

SISTEMA Y MÉTODO ENFRIADOR NOCTURNO DE DESECANTE LÍQUIDO

REFERENCIA CRUZADA A SOLICITUDES RELACIONADAS

[0001] Esta solicitud reivindica prioridad de la Solicitud de Patente Provisional
5 de EE.UU. No. 62/712,355, presentada el 31 de julio de 2018, titulada “ENFRIADOR
NOCTURNO DE DESECANTE LIQUIDO PARA USO EN AGRICULTURA DE
AMBIENTE CONTROLADO”, y la Solicitud de Patente Provisional de EE.UU. No.
62/757,353, presentada el 8 de noviembre de 2018, titulada “ENFRIADOR
NOCTURNO DE DESECANTE LIQUIDO (LDNC)”, cuyas divulgaciones se
10 incorporan acá por referencia en su totalidad.

ANTECEDENTES

CAMPO TECNICO

[0002] Las modalidades de la materia objeto divulgada acá se relacionan
15 generalmente con un sistema enfriador y deshumidificador de aire nocturno de
deseccante líquido (LDNC), y más específicamente, con métodos y sistemas LDNC
para controlar, junto con un sistema de enfriamiento evaporativo, un ambiente de
un recinto.

DISCUSION DE LOS ANTECEDENTES

[0003] El enfriamiento evaporativo es utilizado a nivel mundial para enfriamiento
y deshumidificación de invernaderos en climas cálidos. De especial interés ya que
se relaciona con ahorro de agua fresca y de energía es el uso de recursos de agua
salada para enfriamiento evaporativo (ver, por ejemplo, Davies y Paton, 2004;
25 Kassem, 1994; Paton y Davies 1996; Sabeh 2007). Sin embargo, la efectividad del
enfriamiento evaporativo es limitada durante periodos de alta humedad, dado que
la temperatura mínima que se logra por el enfriamiento evaporativo tradicional es la
temperatura del aire de bombillo húmedo. Por lo tanto, el enfriamiento evaporativo

puede ser una técnica inefectiva cuando se enfría un recinto que opera en ambientes de altas temperaturas, como es el caso de ciertas regiones y/o durante ciertos momentos del año en países del Golfo.

[0004] Los desecantes líquidos han sido propuestos durante mucho tiempo como una tecnología contribuyente potencial para ofrecer enfriamiento y deshumidificación para climas calientes y húmedos. Para agricultura de ambiente controlado, los desecantes líquidos han sido propuestos en combinación con procesos de enfriamiento evaporativo para lograr temperaturas más frías (ver, por ejemplo, Al-Sulaiman y otros, 2007; Davies, 2005; El Hourani y otros, 2014; Lefers y otros, 2016; Lychnos y Davies, 2012). Los desecantes líquidos también pueden ser usados en combinación con otras formas de enfriamiento de aire, incluyendo, pero no limitado a, compresión de vapor mecánica y enfriadores de adsorción (ver, Lowenstein, 2008; Mahmud y otros, 2010; Mohammad y otros, 2013a; Mohammad y otros, 2013b).

[0005] Dado que se relaciona con la producción agrícola y de ambiente controlado, se ha sugerido que las temperaturas en la noche se deben mantener más frías que las temperaturas en el día. En general, los cultivadores de plantas consideran que la alta radiación solar durante el día permite que un cultivo, tal como tomates, tolere e incluso prospere a una alta temperatura, por ejemplo, en el rango de 27-30°C. En contraste, en la noche no hay radiación solar, y como tal, los cultivadores profesionales prefieren una temperatura nocturna más fría, con preferencias en el rango de 20-23°C. Las temperaturas exactas para el día y la noche variarán dependiendo del tipo de cultivo, variedad, temporada, y preferencias/objetivos del cultivador.

[0006] Las altas temperaturas nocturnas pueden llevar a un uso elevado de energía por las plantas, y así, al consumo excesivo de azúcar, reduciendo tanto el rendimiento del cultivo como la calidad. El impacto de la temperatura nocturna en el

rendimiento del cultivo y la calidad variará dependiendo del tipo de cultivo, la variedad, y la temporada.

[0007] Adicional a la temperatura, los cultivos están en mayor riesgo de enfermedad debido a altos niveles de humedad. Por lo tanto, se desea controlar no sólo la temperatura en el ambiente controlado, sino también el nivel de humedad. En este sentido, la Figura 1 ilustra los niveles de humedad preferidos para plantas cultivadas en ambientes controlados con relación a múltiples puntos de temperaturas, con la temperatura siendo más importante que la humedad. Nótese que la humedad relativa RH% se define como la relación de la cantidad de vapor de agua en el aire a una temperatura específica, a la cantidad máxima que el aire puede mantener a esa temperatura, expresado como un porcentaje, es decir, $RH\% = (\text{contenido de humedad absoluto})/(\text{contenido de humedad saturada}) \times 100\%$. El déficit de humedad (HD) se define como la cantidad de vapor de agua que se debe adicionar al aire con el fin de lograr una humedad de 100% a una temperatura específica, es decir, $HD = (\text{contenido de humedad saturada} - \text{contenido de humedad absoluta})$ medido en g/m^3 . La Figura 1 ilustra el déficit de humedad HD en diferentes temperaturas y humedad relativa. Los puntos de humedad preferidos corresponden a los niveles de déficit de humedad que corresponden a la evaporación normal.

[0008] Los sistemas enfriadores evaporativos existentes no son muy eficientes para mantener un régimen de temperatura y humedad durante el día y otro durante la noche para un ambiente cerrado dado que se ubica en climas calientes y húmedos. Por lo tanto, hay una necesidad por un sistema que utiliza las ventajas ofrecidas por un sistema enfriador evaporativo, pero que también mejora la eficiencia de dicho sistema para diferentes regímenes de humedad y temperatura.

RESUMEN

[0009] De acuerdo con una modalidad, hay un sistema de desecante líquido para controlar una temperatura al interior de un recinto. El sistema incluye un

sistema enfriador evaporativo configurado para enfriar una corriente de aire entrante (AA) que ingresa en el recinto durante el día; un sistema enfriador nocturno de desecante líquido (LDNC) configurado para enfriar y secar una corriente de aire interna AE del encierro mediante el uso de un desecante líquido durante la noche;
5 y un controlador configurado para encender el sistema LDNC durante la noche.

[0010] De acuerdo con otra modalidad, hay un método para enfriar y remover humedad de una corriente de aire AE al interior de un recinto. El método incluye un paso de tomar la corriente de aire AE del recinto, un paso de enfriar y secar la corriente de aire AE con un deshumidificador para obtener una corriente de aire fría y seca AF, un paso de devolver la corriente de aire fría y seca AF al recinto, y un
10 paso de enfriar un desecante líquido del deshumidificador con un sistema enfriador.

[0011] De acuerdo con otra modalidad, hay un método para enfriar y remover humedad de una corriente de aire AE dentro de un recinto. El método incluye un paso de recibir la corriente de aire AE del recinto, un paso de enfriar la corriente de
15 aire AE con un sistema enfriador para generar una corriente de aire fría AE', un paso de remover la humedad de la corriente de aire fría AE' con un desecante líquido de un deshumidificador de desecante líquido, para generar una corriente de aire fría y seca AF, y un paso de devolver la corriente de aire fría y seca AF al recinto.

20 **BREVE DESCRIPCION DE LAS FIGURAS**

[0012] Las figuras adjuntas, las cuales se incorporan y constituyen una parte de la descripción, ilustran una o más modalidades y, junto con la descripción, explican estas modalidades. En las figuras:

[0013] La Figura 1 ilustra un déficit de humedad para plantas para varias
25 temperaturas y humedades relativas;

[0014] La Figura 2 ilustra un recinto cuya atmósfera es controlada con un sistema enfriador evaporativo y un sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido;

[0015] La Figura 3 ilustra un sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido;

[0016] La Figura 4 es un diagrama de flujo de un método para operar el sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido;

5 **[0017]** La Figura 5 ilustra otro sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido;

[0018] La Figura 6 es un diagrama de flujo de un método para operar el otro sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido;

[0019] La Figura 7 ilustra un deshumidificador del sistema enfriador y
10 deshumidificador de desecante líquido;

[0020] La Figura 8 es un gráfico psicrométrico;

[0021] La Figura 9 ilustra una humedad relativa del aire al interior de recinto para el día y la noche, cuando se utiliza un sistema enfriador evaporativo tradicional;

[0022] La Figura 10 ilustra la temperatura del aire al interior del recinto para el
15 día y la noche cuando se utiliza el sistema enfriador evaporativo;

[0023] La Figura 11 ilustra la temperatura del aire al interior del recinto para el día y la noche cuando se utiliza el sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido;

[0024] La Figura 12 ilustra el consumo de energía de un sistema AC tradicional,
20 un sistema enfriador evaporativo tradicional, y un sistema enfriador evaporativo y el sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido;

[0025] La Figura 13 es un diagrama de flujo de un método para ejecutar el sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido; y

[0026] La Figura 14 es un diagrama de flujo de un método para ejecutar el otro
25 sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido.

DESCRIPCION DETALLADA

[0027] La siguiente descripción de las modalidades se refiere a las figuras adjuntas. Los mismos números de referencia en diferentes figuras identifican los mismos o similares elementos. La siguiente descripción detallada no limita la invención. Por el contrario, el alcance de la invención está definido por las reivindicaciones adjuntas. Las siguientes modalidades se discuten, para simplicidad, con relación a un invernadero que tiene un sistema enfriador evaporativo para uso durante el día y un sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido para uso durante la noche. Sin embargo, es posible utilizar otro sistema de enfriamiento en lugar del sistema enfriador evaporativo o ejecutar los dos sistemas en intervalos de tiempo diferentes, no sólo el día o la noche.

[0028] La referencia a lo largo de la descripción a “una modalidad” significa que una característica, estructura o rasgo particular descrito en conexión con una modalidad se incluye en por lo menos una modalidad de la materia objeto divulgada.

Así, la aparición de la frase “en una modalidad” en varios lugares a lo largo de la descripción no necesariamente se refiere a la misma modalidad. Además, las características, estructuras o rangos particulares pueden ser combinados en cualquier forma adecuada en una o más modalidades.

[0029] De acuerdo con una modalidad ilustrada en la Figura 2, un sistema de control de temperatura y humedad 200 incluye un sistema enfriador evaporativo 210 a ser usado para enfriamiento en el día y un sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido (LDNC) 220 para ser usado por la noche (nótese que el LDNC también puede ser usado en el día). Durante el día, una corriente de aire externo AA es retirada en una entrada 230-1 en el sistema enfriador evaporativo 210, en el cual se intercambia calor sensible (temperatura) por calor latente (humedad) a través de la evaporación de agua. Un flujo de aire a través del recinto es inducido con un sistema de actuación de aire 240 (por ejemplo, ventiladores) y/o corrientes de viento naturales. Por sostenibilidad, se prefiere que se utilice agua de mar o

salobre en el proceso de enfriamiento evaporativo donde esté disponible y sea accesible, para evitar la huella de energía y carbono de la desalinización. La corriente de aire enfriada AB luego es descargada (opcionalmente, a través de un sistema de tubería 250) en el invernadero 202. Las plantas 204 presentes en el invernadero interactúan con la corriente de aire AB, por ejemplo, al transferir la humedad a la corriente de aire mediante transpiración. La corriente de aire húmedo AC luego es forzada por el ventilador 240 a salir del invernadero en una salida AD.

[0030] En la noche, la corriente de aire AC no es descargada del invernadero 202, sino que, por el contrario, es reciclada dentro del invernadero 202. La corriente de aire reciclada AC es tomada en una entrada interna 230-3 y es enfriada y deshumidificada por el sistema enfriador nocturno de desecante líquido 220 para generar una corriente de aire fría y seco AF. Este proceso también es aplicable en sistemas agrícolas con luz artificial donde la luz natural es reducida o bloqueada completamente (tal como en una bodega, fábrica de plantas, o granja vertical). En estos sistemas, el reciclaje del aire interno es deseado y posible. La corriente de aire frío y seco AF luego es devuelta directamente al recinto 202 a través de un puerto 230-4, o es pasada a través del puerto 230-5 para ser enfriada con el sistema enfriador evaporativo 210, y luego es descargada en el recinto 202. El aire puede ser devuelto con o sin tubería 250.

[0031] Ahora se discute el sistema LDNC 220, en una primera implementación, con relación a la Figura 3. El sistema LDNC incluye un deshumidificador 300 que tiene un recipiente 302 que sostiene una cierta cantidad de desecante líquido 304. Una bomba P1 ubicada en el recipiente 302 (nótese que la bomba también se puede ubicar por fuera del recipiente 302) bombea el desecante líquido 304, a través de una válvula V1, a una almohadilla 306, formada de un material poroso. La almohadilla 306 tiene varios canales que promueven el movimiento de la corriente de aire entrante AE a través de éstos. Por ejemplo, la almohadilla puede incluir, pero no se limita a, membranas de fibra huecas, membranas de hoja plana, lechos de

medio empacado, almohadillas de celulosa, almohadillas de polipropileno, etc. Al mismo tiempo, el desecante líquido 304, el cual es liberado en la parte superior 306A de la almohadilla 306, fluye debido a la gravedad y/o la presión a través de la almohadilla, hasta alcanzar el recipiente 302. Nótese que la parte inferior 306B de la almohadilla 306 está ubicada en el recipiente 302 o está en comunicación fluida con éste de modo que la solución de desecante vuelve al recipiente de almacenamiento 302.

[0032] Como resultado del hecho que la corriente de aire AE es caliente y húmeda, que tiene una presión de vapor mayor a una presión de vapor del desecante líquido 304, la interacción entre la corriente de aire AE y el desecante líquido 304 dentro de la almohadilla 306 produce una corriente de aire más seca AF dado que la humedad y el calor son transferidos de la corriente de aire AE al desecante líquido. La corriente de aire AF es descargada directamente en el invernadero a través del puerto 230-4 como se muestra en la Figura 2, o puede ser suministrada a un sistema adicional, por ejemplo, el sistema enfriador evaporativo 210, a través de otro puerto 230-5, como también se muestra en la Figura 2. Nótese que un sistema de control 260, también mostrado en la Figura 2, es responsable de abrir o cerrar los puertos 230-4 y 230-5 como sea necesario. Por ejemplo, con base en varias lecturas a ser discutidas posteriormente, el controlador 260 puede cerrar el puerto 230-3 durante el día y abrir el puerto 230-1 de modo que la corriente de aire externo AA es enfriada por el sistema enfriador evaporativo 210 durante el día. Sin embargo, durante una noche con condiciones climáticas indeseables, el controlador se configura para cerrar el puerto 203-1 de modo que no se toma corriente de aire del exterior del recinto. La corriente de aire AC es recirculada a través del sistema LDNC 220, al abrir el puerto 230-3 y usando el puerto 230-4 o el puerto 230-5 para descargar la corriente de aire deshumidificada AE, bien sea directamente en el recinto 202 o en el sistema enfriador evaporativo 210. Durante la noche, el controlador 260 también cierra el puerto 230-2 de modo que no se

intercambia aire con el exterior del recinto. Se puede conectar más de un sistema adicional en serie con el sistema LDNC 220 para enfriar más la corriente de aire AF. El sistema adicional puede ser una unidad AC tradicional o un sistema enfriador evaporativo u otro tipo de sistema.

5 **[0033]** Cuando el desecante líquido 304 se debilita, es decir, su presión de vapor aumenta por encima de la presión de vapor de la corriente de aire entrante AE, y también la temperatura del desecante líquido aumenta, el sistema de control 260 puede iniciar la bomba P2 de un tanque de almacenamiento S, para traer desecante líquido fresco 305 dentro del recipiente 302, y también para remover algo del
10 desecante líquido débil 304 del recipiente 302. Para esta operación, el sistema de control 260 recibe líquido, densidad, conductividad, índice refractivo, temperatura, y/u otras lecturas que son convertidas en una resistencia de humedad relativa de equilibrio de las lecturas de desecante del sensor WS1 ubicado en el desecante líquido 304, y también las lecturas de humedad y temperatura del sensor AS1
15 ubicado en la entrada 308. Después de comparar las dos humedades medidas, si la presión de vapor en el desecante líquido es mayor a la presión de vapor en la corriente de aire entrante, el sistema de control cierra las válvulas V1 y V4, y abre las válvulas V2 y V3 para refrescar el desecante líquido en el recipiente 302. La válvula V5, si está presente, también se abre por el sistema de control 260 para
20 refrescar el desecante líquido.

[0034] La Figura 3 además muestra que un intercambiador de calor 320, el cual es parte de un sistema enfriador 330, está conectado fluidamente al tanque de almacenamiento S de modo que el desecante líquido 305 puede ser bombeado por la bomba P2, a través de las válvulas V5 y V4 al intercambiador de calor, y luego de
25 regreso al tanque de almacenamiento S. si esta acción se lleva a cabo, el desecante líquido 304 con presión de vapor alta, recibido por el tanque de almacenamiento S del recipiente 304, es enfriado en el intercambiador de calor 320 de modo que el desecante líquido devuelto al tanque de almacenamiento S está listo para ser usado

de nuevo en conjunto con la almohadilla 306. El intercambiador de calor 320 puede utilizar un fluido (por ejemplo, agua) de un enfriador líquido 331 para enfriar el desecante líquido 304. El enfriador líquido 331 puede ser energizado desde la red 332 o de fuentes de energía alternas, por ejemplo, paneles solares 334 instalados en o al lado del invernadero, viento, generadores diésel, etc.

[0035] El enfriador 331 puede ser un enfriador de velocidad variable conectado directamente a paneles solares fotovoltaicos 334 o un enfriado de velocidad única conectado a la red 332. Toda la tubería, tanques de almacenamiento, válvulas, bombas, y otros componentes pueden estar hechos de materiales resistentes a la corrosión (por ejemplo, plástico). El tanque de almacenamiento S puede incluir más de un tanque y más de una bomba. El deshumidificador 300 puede incluir más de una unidad y puede incluir más de una bomba y puede construirse en cualquier configuración. Los sensores de aire AS1 y AS2 pueden incluir, pero no se limitan a, temperatura, humedad relativa, y sensores de CO₂. El número de sensores de aire puede variar. Los sensores de líquido WS1 y WS2 pueden incluir, pero no se limitan a, temperatura, nivel de líquido, conductividad, índice, refractivo, y sensores de densidad. El número de sensores de líquido variará. El tamaño y tipo de componentes también puede variar dependiendo de la temperatura y la humedad del ambiente, y también del tamaño del recinto que necesita ser controlado.

[0036] En operación, el sistema LDNC 220 ejecuta los pasos discutidos ahora con relación al diagrama de flujo mostrado en la Figura 4. Al comienzo de la noche (o cualquier periodo de enfriamiento/deshumidificación adicional requerido en un sistema agrícola iluminado artificialmente), el desecante líquido 304 fuerte y frío (baja presión de vapor) es bombeado en el paso 400, por medio de la bomba P1, a través de la válvula V1 (V2 está cerrada) para humectar la almohadilla de medio poroso 306 (u otro intercambiador de calor y masa) de modo que la corriente de aire caliente y húmedo AE (puede ser reciclada del invernadero) pasa en el paso 402 a través de la almohadilla de medio poroso 306, para obtener la corriente de aire seco

y frío AF. La corriente de aire seco y frío AF ingresa en el paso 404 en el invernadero directamente o va a través de pasos de enfriamiento adicionales y luego ingresa en el invernadero.

[0037] A medida que el tiempo pasa, el desecante líquido 304 se debilita (mayor presión de vapor) a medida que la temperatura del desecante líquido se eleva como agua (humedad) absorbida en el desecante líquido de la corriente de aire AE. Cuando y si se alcance un punto donde se necesita enfriamiento o deshumidificación adicional más allá de lo que puede suministrar el desecante líquido 304, como es determinado por el sistema de control 260 en el paso 406 mediante el uso del sensor de líquido WS1 y los sensores de aire AS1 y AS2, se puede adicionar desecante líquido adicional frío y fuerte en el paso 408 al sistema con la bomba P2, desde el tanque de almacenamiento S por medio de la válvula V3, con V4 cerrada, y/o se puede bombear desecante tibio y débil fuera del deshumidificador 300 al tanque de almacenamiento S, por medio de la bomba P1, con la válvula V1 cerrada y la válvula V2 abierta.

[0038] Después de una cierta cantidad de tiempo, el desecante líquido 304 en el recipiente 302 puede alcanzar una presión de vapor mayor a la corriente de aire entrante AE. Esto se debe a los cambios diurnos normales y las variaciones naturales en temperatura y niveles de humedad relativa en el ambiente, donde las temperaturas diurnas tienen a ser mayores con menor humedad relativa y las temperaturas nocturnas tienen a ser menores con mayor humedad relativa aunque el clima también variará con base en patrones climáticos tales como frentes de frío, etc. En este momento, el desecante líquido 304 en el recipiente 302 cambia naturalmente a un modo de evaporación dado que la presión de vapor del desecante líquido 304 está por encima de la corriente de aire AE. Así, en el paso 410 el desecante líquido libera el vapor de agua que fue capturado para enfriar el aire, aumentando la resistencia (reduciendo la presión de vapor) del desecante líquido. Cuando se ha logrado una densidad y/o presión vapor definidas del desecante

líquido, como es determinado en el paso 412 por el sistema de control 260, con base en las lecturas del sensor WS1, el desecante líquido 304 se basa en ciclo en el paso 414, al bombearlo con la bomba P1 a través de la válvula V2 (V1 está cerrada) al tanque de almacenamiento S.

5 **[0039]** El desecante líquido 305 en el tanque de almacenamiento térmico S se enfría por el sistema enfriador 330 en el paso 416. La bomba P2 mueve en este paso el desecante líquido 305 del tanque de almacenamiento S al intercambiador de calor 320 del sistema enfriador 330 por medio de la válvula V4, mientras que la válvula V3 está apagada. Dado que las tuberías 340 hacia/desde el intercambiador de calor 320 (el intercambiador de calor puede ser, por ejemplo, el evaporador tipo placa del sistema de enfriamiento mecánico) están cerradas, el desecante líquido frío 305 es reciclado naturalmente de regreso al tanque de almacenamiento S, desde el intercambiador de calor 320, en cualquier momento que la bomba P2 esté ejecutando con V4 abierta y V3 cerrada.

15 **[0040]** Cuando se desee, el desecante líquido frío es bombeado con la bomba P2 con V3 abierta y V4 cerrada hacia el recipiente 302 y el proceso se devuelve al paso 400. La cantidad total de desecante líquido bombeado desde el tanque de almacenamiento S dependerá del enfriamiento total de aire requerido por el invernadero, determinado por los sensores AS1, la resistencia del desecante líquido determinado por el sensor WS2, y la capacidad del recipiente 302 determinada por WS1 y la entrada inicial del usuario.

25 **[0041]** El sistema LDNC 220 puede ser implementado en una configuración diferente a la mostrada en la Figura 2. Esta nueva configuración ahora se discutirá con relación a la Figura 5. En esta configuración, el sistema LDNC 220 primero pre enfría la corriente de aire entrante AE con un sistema enfriador de aire 510, y luego deshumidifica la corriente de aire resultante AE' con el deshumidificador de desecante líquido 530, para obtener la corriente de aire más frío y más seca AF. Para esta modalidad, también es posible que la corriente de aire AE sea

deshumidificada primero con el deshumidificador 530 y luego sea enfriada con el sistema enfriador 510, es decir, el orden del enfriamiento y la deshumidificación se puede intercambiar. La corriente de aire AE es la corriente de aire interna mostrada en la Figura 2. Sin embargo, en una modalidad modificada, el aire externo AA puede ser suministrado al sistema LDNC 220. En una aplicación, es posible que la corriente de aire AE sea una combinación de aire interno AC y aire externo AA.

[0042] El sistema enfriador de aire 510 mostrado en la Figura 5 incluye un intercambiador de calor 512 y un enfriador 514. Un fluido (por ejemplo, aire) es intercambiado entre el intercambiador de calor 512 y el enfriador 514 para enfriar la corriente de aire entrante AE. El enfriador 514 se conecta a una fuente de poder 516, la cual puede ser la red o una fuente autónoma, por ejemplo, un módulo solar. La corriente de aire entrante AE es recibida en una entrada 518, la cual dirige el aire al intercambiador de calor 512. Un sensor AS1 se ubica en la entrada y se configura para medir una presión de vapor de la corriente de aire entrante AE. Las lecturas del sensor AS1 son enviadas, en una forma cableada o inalámbrica, al controlador 260. Después que la corriente de aire AE se ha enfriado, la corriente de aire resultante AE' avanza a través de un conducto 520 hacia el deshumidificador 530. El deshumidificador 530 incluye un recipiente 532 que almacena el desecante líquido 534. Una almohadilla 536 (similar a la almohadilla 306) es provista con un extremo en el desecante líquido 534 y con el otro extremo que se extiende lejos del recipiente 532. Una bomba P1 bombea el desecante líquido 534 a la parte superior de la almohadilla 536 y el desecante líquido vuelve al recipiente 532 a través de la almohadilla, mientras que también interactúa con la corriente de aire AE'. Durante esta interacción, el desecante líquido remueve el vapor de agua de la corriente de aire AE', lo cual resulta en una corriente de aire frío y seco AF. La corriente de aire AF se devuelve a través de la salida 540 al invernadero 202 o a otro sistema de enfriamiento. Un sensor AS3 se ubica en la salida 540 para medir la presión de vapor y un sensor WS1 se ubica en el recipiente 532 para medir la presión de vapor

del desecante líquido. Todos los sensores y la bomba se configuran para intercambiar información con el controlador 260.

[0043] La Figura 6 ilustra un diagrama de flujo de un método para operar el LDNC 220 como es implementado en la modalidad de la Figura 5. Durante periodos de alta humedad, cuando se requiere enfriamiento, como es determinado en el paso 600 por el controlador 260 con base en las lecturas del sensor AS1, si la presión de vapor del desecante está por debajo de la del aire, como es determinado en el paso 602 por el controlador 260 con base en las lecturas de los sensores AS1, AS2 y WS1, el enfriador de aire se inicia en el paso 604 para enfriar la corriente de aire entrante AE. Si la corriente de aire entrante requiere de remoción de humedad, como es determinado en el paso 606 por el controlador 260 con base en las lecturas de los sensores de aire AS2 y AS3, y el desecante líquido 534 es lo suficientemente fuerte como es determinado por el controlador 260 con base en las lecturas del sensor de líquido WS1, la bomba del deshumidificador P1 se enciende en el paso 608. La corriente de aire AE puede requerir enfriamiento, deshumidificación, o una combinación de ambos.

[0044] Durante periodos de baja humedad, cuando también se requiere enfriamiento como es determinado en el paso 610 por el controlador 260 con base en las lecturas del sensor AS1, si la presión de vapor del desecante está por encima de la del aire, como también es determinado por el controlador 260 con base en las lecturas de los sensores AS1 y WS1, entonces el sistema enfriador 510 se apaga en el paso 612 y la bomba P1 se enciende en el paso 614 para utilizar el deshumidificador basado en desecante líquido 350 como un sistema enfriador evaporativo. Estos pasos recargan el desecante líquido para uso posterior en el deshumidificador.

[0045] Durante periodos cuando no se requiere el uso del desecante líquido como un enfriador evaporativo o como un deshumidificador, como es determinado

por el controlador 260 en el paso 616, con base en las lecturas de los sensores AS1, AS2, AS3, y WS1, entonces la bomba P1 se apaga en el paso 618.

[0046] Como en la modalidad anterior, las tuberías, bombas, y otros componentes pueden estar hechos de material resistente a la corrosión (por ejemplo, plástico). El deshumidificador 530 puede incluir más unidades, y puede incluir más de una bomba y se puede construir en cualquier configuración. El enfriador puede ser de cualquier tipo. Un sistema enfriador de ejemplo que se empareja bien con el sistema 220 es un enfriador tipo “caja de hielo”. En este sistema, la energía solar puede ser capturada por medio de paneles solares fotovoltaicos ubicados en el invernadero, y la energía generada es dirigida a un enfriador de caja de hielo con compresor de velocidad variable para almacenamiento térmico. La caja de hielo de almacenamiento térmico luego puede ser usada en cualquier momento para enfriamiento del aire. Otro sistema enfriador que se acopla bien con el sistema 220 es un acondicionador de aire con compresor de velocidad variable, el cual permite el enfriamiento sensible adaptado del aire antes de la deshumidificación con base en las entradas del usuario. El enfriador puede incluir más de una unidad y se puede construir en cualquier configuración.

[0047] Los sensores de aire pueden incluir, pero no se limitan a, temperatura, humedad relativa, y sensores de CO₂. El número de sensores de aire puede variar. Los sensores de líquido pueden incluir, pero no se limitan a, temperatura, nivel de líquido, conductividad, índice refractivo, y sensores de densidad. El número de sensores puede variar. Se prefiere que el sistema 220 esté emparejado con un enfriador evaporativo para enfriamiento eficiente en energía durante periodos de baja humedad, pero esto no es un requerimiento. Para agricultura en invernadero, el enfriamiento en la noche se puede lograr con el sistema descrito acá. para agricultura iluminada artificialmente, el enfriamiento durante periodos de oscuridad (sin luces) se puede lograr con el sistema descrito acá.

[0048] Las diferencias entre el sistema enfriador nocturno de desecante líquido 220 y el enfriador evaporativo convencional de “almohadilla y ventilador” incluyen, pero no se limitan a, el área de almacenamiento de líquido (es decir, el recipiente). Como se ilustra en la Figura 7, un deshumidificador 700, el cual puede ser el deshumidificador 300 o el deshumidificador 530, incluye un recipiente 702 el cual está diseñado para acomodar un gran volumen de líquido desecante, normalmente, pero no limitado a, 300-500 litros por metro lineal de longitud de almohadilla. Este tanque de almacenamiento 702 también está diseñado para estar aislado térmicamente del ambiente, al tener paredes aisladas 704 y fondo 706, y una parte superior térmica flotante 710, la cual flota en la parte superior del desecante líquido, para reducir a un mínimo el calor intercambiado entre el desecante líquido 712 y el ambiente 714. La Figura 7 también muestra que la bomba P1 bombea el desecante líquido 712 a través de una tubería 716 hacia la parte superior de la almohadilla 720. La tubería 716 se ubica dentro de la almohadilla 720. Sin embargo, la tubería también se puede ubicar por fuera de la almohadilla, como se muestra en las Figuras 3 y 5.

[0049] El volumen del recipiente 702 se selecciona para mantener una cantidad de desecante líquido necesario para deshumidificación nocturna en un clima seco y caliente. Por ejemplo, para Jeddah, Arabia Saudí, la cantidad de desecante líquido necesario durante las horas de la noche depende de la opción de configuración, es decir, (i) enfriamiento de líquido desecante como en la modalidad de la Figura 3 o (ii) enfriamiento de aire con deshumidificación de desecante únicamente, como en la modalidad de la Figura 5. Cuando se usa una solución desecante de $MgCl_2$, la opción (ii) requeriría volúmenes de almacenamiento de desecante en el orden de aproximadamente 1-2 litros por m^3 de volumen de aire de ambiente controlado. Para la opción (ii), el volumen de almacenamiento de desecante puede ser tan pequeño como 0.1 litros de desecante líquido por m^3 de volumen de aire de ambiente controlado. Sin embargo, para esta opción, será necesario un sistema enfriador con

un tamaño cuatro veces mayor debido a una carga pico alta (incluyendo, pero no limitado a, durante la primera hora de enfriamiento de aire nocturno). Aunque la opción (i) requiere más volumen total de almacenamiento, el líquido desecante puede actuar como una “batería” de almacenamiento de refrigeración, permitiendo el enfriamiento del líquido por un periodo más largo de tiempo y, por lo tanto, una carga pico menor y un tamaño del enfriador total menor.

[0050] Para la opción (i), para utilizar el desecante líquido para enfriamiento y deshumidificación de aire, el desecante líquido necesita ser enfriado lo suficiente para absorber los kJ de energía que van a ser transferidos a éste de la corriente de aire de ambiente controlado caliente y húmedo AC. En un caso modelado, se estima que esto es aproximadamente 70 kJ/m³ de volumen de ambiente controlado. Enfriar el desecante líquido con el sistema enfriador 330 aumenta su potencial de deshumidificación (reduciendo la presión de vapor) y también le permite actuar como un disipador de calor (bajo kJ/kg de desecante líquido). Cuando se toma humedad del aire, el calor latente de condensación es “liberado” como kJ de calor sensible (aumento de temperatura). Este calor de condensación necesita ser disipado al aire o al desecante líquido. Al enfriar el desecante líquido antes de la deshumidificación (removiendo kJ), el desecante líquido puede actuar como un disipador de calor para tomar esos kJ extra mientras que aún se enfría el aire (o, por lo menos, sin calentar el aire).

[0051] Para la opción (ii), el desecante líquido no necesita ser enfriado, dado que los kJ son removidos de la corriente de aire AC por el enfriador de aire 510. El enfriador de aire 510 es capaz de enfriar el aire al punto de rocío, donde la humedad es removida a medida que el agua líquida se condensa del aire. Sin embargo, en un sistema de solo enfriador (sin desecante), el enfriador de aire debe enfriar demasiado el aire para alcanzar su punto de rocío y remover el exceso de humedad. Por ejemplo, si la temperatura del aire objetivo y la humedad relativa (dentro del invernadero) es 22°C y 70% de humedad relativa, respectivamente, entonces el aire

necesita primero ser enfriado a su temperatura de punto de rocío de 16.3°C y luego, el aire necesita ser recalentado para moverse de 16.3°C a 100% de humedad relativa a 22°C y 70% de humedad relativa (adicionando ~6 kJ/kg de aire), como se muestra por la línea 800 en el gráfico psicrométrico en la Figura 8. Nótese que el eje X en la Figura 8 muestra la temperatura y el eje Y indica la humedad. En la opción propuesta (ii), el aire sólo necesita ser enfriado por el enfriador de aire a 18.3°C a 100% de humedad relativa (la temperatura de bombillo húmedo). Luego, el desecante líquido puede ser usado para intercambiar naturalmente la humedad por temperatura, como se muestra por la línea 802 en la Figura 8. El enfriamiento de aire combinado con un desecante líquido para deshumidificación en este caso ahora aproximadamente 15% en términos de energía eléctrica para enfriamiento por medio del enfriador de aire más la energía adicional para recalentar. Adicionalmente, el vapor de agua capturado en el desecante líquido puede ser reutilizado para enfriamiento de aire evaporativo durante el día, cuando el desecante líquido es regenerado, ahorrando agua y energía adicional.

[0052] Independiente de si el desecante líquido es utilizado para enfriar por medio de la opción (i) o (ii), la humedad que es absorbida en el desecante líquido como agua líquida necesita ser removida con el fin de mantener el potencial de deshumidificación del desecante líquido a su nivel deseado. La presión de vapor del desecante líquido a menudo es comunicada como su humedad relativa de equilibrio (ERH) a la misma temperatura con el aire. En las presentes modalidades, el sistema enfriador/deshumidificador nocturno de desecante líquido 220 es usado (1) durante el día como un enfriador evaporativo/regenerador de desecante para traer la ERH del desecante líquido de regreso a los niveles deseados para deshumidificación nocturna y (2) para suministrar enfriamiento adicional para el ambiente controlado. La ERH deseada del desecante líquido variará, pero para el caso modelado en Thuwal, Arabia Saudí, la ERH deseada es aproximadamente 65% al comienzo del ciclo de deshumidificación y enfriamiento nocturno. Por lo tanto, la humedad

ambiente necesita caer a un valor igual o menor a 65% durante las horas del día para permitir la regeneración de desecante a medida que el agua líquida es evaporada del desecante líquido.

[0053] En este sentido, la Figura 9 muestra cómo la humedad relativa ambiental generalmente varía con base en el ciclo diurno, con humedad nocturna generalmente mayor 902 y humedad diurna menor 904. La Figura 9 ilustra la humedad relativa del aire ambiente contra el tiempo, donde el tiempo corresponde a un par de días en Agosto. También se ilustra un objetivo 900. Se puede ver que los niveles de humedad caen por debajo del objetivo ERH deseado 900 en ciertos momentos del día durante todos los días de la semana de ejemplo, permitiendo que el desecante líquido sea regenerado y suministrando enfriamiento evaporativo adicional para el ambiente controlado.

[0054] La Figura 10 muestra la temperatura interna que se puede lograr con un sistema de enfriamiento evaporativo tradicional durante el mes caliente y húmedo de Agosto, usando datos reales obtenidos de un enfriador evaporativo de agua de mar instalado en un invernadero en Thuwal, Arabia Saudí, del 1 al 3 de agosto de 2016. Como se puede ver de la figura, el sistema enfriador evaporativo es capaz de cumplir con los objetivos de temperatura durante las horas del día (puntos redondos relacionadas con la línea objetivo 1000), pero no es capaz de cumplir con los objetivos durante las horas de la noche (diamantes relacionados con la línea objetivo 1010) debido a la alta humedad ambiente (a pesar de las cargas de energía reducidas en la noche si se usa enfriamiento evaporativo en lugar de enfriamiento por AC/mecánico).

[0055] Sin embargo, cuando el mismo recinto bajo las mismas condiciones es enfriado con el sistema 220 discutido anteriormente, debido a que el sistema LDNC 220 combina desecantes líquidos con otras formas de enfriamiento, se pueden cumplir los objetivos de temperatura diarios (puntos) y nocturnos (triángulos) (ver la temperatura de aire objetivo para el día 1100 y la noche 1110 en la Figura 11) para

la cultivación de cultivos en ambientes controlados con mínimo consumo de energía de la red extra. La Figura 11 ilustra un ejemplo de temperaturas teóricas de modelos desarrollados que se pueden lograr al combinar un sistema de enfriamiento nocturno de desecante líquido con un enfriador evaporativo de agua salada diurno usando datos de entrada del experimento del 1 al 2 de agosto de 2016 ilustrado en la Figura 10.

[0056] La Figura 12 muestra el consumo diario estimado de energía eléctrica para tres tipos de sistemas de enfriamiento para un invernadero de vidrio de 2000 m² en Thuwal, Arabia Saudí para el periodo de tiempo del 1 de agosto de 2016. El primer sistema es un sistema de compresión de vapor mecánico tradicional usado todo el día (aire acondicionado = AC). Las temperaturas alcanzadas son las mostradas para enfriamiento evaporativo diurno con desecante líquido nocturno en la Figura 11. El segundo sistema es un sistema enfriador evaporativo tradicional usado todo el día y asumiendo sin desalinización de agua de entrada (las temperaturas logradas se muestran en la Figura 10). El tercer sistema es un enfriador evaporativo para uso en el día (ECD) combinado con un enfriador nocturno de desecante líquido (LDNC 220) y las temperaturas logradas se muestran en la Figura 11.

[0057] El sistema ECD+LDNC que usa la configuración de la opción (i) con PV solar conectado al sistema enfriador ahorra significativo consumo de energía eléctrica de la red cuando se compara con el AC tradicional (AC ~4x más), y únicamente consume ligeramente más energía eléctrica de la red que un enfriador evaporativo operando todo el día (~1.2x más) mientras cumple los deseos del cultivador de plantas por enfriamiento adicional en la noche, como se ilustra en la Figura 12. En términos del costo de operación mensual estimado, los OPEX eléctricos esperados son: AC=\$3860; EC independiente=\$770; y ECD + LDNC=\$930 (asumiendo una tarifa de electricidad de \$0.08/kWh). Asumiendo un precio de puerta de granja de \$5/kg de vegetales producidos, el invernadero

necesitaría producir 3.6 kg/m²/año más con el AC que con el EC para justificar el OPEX adicionado, mientras que el invernadero necesita únicamente producir 0.2 kg/m²/año más con el ECD + LDNC para justificar el OPEX adicionado. Por lo tanto, el ECD + LDNC mantiene la gran promesa de enfriar eficientemente el invernadero de modo que la producción y la ganancia se pueden aumentar por encima de lo que se lograría con enfriamiento evaporativo convencional solo en climas calientes y húmedos.

[0058] Se espera que el sistema ECD + LDNC cumpla los puntos de ajuste deseados del granjero para temperatura y humedad para agricultura de ambiente controlado en climas calientes y húmedos con una huella de energía significativamente menor de lo que se podría lograr con enfriamiento AC tradicional. Como tal, el sistema LDNC divulgado acá mantiene el gran potencial para aumentar la cantidad y la calidad del producto con una menor huella de energía y costo, y, por lo tanto, también aumentará el ingreso y la sustentabilidad de la agricultura de ambiente controlado para cultivadores en estos climas.

[0059] Ahora se discute un método para implementar la opción (i) con relación a la Figura 13. El método incluye un paso 1300 de tomar la corriente de aire AE del recinto, un paso 1302 de enfriar y secar la corriente de aire AE con un deshumidificador 300 para obtener una corriente de aire frío y seco AF, un paso 1304 de devolver la corriente de aire fría y seca AF al recinto, y un paso 1306 de enfriar un desecante líquido del deshumidificador 300 con un sistema enfriador. El método además puede incluir un paso de cerrar, por la noche, los puertos que permite que el aire externo entre al recinto y que el aire interior escape del recinto, y/o un paso de procesar la corriente de aire fría y seca AF con un sistema enfriador evaporativo antes de devolverla al recinto. Un controlador 260 (por ejemplo, un procesador) decide cuando cerrar o abrir los puertos, e iniciar o detener el deshumidificar y el sistema enfriador evaporativo, con base en las lecturas de vapor de presión de la corriente de aire AE, y el desecante líquido.

[0060] Ahora se discute un método para implementar la opción (ii) con relación a la Figura 14. El método incluye un paso 1400 de recibir la corriente de aire AE del recinto, un paso 1402 de enfriar la corriente de aire AE con un sistema enfriador 510 para generar una corriente de aire frío AE', un paso 1404 de remover la humedad de la corriente de aire fría AE' con un desecante líquido de un deshumidificador de desecante líquido 530, para generar una corriente de aire fría y seca AF, y un paso 1406 de devolver la corriente de aire fría y seca AF al recinto.

[0061] El método además puede incluir un paso de cerrar, por la noche, los puertos que permiten que el aire externo ingrese al recinto y que el aire interno se escape del recinto, y/o un paso de procesar la corriente de aire fría y seca AF con un sistema enfriador evaporativo antes de devolverla al recinto. El controlador 260 decide cuando cerrar o abrir los puertos, e iniciar y detener el deshumidificador de desecante líquido y el sistema enfriador evaporativo, con base en las lecturas de presión de vapor de la corriente de aire AE, y el desecante líquido.

[0062] Las modalidades divulgadas suministran un sistema enfriador y deshumidificador de desecante líquido que puede ser usado durante la noche en un recinto para lograr una temperatura y/o humedad deseadas. Se debe entender que esta descripción no pretende limitar la invención. Por el contrario, las modalidades ejemplares pretenden cubrir alternativas, modificaciones y equivalentes, las cuales están incluidas en el espíritu y el alcance de la invención como se define por las reivindicaciones adjuntas. Además, en la descripción detallada de las modalidades ejemplares, se definen numerosos detalles específicos con el fin de suministrar un entendimiento exhaustivo de la invención reivindicada. Sin embargo, un experto en la materia entendería que se pueden realizar varias modalidades sin dichos detalles específicos.

[0063] Aunque las características y elementos de las presentes modalidades se describen en las modalidades en combinaciones particulares, cada característica o elemento puede ser usado solo sin las otras características y elementos de las

modalidades o en varias combinaciones con o sin otras características y elementos divulgados acá.

[0064] Esta descripción escrita utiliza ejemplos de la materia objeto divulgada para permitir que cualquier experto en la materia practique la misma, incluyendo la fabricación y uso de cualquier dispositivo o sistema y la realización de cualquier método incorporado. El alcance patentable de la materia objeto está definido por las reivindicaciones, y puede incluir otros ejemplos que se le ocurran a los expertos en la materia. Dichos otros ejemplos se pretenden estar dentro del alcance de las reivindicaciones.

Referencias

Al-Sulaiman, F.A., Gandhidasan, P., y Zubair, S.M. (2007). Sistema de enfriamiento evaporativo de dos etapas basado en desecante líquido que usa proceso de osmosis inversa (RO) para regeneración. Ingeniería Térmica Aplicada 27, 2449-2454.

Davies, P., y Paton, C. (2004). El Invernadero de Agua de Mar en los Emiratos Árabes Unidos: Modelado Térmico y Evaluación de Opciones de Diseño. Desalinización 173, 103-111.

Davies, P.A. (2005). Un Sistema de enfriamiento solar para producción de alimentos en invernadero en climas calientes. Energía Solar 79, 661-668.

El Hourani, M., Ghali, K., y Ghaddar, N. (2014). Sistema de deshumidificación efectiva de desecante con enfriamiento evaporativo de dos etapas para climas calientes y húmedos. Energía y Edificios 68, 329-338.

Kassem, A.S. (1994). Gestión de energía y agua en sistemas de enfriamiento evaporativo en Arabia Saudí. Recursos, Conservación y Reciclaje 12, 135-146.

Lefers, R., Bettahalli, N.M.S., Nunes, S.P., Fedoroff, N., Davies, P.A., y Leiknes, T. (2016). Proceso de deshumidificación y regeneración de desecante

líquido para cumplir con las necesidades de enfriamiento y de agua fresca de invernaderos desérticos. *Desalinización y Tratamiento de Agua* 57, 23430-23442.

Lowenstein, A. (2008). Revisión de Tecnología de Desecante Líquido para Aplicaciones HVAC. *Hvac&R Investigación* 14, 819-839.

5 Lychnos, G., y Davies, P.A. (2012). Modelado y verificación experimental de un Sistema de enfriamiento de desecante líquido con energía solar para la producción de alimentos en invernadero en climas cálidos. *Energía* 40, 116-130.

 Mahmud, K., Mahmood, G.I., Simonson, C.J., y Besant, R.W. (2010). Prueba de desempeño de un Sistema intercambiador de energía de membrana circular de contracorriente (RAMEE) para aplicaciones HVAC. *Energía y Edificios* 42, 1139-1147.

 Mohammad, A.T., Bin Mat, S., Sulaiman, M.Y., Sopian, K., y Al-abidi, A.A. (2013a). Estudio de sistemas de aire acondicionado híbrido de desecante líquido. *Revisiones de Energía Renovable y Sustentable* 20, 186-200.

15 Mohammad, A.T., Mat, S.B., Sulaiman, M.Y., Sopian, K., y Al-Abidi, A.A. (2013b). Revisión histórica de tecnología de enfriamiento de evaporación de desecante líquido. *Energía y Edificios* 67, 22-33.

 Paton, C., y Davies, P. (1996). El Invernadero de Agua de Mar para Tierras Áridas. Documento presentado en: Conferencia del Mediterráneo sobre Fuentes de
20 Energía Renovable para la Producción de Agua (Santorini, Grecia).

 Sabeh, N.C. (2007). Evaluación y Minimización del Uso de Agua por Sistemas de Enfriamiento Evaporativo de Invernadero en un Clima Semiárido. En el Departamento de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas (Tucson, Arizona: La Universidad de Arizona).