, aonde o ar resfriado é
10 introduzido em uma câmara de cristalização. Uma nuvem de
'spray' de gotas de água do mar também é injetada dentro da
câmara, que foi pré-resfriada pela troca de calor com as
paredes frias da câmara, e que então é circulada e exposta
ao ar resfriado dentro da câmara. Os tamanhos das gotas
15 podem variar, mas são preferencialmente predeterminados,
juntamente com as temperaturas relativas, fluxos e
velocidades do 'spray' e do ar resfriado, de forma que
quando as gotas são circuladas por dentro do ar resfriado,
e assentadas no fundo da câmara, elas são depositadas à uma
20 temperatura levemente acima da temperatura eutética. Deste
modo, a massa de gelo/neve que se forma no fundo da câmara
vai consistir de cristais de gelo, e um resíduo de salmoura
da água salgada, que pode ser escoada da massa, seja pelos
lados, ou por meio de qualquer vazio ou canais que podem se
25 formar por dentro da massa.