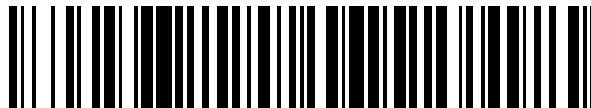


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 726 430**

51 Int. Cl.:

**F24F 5/00** (2006.01)

**F24F 11/30** (2008.01)

**F24F 11/83** (2008.01)

**F24F 110/00** (2008.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.05.2010 PCT/US2010/001420**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.01.2011 WO11011033**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.05.2010 E 10802533 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.02.2019 EP 2457037**

54 Título: **Bombeo de flujo a demanda**

30 Prioridad:

**23.07.2009 US 507806**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**04.10.2019**

73 Titular/es:

**SIEMENS INDUSTRY, INC. (100.0%)  
100 Technology Drive  
Alpharetta, GA 30005, US**

72 Inventor/es:

**HIGGINS, ROBERT**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

ES 2 726 430 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Bombeo de flujo a demanda

**Antecedentes de la invención**

**2. Campo de la invención.**

5 La invención se refiere, en general, a sistemas de refrigeración de confort de agua helada y a sistemas de refrigeración de procesos industriales y, en particular, a métodos y aparatos para el funcionamiento eficaz de sistemas de refrigeración de agua helada.

**3. Técnica relacionada**

10 Muchos edificios comerciales y de otro tipo, así como campus se enfrían por medio de plantas de agua helada. En general, estas plantas de agua helada producen agua helada que se bombea a los tratamientos de aire para enfriar el aire del edificio. Los enfriadores (chillers), los tratamientos del aire (o climatizadores) y otros componentes de la planta de agua helada están diseñados para funcionar a una temperatura específica de entrada y salida del agua helada, o Delta T. En el diseño Delta T, estos componentes son más eficientes y pueden producir un rendimiento de refrigeración a su capacidad nominal. El bajo Delta T, que ocurre cuando la temperatura de entrada y salida se acerca a la de  
15 diseño Delta T, reduce la eficiencia y la capacidad de refrigeración de la planta de agua helada y hace que la planta de agua helada consuma más energía de la necesaria para una demanda determinada.

Las plantas de agua helada están diseñadas para satisfacer la máxima demanda de refrigeración posible de un edificio, campus o similar, también conocida como condición de diseño. En la condición de diseño, los componentes de la planta de agua helada se encuentran en el extremo superior de su capacidad, donde el sistema es más eficiente energéticamente. Sin embargo, es raro que sea necesaria una demanda tan alta de refrigeración. De hecho, casi todas las plantas de agua helada operan por debajo de sus condiciones de diseño durante el 90% del año. Por ejemplo, las condiciones climáticas frías pueden hacer que la demanda de refrigeración disminuya considerablemente. A medida que se reduce la demanda de refrigeración, a menudo también se reduce el Delta T. Esto significa que, la mayoría de las veces, casi todas las plantas de agua helada están funcionando a un nivel de bajo Delta T y con una eficiencia inferior a la óptima. Este bajo Delta T crónico, se conoce como Síndrome de Bajo Delta T.  
20

Se han desarrollado muchas estrategias de mitigación para abordar el Síndrome de bajo Delta T, como el uso de sofisticados programas de secuenciación y algoritmos de selección ON/OFF del equipo, pero ninguno ha demostrado resolver completamente este fenómeno. En la mayoría de los casos, el operador de la planta de agua helada simplemente bombea más agua a los climatizadores del sistema para aumentar su rendimiento, pero esto tiene el efecto combinado de reducir aún más el ya de por si bajo Delta T. Además, el aumento del bombeo en el circuito secundario da como resultado un mayor uso de energía de bombeo del necesario.  
25

El documento US 20009/171512 A1 describe un procedimiento y un aparato para el funcionamiento de un sistema de refrigeración por agua helada.

A partir de la siguiente exposición, se hará evidente que la presente invención aborda las deficiencias asociadas con la técnica anterior al tiempo que proporciona numerosas ventajas y beneficios adicionales no contemplados o posibles con las construcciones de la técnica anterior.  
30

**RESUMEN DE LA INVENCION**

El Flujo a Demanda (Demand Flow) proporciona un procedimiento y un aparato para un funcionamiento muy eficiente de las plantas de agua helada. De hecho, en comparación con los esquemas de funcionamiento tradicionales, el Flujo a Demanda proporciona ahorros de energía sustanciales, al tiempo que cumple con los requisitos de rendimiento de refrigeración. En general, el Flujo a Demanda controla el bombeo del agua helada, el agua del condensador o ambas según una línea Delta T constante. Esto reduce la utilización de energía, reduce o elimina el Síndrome de bajo Delta T, al tiempo que permite que una planta de agua helada satisfaga la demanda de refrigeración. En una o más realizaciones, la línea Delta T constante puede reiniciarse en otra línea Delta T para satisfacer las demandas cambiantes de refrigeración mientras se mantiene la eficiencia energética.  
35

El Síndrome de Bajo Delta T ha afectado y continúa afectando a las plantas de agua helada, causando un uso excesivo de energía y reducciones artificiales de capacidad. Esto impide que las plantas de agua helada satisfagan las demandas de refrigeración, incluso con carga parcial. El Flujo a Demanda y su estrategia de funcionamiento abordan estos temas y proporcionan beneficios adicionales, como se describirá en el presente documento.

En una realización, el Flujo a Demanda proporciona un procedimiento para el funcionamiento eficiente de una planta de agua helada según la reivindicación 1.

5 El procedimiento puede incluir el establecimiento de un Delta T de agua helada y controlar el caudal de agua helada a través de uno o más componentes, para mantener el Delta T de agua helada cruzando uno o más componentes de la planta de agua helada. El Delta T de agua helada incluye una temperatura de entrada de agua helada y una temperatura de salida de agua helada en los componentes de la planta de agua helada. En una o más realizaciones, el Delta T de agua helada puede mantenerse al aumentar el caudal de agua helada para reducir el Delta T de agua helada y al disminuir el caudal de agua helada para aumentar el Delta T de agua helada. Por lo general, el caudal de agua helada se controla a través de una o más bombas de agua helada.

10 Se puede realizar un reinicio de la zona crítica para ajustar el Delta T de agua helada cuando se producen uno o más eventos de activación. En general, el reinicio de la zona crítica proporciona un punto de ajuste Delta T nuevo o reiniciado para ajustar la capacidad o rendimiento de refrigeración según sea necesario. El Delta T de agua fría se puede reiniciar de varias maneras. Por ejemplo, el Delta T de agua fría se puede reiniciar al ajustar la temperatura de entrada del agua helada, ajustando la temperatura de salida del agua helada, o ambas. El control del caudal de agua helada cruzando los componentes de la planta de agua helada para mantener el Delta T de agua helada de esta manera reduce sustancialmente el Síndrome de bajo Delta T en la planta de agua helada. De hecho, la reducción puede ser tal que el Síndrome de bajo Delta T se elimine en la planta de agua helada.

15 Una gran variedad de acontecimientos pueden ser los eventos que activan el reinicio de una zona crítica. Por ejemplo, puede ser un evento que activa la apertura de una válvula de agua helada de una unidad de tratamiento de aire más allá de un umbral determinado. Además, también puede ser el evento de activación el aumento o disminución de la temperatura del agua helada en una derivación (bypass) de la planta de agua helada, o el cambio en el caudal de una bomba terciaria más allá de un umbral determinado. Un evento de activación también puede ser el nivel de humedad en una sala de cirugía/sala de operaciones, en un entorno de fabricación u otro espacio.

20 El caudal de agua del condensador también se puede controlar según el procedimiento. Por ejemplo, el procedimiento puede consistir en establecer un Delta T del agua del condensador que comprende una temperatura baja de entrada de agua del condensador y una temperatura de salida de agua del condensador en un condensador. El condensador puede usar la temperatura baja de entrada del agua del condensador para proporcionar un subenfriamiento al refrigerante lo cual es muy beneficioso para el efecto de la refrigeración y la eficiencia del enfriador (chiller). El Delta T del agua del condensador se puede mantener ajustando el caudal de agua del condensador a través del condensador, como a través de una o más bombas de agua del condensador.

25 El mantenimiento del Delta T del agua del condensador permite al condensador proporcionar un subenfriamiento al refrigerante sin apilamiento, incluso a temperaturas bajas de entrada del agua del condensador. El Delta T del agua del condensador se puede mantener controlando la temperatura de salida del agua del condensador, en donde la temperatura de salida del agua del condensador se controla ajustando el caudal de agua del condensador a través de una o más bombas de agua del condensador.

30 En otra realización, se proporciona un procedimiento para manejar una o más bombas en una planta de agua helada. Este procedimiento puede consistir en bombear agua en un primer caudal a través de un enfriador con una primera bomba, y ajustar el primer caudal para mantener un primer Delta T a través del enfriador. El primer Delta T puede comprender una temperatura de entrada al enfriador y una temperatura de salida del enfriador que proporciona un sobrecalentamiento beneficioso al refrigerante en un evaporador del enfriador, con independencia de las condiciones de carga de la planta de agua helada.

35 El procedimiento también puede consistir en bombear agua a un segundo caudal a través de una unidad de tratamiento de aire con una segunda bomba, y ajustar el segundo caudal para mantener un segundo Delta T a través de la unidad de tratamiento de aire. El segundo Delta T puede comprender una temperatura de entrada de la unidad de tratamiento de aire y una temperatura de salida de la unidad de tratamiento de aire que proporciona el rendimiento de refrigeración deseado en la unidad de tratamiento de aire, independientemente de las condiciones de carga de la planta de agua helada. En una o más realizaciones, el primer Delta T y el segundo Delta T pueden ser similares o iguales para equilibrar el primer caudal y el segundo caudal y reducir la mezcla de la derivación en una derivación de la planta de agua helada. La mezcla de la derivación es una causa común del síndrome de bajo Delta T y, por lo tanto, su reducción es muy ventajosa.

40 El método puede incluir un reinicio de la zona crítica para aumentar el rendimiento de refrigeración. Por ejemplo, el segundo caudal se puede aumentar reajustando el segunda Delta T cuando una válvula de agua de la unidad de tratamiento de aire se abre más allá de un umbral particular. Este aumento del segundo caudal provoca un aumento del rendimiento de refrigeración en el tratamiento de aire.

5 El procedimiento se puede utilizar en una variedad de configuraciones de la planta de agua helada. Para ilustrar, el método puede consistir en bombear el agua a través de un circuito de distribución de la planta de agua helada a la segunda bomba en un tercer caudal con una tercera bomba, y ajustar el tercer caudal para mantener un tercer Delta T. La capacidad de refrigeración en el climatizador de esta realización puede aumentarse mediante un reinicio de la zona crítica. Por ejemplo, el tercer caudal puede aumentarse restableciendo la tercera Delta T cuando el segundo caudal proporcionado por la segunda bomba está más allá de un umbral particular. Al igual que lo anterior, al aumentar el tercer caudal aumenta la capacidad de refrigeración en el climatizador.

10 El procedimiento también puede controlar el caudal de agua del condensador. Por ejemplo, el procedimiento puede incluir bombear agua del condensador a un cuarto caudal a través de un condensador del enfriador con una cuarta bomba, y ajustar el cuarto caudal para mantener un cuarto Delta T en el condensador. El cuarto Delta T puede comprender una temperatura de entrada del agua del condensador y una temperatura de salida del agua del condensador que proporciona un subenfriamiento al refrigerante y evita el apilamiento del refrigerante independientemente de las condiciones de carga de la planta de agua helada. Por ejemplo, la temperatura de entrada del agua del condensador puede ser más baja que la temperatura del bulbo húmedo para que el agua del condensador proporcione un subenfriamiento del refrigerante.

20 En una realización, se proporciona un controlador para controlar una o más bombas de una planta de agua helada. El controlador puede contener una entrada configurada para recibir información del sensor de uno o más sensores, un procesador configurado para controlar un caudal proporcionado por una o más bombas para mantener un Delta T cruzando un componente de la planta de agua helada y una salida configurada para enviar una o más señales a una o más bombas. El procesador también puede generar una o más señales que controlan el caudal proporcionado por una o más bombas. El Delta T puede comprender una temperatura de entrada y una temperatura de salida.

25 El procesador puede configurarse para mantener el Delta T aumentando o disminuyendo el caudal en función de la información del sensor. El procesador también puede configurarse para realizar un reinicio de una zona crítica bajando el Delta T en respuesta a la información del sensor que indica que se desea una capacidad de refrigeración adicional en el componente. La información del sensor puede ser una información variada. Por ejemplo, la información del sensor puede ser información de temperatura. La información del sensor puede ser también, o alternativamente, la información del funcionamiento seleccionado del grupo que consiste en la posición de la válvula de agua helada del climatizador, los VFD Hz, la velocidad de la bomba, la temperatura del agua helada, la temperatura del agua del condensador y la temperatura en una derivación de la planta de agua helada.

30 El procesador puede configurarse para mantener el Delta T controlando la temperatura de salida del Delta T. La temperatura de salida se puede controlar ajustando el caudal a través del componente de la planta de agua helada. Para ilustrarlo, el caudal se puede ajustar aumentando el caudal para disminuir la temperatura de salida y disminuyendo el caudal para aumentar la temperatura de salida. El Delta T mantenido por el controlador puede ser similar a un diseño Delta T para el componente. Esto permite que el componente funcione de manera eficiente de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

35 Otros sistemas, procedimientos, características y ventajas de la invención serán o llegarán a ser evidentes para el experto en la técnica tras el examen de las siguientes figuras y la descripción detallada. Está previsto que todos estos sistemas, procedimientos, características y ventajas adicionales estén incluidos dentro de esta descripción, estén dentro del alcance de la invención y estén protegidos por las reivindicaciones adjuntas.

#### 40 **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Los componentes en las figuras no están necesariamente a escala, sino que se pone énfasis en ilustrar los principios de la invención. En las figuras, los números de referencia similares designan partes correspondientes en las diferentes vistas.

La Figura 1 es un diagrama de bloques que ilustra una planta de agua helada desacoplada ejemplar;

45 La Figura 2 es un diagrama de bloques que ilustra el Síndrome de bajo Delta T en una planta de agua helada ejemplar;

La Figura 3 es un diagrama de bloques que ilustra el exceso de flujo en una planta de agua helada ejemplar;

La Figura 4 es un diagrama de bloques que ilustra una planta de agua helada primaria directa ejemplar;

La Figura 5 es un diagrama de bloques que ilustra los componentes de un enfriador ejemplar;

La Figura 6A es un gráfico de entalpía de presión ejemplar que ilustra el ciclo de refrigeración;

## ES 2 726 430 T3

- La Figura 6B es un gráfico de entalpía de presión ejemplar que ilustra el subenfriamiento en el ciclo de refrigeración;
- La Figura 6C es un gráfico de entalpía de presión ejemplar que ilustra el sobrecalentamiento del refrigerante en el ciclo de refrigeración;
- 5 La Figura 7 es una gráfica que ilustra los beneficios de una temperatura baja de entrada de agua del condensador en un condensador ejemplar;
- La Figura 8 es un gráfico de entalpía de presión ejemplar que ilustra los beneficios del Flujo a Demanda en un enfriador ejemplar;
- La Figura 9A es un gráfico que ilustra la relación entre el caudal y la velocidad del eje;
- La Figura 9B es un gráfico que ilustra la relación entre el cabezal de diseño total y la velocidad del eje;
- 10 La Figura 9C es un gráfico que ilustra la relación entre el uso de energía y la velocidad del eje;
- La Figura 9D es un gráfico que ilustra una línea Delta T ejemplar con una curva de bombeo y una curva de energía;
- La Figura 10 es un diagrama de bloques que ilustra un controlador ejemplar;
- La Figura 11A es un diagrama de flujo que ilustra un controlador ejemplar en funcionamiento;
- La Figura 11B es un diagrama de flujo que ilustra un controlador ejemplar en funcionamiento;
- 15 La Figura 12 es una gráfica que ilustra los reajustes de zona crítica ejemplares activados por la temperatura del aire;
- La Figura 13 es una gráfica que ilustra los reajustes de zona crítica ejemplares activados por la posición de la válvula de agua helada;
- La Figura 14 es un diagrama de bloques que ilustra una planta de agua helada desacoplada ejemplar;
- La Figura 15 es una gráfica que ilustra los reinicios de zona crítica ejemplares activados por los VFD Hertz;
- 20 La Figura 16 es una vista en sección transversal de un condensador ejemplar;
- La Figura 17 es una gráfica que ilustra los beneficios del Flujo a Demanda en una planta de agua helada ejemplar;
- La Figura 18 es una gráfica que ilustra la relación lineal entre las temperaturas de entrada y salida del agua del condensador de un condensador ejemplar;
- 25 La Figura 19 es una gráfica que ilustra los cambios de energía del compresor bajo el Flujo a Demanda en una planta de agua helada ejemplar;
- La Figura 20 es un gráfico de entalpía de presión que ilustra los cambios en el ciclo de refrigeración bajo el Flujo a Demanda en un enfriador ejemplar;
- La Figura 21 es una gráfica que ilustra el efecto sobre la energía y la capacidad bajo el Flujo a Demanda en una planta de agua helada ejemplar;
- 30 La Figura 22 es una gráfica que ilustra la diferencia de temperatura media del registro con el Flujo a Demanda en una planta de agua helada ejemplar;
- La Figura 23A es un gráfico que ilustra la relación entre el flujo de agua helada y el Delta T en una planta de agua helada ejemplar de bajo Delta T;
- 35 La Figura 23B es una gráfica que ilustra la flexibilidad del Flujo a Demanda con una capacidad de enfriamiento constante ejemplar;
- La Figura 23C es una gráfica que ilustra la flexibilidad del Flujo a Demanda con un caudal constante ejemplar; y

La Figura 24 es una gráfica que ilustra los cambios de energía en el lado del aire bajo el Flujo a Demanda en una planta de agua helada ejemplar.

### DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS REALIZACIONES PREFERENTES

- 5 En la siguiente descripción, se exponen numerosos detalles específicos con el fin de proporcionar una descripción más completa de la presente invención. Sin embargo, será evidente para un experto en la materia que la presente invención se puede poner en práctica sin estos detalles específicos. En otros casos, las características bien conocidas no se han descrito en detalle para no complicar la invención.
- 10 El Flujo a Demanda, tal como se describe en este documento, se refiere a los procedimientos y aparatos para reducir o eliminar el Síndrome de bajo Delta T y para mejorar la eficiencia de las plantas de agua helada. El Flujo a Demanda se puede implementar en proyectos de reacondicionamiento de plantas de agua helada existentes, así como en nuevas instalaciones o diseños de plantas de agua helada. Tal como se entiende en este documento, la planta de agua helada se refiere a sistemas de refrigeración que utilizan agua helada para proporcionar enfriamiento de confort o agua helada para alguna necesidad del proceso. Estas plantas de agua helada se utilizan normalmente, pero no siempre, para enfriar campus, complejos industriales, edificios comerciales y similares.
- 15 En general y como se describirá más adelante, el Flujo a Demanda utiliza un flujo variable o un bombeo de agua helada dentro de una planta de agua helada para hacer frente al Síndrome de bajo Delta T y para aumentar sustancialmente la eficiencia de una planta de agua helada. El Flujo variable bajo el Flujo a Demanda mantiene un Delta T para los componentes de la planta de agua helada que se encuentra en el diseño Delta T o cerca del diseño Delta T para los componentes. Como resultado, el Flujo a Demanda aumenta sustancialmente la eficiencia del funcionamiento de las plantas de agua helada y de sus componentes, lo que se traduce en un ahorro sustancial en los costos de energía. La mayor eficiencia proporcionada por el Flujo a Demanda también proporciona el beneficio de la reducción de contaminación. Además, el Flujo a Demanda también aumenta la esperanza de vida de los componentes de la planta de agua helada al funcionar estos componentes cerca o a sus temperaturas especificadas de entrada y salida de agua helada, o diseño Delta T, a diferencia de las técnicas tradicionales de bombeo variable u
- 20 otras técnicas de bombeo.
- 25 El Flujo a Demanda proporciona una mayor eficiencia independientemente de la demanda o de la carga de refrigeración al operar los componentes de la planta de agua helada de forma sincrónica. En una o más realizaciones, esto ocurre mediante el control del bombeo de agua helada y del agua del condensador en una o más bombas para mantener un Delta T en componentes o puntos determinados de una planta de agua helada. En general, el Flujo a
- 30 Demanda funciona con un condensador individual o bombas de agua para mantener un Delta T a través de un componente o punto determinado de una planta de agua helada. Por ejemplo, las bombas primarias de agua helada pueden funcionar para mantener un Delta T a través de un enfriador, las bombas secundarias de agua helada pueden funcionar para mantener un Delta T a través de los climatizadores de la planta, y las bombas de agua del condensador pueden funcionar para mantener un Delta T a través de un condensador.
- 35 El control de las bombas individuales (y el caudal) de esta manera da como resultado el funcionamiento sincronizado de una planta de agua helada, como se describirá más adelante. Esta operación sincronizada equilibra el caudal en la planta de agua helada, lo que reduce o elimina significativamente el Síndrome de bajo Delta T y las ineficiencias relacionadas.
- 40 En las plantas de agua helada tradicionales, el flujo variable se controla de acuerdo con un diferencial de presión mínimo, o Delta P, en algún lugar de la planta o en algunos lugares de la planta o en el sistema de agua helada. El Flujo a Demanda es distinto de estas técnicas ya que se centra en Delta T, en lugar de en Delta P. Con el Flujo a Demanda, se puede mantener un Delta T óptimo en todos los componentes de la planta de agua helada, independientemente de las condiciones de carga (es decir, la demanda de refrigeración). El mantenimiento de un Delta T constante o regular permite grandes variaciones en el flujo de agua helada, lo que da como resultado un ahorro de
- 45 energía no sólo en el bombeo de energía sino también en el consumo de energía del enfriador. Por ejemplo, el Delta T de un enfriador puede mantenerse por medio del control del caudal a través de bombas de agua helada o de agua del condensador, cerca o en los parámetros de diseño del enfriador, con independencia de las condiciones de carga para maximizar la eficiencia de los haces de tubos del evaporador y del intercambiador de calor del condensador en el enfriador.
- 50 Por el contrario, los esquemas de flujo variable tradicionales varían el flujo dentro de rangos mucho más estrechos y, por lo tanto, son incapaces de lograr el ahorro de costes y energía del Flujo a Demanda. Esto se debe a que los esquemas de control de flujo tradicionales controlan el caudal para producir una diferencia de presión individual, o Delta P, en lugar de Delta T. Además, los esquemas de flujo variable tradicionales solo buscan mantener el Delta P en una ubicación predeterminada del sistema, ignorando el bajo Delta T. Esto da como resultado unos caudales que
- 55 son mucho más altos que los requeridos para generar y distribuir la cantidad deseada de rendimiento de refrigeración, en gran parte, para compensar las ineficiencias causadas por el bajo Delta T.

Debido a que los caudales están controlados por el Flujo a Demanda para mantener un Delta T y no para mantener un Delta P o un rendimiento de refrigeración particular en los climatizadores de la planta, puede haber situaciones en las que el caudal sea demasiado bajo para producir la cantidad deseada de rendimiento de refrigeración en ciertas áreas que se basan en la diversidad del sistema. Para solucionar esto, el Flujo a Demanda incluye una característica a la que se hace referencia aquí como reinicio de la zona crítica que permite que el Delta T mantenido por el Flujo a Demanda se reinicie en otro valor, generalmente más bajo, basado en una necesidad específica del sistema que no se cumple por completo con el caudal requerido por el sistema. Esto puede deberse a una tubería inadecuada, climatizador de tamaño incorrecto para la carga que se está sirviendo o cualquier número de anomalías imprevistas en el sistema. Como se describirá más adelante, esto permite que se proporcione refrigeración adicional manteniendo un Delta T nuevo o reiniciado, generalmente aumentando el flujo de agua helada.

La aplicación del Flujo a Demanda tiene un efecto sinérgico en los climatizadores, así como en los enfriadores, bombas y otros componentes de una planta de agua helada. Esto se traduce en una reducción en el uso de energía neta mientras se mantiene o incluso se incrementa la capacidad nominal de la planta de agua helada. Como se describirá más adelante, bajo el Flujo a Demanda, se usa poco o ningún exceso de energía para proporcionar un nivel dado de enfriamiento.

Preferentemente, el Delta T mantenido por el Flujo a Demanda estará cerca del diseño Delta T o en el diseño Delta T de un componente de una planta de agua helada para maximizar la eficiencia del componente. Las ventajas de mantener el Delta T se pueden ver a través de una ecuación de capacidad de enfriamiento, como  $Tons = \left(\frac{GPM \cdot \Delta T}{K}\right)$ , donde Tons es la capacidad de enfriamiento, GPM es el caudal y K es una constante. Como muestra esta ecuación, a medida que disminuye el Delta T, también lo hace la capacidad de enfriamiento.

Cabe señalar que, aunque aquí se describe con referencia a una ecuación de capacidad particular, se entenderá que la operación y los beneficios del Flujo a Demanda también se pueden mostrar con una variedad de ecuaciones de capacidad. Esto generalmente se debe a que las relaciones entre la capacidad de enfriamiento, el caudal y la constante Delta T son lineales.

Las ventajas de mantener el Delta T se pueden ver en el siguiente ejemplo. Para un valor constante de 24 para K, se pueden generar 1000 Tons de capacidad, al proporcionar un caudal de 1500 GPM a un diseño Delta T de 16 grados. Se pueden generar 500 Tons de capacidad al proporcionar 750 GPM a un Delta T de 16 grados. Sin embargo, a un bajo Delta T, tal como el que se encuentra comúnmente en los sistemas tradicionales, se requiere un caudal mayor. Por ejemplo, en un Delta T de 8 grados, 500 tons de capacidad requerirían un caudal de 1500 GPM. Si el Delta T se baja aún más, como a 4 grados, la capacidad de enfriamiento sería de 250 tons a 1500 GPM. Donde las bombas de una planta de agua helada u otros componentes solo puedan tener un caudal máximo de 1500 GPM, la planta de agua helada no podrá satisfacer la demanda deseada de 500 tons, aunque, en el diseño Delta T, la planta de agua helada puede tener una capacidad de 1000 tons a 1500 GPM.

### I. Síndrome de bajo Delta T

El síndrome de bajo Delta T se describirá a continuación con respecto a la Figura 1 que ilustra una planta de agua helada desacoplada ejemplar. Como se muestra, la planta de agua helada consta de un circuito primario 104 y un circuito secundario 108. Cada circuito 104, 108 puede tener su propia temperatura de entrada y salida de agua, o Delta T. Cabe señalar que el Flujo a Demanda también beneficia a las plantas de agua helada directa/primaria (es decir, a las plantas de agua helada no desacopladas), como se describirá más adelante.

Durante el funcionamiento de una planta de agua helada desacoplada, el agua helada se produce en un circuito de producción o primario 104 por uno o más enfriadores 112. Esta agua helada puede circular en el circuito primario 104 por una o más bombas de agua helada primaria 116. El agua helada del circuito primario 104 se puede entonces distribuir a un edificio (u otra estructura) mediante un circuito de distribución o secundario 108 en comunicación fluida con el circuito primario 104. Dentro del circuito secundario 108, el agua helada se puede distribuir por una o más bombas de agua helada secundarias 120 a uno o más tratamientos de aire 124. Las unidades de tratamiento de aire 124 permiten que el calor del aire del edificio se traslade al agua helada, por ejemplo, a través de uno o más intercambiadores de calor. Esto proporciona aire frío al edificio. Normalmente, el aire del edificio es forzado o soplado a través de un intercambiador de calor a los tratamientos de aire 124 para enfriar mejor un volumen de aire. El agua helada sale de los tratamientos de aire 124 para regresar al circuito secundario 108 a una temperatura más alta debido al calor que el agua helada ha absorbido a través de los tratamientos de aire.

El agua helada deja el circuito secundario 108 y regresa al circuito primario 104 a una temperatura más alta. Como se puede ver, tanto el circuito primario 104 como el circuito secundario 108 (así como los componentes de la planta de agua helada unidos a estos circuitos) tienen una temperatura de entrada del agua y una temperatura de salida del agua, o Delta T. En una situación perfecta, las temperaturas de entrada y salida para ambos circuitos estarían en su diseño Delta T respectivo. Desafortunadamente, en la práctica, los circuitos de agua helada funcionan en un bajo Delta T crónico.

El bajo Delta T ocurre por diversas razones. En algunos casos, el bajo Delta T se produce debido a un diseño imperfecto de la planta de agua helada. Esto es relativamente común debido a la complejidad de las plantas de agua helada y a la dificultad para conseguir un diseño perfecto. Para aclararlo, los tratamientos de aire 124 del circuito secundario 108 pueden no haber sido seleccionados correctamente y, por lo tanto, el agua helada no absorbe tanto calor como se esperaba. En este caso, el agua helada del circuito secundario 108 entra en el circuito primario 104 a una temperatura más fría de lo esperado, lo que da como resultado un bajo Delta T. Cabe señalar que, debido a un diseño y/o funcionamiento imperfecto, una planta de agua helada puede estar funcionando a un bajo Delta T bajo diversas cargas, incluidas las cargas de condición de diseño.

El bajo Delta T también se produce cuando el rendimiento de refrigeración se reduce para cumplir con una carga que es menor que la condición de diseño. A medida que disminuye el rendimiento, el flujo de agua helada, el Delta T de agua helada y otros factores se vuelven impredecibles, lo que a menudo da como resultado un bajo Delta T. De hecho, en la práctica, se ha visto que los esquemas tradicionales de control de flujo del Delta P dan lugar invariablemente a un bajo Delta T en algunos, si no en todos, los componentes de la planta de agua helada.

Por ejemplo, para reducir el rendimiento de refrigeración en función de las condiciones de diseño, se pueden cerrar (parcial o completamente) una o más válvulas de agua helada de las unidades de tratamiento de aire 124 de la planta de agua helada. Esto reduce el flujo de agua helada a través de los tratamientos de aire 124 y, por lo tanto, se proporciona menos aire frío. Sin embargo, ahora que las válvulas de agua helada están parcialmente cerradas, el agua helada absorbe menos calor del aire a medida que fluye a través de los tratamientos de aire 124 a una velocidad superior a la necesaria, tal como refleja que este debajo del diseño Delta T. Así, el agua helada que sale de los tratamientos de aire 124 no es tan "caliente" como lo era antes. Como resultado, el agua helada que sale del circuito secundario 108 al circuito primario 104 es más fría de lo deseado, lo que provoca un bajo Delta T en ambos círculos.

Para ilustrar con un ejemplo específico, en la Figura 2 se proporciona una planta de agua helada ejemplar. En el ejemplo, el agua helada producida en el circuito primario 104 es de 40 grados. Como se puede ver, el agua helada que sale de los tratamientos de aire 124 puede estar a 52 grados en lugar de los 56 grados esperados porque las válvulas de agua helada se han cerrado y el caudal de agua helada es demasiado alto para la carga actual. Debido a que no hay exceso de flujo de distribución en la derivación 128, la temperatura del agua helada que sale del circuito secundario sigue siendo de 40 grados. Suponiendo que el sistema tiene un diseño Delta T de 16 grados, ahora hay un bajo Delta T de 12 grados, que es 4 grados más bajo que el diseño Delta T. Aquí se observa que el bajo Delta T en sí mismo reduce la capacidad y hace que el exceso de energía se utilice para proporcionar un rendimiento de refrigeración determinado. Como puede verse por la ecuación de capacidad,  $Tons = \left(\frac{GPM \cdot \Delta T}{K}\right)$ , la capacidad de tons se reduce significativamente por el bajo Delta T. Para compensar, se requeriría un caudal o GPM más alto, lo que llevaría a un uso excesivo de la energía de bombeo para la demanda de enfriamiento dada.

Con referencia de nuevo a la Figura 1, otra causa de bajo Delta T es la mezcla de la derivación causada por el exceso de flujo dentro del circuito primario 104, el circuito secundario 108, o ambos. La mezcla de la derivación y el exceso de flujo son causas conocidas de bajo Delta T y tradicionalmente han sido extremadamente difíciles de tratar, especialmente con los esquemas de control de flujo Delta P. De hecho, una causa común del exceso de flujo es el bombeo excesivo de agua helada por esquemas de control Delta P ineficientes (como se muestra en el ejemplo anterior). Por esta razón, los desequilibrios de flujo y la mezcla de la derivación son comunes en las plantas de agua helada que utilizan esquemas de control de flujo Delta P. Se observa que la mezcla de la derivación puede ocurrir incluso en condiciones de diseño porque, como ocurre con cualquier mecanismo complejo, las plantas de agua helada rara vez son perfectas. De hecho, las plantas de agua helada a menudo están diseñadas con caudales de bomba primaria de agua helada que no coinciden con los caudales de la bomba secundaria.

En las plantas de agua helada desacopladas, se proporciona un desacoplador o una derivación 128 que conecta el circuito primario 104 y el circuito secundario 108 para manejar los desequilibrios de flujo entre los circuitos. Esto ocurre normalmente como resultado del exceso de flujo o exceso de bombeo en uno de los circuitos. La derivación 128 acepta el exceso de flujo de un circuito generalmente permitiendo que circule al otro circuito. Se observa que el exceso de flujo no se limita a ningún circuito en particular y que puede haber exceso de flujo en todos los circuitos, además de un desequilibrio de flujo entre ellos.

El exceso de flujo generalmente indica que se está gastando demasiada energía en bombear agua helada, como se describirá más adelante a través de las Leyes de Afinidad, y también exacerba los problemas del bajo Delta T. Para ilustrar el uso de la Figura 3, que representa una planta de agua helada ejemplar que tiene exceso de flujo, el agua helada de los tratamientos de aire 124 y del circuito secundario 108 se mezclan con el suministro de agua del circuito primario 108 en la derivación 128 cuando hay un exceso de flujo de agua helada primaria o de distribución. La mezcla que resulta de estas dos corrientes de agua es más caliente que el agua helada de diseño que luego es distribuida a los tratamientos de aire 124.

Para ilustrarlo, el exceso de flujo (GPM) de 300 galones por minuto de agua a 54 grados del circuito secundario 108 se mezclaría con agua helada de 40 grados del circuito primario 104 en la derivación 128, lo que conducirá a una



temperatura del agua helada del circuito secundario de 42 grados. Ahora, el agua helada del circuito secundario tiene una temperatura más alta que la del agua helada del circuito primario. Esto causa un bajo Delta T en el circuito primario 104 y en el circuito secundario 108 y una reducción correspondiente en la capacidad de refrigeración.

5 La mezcla de la derivación de corrientes de agua helada tampoco es deseable porque exagera el bajo Delta T. Para aclararlo, cuando los tratamientos de aire 124 detectan la temperatura elevada del agua causada por la mezcla de la derivación o no puede satisfacer la demanda de refrigeración debido a la temperatura elevada del agua, sus válvulas de agua helada se abren para permitir un flujo adicional de agua a través de los tratamientos de aire 124 para aumentar la capacidad de enfriamiento del aire. En los sistemas tradicionales Delta P, las bombas secundarias de agua helada 120 también aumentan el caudal de agua helada para aumentar la capacidad de refrigeración del aire en los  
10 tratamientos de aire 124. Este aumento en el caudal provoca más desequilibrios en el caudal (es decir, más exceso de flujo) en la derivación 128 entre el circuito primario 104 y el circuito secundario 108. El aumento del exceso de flujo exagera el bajo Delta T al causar una mezcla adicional de la derivación que reduce aún más el Delta T.

15 El exceso de flujo y la mezcla de la derivación también causan un uso excesivo de energía para una demanda de refrigeración determinada. En algunas situaciones, se usa energía de bombeo adicional para aumentar el caudal en el circuito primario 104 para equilibrar mejor el flujo del circuito secundario 108 y evitar la mezcla de la derivación. Además, o alternativamente, puede ser necesario poner en línea un enfriador adicional 112 o se puede usar energía del enfriador adicional para generar suficiente agua helada en el circuito primario 104 para que compense el efecto de calentamiento de la mezcla de la derivación en el suministro de agua helada. En el lado del suministro de aire, los  
20 tratamientos de aire 124 pueden intentar compensar la capacidad reducida causada por las elevadas temperaturas del agua al mover grandes volúmenes de aire. Esto se logra normalmente aumentando la potencia a uno o más ventiladores 132 para mover aire adicional a través de los tratamientos de aire 124, como se describirá más adelante a través de las Leyes de Afinidad.

25 En muchos casos, estas medidas (por ejemplo, el aumento de bombeo de agua helada, la abertura de las válvulas de agua de los manipuladores de aire, el aumento del movimiento de aire del suministro de aire) no compensan completamente la reducción artificial de la capacidad de refrigeración causada por el bajo Delta T. Por lo tanto, la planta de agua helada es simplemente incapaz de satisfacer la demanda de refrigeración, aunque este nivel de demanda puede estar por debajo de su capacidad de refrigeración nominal. En situaciones en las que tales medidas pueden compensar la reducción artificial de la capacidad, como por ejemplo al iniciar los enfriadores adicionales, la  
30 planta de agua helada está utilizando sustancialmente más energía de la necesaria para proporcionar el rendimiento de refrigeración deseado con gran parte del exceso de energía que se gasta en compensar los efectos del bajo Delta T.

35 Se entenderá que el bajo Delta T también se produce en configuraciones de plantas de agua helada primaria directa (es decir, plantas de agua helada no desacopladas), aunque dichas configuraciones generalmente no tienen el problema de mezclar el agua de retorno del edificio con el agua de suministro de producción. Los sistemas primarios directos invariablemente tienen una derivación de planta o de sistema, válvulas de 3 vías o ambas, para mantener el flujo mínimo a través del sistema. Por ejemplo, la Figura 4 ilustra una planta de agua helada primaria directa ejemplar que tiene tal derivación. Similar a una planta de agua helada desacoplada, el exceso de flujo puede ocurrir en estas derivaciones o válvulas de 3 vías. Por lo tanto, los problemas del bajo Delta T, como el exceso de energía del enfriador, el exceso de energía de bombeo y la capacidad reducida del sistema también están presentes en las configuraciones  
40 primarias directas. De hecho, los problemas de baja Delta T son los mismos con independencia de la configuración de la planta. Esto se ha demostrado en la práctica por el hecho de que el síndrome de bajo Delta T ocurre en ambos tipos de plantas de agua helada.

45 El efecto del bajo Delta T con respecto a los enfriadores se describirá ahora con más detalle. La Figura 5 ilustra un enfriador ejemplar 112. A título ilustrativo, la línea discontinua de la Figura 5 delinea que componentes forman parte del enfriador ejemplar 112 y cuáles no, con componentes dentro de la línea discontinua que forman parte del enfriador. Por supuesto, se entenderá que un enfriador puede incluir componentes adicionales o menos componentes que los mostrados.

50 Como se puede ver, el enfriador 112 consta de un condensador 508, un compresor 520 y un evaporador 512 conectados por una o más líneas de refrigerante 536. El evaporador 512 se puede conectar a un circuito primario o a otros circuitos de una planta de agua helada mediante una o más líneas de agua helada 532.

55 En funcionamiento, el agua helada puede entrar en el evaporador 512 donde transfiere calor a un refrigerante. Esto evapora al refrigerante causando que el refrigerante se convierta en vapor refrigerante. La transferencia de calor del agua helada enfría el agua permitiendo que el agua regrese al circuito primario a través de las líneas de agua helada 532. Para aclararlo, el agua helada a 54 grados puede enfriarse a 42 grados transfiriendo calor a un refrigerante de 40 grados dentro de un evaporador 512 El agua helada de 42 grados se puede usar entonces para enfriar un edificio u otras estructuras, como se describió anteriormente.

5 Para que el ciclo de refrigeración continúe, el vapor refrigerante producido por el evaporador 512 se condensa de nuevo en forma líquida. Esta condensación del vapor refrigerante se puede realizar por el condensador 512. Como es sabido, el vapor refrigerante sólo puede condensarse en una superficie de temperatura más baja. Debido a que el refrigerante tiene un punto de ebullición relativamente bajo, el vapor refrigerante tiene una temperatura relativamente baja. Por esta razón, se puede utilizar un compresor 520 para comprimir el vapor refrigerante, elevando la temperatura y la presión del vapor.

10 El aumento de la temperatura del vapor refrigerante permite que el vapor se condense a una temperatura más alta. Por ejemplo, sin compresión, el vapor refrigerante puede estar a 60 grados, mientras que, con la compresión, el vapor puede estar a 97 grados. Por lo tanto, la condensación puede ocurrir por debajo de los 97 grados en lugar de por debajo de los 60 grados. Esto es altamente beneficioso porque generalmente es más fácil proporcionar una superficie de condensación que tiene una temperatura más baja que la temperatura incrementada del vapor refrigerante.

15 El vapor refrigerante entra en el condensador 508 en donde su calor se puede transferir a un medio de condensación, lo que hace que el refrigerante regrese a un estado líquido. Por ejemplo, el condensador 508 puede tener un diseño de carcasa y tubo donde el medio de condensación fluye a través de los tubos del condensador. De esta manera, el vapor refrigerante puede condensarse en los tubos dentro de la carcasa del condensador. Como se ha comentado aquí, el medio de condensación es el agua del condensador, aunque se entenderá que se pueden usar otros fluidos o medios. Después de la condensación, el refrigerante regresa a través de la línea de refrigerante 536 y el reductor de presión 528 de vuelta al evaporador 508, donde continúa el ciclo de refrigeración.

20 El condensador 508 puede conectarse a una torre de enfriamiento 524 u otro dispositivo de enfriamiento mediante una o más líneas de agua del condensador 540. Debido a que el agua del condensador absorbe el calor del vapor refrigerante, el agua del condensador debe enfriarse para mantener su temperatura lo suficientemente baja como para condensar el vapor refrigerante. El agua del condensador puede circular entre el condensador 508 y la torre de enfriamiento 524 mediante una o más bombas de agua del condensador 516. Esto proporciona un suministro de agua del condensador refrigerada que permite la condensación continua del vapor refrigerante. Se observa que, aunque se utiliza una torre de enfriamiento 524 para enfriar el agua en la realización de la Figura 4, se pueden usar otros suministros de agua del condensador.

30 El funcionamiento de un enfriador también se puede mostrar a través de un diagrama de presión-entalpía como el que se muestra en la Figura 6A. En el diagrama, la presión se representa en el eje vertical, mientras que la entalpía está en el eje horizontal. En el punto 604, el refrigerante puede estar en un estado muy saturado o principalmente líquido en un evaporador. A medida que el refrigerante absorbe el calor del agua helada en el evaporador, su entalpía aumenta al convertir el refrigerante en vapor de refrigerante en el punto 608. La parte del diagrama entre el punto 604 y el punto 608 representa el efecto de refrigeración del enfriador. Durante este tiempo, la absorción de calor del agua helada por el refrigerante enfría el agua helada.

35 Después se puede usar un compresor para aumentar la temperatura y la presión del vapor refrigerante desde el punto 608 hasta el punto 612. Esto se conoce como "elevación". Esta elevación permite que el vapor refrigerante se condense en el condensador, como se describió anteriormente. Entre el punto 612 y el punto 616, el vapor refrigerante transfiere calor al agua del condensador y se condensa en el condensador, convirtiendo el vapor en líquido una vez más. El refrigerante después pasa a través de un reductor de presión entre el punto 616 y el punto 604, lo que reduce tanto la temperatura como la presión del refrigerante líquido, de modo que se puede usar en el evaporador y continuar el ciclo de refrigeración.

45 Como se describirá más adelante, los problemas asociados con el bajo Delta T en el condensador a menudo causan fallos en el enfriador debido a la falta de la elevación mínima en condiciones de carga parcial. Cuando la presión diferencial entre el condensador y el evaporador cae demasiado baja, se produce una condición conocida por la industria como "apilamiento". Esta es una condición en la que el refrigerante se acumula en el condensador, dejando caer la presión saturada del evaporador y la temperatura a puntos críticos. El refrigerante también tiene una alta afinidad con el aceite y, por lo tanto, el apilamiento atraparán una buena parte de la carga de aceite en el condensador, lo que provocará que el enfriador se apague con cualquier número de problemas de baja presión, de baja temperatura del evaporador o de baja presión del aceite.

50 Debido a que la mayoría de los sistemas tradicionales de bombeo de agua del condensador funcionan a un volumen constante, las torres de refrigeración también están en condiciones de flujo total. A medida que la carga en la torre de enfriamiento disminuye, el rango de funcionamiento permanece relativamente constante, lo que reduce la eficiencia de la torre. A la inversa, en los sistemas de agua del condensador de flujo variable, el rango de operación disminuye con el flujo. Esto permite menores temperaturas de entrada del agua del condensador y la reducción asociada de la energía del enfriador y de la energía del ventilador de la torre de enfriamiento que se describe más adelante en esta descripción.

55

5 El bajo Delta T también resulta de una eficiencia de la bomba (KW / Ton) de agua del condensador muy ineficiente y limita la cantidad de subenfriamiento del refrigerante disponible para el enfriador a través de temperaturas de entrada de agua del condensador estacionalmente bajas. A una carga dada, por cada grado de temperatura de entrada de agua del condensador se reduce la energía del compresor en aproximadamente 1,5% y el tonelaje nominal del enfriador se incrementa en aproximadamente 1%. Por lo tanto, como se describirá más adelante, el funcionamiento de los enfriadores a la temperatura más baja posible de entrada de agua del condensador es altamente deseable.

Además, el bajo Delta T en el evaporador reduce el efecto de refrigeración del ciclo de refrigeración. Como se describirá más adelante, esto reduce la temperatura del vapor refrigerante producido por el evaporador.

## II. FLUJO A DEMANDA

10 En general, el Flujo a Demanda comprende sistemas y métodos para tratar el Síndrome de bajo Delta T mientras se incrementa la eficiencia de la planta y el sistema de agua helada. Como se demostró anteriormente, los esquemas tradicionales de control de sistemas de agua helada conducen directamente a ineficiencias de energía y capacidad evidenciadas por el Síndrome de bajo Delta T, el alto KW/Ton y la capacidad reducida del lado del aire. La descripción anterior también demuestra que existe un conflicto directo entre los esquemas de control más tradicionales y el sistema de optimización de energía y la capacidad de suministro. Esto se evidencia más claramente en los esquemas de control de bombeo de agua helada por diferencia de presión, o Delta P, que ignoran el aumento del uso de energía y reducen la capacidad del sistema. Los esquemas de bombeo tradicionalmente diseñados, basados en Delta P inevitablemente producen un sistema que se realiza con el Síndrome de bajo Delta T a medida que varía la carga del sistema.

20 En una situación ideal, el Delta T de agua helada sería el mismo en los círculos primario, secundario y algún terciario u otros circuitos de una planta de agua helada. El funcionamiento de los componentes de la planta de agua helada en su selección o diseño Delta T siempre produce una mayor capacidad de suministro y una mayor eficiencia del sistema. Por lo tanto, en una situación ideal, el Delta T de agua helada coincidiría con el diseño Delta T. Para generar esta situación ideal, la selección, el diseño y la instalación de los componentes de la planta de agua helada y los algoritmos de control de bombeo deben ser perfectos. Desafortunadamente, esta perfección es extraordinariamente rara o nunca se alcanza en la práctica, y las disparidades en el diseño, la carga y la instalación de las plantas de agua helada están siempre presentes.

30 A diferencia de los esquemas de control tradicionales, un principio básico de Flujo a Demanda es funcionar lo más cerca posible del diseño de Delta T, haciendo hincapié en satisfacer la demanda de enfriamiento, como se describirá más adelante con respecto al restablecimiento de las zonas críticas. Esto permite que una planta de agua helada funcione con una alta eficiencia, con independencia de la carga de refrigeración. Esto contrasta con los esquemas de control tradicionales, donde el funcionamiento con cargas parciales o incluso de diseño utiliza mucha más energía de la necesaria debido al Síndrome de bajo Delta T que afecta a estos sistemas tradicionales.

35 Además, debido a que las bombas están controladas para mantener un Delta T cerca o en el diseño Delta T, la planta de agua helada utiliza energía de manera eficiente, independientemente de la carga de la planta. Cuando se compara con los esquemas de control tradicionales, el uso de energía es sustancialmente menor bajo el Flujo a Demanda, como puede verse en el siguiente gráfico. Los valores indicados en el gráfico se han tomado de las mediciones reales de una implementación de funcionamiento de Flujo a Demanda.

40 Para mostrarlo, la figura 7 es una gráfica de una aplicación de Flujo a Demanda real que muestra las reducciones de energía que se pueden lograr al reducir la temperatura de entrada del agua del condensador. La Figura 8 es un diagrama de presión-entalpía que compara los esquemas de bombeo de agua del condensador de volumen constante 804 y de bombeo de agua helada Delta P con el bombeo de Flujo a Demanda 808. Como se puede ver, la elevación se reduce mientras que aumenta el efecto de refrigeración por subenfriamiento 812 y sobrecalentamiento del refrigerante 816 en comparación con el bombeo de volumen constante tradicional 804.

45 El Flujo a Demanda tiene un efecto medible, sostenible y reproducible en las plantas de agua helada porque está basado en principios científicos fundamentales sólidos que, como tales, son medibles y predecibles. La ganancia en eficiencia y capacidad de suministro resultantes de la aplicación del Flujo a Demanda se describirán a continuación.

Una premisa fundamental de la eficiencia de la energía de bombeo con plantas de agua helada de flujo variable conocida como Leyes de Afinidad consiste en las siguientes leyes:

50 • Ley 1: El flujo es proporcional a la velocidad de rotación del eje, como se muestra por la ecuación  $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$

donde N es la velocidad de rotación del eje y Q es el caudal volumétrico (por ejemplo, CFM, GPM o L/s. Esto se ilustra mediante la línea de flujo 936 que se muestra en el gráfico de la Figura 9A.

- Ley 2: La presión o la parte superior es proporcional al cuadrado de la velocidad del eje, como se muestra en la ecuación  $\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$ , donde H es la presión o el cabezal desarrollado por la bomba o el ventilador (por ejemplo, ft o m). Esto se ilustra mediante la curva de bombeo 916 que se muestra en el gráfico de la Figura 9B.

- Ley 3: La potencia es proporcional al cubo de la velocidad del eje, como lo muestra la ecuación  $\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3$ ,

5 donde P es la potencia del eje (por ejemplo, W). Esto se ilustra mediante la curva de energía 920 que se muestra en el gráfico de la Figura 9C.

10 Las Leyes de Afinidad establecen que la caída de presión del agua helada (también conocida como TDH o como H) está relacionada con el cambio de caudal al cuadrado, mientras que la utilización de energía está relacionada con el cambio de caudal al cubo. Por lo tanto, en el Flujo a Demanda, a medida que se reduce el caudal, la capacidad de enfriamiento o el rendimiento se reducen proporcionalmente, pero la utilización de energía se reduce exponencialmente.

15 La figura 9D es un gráfico que ilustra una línea Delta T 904 constante ejemplar. La línea 904 se denomina línea Delta T constante porque todos los puntos de la línea se han generado con el mismo Delta T. En el gráfico, el eje horizontal representa el caudal, mientras que el eje vertical representa la presión. Por lo tanto, como se muestra, la línea Delta T 904 indica, para un Delta T constante, el caudal necesario para producir un rendimiento de refrigeración determinado. En una o más realizaciones, la línea Delta T 904 puede definirse mediante una ecuación de capacidad, como,  $Tons = \left(\frac{GPM \cdot \Delta T}{K}\right)$ , que establece que un aumento o una disminución del caudal (GPM) provoca un aumento o una disminución proporcional en el rendimiento de refrigeración (Tons). Cabe señalar que, aunque en la Figura 9D se muestra una línea Delta T 904 determinada, se entenderá que la línea Delta T 940 puede ser diferente para varias plantas de agua helada o componentes de las plantas de agua helada.

20

25 En general, el Flujo a Demanda busca mantener el caudal, para un rendimiento de refrigeración dado, en la línea Delta T 904. De este modo se consigue un aumento sustancial de la eficiencia (es decir, ahorro de energía) al tiempo que satisface la demanda de refrigeración. Por el contrario, el caudal determinado por los esquemas de control tradicionales es más alto, a menudo sustancialmente, que el proporcionado por la línea Delta T 904. Esto se ha demostrado en la práctica y, a menudo, se registra en los registros de funcionamiento de las plantas de agua helada tradicionales. La Figura 9D ilustra un punto registrado 908 ejemplar que muestra el caudal según lo determinado por los esquemas de control tradicionales, y un punto de Flujo a Demanda 912. El punto del Flujo a Demanda 912 representa el caudal para un rendimiento de refrigeración dado bajo los principios de Flujo a Demanda.

30 Por lo general, el punto registrado 908, según lo determinan los esquemas de control tradicionales, tendrá un caudal más alto que el requerido por la planta de agua helada para satisfacer las demandas reales de enfriamiento. Por ejemplo, en la Figura 9D, el punto registrado 908 tiene un caudal más alto que el punto del Flujo a Demanda 912. Esto es, al menos parcialmente, porque los esquemas de control tradicionales deben compensar las ineficiencias causadas por el bajo Delta T con caudales más altos y un mayor rendimiento de refrigeración.

35 Con el Flujo a Demanda, el caudal se ajusta a lo largo de la línea Delta T 904, lineal a la carga, lo que significa que la planta de agua helada y sus componentes operan en el diseño Delta T o cerca del diseño Delta T. De esta manera, el bajo Delta T se elimina o se reduce de manera significativa por el Flujo a Demanda. Por lo tanto, la demanda deseada de enfriamiento se puede satisfacer con un caudal y un rendimiento de refrigeración más bajos en comparación con los esquemas de control tradicionales. Esto se debe en gran parte a que la planta de agua helada no tiene que compensar las ineficiencias del bajo Delta T.

40 La Figura 9D superpone la curva de bombeo 916 y la curva de energía 920 mencionadas anteriormente para ilustrar las ganancias de eficiencia proporcionadas por el Flujo a Demanda. Como se muestra, la curva de bombeo 916 representa la cabeza de diseño total (TDH) o la caída de presión en su eje vertical y la capacidad o la velocidad del eje en su eje horizontal. Las Leyes de Afinidad dictan que la velocidad del eje es linealmente proporcional al caudal. Por lo tanto, la curva de bombeo 916 puede superponerse como en la Figura 9D para ilustrar las ganancias de eficiencia proporcionadas por el Flujo a Demanda. Las Leyes de Afinidad también dictan que la curva de bombeo 916 es una función cuadrada. Por lo tanto, de los gráficos se desprende que, a medida que el caudal se reduce linealmente a lo largo de la línea Delta T 204, la TDH se reduce exponencialmente.

45

50 La curva de energía 920, como se muestra, representa el uso de energía en su eje vertical y la velocidad del eje en su eje horizontal (que, como se ha indicado, ha demostrado que es linealmente proporcional al caudal). Bajo las Leyes de Afinidad, la curva de energía 920 es una función al cubo. Por lo tanto, se puede ver que a medida que se reduce el caudal, el uso de energía se reduce exponencialmente, incluso más que la TDH. Dicho de otra manera, el uso de energía aumenta exponencialmente de acuerdo con una función al cubo a medida que aumenta el caudal. Por esta

razón, es muy deseable que las bombas del sistema funcionen de manera que se proporcione el caudal mínimo necesario para lograr un rendimiento de refrigeración determinado.

5 Se puede observar que se produce una cantidad considerable de ahorro de energía cuando una planta de agua helada funciona con el Flujo a Demanda. La Figura 9D resalta las diferencias en el uso de energía entre el punto del Flujo a Demanda 912 y el punto registrado 908. Como se puede ver en la curva de energía 920, en el rendimiento de refrigeración indicado por estos puntos, el uso de energía excesiva 932 entre el punto registrado 908 y el punto del Flujo a Demanda 912 es sustancial. Una vez más, esto se debe al aumento exponencial del uso de energía a medida que aumenta el caudal.

10 La Figura 9D también resalta las diferencias en la TDH entre el punto del Flujo a Demanda 912 y el punto registrado 908. Como se puede ver, el punto registrado 908 nuevamente tiene un TDH sustancialmente más alto que el necesario para satisfacer la demanda actual de refrigeración. En cambio, en el punto del Flujo a Demanda 912, la TDH es mucho menor. Como se puede ver por la curva de bombeo 916, el exceso de la TDH 924 entre el punto registrado 908 y el punto de Flujo a Demanda 912 es sustancial. Por lo tanto, las bombas de la planta de agua helada gastan sustancialmente menos trabajo bajo el Flujo a Demanda en comparación con los esquemas de control tradicionales. Esto es beneficioso porque se ejerce menos tensión en las bombas, lo que prolonga su vida útil.

### III. Estrategia de funcionamiento del Flujo a Demanda

20 Para ayudar en la descripción del Flujo a Demanda, el término estrategia de funcionamiento se usará aquí para referirse a los principios, operaciones y algoritmos aplicados a las plantas de agua helada y sus componentes, para lograr los beneficios del Flujo a Demanda para el uso de la energía de la planta y la capacidad de refrigeración. La estrategia de funcionamiento influye beneficiosamente en los aspectos comunes de la mayoría, si no de todas, las plantas de agua helada. Como se describirá más adelante, estos aspectos incluyen la producción de agua helada (por ejemplo, enfriadores), el bombeo de agua helada, el bombeo de agua del condensador, el funcionamiento del ventilador de la torre de enfriamiento y el funcionamiento del ventilador del lado del aire. La aplicación de la estrategia de funcionamiento reduce o elimina significativamente el Síndrome de bajo Delta T, haciendo funcionar los componentes de la planta de agua helada en el diseño Delta T o cerca del mismo, independientemente de las condiciones de carga. Esto, a su vez, optimiza el uso de energía y la capacidad de suministro para los componentes de la planta de agua helada y la planta en su conjunto.

30 En una o más realizaciones, la estrategia de funcionamiento se puede materializar y/o implementar por uno o más dispositivos de control o componentes de una planta de agua helada. La Figura 10 ilustra un controlador ejemplar que se puede usar para implementar la estrategia de funcionamiento. En una o más realizaciones, el controlador puede aceptar datos o información de entrada, realizar una o más operaciones en la entrada de acuerdo con la estrategia de funcionamiento y proporcionar un rendimiento correspondiente.

35 El controlador 1004 puede estar compuesto de un procesador 1004, una o más entradas 1020 y una o más salidas 1024. La entrada 1020 puede usarse para recibir datos o información de uno o más sensores 1028. Por ejemplo, información sobre el agua helada, el agua del condensador, el refrigerante o las características de funcionamiento de los componentes de la planta de agua helada detectados por uno o más sensores 1028 pueden recibirse a través de una entrada 1020.

40 El procesador 1004 puede entonces realizar una o más operaciones sobre la información recibida a través de una o más entradas 1020. En una o más realizaciones, el procesador puede llevar a cabo una o más instrucciones almacenadas en un dispositivo de memoria 1012 para realizar estas operaciones. Las instrucciones también pueden estar integradas al procesador 1008, como en el caso de un ASIC o FPGA. Cabe señalar que el dispositivo de memoria 1012 puede ser interno o externo al procesador 1004 y también puede usarse para almacenar datos o información. Las instrucciones pueden estar en forma de código legible por máquina en una o más realizaciones.

45 La estrategia de funcionamiento puede ser incorporada por una o más instrucciones de tal manera que, al ejecutar las instrucciones, el controlador 1004 puede hacer funcionar una planta de agua helada o un componente de la misma de acuerdo con el Flujo a Demanda. Por ejemplo, se pueden realizar uno o más algoritmos para determinar cuándo se deben realizar aumentos o disminuciones del caudal de agua helada/del condensador para mantener el bombeo de agua helada/del condensador en una línea Delta T o cerca de ella. Una vez que se ejecutan las instrucciones sobre la información de una o más entradas 1020, se puede proporcionar una salida correspondiente a través de una o más salidas 1024 del controlador 1004. Como se muestra, una salida 1024 del controlador 1004 está conectada a un VFD 1032. El VFD 1032 puede conectarse a un enfriador, condensador u otra bomba o ventilador de la torre de enfriamiento (no mostrado). De esta manera, el controlador 1004 puede controlar el bombeo de las bombas de la planta del agua helada.

55 Cabe señalar que la estrategia de funcionamiento puede considerarse que proporciona operaciones de control externo que controlan los componentes de una planta de agua helada. Por ejemplo, en el caso de una modernización, un

controlador 1004 o similar puede aplicar el Flujo a Demanda a una planta de agua helada sin requerir alteraciones en los componentes existentes de la planta. El controlador 1004 puede controlar, por ejemplo, el VFD y las bombas de planta existentes. En algunas realizaciones, los VFD pueden instalarse en una o más agua helada, agua del condensador u otras bombas para permitir el control de estas bombas mediante la estrategia de funcionamiento. También se pueden instalar uno o más sensores o el controlador 1004 puede usar los sensores existentes en una o más realizaciones.

La Figura 11A es un diagrama de flujo que ilustra las operaciones ejemplares que puede realizar un controlador 1024 para realizar la estrategia de funcionamiento. Se entiende que algunos pasos descritos en este documento pueden realizarse en un orden diferente al aquí descrito, y que puede menos pasos o pasos adicionales en diversas realizaciones correspondientes a diversos aspectos de la estrategia de funcionamiento aquí descrita, pero que no se muestran en el diagrama de flujo.

En la realización mostrada, la información del sensor se recibe en la etapa 1104. Por ejemplo, se puede recibir información del sensor con respecto a la temperatura de entrada del agua helada, la temperatura de salida del agua o ambos componentes de una planta de agua helada. También se puede recibir la temperatura del refrigerante, la presión u otras características. Además, se pueden recibir características de funcionamiento tales como la posición de las válvulas de agua helada en los tratamientos de aire, la velocidad o el rendimiento de los VFD, la velocidad o el caudal de las bombas, así como otra información.

En el paso 1108, basado en la información recibida en el paso 1104, el controlador puede determinar si aumentar o disminuir en una o más bombas para mantener un Delta T que está preferiblemente cerca del diseño Delta T o en el diseño Delta T. Por ejemplo, refiriéndose a la Figura 1, si la temperatura de salida del agua helada en un tratamiento de aire 124 indica un bajo Delta T, el caudal en el circuito secundario 108 se puede ajustar mediante una bomba secundaria de agua helada 120 para mantener el diseño Delta T a través del tratamiento de aire 124.

En el paso 1112, se puede proporcionar un rendimiento, como a un VFD u otro controlador de bomba, o incluso a una bomba directamente para aumentar o disminuir el caudal como se determina en el paso 1108. En este ejemplo anterior, al reducir el caudal, el agua helada permanece en el tratamiento de aire 124 durante un período de tiempo más largo. Esto hace que la entalpía del agua helada aumente debido a que está expuesta al aire caliente del edificio por el tratamiento de aire 124 durante un período de tiempo más prolongado.

El aumento de la entalpía del agua helada aumenta la temperatura de salida del agua helada del tratamiento de aire 124. A medida que el agua sale del circuito secundario 108, aumenta la temperatura de salida del agua del circuito secundario. De esta manera, el Delta T se puede aumentar hasta cerca del diseño Delta T o en el diseño Delta T (reduciendo o eliminando el Síndrome de Bajo Delta T).

Aunque el ejemplo anterior describe el mantenimiento de Delta T en el tratamiento del aire 124, el Delta T se puede mantener, de esta manera, en otros componentes de la planta de agua helada, incluidos los circuitos primarios, secundarios u otros, así como dentro de los componentes de la planta. Por ejemplo, en una o más realizaciones, un controlador de una planta de agua helada puede alterar el caudal de una o más bombas de agua del condensador para mantener el Delta T a través de un componente del enfriador, como el condensador del enfriador.

Como se explicó brevemente más arriba, la estrategia de funcionamiento también puede incluir uno o más reinicios de la zona crítica. En una o más realizaciones, el reinicio de una zona crítica cambia el Delta T al que se controla el caudal. En esencia, el reinicio de la zona crítica altera la línea Delta T a la cual se controla el caudal por la estrategia de funcionamiento. Esto permite que la estrategia de funcionamiento satisfaga la demanda de refrigeración funcionando de acuerdo con varias líneas Delta T. En la práctica, estas líneas Delta T estarán generalmente cerca de la línea Delta T generada en el diseño Delta T. La estrategia de funcionamiento es, por lo tanto, flexible y capaz de satisfacer varias demandas de enfriamiento mientras funciona eficientemente la planta de agua helada cerca del diseño Delta T o en el diseño Delta T.

El reinicio de una zona crítica se puede utilizar para aumentar o disminuir el rendimiento de refrigeración, como puede ser al aumentar o disminuir el flujo de agua helada. En una o más realizaciones, se puede usar un reinicio de zona crítica para aumentar el rendimiento de refrigeración al aumentar el flujo de agua helada. Esto puede ocurrir en situaciones en las que la demanda de refrigeración no se puede satisfacer al operar una planta de agua helada en un Delta T determinado. Por ejemplo, si no se puede satisfacer la demanda de refrigeración, se puede usar el reinicio de zona crítica para reiniciar el actual delta T, mantenido por la estrategia de funcionamiento, a un nuevo valor. Para demostrarlo, el Delta T mantenido por la estrategia de funcionamiento se puede reajustar de 16 grados a 15 grados. Para producir este valor más bajo Delta T en los componentes de la planta de agua helada, se puede aumentar el caudal de agua helada para mantener el nuevo valor Delta T en uno o más componentes de la planta de agua helada. El aumento del caudal proporciona agua helada adicional a los componentes de la planta de agua helada, lo que a su vez proporciona un mayor rendimiento de refrigeración para satisfacer la demanda. Por ejemplo, el aumento de flujo de agua helada a los tratamientos de aire les daría a los tratamientos de aire una capacidad adicional de aire frío.

Se observa que el reinicio de zona crítica también puede ocurrir cuando una planta de agua helada, o sus componentes, están produciendo demasiado o excesivo rendimiento de refrigeración. Por ejemplo, si se reduce la demanda de refrigeración, el reinicio de zona crítica puede cambiar el Delta T para que se mantenga de tal modo que esté más cerca del diseño Delta T. En el ejemplo anterior, por ejemplo, el Delta T puede restablecerse de 15 grados a 16 grados cuando se reduce la demanda de refrigeración. Por consiguiente, el caudal de agua helada se puede reducir, lo que reduce el rendimiento de refrigeración. Normalmente, el reinicio lineal de un punto de ajuste Delta T se calcula en función de la dinámica del sistema, como se descubrió durante el proceso de puesta en marcha.

La figura 12 es una gráfica que ilustra un ejemplo de un reinicio de una zona crítica para una unidad de tratamiento de aire ejemplar. Como se puede ver, el Delta T puede reiniciarse a un valor más bajo para proporcionar más caudal de agua helada, lo que reduce la temperatura del aire de suministro de la unidad de tratamiento de aire. También se puede observar que el reinicio de Delta T a un valor más alto eleva la temperatura del aire de suministro al reducir el caudal de agua helada a la unidad de tratamiento de aire.

En funcionamiento, el valor al que se reinicia el Delta T se puede determinar de varias maneras. Por ejemplo, los nuevos valores de entrada y salida de la temperatura del agua (es decir, un restablecimiento de Delta T) se pueden determinar de acuerdo con una fórmula o ecuación en algunas realizaciones. En otras realizaciones, se puede usar un conjunto de puntos de ajuste predeterminados para proporcionar el valor Delta T restablecido. Esto se puede describir con respecto a la Figura 12 que ilustra un grupo ejemplar de puntos de ajuste 1204. En general, cada punto de ajuste 1204 proporciona un valor Delta T para un evento de activación determinado. En la Figura 12 por ejemplo, cada punto de ajuste 1204 proporciona un valor Delta T para la temperatura de suministro de aire dada de una unidad de tratamiento de aire. Los puntos de ajuste 1204 pueden determinarse durante la configuración o la puesta en marcha del Flujo a Demanda, y pueden ajustarse más adelante si se desea.

Si el valor nuevo o reiniciado de Delta T sigue siendo insuficiente para satisfacer la demanda de refrigeración, se puede activar otro reinicio de zona crítica para restablecer nuevamente el Delta T que se mantiene por la estrategia de funcionamiento. En una o más realizaciones, pueden ocurrir reinicios de la zona crítica hasta que la planta de agua helada pueda satisfacer la demanda de refrigeración.

En una o más realizaciones, un reajuste de zona crítica altera el Delta T que debe mantenerse en una cantidad incremental, como un grado. Esto ayuda a asegurar que el Delta T que se va a mantener, se aproxime al diseño Delta T. Aunque puede resultar una eficiencia ligeramente reducida en los componentes del agua helada, esta ligera reducción de la eficiencia se supera por los beneficios que supone el reducir o eliminar sustancialmente el bajo Delta T. Cuando se compara con los esquemas de control tradicionales, el aumento de la eficiencia del Flujo a Demanda seguirá siendo considerable.

A las circunstancias que dan lugar a un reinicio de zona crítica se hará referencia aquí como un evento desencadenante o activador. Como se indicó, los reinicios de zonas críticas pueden activarse cuando los componentes de la planta de agua helada producen demasiado o muy poco rendimiento de refrigeración. Para determinar si los componentes de la planta están produciendo demasiado o muy poco rendimiento de refrigeración, la estrategia de funcionamiento puede utilizar información de uno o más sensores. Como se describirá más adelante, esta información puede incluir las características del agua helada dentro de una planta de agua helada (por ejemplo, la temperatura o el caudal), las características de funcionamiento de uno o más componentes de la planta de agua helada, las condiciones de aire o ambientales de un espacio (por ejemplo, la temperatura o la humedad), así como otra información. Haciendo referencia a la figura 12, por ejemplo, un activador puede ser la temperatura de aire de suministro de una unidad de tratamiento de aire. Para ilustrarlo, si la temperatura de aire de suministro no coincide con la temperatura de suministro de aire deseada, se puede activar el reinicio de zona crítica.

Como se mencionó anteriormente, el Delta T también se puede incrementar por la estrategia de funcionamiento como resultado del reinicio de zona crítica. Por ejemplo, si se reduce la demanda de refrigeración, el Delta T se puede reiniciar en un valor más alto por medio del reinicio de zona crítica. En la Figura 12 se muestra un ejemplo de reinicio de Delta T a un valor más alto para disminuir el rendimiento de refrigeración (es decir, elevar la temperatura del aire de suministro de la unidad de tratamiento de aire). De manera similar a lo anterior, varios eventos o condiciones pueden activar un aumento del Delta T por un reinicio de zona crítica.

La Figura 11B es un diagrama de flujo que ilustra operaciones ejemplares, incluidas las operaciones de reinicio de zona crítica, que se pueden realizar por un controlador 1024. En la etapa 1116, se puede procesar la información recibida de la etapa 1104 para determinar si se ha producido una activación. Si es así, puede producirse un reinicio de zona crítica que restablece la línea Delta T a la que se controla el bombeo. Por ejemplo, las características de funcionamiento proporcionadas por uno o más sensores, como son la posición de las válvulas de agua helada del tratamiento de aire, la velocidad o rendimiento del VFD, la temperatura del agua helada en una derivación de la planta u otra información pueden causar un reinicio de zona crítica, como se describirá más adelante.

Si se produce un reinicio de zona crítica, el controlador utilizará el valor de reinicio Delta T o la línea Delta T reiniciada en el paso 1108 para determinar si es necesario aumentar o disminuir el caudal. Entonces, como se explicó anteriormente, se puede proporcionar un rendimiento a una o más bombas para efectuar este cambio en el caudal. Si no se produce un reinicio de zona crítica, el controlador puede seguir usando el Delta T o la línea Delta T actual y controlar el caudal en consecuencia. Se observa que las etapas de las Figuras 11A y 11B pueden ocurrir continuamente o en varios períodos de tiempo. De esta manera, los reinicios de zonas críticas y los caudales se pueden ajustar de forma continua o en los períodos de tiempo deseados, respectivamente.

La estrategia de funcionamiento del Flujo a Demanda se describirá a continuación con respecto al funcionamiento de las bombas de agua helada y las bombas de agua del condensador. Como resultará evidente a partir de la siguiente discusión, el control del bombeo o el caudal por la estrategia de funcionamiento tiene un efecto muy beneficioso en la producción de agua helada (por ejemplo, enfriadores), el bombeo de agua helada, el bombeo de agua del condensador, el funcionamiento del ventilador de la torre de enfriamiento y el funcionamiento del ventilador del lado del aire.

#### A. Funcionamiento de la Bomba de Agua Helada

Como se describió anteriormente, las bombas de agua helada proporcionan un flujo de agua helada a través de la planta de agua helada. En una o más realizaciones, las bombas de agua helada proporcionan un flujo de agua helada a través de circuitos primarios, secundarios, terciarios u otros circuitos de una planta de agua helada.

En una o más realizaciones, la estrategia de funcionamiento controla tales bombas de agua helada de modo que su caudal esté en o cerca de la línea Delta T descrita anteriormente. Como se describió anteriormente con respecto al gráfico de la Figura 9D, el funcionamiento de las bombas de agua helada de acuerdo con una línea Delta T supone un ahorro sustancial de energía, especialmente en comparación con los esquemas de control tradicionales.

El funcionamiento de las bombas de agua helada de acuerdo con una línea Delta T puede realizarse de varias maneras. En general, dicho funcionamiento mantiene el caudal en una o más bombas en la línea Delta T o cerca de ella. La estrategia de funcionamiento puede utilizar diferentes métodos dependiendo de la ubicación o el tipo de bomba de agua helada. Por ejemplo, se pueden usar diferentes operaciones para controlar el caudal de una bomba de agua helada dependiendo de si la bomba está en un circuito primario, secundario, terciario u otro circuito. En una o más realizaciones, el caudal proporcionado por una bomba de agua helada se puede controlar mediante un variador de frecuencia (VFD) conectado a la bomba. Se entenderá que otros dispositivos, incluidos los dispositivos de las propias bombas de agua helada, se pueden usar para controlar el caudal, la velocidad de bombeo o similares.

Normalmente, pero no siempre, la estrategia de funcionamiento controla el caudal a través de una o más bombas de agua helada para mantener la temperatura en uno o más puntos de la planta de agua helada. Para detectar la temperatura en estos puntos se pueden usar uno o más sensores. El caudal se puede ajustar para mantener una temperatura de acuerdo con la información de temperatura de los sensores. De esta manera, un Delta T se puede mantener en uno o más puntos de la planta de agua helada.

Haciendo referencia a la Figura 1, en una realización, la estrategia de funcionamiento puede controlar las bombas secundarias de agua helada 120 para mantener un Delta T, preferiblemente en el diseño Delta T o cerca del mismo, a través de los tratamientos de aire 124. Esto hace funcionar las bombas secundarias de agua helada 120 de acuerdo con la línea Delta T y garantiza que los tratamientos de aire 124 puedan proporcionar su capacidad de refrigeración nominal mientras funcionan eficientemente. Como se indicó anteriormente, un Delta T particular se puede mantener aumentando o disminuyendo el caudal a través de las bombas secundarias de agua helada 120.

La estrategia de funcionamiento puede controlar las bombas primarias de agua helada 116 para mantener un Delta T en uno o más puntos de la planta de agua helada también. Por ejemplo, las bombas de agua helada primaria 116 pueden funcionar para mantener un Delta T para el circuito primario 104, el circuito secundario 108, o ambos. Nuevamente, esto se puede lograr al aumentar o disminuir el caudal de una o más bombas primarias de agua helada 116.

Como se puede ver en la ecuación de capacidad, la relación entre el Delta T y el caudal es lineal. Por lo tanto, al mantener un Delta T determinado en los circuitos primario y secundario 104,108, el caudal típicamente estará cerca o en equilibrio. Esto reduce o elimina el exceso de flujo lo que causa una reducción o eliminación de la mezcla de la derivación.

Se observa que en una o más realizaciones se pueden usar otras formas de eliminar la mezcla de la derivación. En una realización, las bombas primarias de agua helada 116 se pueden controlar para mantener la temperatura dentro de una derivación 128 de la planta de agua helada. Debido a que la temperatura en la derivación 128 es el resultado de la mezcla de la derivación, mantener la temperatura dentro de la derivación también controla la mezcla de la derivación. De esta manera, la mezcla de la derivación y su efecto combinado en el bajo Delta T pueden reducirse



considerablemente y, en muchos casos, eliminarse de manera efectiva. En una realización, la temperatura mantenida puede ser tal que haya un equilibrio o un casi equilibrio entre los circuitos primario y secundario 104, 108, reduciendo o eliminando la mezcla de la derivación.

- 5 Para ilustrarlo, el exceso de flujo en el circuito secundario 108 se puede determinar midiendo la temperatura del agua helada dentro de la derivación 128. Si la temperatura de la derivación es cercana o igual a la temperatura del agua de retorno de los tratamientos de aire 124, hay un exceso de flujo secundario y la velocidad de la bomba de agua helada primaria 116 puede incrementarse hasta que la temperatura del agua helada en la derivación descienda hasta cerca o a la temperatura del agua helada en el circuito primario 104. Si la temperatura de derivación es cercana o igual al suministro de agua helada del circuito primario 104, hay un exceso de flujo primario. La velocidad de la bomba primaria
- 10 de agua helada 116 puede disminuir hasta que la temperatura en la derivación descienda a un punto medio entre la temperatura del agua helada de retorno de los tratamientos de aire 124 y el circuito primario 104. Las temperaturas en la derivación en esta "banda muerta" no tienen ningún efecto de restablecimiento en las velocidades de la bomba primaria. En una o más realizaciones, la velocidad de la bomba primaria de agua helada 116 no puede disminuir por debajo del punto de ajuste Delta T de la bomba primaria de agua helada.
- 15 En otra realización, la estrategia de funcionamiento puede controlar las bombas de agua helada primaria 116 para reducir o eliminar el exceso de flujo, haciendo coincidir el caudal de agua helada en el circuito primario 104 con el caudal de agua helada en el circuito secundario 108. Se pueden usar uno o más sensores para determinar el caudal del circuito secundario 108 para permitir que las bombas de agua helada primaria 116 coincidan con el caudal.
- 20 El reinicio de zona crítica se describirá a continuación con respecto al funcionamiento de las bombas de agua helada de acuerdo con la estrategia de funcionamiento. Como se indicó, el reinicio de zona crítica puede cambiar la línea Delta T en la que operan las bombas de agua helada. En general, puede producirse un reinicio de zona crítica cuando hay un rendimiento de refrigeración demasiado alto o demasiado bajo, como puede determinarse a través de uno o más sensores. Puede producirse un reinicio de zona crítica para diferentes bombas de agua helada en diferentes momentos y/o en función de la información diferente del sensor.
- 25 Haciendo referencia a la figura 1, por ejemplo, se puede activar un reinicio de zona crítica para las bombas secundarias de agua helada 120 si se determina que no hay suficiente flujo de agua helada en el tratamiento de aire 124 para satisfacer la demanda de refrigeración. Esta determinación se puede realizar en función de diversas informaciones (que se suele recopilar por uno o más sensores). Por ejemplo, cuando el aire helado de un tratamiento de aire 124 es más cálido de lo deseado, puede producirse un reinicio de zona crítica.
- 30 En una realización, la posición de una o más válvulas de agua helada dentro de un tratamiento de aire 124 puede indicar que no hay suficiente flujo de agua helada y desencadenar un reinicio de zona crítica. Por ejemplo, la abertura de una válvula de agua helada más allá del 85% u otro umbral puede indicar que el tratamiento de aire 124 está "hambriento" de agua helada y desencadena un reinicio de zona crítica. En una realización, el reinicio de zona crítica puede disminuir gradualmente el Delta T que se mantendrá a través del tratamiento de aire 124, lo que provocará un
- 35 aumento en el caudal de agua helada a través del tratamiento de aire. El tratamiento de aire 124 ahora puede satisfacer la demanda de refrigeración. De lo contrario, la válvula de agua helada del tratamiento de aire permanecería abierta más allá del umbral y se podrían activar reinicios adicionales de zona crítica hasta que se pueda satisfacer la demanda de enfriamiento. A medida que se alcanza el enfriamiento, las válvulas de agua helada se cierran, lo que evita que se reinicien más zonas críticas.
- 40 La Figura 13 es un gráfico que ilustra los reinicios de zonas críticas para una unidad de tratamiento de aire ejemplar. En esta realización, los reinicios de zonas críticas se activan por la posición de la válvula de agua helada de la unidad de tratamiento de aire. Como se puede ver, a medida que la válvula de agua helada se modula hacia el 100% de abertura, el Delta T se restablece en valores más bajos para proporcionar un flujo adicional de agua helada a la unidad de tratamiento de aire. En funcionamiento, se puede usar una bomba de agua helada que suministra agua helada a
- 45 la unidad de tratamiento de aire, como una bomba secundaria o terciaria de agua helada, para proporcionar el flujo de agua helada adicional. Cabe señalar que, la figura 13 también muestra que los reinicios de zonas críticas se pueden usar para aumentar el Delta T a medida que la posición de una válvula de agua helada se mueve de abierta a cerrada.
- Los reinicios de zonas críticas también se pueden activar para las bombas primarias de agua helada 116. En una o más realizaciones, se puede activar un reinicio de zona crítica para las bombas primarias de agua helada 116 para
- 50 asegurar que haya poca o ninguna mezcla de la derivación en una planta de agua helada. En una o más realizaciones, el exceso de flujo, si lo hay, se puede detectar por la detección de la temperatura del agua en la derivación. Un aumento o disminución de la temperatura del agua dentro de la derivación puede desencadenar un restablecimiento de zona crítica. Por ejemplo, a medida que aumenta la temperatura del agua en la derivación, se puede aumentar el bombeo en el circuito primario para mantener el equilibrio entre los circuitos primario y secundario. En una realización, el VFD para una bomba primaria de agua helada 116 se puede ajustar en + o -1 Hz por minuto hasta que se produzca el equilibrio o casi el equilibrio. En funcionamiento, la estrategia de funcionamiento típicamente resultará en una limitación de flujo que oscila entre cero y un flujo insignificante que da como resultado una reducción significativa o eliminación
- 55

de la mezcla de la derivación. Se observa que, para equilibrar el flujo en una derivación, que puede ser muy variable y dinámica, en algunas realizaciones el reinicio de zona crítica puede ocurrir continuamente.

5 Por ejemplo, en una realización, la temperatura en la derivación se puede medir y controlar, por ejemplo, a través de un ajuste de frecuencia VFD de una bomba de producción, a un punto de ajuste de 48 grados. Esta temperatura del punto de ajuste puede ser variable hasta cierto punto por el sistema y se determina en la puesta en servicio. Como la temperatura en la derivación se eleva por encima de dicho punto de ajuste, se conoce una indicación del exceso de flujo de agua de distribución en comparación con el flujo de agua helada de producción. Los algoritmos de la bomba de producción de Flujo a Demanda pueden entonces reiniciarse, a través del reinicio de zona crítica, para aumentar la frecuencia VFD en 1 Hz por minuto hasta que la temperatura en el desacoplador descienda por debajo del punto establecido menos una banda muerta de 2 grados. Estos parámetros también pueden variar según el sistema y se determinarán en la puesta en servicio del sistema. Las temperaturas en una derivación por debajo del punto de ajuste + banda muerta indican que se ha obtenido un exceso de flujo de agua de producción y que el algoritmo de control de bombeo de la producción se invierte entonces en la misma frecuencia por unidad de tiempo, pero nunca por encima del punto de ajuste original Delta T. Esta estrategia de control permite que el bombeo de producción cumpla las condiciones de carga dinámica en los circuitos secundarios o de distribución. Esto reduce el Síndrome de Bajo Delta a su nivel más bajo alcanzable en todos los sistemas de bombeo desacoplados construidos. Se observa que las frecuencias VFD mínimas se pueden ajustar durante la puesta en servicio para cumplir con los requisitos mínimos de flujo del fabricante.

20 La estrategia de funcionamiento, incluidos los reinicios de la zona crítica, se puede aplicar a varias configuraciones de plantas de agua helada desacopladas. La Figura 14 ilustra una planta ejemplar de agua helada que tiene un circuito primario 104, un circuito secundario 108 y un circuito terciario 1404. Como se sabe, el circuito secundario 108 puede ser una línea de distribución que lleva agua helada al circuito terciario 1404. Se observa que en algunas plantas de agua helada se pueden proporcionar una pluralidad de circuitos terciarios 1404. En general, el circuito terciario 1404 tiene al menos una bomba terciaria de agua helada y uno o más tratamientos de aire 124 que proporcionan refrigeración a uno o más edificios u otras estructuras.

30 En funcionamiento, las bombas terciarias de agua helada 1408 pueden funcionar para mantener un Delta T a través de los tratamientos de aire 124. Como se describió anteriormente, este Delta T está preferiblemente cerca o en el diseño Delta T para los tratamientos de aire 124. Las bombas secundarias de agua helada 120 pueden funcionar para mantener el Delta T a través de las bombas terciarias 204. Preferiblemente, este Delta T está cerca o en el diseño Delta T para el circuito terciario 204. Las bombas de agua helada primaria 116 pueden funcionar para mantener un Delta T a través de los enfriadores 112. Este Delta T está preferiblemente cerca o en el diseño Delta T para los enfriadores.

35 En las plantas de agua helada que tienen uno o más circuitos terciarios 1404, los reinicios de zonas críticas también se pueden activar en función de varios criterios. Para mostrarlo, los reinicios de zonas críticas para las bombas terciarias de agua helada 1408 pueden activarse en función de la posición de las válvulas de agua helada en los tratamientos de aire 124. Los reinicios de zona crítica para las bombas secundarias de agua helada 120 pueden activarse en función del caudal de las bombas terciarias de agua helada 1408, tal como se indica por la velocidad de las bombas, el rendimiento del VFD de las bombas o similares. Un alto caudal en las bombas terciarias de agua helada 1404 puede indicar que el (los) circuito(s) terciarios 1404 o las bombas terciarias 1408 están "hambrientos" de agua helada. Por lo tanto, se puede activar un reinicio de zona crítica para proporcionar un flujo de agua helada adicional a los circuitos terciarios 1404 desde el circuito secundario 208 al aumentar el caudal en una o más bombas secundarias de agua helada 120.

45 Para ilustrar, en una realización, cuando cualquier frecuencia VFD de la bomba terciaria de agua helada 1404 alcanza los 55 Hz, los puntos de ajuste del Delta T de la bomba del circuito secundario 208 pueden reiniciarse linealmente a través del reinicio de la zona crítica para evitar que las frecuencias VFD de la bomba terciaria se eleven por encima de 55 Hz u otro umbral de frecuencia. Los puntos de ajuste, los umbrales de frecuencia o ambos pueden determinarse durante la puesta en servicio o la instalación del Flujo a Demanda en una planta de agua helada.

50 La Figura 15 es una gráfica que ilustra los reinicios de zonas críticas para una bomba terciaria de agua helada. En esta realización, los reinicios de zona crítica son activados por la frecuencia de funcionamiento (Hz) del VFD de una bomba terciaria de agua. Como puede verse, el Delta T puede reiniciarse en un valor más bajo a medida que aumenta el VFD de la bomba terciaria (u otro indicador de la velocidad o el caudal de la bomba terciaria). Como ya se ha indicado, la reducción del valor Delta T provoca un aumento del flujo de agua helada a la bomba terciaria, lo que permite satisfacer la demanda de refrigeración. Las frecuencias en las que se producen los reinicios de zonas críticas y sus valores Delta T asociados, pueden determinarse durante la configuración o la puesta en servicio del Flujo a Demanda en la planta de agua helada. Se observa que el Delta T también puede incrementarse a medida que disminuye la frecuencia o la velocidad de la bomba terciaria.

Los reinicios de zona crítica para la bomba primaria de agua helada 116 pueden ocurrir, como se describió anteriormente, para mantener un equilibrio o cerca del equilibrio, reduciendo o eliminando en gran medida la mezcla de la derivación entre los circuitos primario y secundario 104,108.

5 Se observa que en una o más realizaciones, pueden activarse reinicios de zonas críticas para la zona más crítica de un subsistema de una planta de agua helada. Una zona crítica en este sentido, puede considerarse como un parámetro que debe mantenerse para proporcionar las condiciones deseadas en un área o proceso. Dichos parámetros pueden incluir la temperatura del aire de suministro del tratamiento de aire, la temperatura/humedad del espacio, la temperatura en la derivación, la posición de la válvula de agua helada, la velocidad de la bomba o la frecuencia VFD. Para ilustrarlo, el bombeo terciario de agua helada, como son los sistemas de bombeo de edificios en diseños de campus, se puede reiniciar desde su línea Delta T en base a la zona más crítica del edificio. El bombeo de distribución se puede reiniciar fuera de su línea Delta T en función de la bomba terciaria más crítica VFD HZ del sistema.

## B. Operaciones de la bomba de agua del condensador

15 En general, las bombas de agua del condensador proporcionan un flujo de agua del condensador para permitir la condensación del refrigerante dentro del enfriador (chiller). Esta condensación es una parte importante del ciclo de refrigeración, ya que permite que el vapor refrigerante vuelva a una forma líquida para continuar el ciclo de refrigeración. En una o más realizaciones, la aplicación de la estrategia de funcionamiento hace que las bombas de agua del condensador funcionen de acuerdo con una línea Delta T que da como resultado un sustancial ahorro de energía.

20 La Figura 16 ilustra un condensador 512 ejemplar que contiene una pluralidad de tubos de condensador 1604 dentro de una carcasa 1608. El vapor de refrigerante puede mantenerse en la carcasa 1608 de modo que el vapor de refrigerante entre en contacto con los tubos del condensador 1604. En funcionamiento, el agua del condensador fluye a través de los tubos del condensador 1604, haciendo que los tubos del condensador 1604 tengan una temperatura más baja que el vapor refrigerante. Como resultado, el vapor de refrigerante se condensa en los tubos del condensador 1604 cuando el calor del vapor se transfiere al agua del condensador a través de los tubos del condensador.

25 En una o más realizaciones, la estrategia de funcionamiento influye en la temperatura del refrigerante y del agua del condensador al controlar el caudal de agua del condensador a través de los tubos del condensador 1604. La reducción del caudal de agua del condensador hace que el agua permanezca dentro de los tubos del condensador 1604 por un período de tiempo más largo. Por lo tanto, el vapor de refrigerante absorbe una mayor cantidad de calor, lo que hace que el agua del condensador salga del condensador a una temperatura y entalpía más altas. Por otra parte, aumentar el caudal de agua del condensador reduce el tiempo en el que el agua del condensador está dentro de los tubos del condensador 1604. Por lo tanto, se absorbe menos calor y el agua del condensador sale del condensador a una temperatura y entalpía más bajas.

35 Como se indicó, un problema causado por el bajo Delta T en un enfriador es el apilamiento. La estrategia de funcionamiento aborda el problema del apilamiento causado por el bajo Delta T del agua del condensador a bajas temperaturas de entrada del agua del condensador. En una o más realizaciones, esto se logra controlando el caudal de agua del condensador de acuerdo con una línea Delta T. De esta manera, los requisitos de elevación mínimos de un enfriador se pueden mantener y el problema del apilamiento se reduce sustancialmente si no se elimina. En una o más realizaciones, los requisitos de la elevación pueden mantenerse controlando la temperatura del refrigerante saturado del condensador a través del control de la temperatura de salida del agua del condensador en el condensador. La estrategia de funcionamiento puede controlar la temperatura de salida del agua del condensador mediante el control del caudal de la temperatura del agua del condensador, como se explicó anteriormente. Debido a que la presión del refrigerante saturado del condensador aumenta o disminuye con la temperatura del refrigerante saturado del condensador, se puede mantener el Delta P o la elevación en el enfriador controlando el flujo de agua del condensador.

45 En funcionamiento, la estrategia de funcionamiento puede controlar una o más bombas de agua del condensador, como a través de un VFD, para mantener un Delta T a través del condensador. En consecuencia, también se mantiene la temperatura de salida del agua del condensador en el condensador y la elevación en el enfriador.

50 Además, para hacer frente al apilamiento, la estrategia de funcionamiento del Flujo a Demanda también puede configurarse para influir de manera beneficiosa en el flujo másico, la elevación o ambos en un enfriador 112 al operar las bombas de agua del condensador 516 de acuerdo con una línea Delta T. En general, el flujo másico se refiere a la cantidad de refrigerante que circula dentro de un enfriador para una carga determinada, mientras que la elevación se refiere al diferencial de presión/temperatura con el que se debe transferir el refrigerante. La cantidad de flujo másico y elevación determina el uso de energía del compresor 520 de un enfriador. Por lo tanto, el funcionamiento de las bombas de agua del condensador 516 de acuerdo con la estrategia de funcionamiento proporciona mayor eficiencia al reducir el uso de energía del compresor.

55

## ES 2 726 430 T3

5 Un compresor 520 de un enfriador puede considerarse como una bomba de vapor de refrigerante que transfiere gas a baja presión y a baja temperatura desde el evaporador 508 al condensador 512 a un estado de presión más alto y a una temperatura más alta. La energía utilizada en este proceso se puede expresar mediante la ecuación,  $E = MF \cdot \frac{L}{K}$  donde E es la energía utilizada, MF es el flujo másico, L es la elevación y K es una constante del refrigerante. Como se puede ver en esta ecuación, la disminución del flujo másico o de la elevación disminuye el uso de energía.

10 El flujo másico (o el peso del refrigerante) que debe circular a través de un enfriador 112 para producir el efecto de refrigeración requerido (RE) para una cantidad determinada de trabajo o rendimiento (Tons) se puede describir mediante la fórmula,  $MF = Tons \cdot \frac{K}{RE}$ , donde K es algo constante. En pocas palabras, esta fórmula dice que aumentar el efecto de refrigeración reduce el peso del refrigerante, o flujo másico, que debe circular a través del enfriador para una cantidad determinada de trabajo. Aumentar el efecto de refrigeración también aumenta la capacidad de suministro de un enfriador al tiempo que reduce la energía del compresor para una cantidad determinada de trabajo.

15 El efecto de refrigeración puede incrementarse de varias maneras. Una forma de aumentar el efecto de refrigeración es por medio del subenfriamiento del refrigerante en el condensador. El subenfriamiento se puede lograr reduciendo la temperatura de entrada de agua del condensador en el condensador. Como se sabe, la temperatura de entrada del agua del condensador es una función del diseño de la torre de enfriamiento y de las condiciones ambientales. Una menor temperatura de entrada del agua del condensador permite que el condensador produzca una menor temperatura del refrigerante cuando el refrigerante sale del condensador. El funcionamiento a la temperatura de entrada de agua del condensador más fría disponible estacionalmente permitida por el condensador, proporciona el mayor subenfriamiento mientras funciona dentro de las especificaciones del fabricante.

20 El subenfriamiento del refrigerante reduce su temperatura por debajo de la saturación y disminuye la cantidad de "intermitencias" que se producen durante el ciclo de expansión o el proceso de regulación. Intermitencia es un término usado para describir la cantidad de refrigerante usado para enfriar el refrigerante del condensador subenfriado a las temperaturas saturadas del evaporador. No se obtiene ningún efecto de refrigeración útil por este refrigerante "intermitente" y se considera una compensación del efecto de refrigeración. Por lo tanto, cuanto mayor sea el subenfriamiento, mayor será el efecto de refrigeración útil por ciclo.

25 La Figura 17 es una gráfica que ilustra los beneficios del subenfriamiento en una planta de agua helada donde se ha aplicado el Flujo a Demanda. En general, la gráfica cuantifica los cambios de energía del compresor de Flujo a Demanda. En la gráfica, el diseño CoPr se calcula a partir de datos conocidos del rendimiento de los enfriadores. El funcionamiento CoPr es un ajuste del diseño CoPr basado en el enfriador actual que funciona con RE y HC.

30 Como se puede ver, la fila superior de la gráfica muestra que la eficiencia del diseño es de 0.7 KW/ton y el CoPr como 8.33. La segunda fila es una imagen de las condiciones de funcionamiento del enfriador antes de la implementación del Flujo a Demanda. La tercera fila es el mismo enfriador en aproximadamente la misma condición ambiental/de carga después del Flujo a Demanda. La cuarta fila es la eficiencia que la enfriadora es capaz de alcanzar en las mejores condiciones de funcionamiento. Observe el cambio en el tonelaje nominal y la eficiencia lograda en este enfriador al mejorar la RE. El tonelaje aumenta en un 30%, mientras que la eficiencia se mejora en más del 50%.

40 Como se describió anteriormente con respecto a la Figura 6A, el ciclo de refrigeración se puede ilustrar con un diagrama de presión-entalpía. Refiriéndonos ahora a la Figura 6B, los efectos beneficiosos del subenfriamiento también se pueden mostrar a través de un diagrama de presión-entalpía. Como se muestra en la Figura 6B, al subenfriar el refrigerante en el condensador se reduce la entalpía del refrigerante desde el punto 616 hasta el punto 628. El refrigerante subenfriado puede entonces entrar en el evaporador en un punto 624. Como se puede ver, esto extiende el efecto de refrigeración desde el punto 604 hasta el punto 624.

45 Otro factor que contribuye a la energía del compresor es la diferencia de presión entre el evaporador y el condensador o, Delta P, a través del que un compresor tiene que transferir el refrigerante. Como se indicó anteriormente, este Delta P se conoce comúnmente en la industria como elevación (lift), y se expresa comúnmente en términos de la diferencia de temperatura entre el refrigerante saturado en el evaporador y el condensador. El efecto de la elevación sobre la energía del compresor se puede ver en la ecuación de energía,  $E = MF \cdot \frac{L}{K}$  donde L es la elevación. Por ejemplo, según la ecuación, un aumento en la elevación provoca un aumento en el uso de energía, mientras que una disminución en la elevación reduce el uso de energía.

50 En términos prácticos, la presión saturada del evaporador puede considerarse una constante relativa. Esta presión puede ser determinada por la temperatura de salida del agua helada del evaporador. Por ejemplo, se pueden usar uno o más puntos de ajuste o una gráfica para determinar la presión saturada de refrigerante en el evaporador. La diferencia entre la temperatura del agua helada de salida y la temperatura saturada del refrigerante se conoce como temperatura de aproximación del evaporador.

- 5 En una o más realizaciones, la reducción de la elevación de acuerdo con la estrategia de funcionamiento del Flujo a Demanda se puede lograr reduciendo la presión del refrigerante en el condensador. Esto se puede lograr reduciendo la temperatura de salida del agua del condensador en el condensador debido a que la presión saturada de refrigerante del condensador se establece por la temperatura de salida del agua del condensador y el enfoque diseñado para la temperatura saturada del refrigerante. La temperatura de enfoque diseñada puede variar dependiendo de la calidad de un enfriador. Por ejemplo, un enfriador económico puede tener un enfoque de 4 grados o más, mientras que un enfriador de mejor calidad puede tener un enfoque de 1 grado o menos.
- 10 En sistemas de bombeo de volumen constante, la temperatura de salida del agua del condensador generalmente está relacionada linealmente con la temperatura de entrada del agua del condensador en un condensador. Por lo tanto, la reducción de la temperatura de entrada del agua del condensador reduce la temperatura de salida del agua del condensador. La Figura 19 es una gráfica que ilustra la relación lineal entre el agua del condensador que sale y las temperaturas de entrada en un condensador ejemplar con un bombeo de volumen constante.
- 15 Como se indicó anteriormente, una temperatura reducida de salida del agua del condensador reduce la presión del refrigerante en el condensador, subenfriando el refrigerante y, por lo tanto, extiende el efecto de refrigeración. La reducción de la presión del refrigerante en el condensador también reduce la elevación. Por lo tanto, reducir la temperatura de entrada del agua del condensador tiene el doble beneficio de aumentar el efecto de refrigeración y reducir la elevación.
- 20 Reducir la temperatura de entrada del agua del condensador justo por encima del punto de congelación, en teoría, tendría el efecto práctico óptimo en el flujo másico y la elevación. Desafortunadamente, los enfriadores tienen requisitos mínimos de elevación (que generalmente varían según el fabricante, la marca y el modelo del enfriador). Las presiones saturadas de condensación del refrigerante deben mantenerse en o por encima de estos puntos mínimos para proporcionar suficiente presión diferencial (es decir, Delta P del refrigerante) para impulsar el refrigerante a través del proceso de regulación o expansión en el condensador. Si no se cumplen estos requisitos de presión, el refrigerante causará el apilamiento y hará que el enfriador se apague por varios dispositivos de seguridad del enfriador.
- 25 A diferencia de los sistemas de flujo constante, la estrategia de funcionamiento puede controlar la elevación, con independencia de la temperatura de entrada del agua del condensador, al ajustar el caudal de agua del condensador. Esto es muy ventajoso porque permite el uso de temperaturas más bajas de entrada de agua del condensador. Al permitir menores temperaturas de entrada del agua del condensador, sin apilamiento, la estrategia de funcionamiento reduce significativamente la energía del compresor al aumentar el subenfriamiento (y el efecto de refrigeración) y la elevación. En la práctica, el subenfriamiento de la estrategia de funcionamiento puede aumentarse hasta los límites máximos permitidos para maximizar el ahorro de energía. El método de Flujo a Demanda para controlar la elevación, independientemente de la temperatura de entrada del agua del condensador y mediante los algoritmos de bombeo del agua del condensador, es único en el sector.
- 30 Además, debido a que los sistemas tradicionales de bombeo de agua del condensador operan a un volumen constante, las torres de enfriamiento están siempre en condiciones de flujo total, incluso en condiciones de carga parcial. En un esquema de control de flujo constante, a medida que disminuye la carga en la torre de enfriamiento disminuye el rango de funcionamiento o Delta T en la torre, lo que reduce la eficiencia de la torre. En contraste, con la estrategia de funcionamiento, el Delta T en la torre de enfriamiento se mantiene en o cerca del diseño Delta T de la torre mediante los algoritmos de bombeo de agua del condensador descritos anteriormente. Esto es significativo, ya que se pueden lograr temperaturas más bajas en el sumidero de la torre por la misma cantidad de energía del ventilador de la torre de enfriamiento porque se ha incrementado la eficiencia. Las temperaturas más bajas en el sumidero de la torre corresponden a las temperaturas más bajas de entrada de agua del condensador en el condensador. Es importante tener en cuenta que los condensadores y las torres de enfriamiento se seleccionan en los puntos de diseño comunes Delta T, generalmente 10 grados, como un estándar de la industria.
- 35 En la estrategia de funcionamiento, la energía mínima del ventilador de la torre de enfriamiento se mantiene para un punto de ajuste de temperatura del sumidero dado al controlar la bomba de agua del condensador a un algoritmo Delta T constante, como se describió anteriormente. Este método para controlar la eficiencia de la torre de enfriamiento, independientemente de la carga de la torre, a través del bombeo de agua del condensador es único en el sector. Existe una sinergia que se desarrolla entre el enfriador, el bombeo de agua del condensador y el subsistema de la torre de enfriamiento al funcionar bajo la estrategia de Flujo a Demanda que reduce la energía neta del sistema.
- 40 Aquí se señala que otra forma en que la estrategia de funcionamiento aumenta el efecto de refrigeración es aumentando el sobrecalentamiento del refrigerante en el evaporador. Una ventaja del aumento del sobrecalentamiento del refrigerante es que reduce los requisitos de flujo másico de refrigerante por ciclo. Esto reduce el uso de energía del compresor. Como se puede ver en la Figura 6C, el sobrecalentamiento del refrigerante generado en el evaporador extiende el efecto de refrigeración desde el punto 608 hasta un punto 620 que tiene una mayor entalpía.
- 45
- 50
- 55

5 Con la estrategia de funcionamiento, el sobrecalentamiento del refrigerante se mantiene constante en todo el rango de carga del enfriador mediante el control de la(s) bomba(s) de agua helada a un algoritmo Delta T constante basado en las condiciones de diseño Delta T. Este método para controlar el sobrecalentamiento del enfriador según las condiciones de diseño, independientemente de la carga del evaporador, a través de algoritmos de bombeo de agua helada, es único en el sector.

10 En plantas de agua helada de funcionamiento tradicional, el agua helada en el evaporador que tiene un bajo Delta T reduce significativamente y algunas veces elimina el sobrecalentamiento de refrigerante en el evaporador del enfriador. La reducción o eliminación del sobrecalentamiento de refrigerante en el evaporador reduce el efecto de refrigeración. Por ejemplo, en la Figura 6C, la reducción del sobrecalentamiento del refrigerante puede causar que el efecto de refrigeración se reduzca del punto 620 al punto 608.

15 El refrigerante que no está muy saturado debido al bajo Delta T de agua helada, no está suficientemente sobrecalentado y puede causar daños al compresor porque el refrigerante no está suficientemente vaporizado. De hecho, los fabricantes a menudo agregan pantallas de eliminación a la parte superior de las secciones del evaporador para romper gotas de refrigerante más grandes que no se han sobrecalentado y vaporizado adecuadamente antes de entrar en el compresor. Si estas gotas llegan al compresor, causan un ruido excesivo y dañan el compresor. Por lo tanto, el Flujo a Demanda proporciona un beneficio adicional al prevenir la formación de tales gotas al mantener o aumentar el sobrecalentamiento del refrigerante para vaporizar adecuadamente el refrigerante antes de que llegue al compresor.

20 En una o más realizaciones, la estrategia de funcionamiento mantiene el sobrecalentamiento del refrigerante mediante el control de las bombas de agua helada de acuerdo con una línea Delta T. De esta manera, el sobrecalentamiento del refrigerante puede mantenerse cerca o en condiciones de diseño, independientemente de la carga del evaporador. Cuando se compara con un enfriador tradicional que funciona a bajo Delta T, el sobrecalentamiento del refrigerante es generalmente mucho mayor bajo la estrategia de funcionamiento.

25 Para ilustrarlo, refiriéndose a la Figura 1, la bomba primaria de agua helada 116 de un circuito primario 104 se puede controlar de acuerdo con una línea Delta T como se describe anteriormente. De esta manera, se puede mantener un Delta T en el enfriador 112. Como se puede ver en la Figura 5, esto mantiene el Delta T de agua helada en el evaporador del enfriador 508 que está conectado al circuito primario por uno o más conductos de agua helada 532. Como consecuencia del mantenimiento del Delta T de agua helada en el evaporador 508, el sobrecalentamiento del refrigerante puede mantenerse cerca o en condiciones de diseño en el evaporador.

30 Como se puede ver, se desarrolla una sinergia entre los subsistemas de bombeo de agua del condensador y del agua helada como resultado del mantenimiento del Delta T de acuerdo con la estrategia de funcionamiento. Por ejemplo, controlar la temperatura de entrada del agua del condensador, la temperatura de salida del agua del condensador y el caudal de la bomba del condensador proporciona un efecto sinérgico sobre la energía del enfriador, la energía de la bomba del condensador y la eficiencia de la torre de enfriamiento. Se entenderá que las combinaciones óptimas de energía de la bomba del condensador, del enfriador y del ventilador de la torre de enfriamiento pueden descubrirse durante la puesta en marcha o la configuración de la estrategia de funcionamiento.

#### IV. UTILIZACIÓN DE ENERGÍA DEL FLUJO A DEMANDA

40 Como se mostró anteriormente, los sistemas/esquemas de control de plantas de agua helada pueden influir positiva o negativamente en la capacidad y la utilización de energía de una planta de agua helada. En general, los esquemas de control tradicionales se centran casi por completo en el Delta P, lo que da como resultado reducciones artificiales de capacidad y un consumo excesivo de energía para una carga determinada. El Flujo a Demanda reduce la utilización de energía y maximiza la capacidad de la planta de agua helada, independientemente de la carga. A continuación, se describen las reducciones en el uso de energía que proporciona el Flujo a Demanda en los subsistemas de las plantas de agua helada, incluyendo las bombas de agua helada, las bombas de agua del condensada, los compresores, los ventiladores de las torres de refrigeración y los ventiladores laterales de aire.

##### A. Bombas de agua helada

50 La premisa fundamental detrás de las aplicaciones de agua helada de flujo variable se entiende mejor a través de las Leyes de Afinidad. Las Leyes de Afinidad establecen que la carga del sistema (tons) y el flujo (GPM) son lineales, el flujo del sistema y la caída de presión (TDH) son una función al cuadrado y el flujo y la energía del sistema son una función al cubo. Por lo tanto, a medida que se reduce la carga del sistema, la cantidad de flujo de agua helada se reduce proporcionalmente, pero la energía se reduce exponencialmente.

Como se describió anteriormente en este documento, los algoritmos tradicionales de bombeo de agua helada basados en Delta P pueden reducir el flujo, pero no lo suficiente como para evitar los sistemas de Síndrome de bajo Delta T. A medida que la carga de construcción desciende de las condiciones de diseño, la relación entre la carga del sistema

(Tons) y el flujo (GPM) se describe mediante la ecuación  $Tons = \left(\frac{GPM \cdot \Delta T}{K}\right)$ . Mantener un valor Delta T en los parámetros de diseño o cerca de ellos a través de la estrategia de funcionamiento del Flujo a Demanda optimiza el flujo (GPM) en torno a los criterios y especificaciones de selección del equipo del sistema original, optimizando así tanto el trabajo como la energía de bombeo. Además, el caudal óptimo proporcionado por el Flujo a Demanda reduce la utilización de energía de manera exponencial como se ve en las Leyes de Afinidad.

Como se describió anteriormente, el uso de la bomba de agua helada para controlar el diseño Delta T del sistema tiene el doble efecto de optimizar la energía del enfriador a través del sobrecalentamiento, así como la energía de la bomba de agua helada. Además, como se describirá más adelante, también se incrementará la capacidad del lado del aire y se reducirá la energía del ventilador como resultado directo de la estrategia de funcionamiento del Flujo a Demanda.

### B. Bombas de agua del condensador

Las Leyes de Afinidad también se aplican a la energía del lado del condensador. A medida que la carga del edificio desciende de las condiciones de diseño, la relación entre la carga del sistema (Tons) y el flujo de agua del condensador (GPM) también es la que se describe en las Leyes de afinidad. Mantener un Delta T en los parámetros de diseño o cerca de ellos, a través de algoritmos de control del Flujo a Demanda, optimiza el flujo (GPM) en torno a los criterios de selección del equipo del sistema original, optimizando así tanto el trabajo como la energía de bombeo. Al igual que con las bombas de agua helada, a medida que disminuye el caudal disminuye exponencialmente la utilización de energía de las bombas de agua del condensador (así como otras bombas).

Como se indicó anteriormente en esta descripción, las estrategias tradicionales de bombeo de agua del condensador basadas en el volumen constante dan como resultado un Delta T de muy bajo funcionamiento a través del condensador, lo que minimiza la capacidad de reducir la energía del compresor subenfriado el refrigerante. El uso de la estrategia de funcionamiento en las bombas de agua del condensador tiene el triple efecto de optimizar la energía de la bomba, la eficiencia de la torre de enfriamiento y administrar los requisitos mínimos de elevación en el enfriador, incluso a temperaturas de entrada de agua del condensador muy bajas. Como se demostrará más adelante en esta descripción, como resultado directo de esta estrategia de control del Flujo a Demanda, también se aumentará la eficiencia de la torre de enfriamiento y se reducirá la energía del ventilador.

Los cambios en la utilización de energía de la bomba de agua del condensador en el Flujo a Demanda se pueden determinar de la misma manera que la energía de bombeo de agua helada. Cabe señalar que en el caso inusual de que las bombas de agua del condensador sean pequeñas (por ejemplo, de pocos caballos de potencia) en relación con el tonelaje nominal del enfriador, el funcionamiento del sistema de agua del condensador en el diseño Delta T o cerca del mismo, en condiciones de carga superior bajo el Flujo a Demanda podría, en algunos casos, hacer que la planta de agua helada utilizara una energía ligeramente superior a la que utilizaría si funcionara en el caso de agua del condensador de bajo Delta T. Sin embargo, funcionando de esta manera bajo el Flujo a Demanda, se mantiene la elevación adecuada en el condensador, incluso cuando funciona a una temperatura de entrada de agua en el condensador muy baja. Esto maximiza el subenfriamiento, lo que generalmente compensa con creces cualquier aumento causado por el funcionamiento cerca o en el diseño Delta T en condiciones de carga superior. El funcionamiento óptimo Delta T se determinará normalmente durante la puesta en servicio o el proceso de configuración a través de pruebas de campo.

### C. Compresores

Las reducciones en la energía del compresor derivadas de la aplicación de una estrategia de funcionamiento del Flujo a Demanda se cuantifican mejor calculando el cambio asociado en el Coeficiente de Rendimiento del Refrigerante (COPR) [Coefficient of Performance of the Refrigerant]. El COPR es la medida de la eficiencia en el ciclo de refrigeración basada en la cantidad de energía absorbida en el evaporador en comparación con la cantidad de energía gastada en el ciclo de compresión. Los dos factores que determinan el COPR son el efecto de refrigeración y el calor de compresión. El calor de compresión es la energía térmica equivalente al trabajo realizado durante el ciclo de compresión. El calor de compresión se cuantifica como la diferencia de entalpía entre el refrigerante que entra y sale del compresor. Esta relación puede ser expresada como  $COPR = \frac{RE}{HC}$ , donde RE es el efecto de refrigeración y HC es el calor de compresión. Para obtener un COPR óptimo, el sobrecalentamiento del refrigerante debe ser lo más alto posible y el subenfriamiento del refrigerante debe ser lo más bajo posible.

El uso de los subsistemas de bombeo de agua helada, bombeo de agua del condensador y ventilador de la torre de enfriamiento para lograr un COPR óptimo es único en la industria y fundamental para la tecnología del Flujo a Demanda.

Los cambios de energía del compresor bajo el Flujo a Demanda ahora se explicarán con más detalle. El diseño COPR se calcula a partir de los datos conocidos de rendimiento de los enfriadores, mientras que el funcionamiento de COPR

es un ajuste del diseño basado en el efecto de refrigeración actual y el calor de compresión. Por ejemplo, la gráfica de la Figura 19 contiene el diseño y las propiedades de los refrigerantes medidos de un enfriador Carrier (Trademark of Carrier Corporation) antes y después de una actualización real del Flujo a Demanda. La fila superior de esta hoja de cálculo muestra que la eficiencia de diseño es de 0.7 KW/ton y que el diseño COPR es de 8.33. La segunda fila son los parámetros de funcionamiento medidos del sistema de agua helada antes de la implementación del Flujo a Demanda. La tercera fila son los parámetros operativos medidos del sistema de agua helada con Flujo a Demanda aplicado. La cuarta fila es la eficiencia que el enfriador puede lograr en las mejores condiciones de funcionamiento. Hay que tener en cuenta el cambio en el tonelaje nominal y la eficiencia lograda en este enfriador al mejorar el efecto de refrigeración. El tonelaje aumenta en un 30%, mientras que la eficiencia se mejora en más del 50%.

- 5
- 10
- 15

#### D. Ventiladores de la torre de enfriamiento

La energía del ventilador de la torre de enfriamiento del Flujo a Demanda es aproximadamente lineal a la carga en un sistema bien mantenido que funciona con las temperaturas de sumidero más bajas que se pueden alcanzar en las condiciones ambientales actuales. La temperatura de entrada del agua del condensador o los puntos de ajuste del ventilador de la torre de enfriamiento se pueden establecer iguales a la temperatura del bulbo húmedo de diseño + la temperatura del sumidero de la torre de enfriamiento que se aproxima al bulbo húmedo. Los cambios en la energía del ventilador de la torre de enfriamiento pueden basarse en la temperatura real de entrada del agua del condensador, el tonelaje nominal en línea, el tonelaje medido y los caballos de potencia del ventilador de la torre de enfriamiento en línea.

- 20
- 25

#### E. Ventiladores laterales de aire

La energía y la capacidad del ventilador en el lado del aire se ven directamente afectadas por el Síndrome de bajo Delta T y la mezcla de la derivación en la planta. Por ejemplo, un aumento de 2 grados en la temperatura del agua helada puede aumentar la energía del ventilador de la unidad de tratamiento de aire de volumen de aire variable en un 30% en condiciones de carga de diseño. Esta pérdida de eficiencia se puede cuantificar directamente utilizando cálculos básicos de intercambiadores de calor. Cabe señalar que el trabajo en el lado del aire y la energía se ven afectados por el Síndrome de bajo Delta T de la misma manera que otros intercambiadores de calor del sistema con una pérdida de capacidad de suministro y un mayor consumo de energía.

- 30
- 35

La ecuación de transferencia de calor  $Q = U \cdot A \cdot LMTD$ , donde Q es el calor total transferido, U es el coeficiente de transferencia de calor total del material del intercambiador de calor, A es el área de superficie del intercambiador de calor y LMTD es la diferencia de temperatura media logarítmica, es una forma de observar los efectos del Síndrome de bajo Delta T en los serpentines de agua helada del tratamiento de aire. En los serpentines de agua helada, LMTD describe la relación entre el lado del aire de entrada/salida y el lado del agua de entrada/salida. En el contexto de los sistemas de Flujo a Demanda en los que el agua helada se mueve más lentamente (mayor Delta T), hay algunas consideraciones de que el coeficiente de transferencia de calor global, U, se reduce, lo que resulta en un rendimiento menos eficiente del serpentín. Si bien puede ser cierto que la U se reduce, está más que compensada por los efectos del suministro de agua helada más fría en un sistema de Flujo a Demanda, que se refleja en el LMTD más alto. En efecto, el LMTD más alto compensa con creces cualquier reducción teórica en U como se ve en el siguiente ejemplo.

- 40
- 45

Más específicamente, el análisis LMTD muestra que reducir CHWS en el serpentín mediante la reducción de los puntos de ajuste del enfriador o la eliminación de la mezcla de la derivación de la

planta puede mejorar dramáticamente el rendimiento del serpentín. La gráfica de la Figura 22 proporciona un análisis LMTD que detalla los posibles cambios en la capacidad del serpentín del lado del aire en el Flujo a Demanda. Con los datos ejemplares de la Figura 22, se logra un aumento de capacidad del 25%.

- 50

La Figura 23A ilustra la relación entre el flujo de agua helada y el Delta T en un sistema con Síndrome de bajo Delta T. La Figura 23B ilustra un serpentín del Sistema de Flujo a Demanda con temperaturas de suministro de agua helada decrecientes y GPM asociados a una temperatura de retorno de agua helada constante y a la carga. La Figura 23C



ilustra el potencial de aumento de la capacidad del serpentín en los flujos de agua helada de diseño con disminución de las temperaturas del suministro de agua helada. Este ejemplo ilustra la flexibilidad de una estrategia de funcionamiento del Flujo a Demanda para superar los problemas particulares en un sistema dado.

5 La carga total de enfriamiento en el lado del aire se calcula mediante la ecuación  $Q_t = 4.5 \cdot CFM \cdot (h_1 - h_2)$ , donde la entalpía del aire entrante es  $h_1$  y la entalpía del aire saliente es  $h_2$ . Por ejemplo, en base a esta fórmula y a las siguientes suposiciones, se puede calcular/cuantificar la utilización de la energía del ventilador después de que se aplique el Flujo a Demanda.

- El promedio mensual de carga ( $Q_t$ ) de la unidad de tratamiento de aire (AHU) se conoce a partir del análisis anterior.
- El AHU CFM es lineal a la carga.

10 • La entalpía del aire entrante ( $h_1$ ) AHU se conoce por la información de diseño o por la medición directa.

Sobre la base de lo anterior, el promedio mensual de AHU CFM se puede determinar mediante la ecuación,  $CFM_{avg} = CFM_{design} \cdot \left(\frac{Q_{t_{avg}}}{Q_{t_{max}}}\right)$ , donde  $Q_{t_{avg}}$  es el promedio mensual de AHU  $Q_t$  y  $Q_{t_{max}}$  es el máximo de AHU  $Q_t$ . El promedio mensual de la entalpía del aire saliente se puede determinar mediante la ecuación,  $h_{2_{avg}} = h_1 + \left(\frac{Q_{t_{avg}}}{4.5}\right) \cdot CFM_{avg}$ , donde  $Q_{t_{avg}}$  es el promedio mensual de AHU  $Q_t$  y  $CFM_{avg}$  es el promedio mensual de AHU CFM. Cabe señalar que el valor 4.5 es una constante que se puede ajustar para la ubicación del sitio según la densidad del aire.

15 Los datos de ejemplo en la Figura 24 ilustran los resultados de estos cálculos y suposiciones para un sistema que tiene una carga máxima conectada de 1000 Tons a 315,000 CFM. El lado de aire mínimo CFM es del 35% y el mínimo AHU SAT es el que se indica. Como se puede ver, el Flujo a Demanda ofrece numerosas ventajas.

## V. VENTAJAS ESPECÍFICAS ÚNICAS PARA EL FLUJO A DEMANDA

20 Como se puede ver en lo anterior, el Flujo a Demanda ofrece una estrategia de funcionamiento única en la industria de HVA/C. Además, el Flujo a Demanda y su estrategia de funcionamiento es la primera que específicamente:

1. Utiliza operaciones de control externo en los subsistemas de bombeo de producción de agua helada para optimizar el sobrecalentamiento del refrigerante en el evaporador, o la entalpía del refrigerante que sale del evaporador, por lo tanto, influye de manera beneficiosa en el componente de flujo másico en el uso de energía del compresor. Controlar las bombas de agua helada, como puede ser a través de VFDs, cerca o en el Delta T del evaporador diseñado por el fabricante (por ejemplo, diseño Delta T) mediante el uso de las operaciones de bombeo de agua helada del Flujo a Demanda, que controla el sobrecalentamiento del refrigerante en las condiciones de diseño del fabricante del enfriador, independientemente del porcentaje de carga en el enfriador en cualquier momento. Esto optimiza la entalpía del refrigerante que sale del evaporador y reduce la energía del compresor del enfriador en comparación con un enfriador que funciona por debajo del Delta T de diseño (es decir, bajo Delta T).

30 El Flujo a Demanda también utiliza operaciones de control externo en los subsistemas de bombeo de distribución de agua helada para lograr el diseño Delta T independientemente de las condiciones de carga de la planta de agua helada, eliminando así el Síndrome de bajo Delta T en el subsistema de agua del enfriador.

2. Utiliza operaciones de control externo en los subsistemas de bombeo de agua del condensador y del ventilador de la torre de enfriamiento para optimizar el subenfriamiento del refrigerante del condensador o la entalpía del refrigerante que sale del condensador (y entra en el evaporador). De esta manera, el componente de flujo másico de la ecuación de energía del compresor, como se describe anteriormente, se ve beneficiosamente influenciado. Las operaciones de control de Flujo a Demanda en los subsistemas de bombeo de agua del condensador y de ventilador de la torre de enfriamiento generalmente determinan el diferencial de presión/ temperatura saturada de funcionamiento final entre el evaporador y el condensador en el enfriador (es decir, la elevación). Esto influye de manera beneficiosa en los componentes de flujo másico y elevación de la ecuación de energía del compresor, tratado anteriormente.

35 Como se ha indicado, la presión saturada del evaporador se puede considerar una constante relativa porque las condiciones de entrada y salida de agua helada se mantienen constantes. Sin embargo, las temperaturas de entrada de agua al condensador y las presiones cuando usan bombas de agua de condensador de volumen constante varían de acuerdo con las condiciones ambientales y de carga. Por lo tanto, las condiciones de presión saturada del condensador pueden manipularse, a través de la temperatura de salida del agua del condensador, para controlar el diferencial de presión mínimo requerido por el fabricante del enfriador. Las operaciones de flujo variable Delta T constante del Flujo a Demanda controla las bombas de agua del condensador, como a través de VFDs, para mantener el diferencial de presión mínimo del fabricante (es decir, la elevación) entre el evaporador y el condensador en todo momento. El Flujo a Demanda también hace coincidir el flujo de agua del condensador con la carga del enfriador, de

50

- esta manera reduce el flujo de agua del condensador a través de la torre de enfriamiento en todas las condiciones de carga parcial. Como se indicó, las condiciones de carga parcial existen aproximadamente el 90% del tiempo en la mayoría de las plantas de agua helada. A medida que se reduce el flujo de agua del condensador, también se reduce la temperatura del sumidero de la torre de enfriamiento que se acerca al bulbo húmedo. Esto es casi una relación lineal con aproximadamente la mitad de la temperatura que se acerca al diseño original de la torre de enfriamiento. Esto produce temperaturas más bajas en el sumidero de la torre de enfriamiento a cualquier carga parcial dada con la misma energía del ventilador de la torre de enfriamiento. A su vez, las temperaturas más bajas del sumidero de la torre de enfriamiento dan como resultado menores temperaturas de entrada del agua del condensador en el condensador, lo que proporciona un subenfriamiento del refrigerante en el condensador.
- 5
- 10 Además, el Flujo a Demanda utiliza operaciones de control externo en el subsistema de bombeo de agua del condensador para lograr un diseño Delta T o cerca del mismo para un condensador independientemente de las condiciones de carga del enfriador, eliminando así el Síndrome de bajo Delta T en el subsistema de agua del condensador.
- 15 3. Utiliza operaciones de control de colaboración externa entre los circuitos de producción y distribución para equilibrar el flujo entre los enlaces, minimizando o eliminando el exceso de flujo y la mezcla de la derivación que contribuyen al Síndrome de bajo Delta T, como en una planta de agua helada desacoplada. Esto produce la mayor capacidad de suministro del lado del aire a cualquier caudal de agua helada dada. Esto también permite que el bombeo de circuito primario o de producción cumpla con las condiciones de carga variable del sistema de bombeo de distribución. Bajo el Flujo a Demanda, el síndrome de bajo Delta se reduce a su nivel más bajo alcanzable, si no se elimina efectivamente.
- 20 4. Utiliza los reinicios de zonas críticas para satisfacer los aumentos de demanda de refrigeración y al mismo tiempo controlar el bombeo de agua helada según una línea Delta T. Los reinicios de zona crítica también se pueden usar para disminuir el rendimiento de refrigeración al reiniciar la línea Delta T.
- 25 5. Hace funcionar las plantas de agua helada y sus componentes a presiones mínimas de bombeo de carga parcial para minimizar la derivación de la válvula de agua helada y el enfriamiento excesivo resultante, disminuyendo así la carga del sistema.
6. Produce una reducción sinérgica en la utilización de energía de la planta de agua helada, así como un aumento en la capacidad de suministro al sincronizar el bombeo de agua helada, el bombeo de agua del condensador, el funcionamiento del compresor, el funcionamiento de la torre de enfriamiento y el funcionamiento del lado del aire.
- 30 Aunque se han descrito varias realizaciones de la invención, será evidente para los expertos en la técnica que son posibles muchas más realizaciones e implementaciones que están dentro del alcance de esta invención. Además, las diversas características, elementos y realizaciones descritas aquí pueden reivindicarse o combinarse en cualquier combinación o disposición.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para el funcionamiento eficiente de una planta de agua helada que incluye:

la configuración del Delta T de agua helada que tiene una temperatura de entrada del agua helada y una temperatura de salida del agua helada en uno o más componentes de la planta de agua helada;

5 el control del caudal de agua helada a través de uno o más componentes con el fin de mantener el Delta T de agua helada a través de uno o más componentes, donde el caudal de agua helada se controla mediante una o más bombas de agua helada (116, 120, 204); y

10 la realización de un reinicio de zona crítica para ajustar el Delta T de agua helada cuando se producen uno o más eventos de activación, en donde este o estos eventos de activación contienen al menos uno de los grupos que consisten en la abertura de una válvula de agua helada de la unidad de tratamiento de aire (124) más allá de un cierto umbral, el aumento de la temperatura del agua helada en una derivación (128) de la planta de agua helada, la  
15 disminución de la temperatura del agua helada en una derivación (128) de la planta de agua helada y el cambio de caudal de una bomba terciaria (204) más allá de un cierto umbral, en el que Delta T de agua helada se reinicia mediante una acción seleccionada a partir de un grupo que consiste en el ajuste de la temperatura de entrada del agua helada y en el ajuste de la temperatura de salida del agua helada;

en donde el control del caudal de agua helada por uno o más componentes para mantener el Delta T de agua helada reduce el síndrome de bajo Delta T en la planta de agua helada.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el Delta T de agua helada se mantiene en uno o más  
20 componentes de la planta de agua helada aumentando el caudal de agua helada para reducir el Delta T de agua helada y disminuyendo el caudal de agua helada para aumentar el Delta T de agua helada.

3. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además:

25 el establecimiento del Delta T del agua del condensador que comprende una temperatura de entrada baja del agua del condensador y una temperatura de salida del agua del condensador en un condensador (508), en donde el condensador (508) utiliza la temperatura de entrada baja del agua del condensador con el fin de proporcionar un subenfriamiento del refrigerante; y

el mantenimiento del Delta T del agua del condensador al ajustar el caudal de agua del condensador a través del condensador (508), en donde el caudal de agua del condensador se ajusta a través de una o más bombas de agua del condensador (516).

30 4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes para el funcionamiento de una o más bombas (116, 120, 204) de una planta de agua helada que comprende:

el bombeo de agua con un primer caudal a través de un enfriador (112) con una primera bomba (116);

35 el ajuste del primer caudal para mantener el primer Delta T en el enfriador (112), donde el primer Delta T incluye una temperatura de entrada del enfriador (112) y una temperatura de salida del enfriador (112) que proporciona el sobrecalentamiento del refrigerante en un evaporador (512) del enfriador (112), independientemente de las condiciones de carga de la planta de agua helada;

el bombeo de agua con un segundo caudal a través de una unidad de tratamiento de aire (AHU) con una segunda bomba (120);

40 el ajuste del segundo caudal para mantener el segundo Delta T en la unidad de tratamiento de aire (AHU), en el que el segundo Delta T incluye una temperatura de entrada de la unidad de tratamiento de aire (AHU) y una temperatura de salida de la unidad de tratamiento de aire (AHU), que proporciona el rendimiento de refrigeración deseado a la unidad de tratamiento de aire (AHU) independientemente de las condiciones de carga de la planta de agua helada;

en donde el primer Delta T y el segundo Delta T son similares con el fin de equilibrar el primer caudal y el segundo caudal y para reducir la mezcla de la derivación (128) en la derivación (128) de la planta de agua helada.

5. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que el primer Delta T y el segundo Delta T son idénticos.

45 6. Procedimiento según la reivindicación 4, que comprende además el aumento del segundo caudal al reiniciar el segundo Delta T cuando una válvula de agua de la unidad de tratamiento de aire (124) se abre más allá de un cierto

umbral, y en el que el aumento del segundo caudal aumenta el rendimiento de refrigeración del tratamiento del aire (124).

7. Procedimiento según la reivindicación 4, que comprende además:

5 el bombeo de agua a través de un circuito de distribución de la planta de agua helada hacia la segunda bomba (120) a un tercer caudal con una tercera bomba (204);

el ajuste del tercer caudal para conservar un tercer Delta T;

el aumento del tercer caudal para reiniciar el tercer Delta T cuando el segundo caudal proporcionado por la segunda bomba (120) está por encima de un cierto umbral, en el que al aumentar el tercer caudal aumenta la capacidad de enfriamiento del tratamiento de aire (124).

10 8. Procedimiento según la reivindicación 4, que comprende, además:

el bombeo del agua del condensador con un cuarto caudal a través del condensador (508) del enfriador (112) con una cuarta bomba; y

15 el ajuste del cuarto caudal para mantener un cuarto Delta T en el condensador (508) en el que el cuarto Delta T incluye una temperatura de entrada de agua del condensador y una temperatura de salida de agua del condensador que proporciona un subenfriamiento al refrigerante y evita el apilamiento de refrigerante, independientemente de las condiciones de carga de la planta de agua helada.

9. Un controlador (1004) para controlar una o más bombas (116, 120, 204) de una planta de agua helada que comprende:

una entrada (1020) configurada para recibir información del sensor de uno o más sensores (1028);

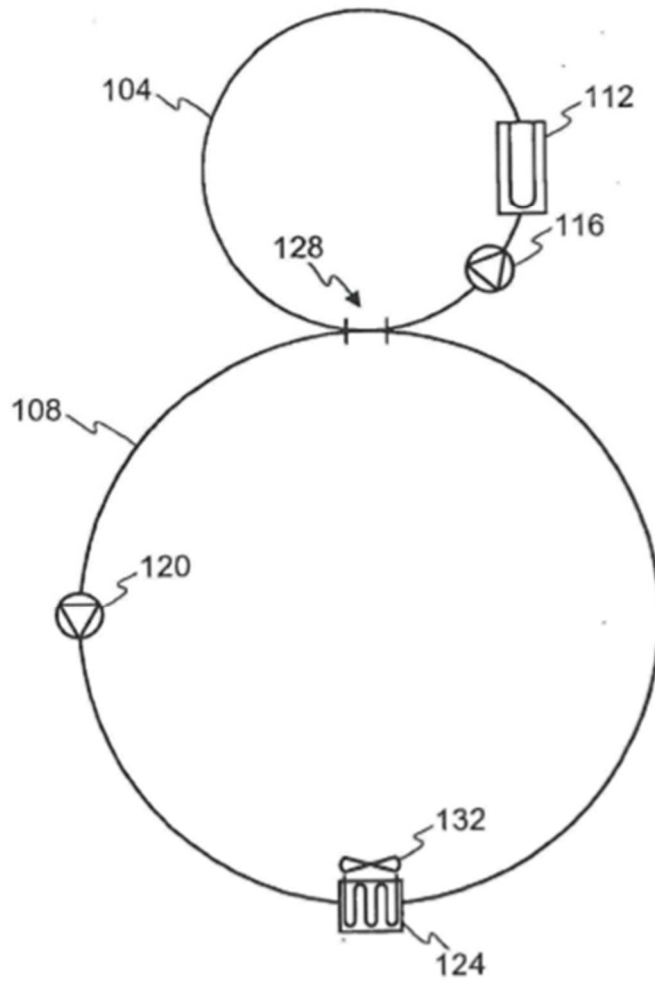
20 un procesador (1004) configurado para controlar el caudal proporcionado por una o más bombas (116, 120, 204) para mantener el Delta T a través de un componente de la planta de agua helada, en donde el procesador (1004) aumenta o disminuye el caudal con el fin de mantener el Delta T en base a la información del sensor y genera una o más señales con el fin de controlar el caudal proporcionado por una o más bombas (116, 120, 204), el Delta T incluye una temperatura de entrada y una temperatura de salida;

25 una salida (1024) configurada para enviar una o más señales a una o más bombas (116, 120, 204), en la que el procesador (1004) está configurado para realizar un reinicio de zona crítica con el fin de ajustar el Delta T de agua helada cuando se producen uno o más eventos de activación, en donde el o los eventos de activación comprenden al menos uno de los siguientes grupos que consiste en la apertura de una válvula de agua helada de la unidad de tratamiento de aire (124) más allá de un cierto umbral, el aumento de la temperatura del agua helada en una derivación (128) de la planta de agua helada, la disminución de la temperatura del agua helada en una derivación (128) de la planta de agua helada y un cambio del caudal de una bomba terciaria (204) más allá de un cierto umbral.

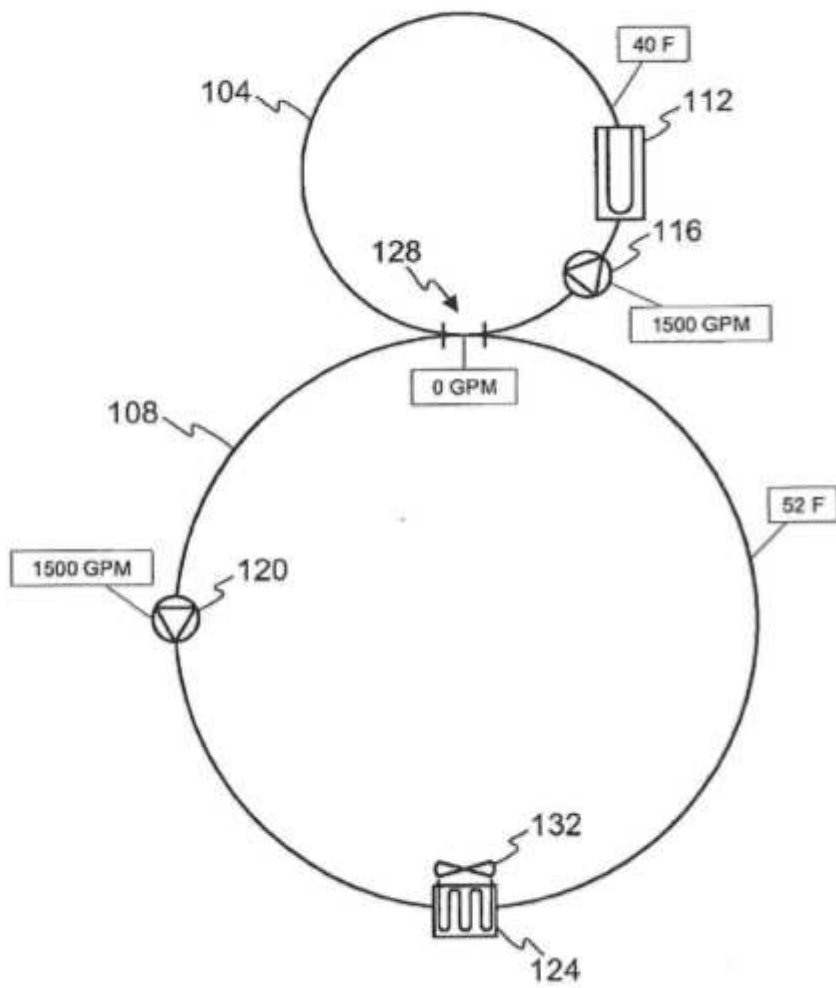
30 10. El controlador según la reivindicación 9, en el que el procesador está configurado para realizar un reinicio de zona crítica al reducir el Delta T en respuesta a la información del sensor que indica que se desea una capacidad de refrigeración adicional en el componente.

35 11. El controlador según la reivindicación 9, en el que el procesador (1004) está configurado para mantener el Delta T controlando la temperatura de salida del Delta T, en el que la temperatura de salida se controla ajustando el caudal con la ayuda de un componente de la planta de agua helada.

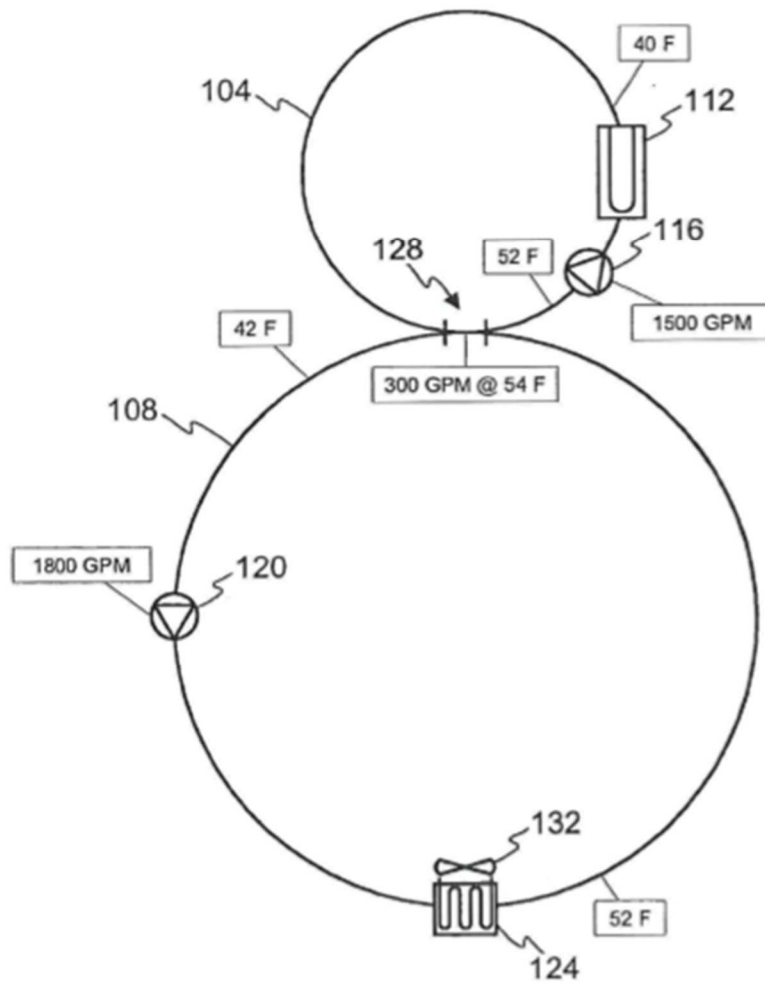
**Fig. 1**



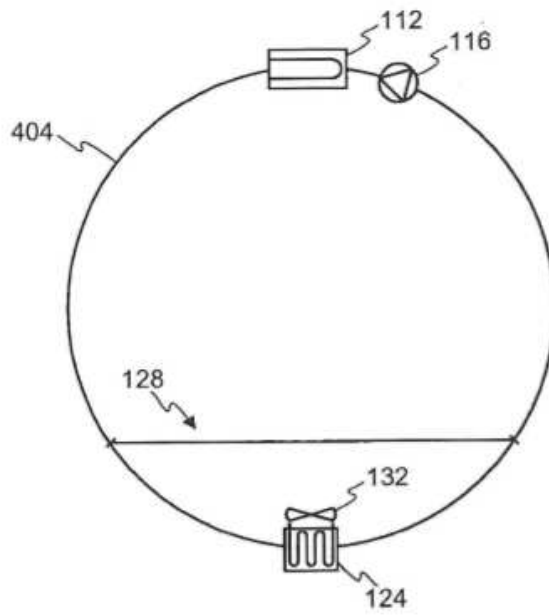
**Fig. 2**



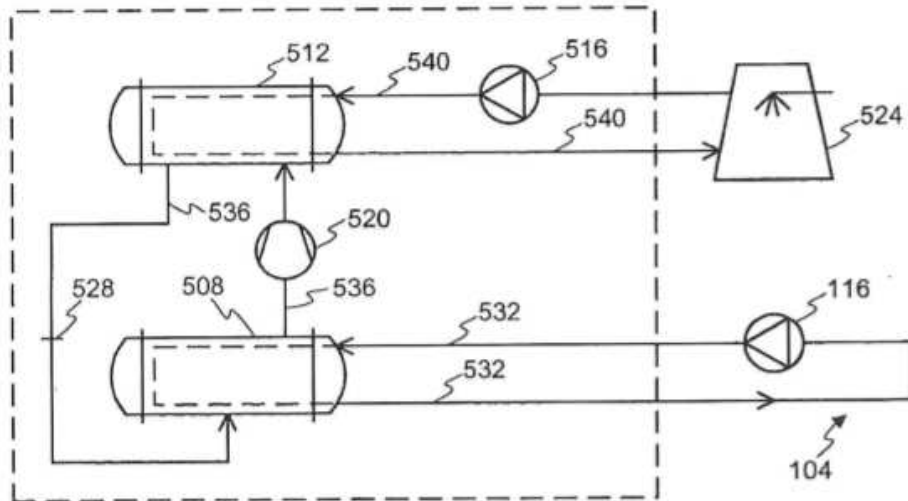
**Fig. 3**



**Fig. 4**

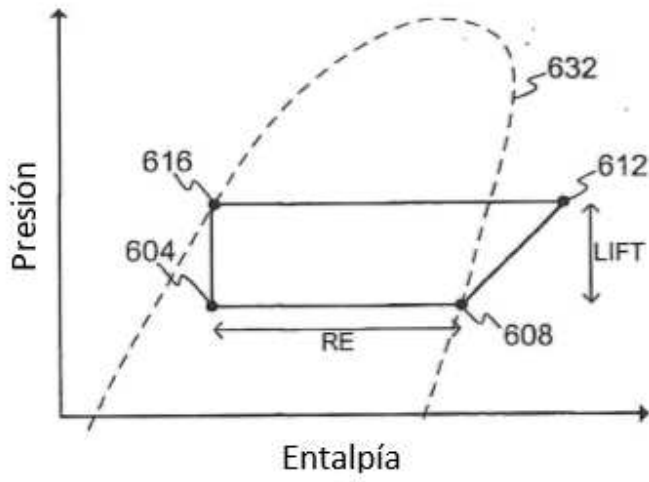


**Fig. 5**

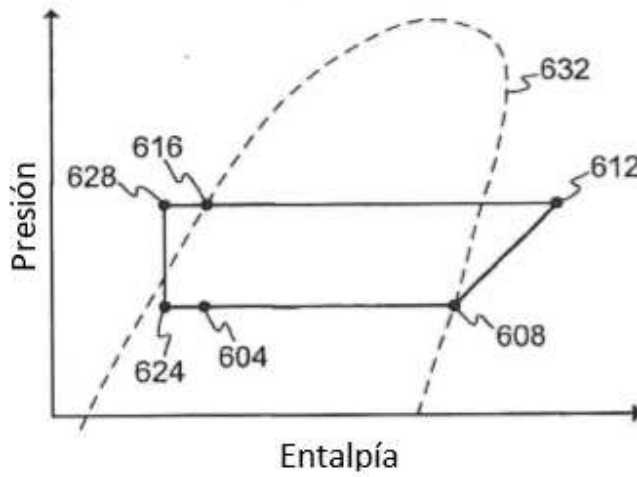




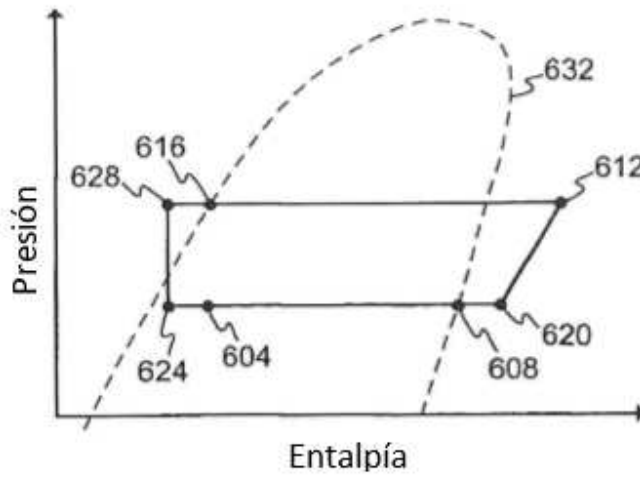
**Fig. 6A**



**Fig. 6B**



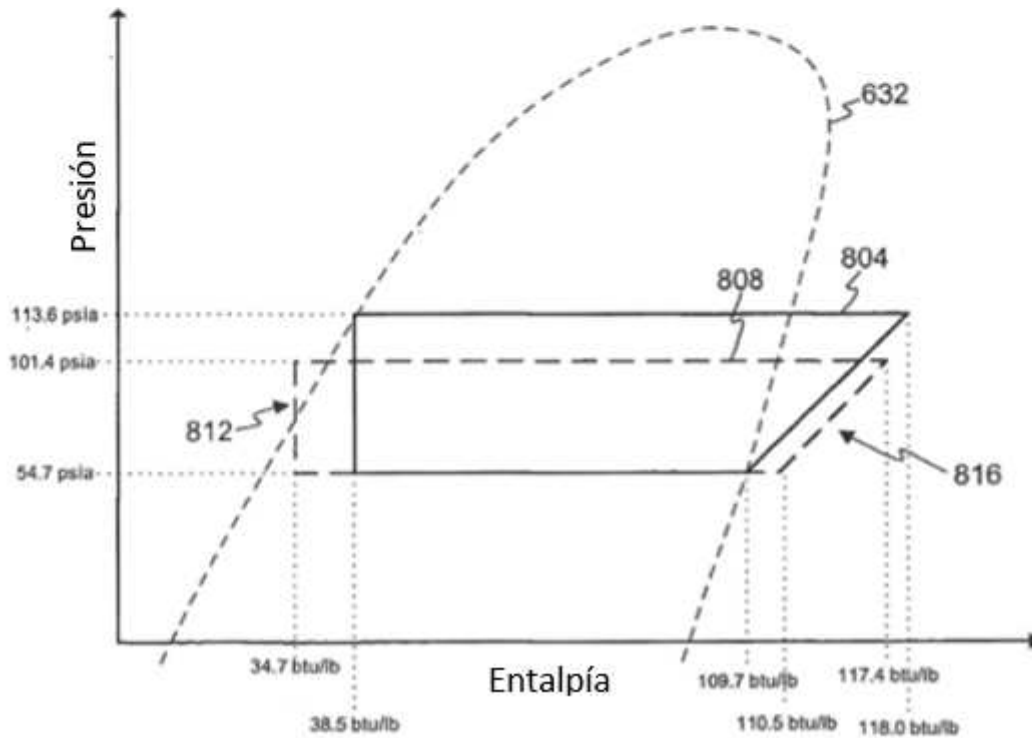
**Fig. 6C**

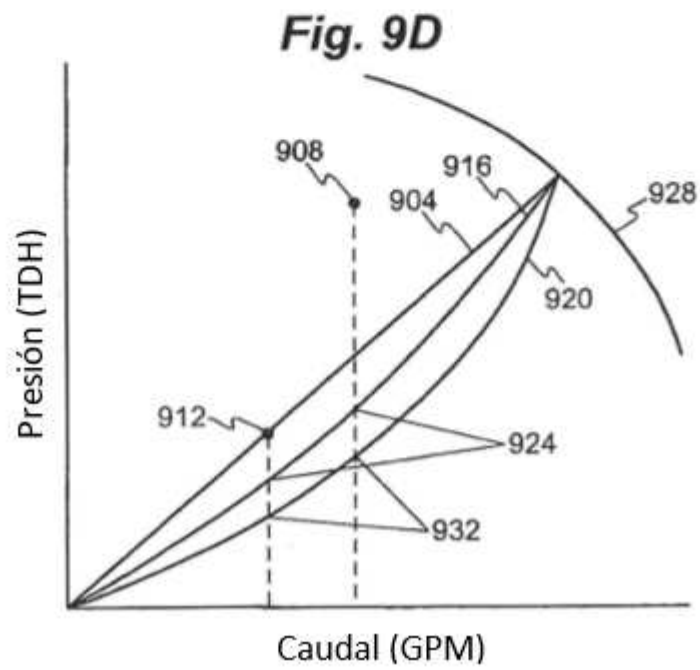
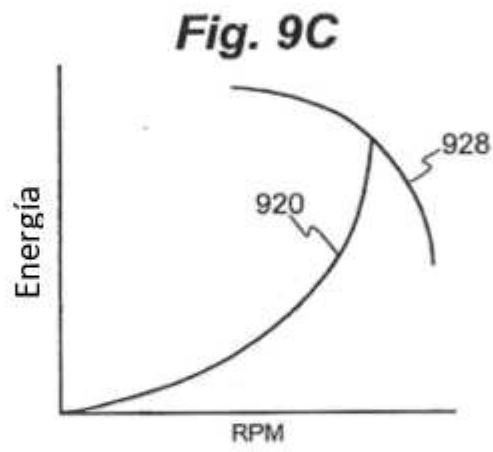
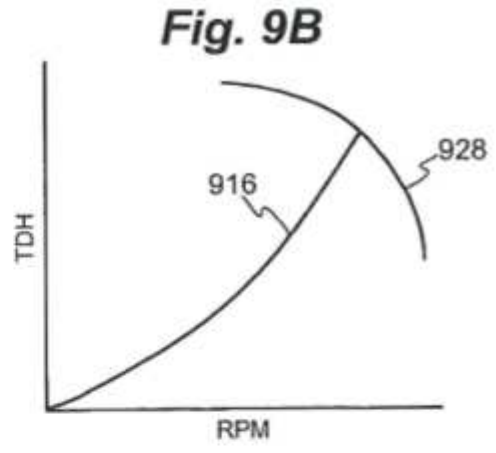
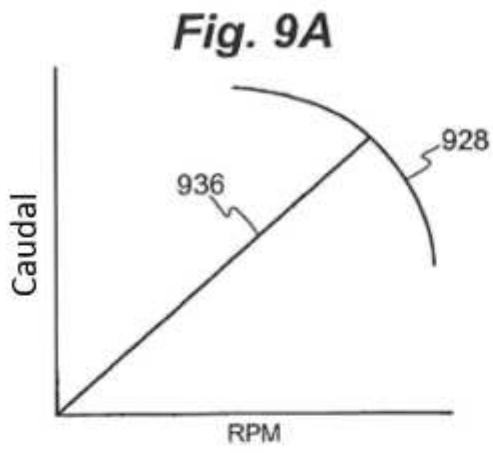


**Fig. 7**

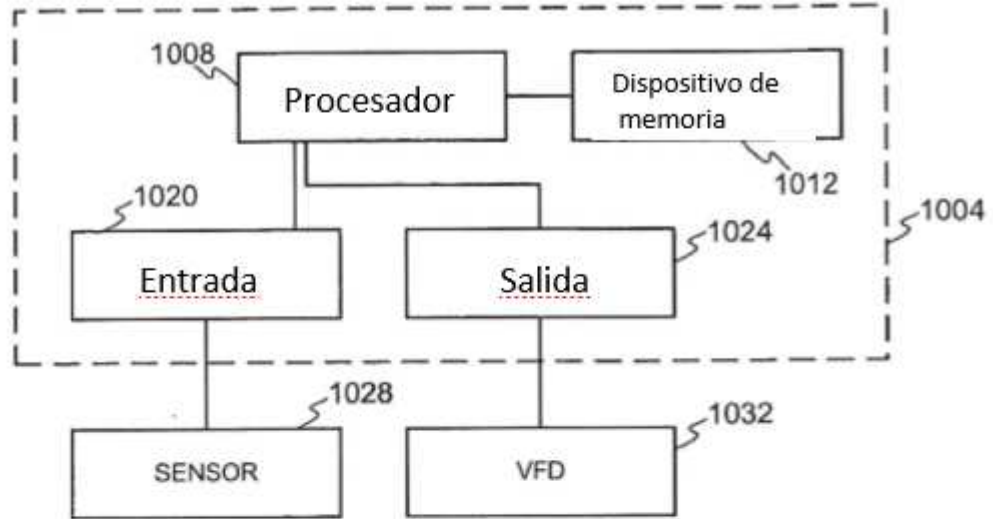
|                                     |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temperatura CWE                     | 61.00 | 64.97 | 67.20 | 75.00 | 78.00 | 80.00 | 83.00 |
| Temperatura CWL                     | 75.00 | 79.59 | 81.20 | 89.00 | 92.00 | 94.00 | 97.00 |
| Bomba de agua helada KW             | 46    | 54    | 65    | 49    | 55    | 59    | 48    |
| Temperatura CWL                     | 26    | 27    | 31    | 27    | 28    | 29    | 29    |
| Enfriador KW                        | 1027  | 1217  | 1321  | 1423  | 1555  | 1605  | 1571  |
| Ventilador de la torre KW           | 228   | 198   | 118   | 57    | 33    | 23    | 18    |
| Planta completa KW                  | 1327  | 1496  | 1535  | 1556  | 1671  | 1696  | 1666  |
| Sistema Tons                        | 2130  | 2364  | 2408  | 2193  | 2353  | 2356  | 2201  |
| Sistema KW/Ton                      | 0.623 | 0.633 | 0.640 | 0.680 | 0.710 | 0.720 | 0.757 |
| Enfriador KW/Ton                    | 0.482 | 0.515 | 0.549 | 0.649 | 0.661 | 0.681 | 0.714 |
| CWP KW/Ton                          | 0.012 | 0.011 | 0.013 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.013 |
| CHWP KW/Ton                         | 0.022 | 0.023 | 0.027 | 0.022 | 0.023 | 0.025 | 0.022 |
| Ventilador CT KW/Ton                | 0.107 | 0.084 | 0.049 | 0.026 | 0.014 | 0.010 | 0.008 |
| Sistema KW/Ton                      | 0.623 | 0.633 | 0.637 | 0.710 | 0.710 | 0.728 | 0.757 |
| Capacidad enfriadores en línea %    | 59%   | 70%   | 75%   | 81%   | 87%   | 91%   | 93%   |
| Capacidad enfriadores en línea Tons | 3641  | 3401  | 3232  | 2724  | 2705  | 2603  | 2367  |
| Mayor eficiencia del sistema        | 18%   | 16%   | 16%   | 6%    | 6%    | 4%    | 0%    |
| Mayor eficiencia del enfriador      | 32%   | 28%   | 23%   | 9%    | 7%    | 5%    | 0%    |
| Mayor capacidad del enfriador       | 54%   | 44%   | 37%   | 15%   | 14%   | 10%   | 0%    |

**Fig. 8**

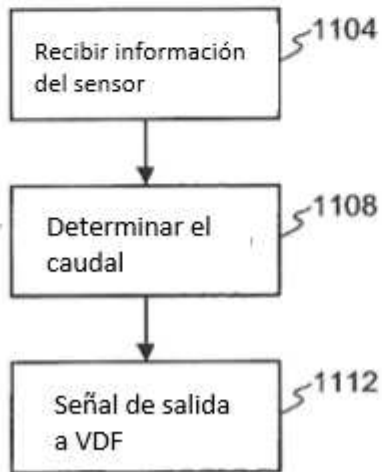




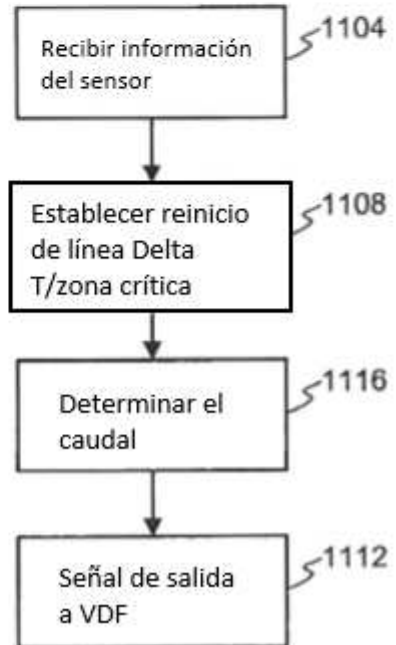
**Fig. 10**



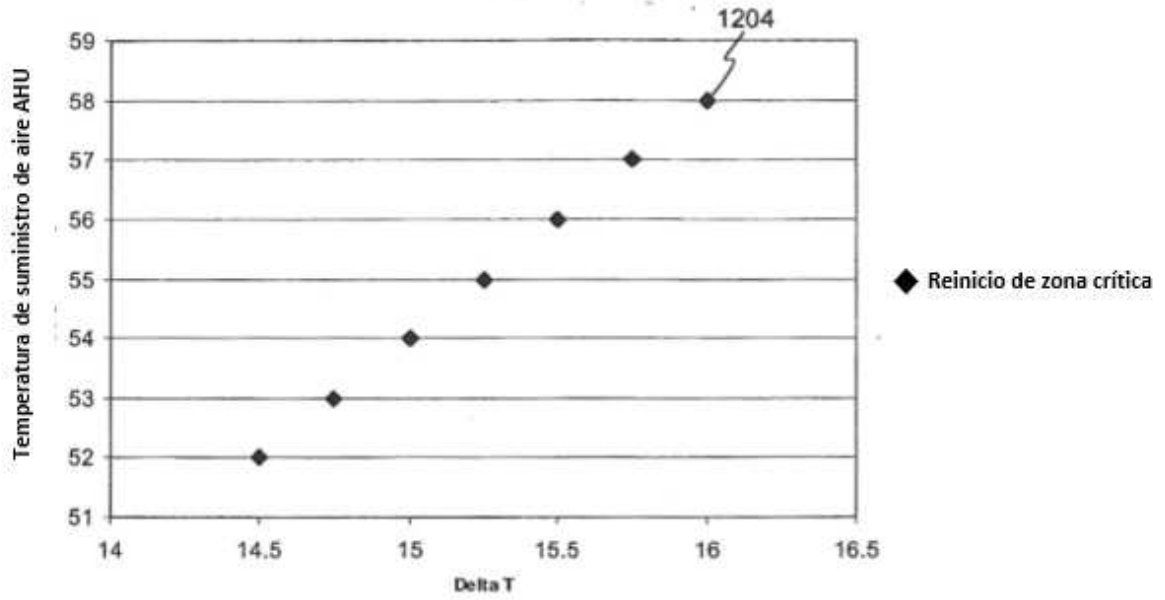
**Fig. 11A**



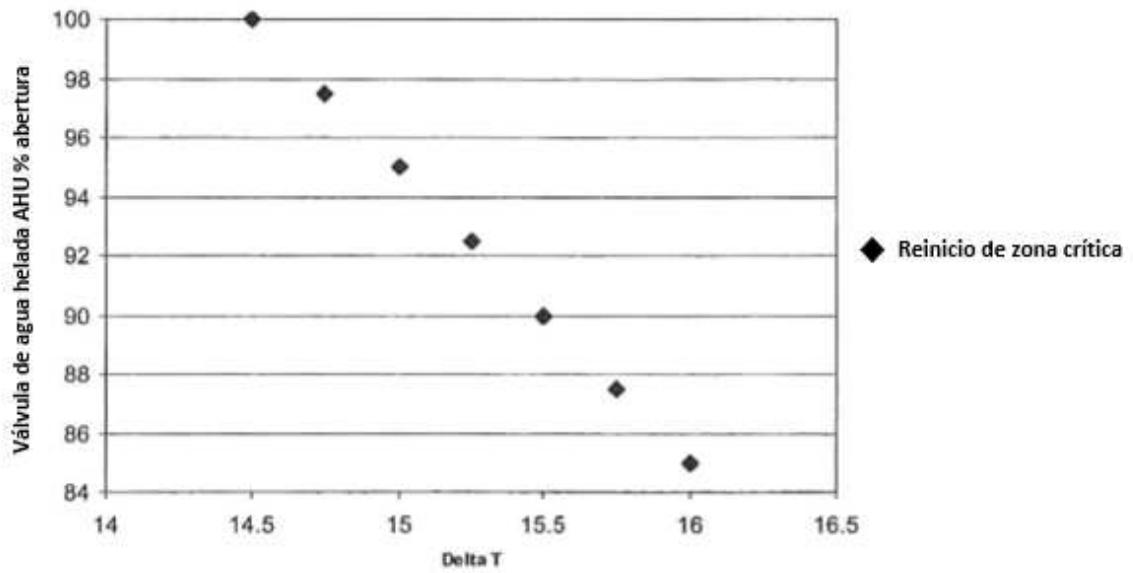
**Fig. 11B**



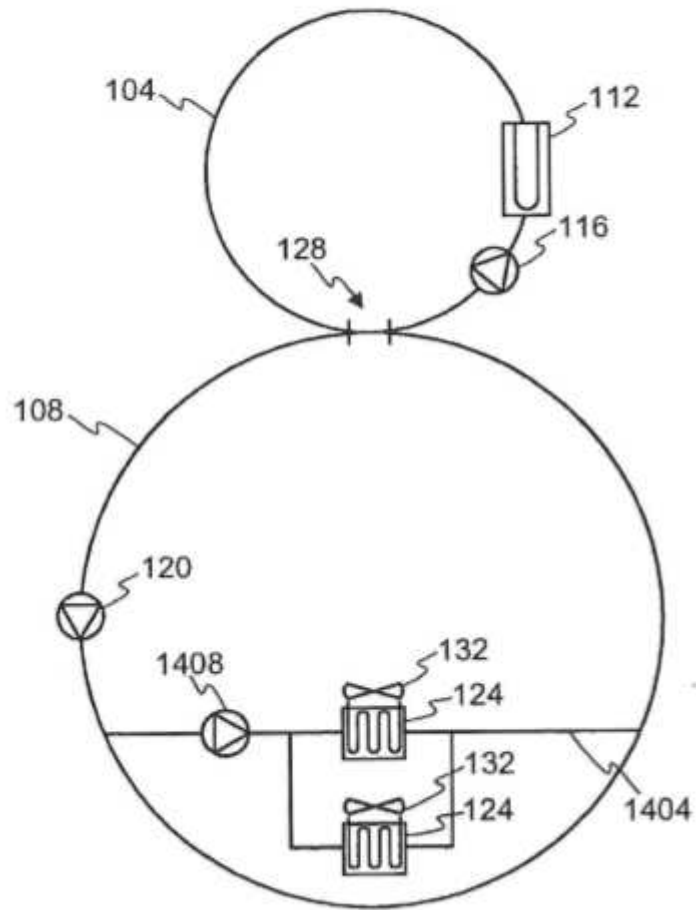
**Fig. 12**



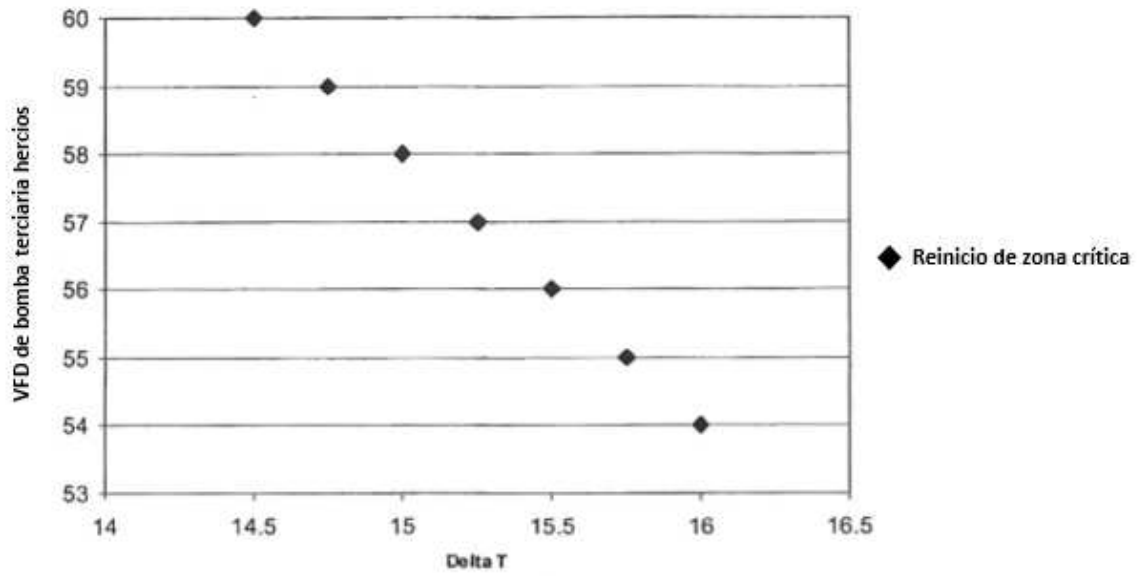
**Fig. 13**



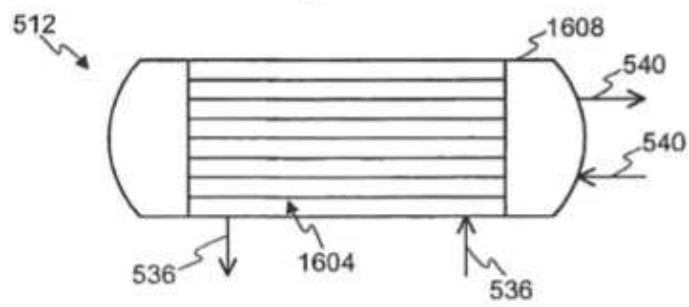
**Fig. 14**



**Fig. 15**



**Fig. 16**



**Fig. 17**

| Evaporador     |             |             |               |               |                       | Condensador |             |              |              |                      |               |              |                    |  |
|----------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------------------|---------------|--------------|--------------------|--|
| comp<br>kw/ton | dws<br>temp | chw<br>temp | e sat<br>temp | e sat<br>psia | superheat<br>enthalpy | cws<br>temp | cwr<br>temp | csat<br>temp | csat<br>psia | sub cool<br>enthalpy | RE<br>btu/ lb | disc<br>temp | d temp<br>enthalpy |  |
| 0.700          | 43          | 54          | 45            | 55            | 110.50                | 85          | 95          | 97           | 133          | 40.50                | 70.00         | 127          | 118.60             |  |
|                |             |             | B             |               | C                     |             |             | E            |              | A                    |               |              | D                  |  |
| 0.680          | 43          | 48          | 45            | 55            | 109.70                | 79          | 85          | 87           | 114          | 38.50                | 71.20         | 117          | 118.00             |  |
|                |             |             | b             |               | c                     |             |             | e            |              | a                    |               |              | D                  |  |
| 0.531          | 43          | 54          | 45            | 55            | 110.50                | 68          | 78          | 80           | 101          | 34.70                | 75.80         | 110          | 117.40             |  |
| 0.341          | 38          | 54          | 40            | 50            | 110.50                | 49          | 59          | 61           | 73           | 28.40                | 82.10         | 81           | 115.30             |  |

**Fig. 18**

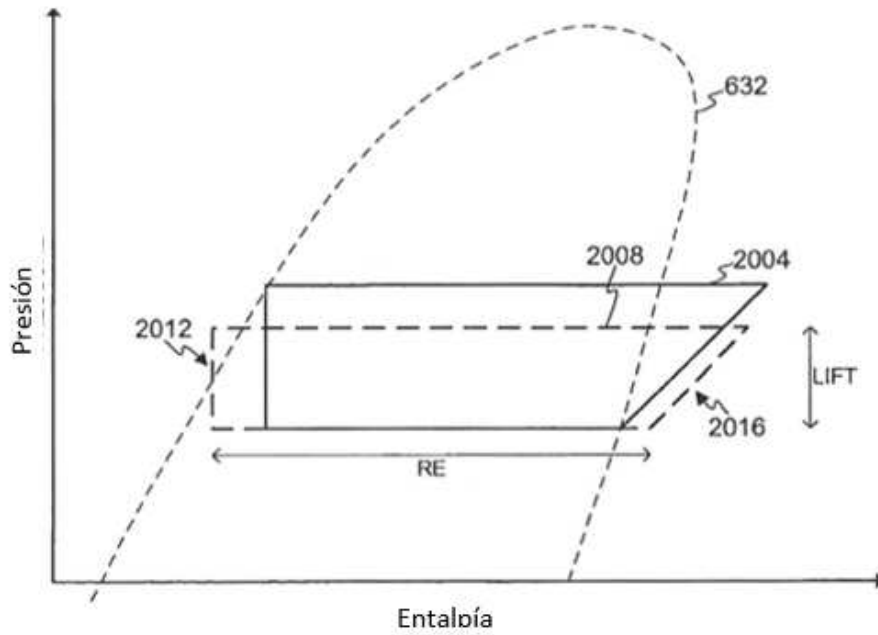
| Condensador de agua de flujo constante |      |      |      |         |
|--|------|------|------|---------|
| TONS                                   | GPM  | CWET | CWLT | DELTA T |
| 1000                                   | 2400 | 85   | 95   | 10      |
| 900                                    | 2400 | 80   | 89   | 9       |
| 800                                    | 2400 | 75   | 83   | 8       |
| 700                                    | 2400 | 70   | 77   | 7       |
| 600                                    | 2400 | 65   | 71   | 6       |
| 500                                    | 2400 | 60   | 65   | 5       |
| 400                                    | 2400 | 55   | 59   | 4       |
| 300                                    | 2400 | 50   | 53   | 3       |
| 200                                    | 2400 | 45   | 47   | 2       |



**Fig. 19**

|        | comp<br>kw/ton | Evaporador  |             |              |              |                       | Condensador |             |              |              |                     | Propiedades del refrigerante |              |                   |                 | CoP<br>(Ref) | Tons |
|--------|----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------------|------------------------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------|
|        |                | chw<br>temp | chr<br>temp | esat<br>temp | esat<br>psia | superheat<br>enthalpy | cws<br>temp | cwr<br>temp | csat<br>temp | csat<br>psia | subcool<br>enthalpy | RE<br>btu/lb                 | disc<br>temp | dtemp<br>enthalpy | heat of<br>comp |              |      |
| Diseño | 0.700          | 43          | 54          | 45           | 55           | 110.50                | 85          | 95          | 97           | 133          | 40.50               | 70.00                        | 127          | 118.90            | 8.40            | 8.33         | 440  |
| Pre    | 0.680          | 43          | 48          | 45           | 55           | 109.70                | 79          | 85          | 87           | 114          | 38.50               | 71.20                        | 117          | 118.00            | 8.30            | 8.58         | 239  |
| Post   | 0.531          | 43          | 54          | 45           | 55           | 110.50                | 68          | 78          | 80           | 101          | 34.70               | 75.80                        | 110          | 117.40            | 6.90            | 10.99        | 297  |
| Mejor  | 0.341          | 38          | 54          | 40           | 50           | 110.50                | 49          | 59          | 61           | 73           | 28.40               | 82.10                        | 91           | 115.30            | 4.80            | 17.10        | 641  |

**Fig. 20**



**Fig. 21**

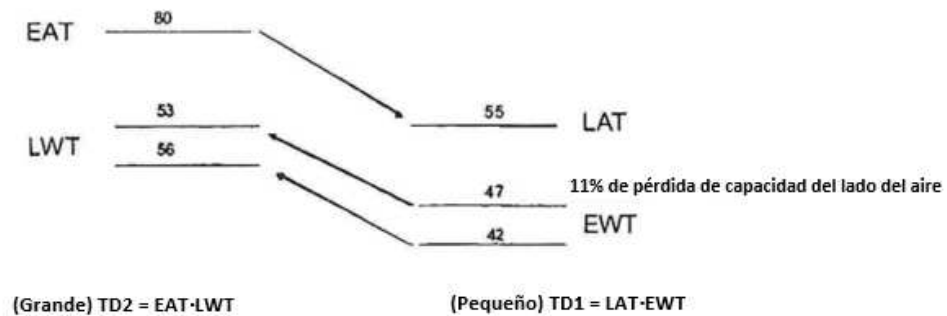
**Efecto en la energía y la capacidad por reducción de CWET en un Delta T constante**

|                                     | 61.00 | 64.97 | 67.20 | 75.00 | 78.00 | 80.00 | 83.00 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temperatura CWE                     |       |       |       |       |       |       |       |
| Temperatura CWL                     | 75.00 | 79.59 | 81.20 | 89.00 | 92.00 | 94.00 | 97.00 |
| Bomba de agua helada KW             | 46    | 54    | 65    | 49    | 55    | 59    | 48    |
| Temperatura CWL                     | 26    | 27    | 31    | 27    | 28    | 29    | 29    |
| Enfriador KW                        | 1027  | 1217  | 1321  | 1423  | 1555  | 1605  | 1571  |
| Ventilador de la torre KW           | 228   | 198   | 118   | 57    | 33    | 23    | 18    |
| Planta complete KW                  | 1327  | 1496  | 1535  | 1556  | 1671  | 1696  | 1666  |
| Sistema Tons                        | 2130  | 2364  | 2408  | 2193  | 2353  | 2356  | 2201  |
| Sistema KW/Ton                      | 0.623 | 0.633 | 0.640 | 0.680 | 0.710 | 0.720 | 0.757 |
| Enfriador KW/Ton                    | 0.482 | 0.515 | 0.549 | 0.649 | 0.661 | 0.681 | 0.714 |
| CWP KW/Ton                          | 0.012 | 0.011 | 0.013 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.013 |
| CHWP KW/Ton                         | 0.022 | 0.023 | 0.027 | 0.022 | 0.023 | 0.025 | 0.022 |
| Ventilador CT KW/Ton                | 0.107 | 0.084 | 0.049 | 0.026 | 0.014 | 0.010 | 0.008 |
| Sistema KW/Ton                      | 0.623 | 0.633 | 0.637 | 0.710 | 0.710 | 0.728 | 0.757 |
| Capacidad enfriadores en línea %    | 59%   | 70%   | 75%   | 81%   | 87%   | 91%   | 93%   |
| Capacidad enfriadores en línea Tons | 3641  | 3401  | 3232  | 2724  | 2705  | 2603  | 2367  |
| Mayor eficiencia del sistema        | 18%   | 16%   | 16%   | 6%    | 6%    | 4%    | 0%    |
| Mayor eficiencia del enfriador      | 32%   | 28%   | 23%   | 9%    | 7%    | 5%    | 0%    |
| Mayor capacidad del enfriador       | 54%   | 44%   | 37%   | 15%   | 14%   | 10%   | 0%    |

- |   |          |
|---|----------|
| (3) 100 HP CHWP en línea                | (300 HP) |
| (2) 200 HP CWP en línea                 | (400 HP) |
| (2) CVHE Trane 1250 en línea            | (320 HP) |
| (4) Evapco CT / 8 ventiladores en línea |          |

**Fig. 22**

**Oportunidad de capacidad del lado del aire**



Lado de agua Delta T de 8 grados, lado del aire de 25

$$LMTD = \frac{25 - 8}{\ln(25/8)} = 14.92$$

Lado de agua Delta T de 16 grados, Lado del aire de 25

$$LMTD = \frac{24 - 13}{\ln(24/13)} = 17.94$$

**Aumento de capacidad del 25%**

Fig. 23A

| A  | B    | C    | D    | E       |
|----|------|------|------|---------|
| 1  | Tons | CHWS | CHWR | Delta T |
| 2  | 42   | 100  | 45   | 55      |
| 3  | 38   | 100  | 45   | 54      |
| 4  | 33   | 100  | 45   | 53      |
| 5  | 29   | 100  | 45   | 52      |
| 6  | 25   | 100  | 45   | 51      |
| 7  | 21   | 100  | 45   | 50      |
| 8  | 17   | 100  | 45   | 49      |
| 9  | 13   | 100  | 45   | 48      |
| 10 | 8    | 100  | 45   | 47      |
| 11 | 4    | 100  | 45   | 46      |

Fig. 23B

| F  | G    | H   | I    | J    |
|----|------|-----|------|------|
| 1  | Tons | GPM | CHWS | CHWR |
| 2  | 42   | 100 | 45   | 55   |
| 3  | 42   | 92  | 44   | 55   |
| 4  | 42   | 84  | 43   | 55   |
| 5  | 42   | 78  | 42   | 55   |
| 6  | 42   | 72  | 41   | 55   |
| 7  | 42   | 67  | 40   | 55   |
| 8  | 42   | 63  | 39   | 55   |
| 9  | 42   | 59  | 38   | 55   |
| 10 | 42   | 56  | 37   | 55   |
| 11 | 42   | 53  | 36   | 55   |

Fig. 23C

| K  | L    | M   | N    | O    |
|----|------|-----|------|------|
| 1  | Tons | GPM | CHWS | CHWR |
| 2  | 42   | 100 | 45   | 55   |
| 3  | 46   | 100 | 44   | 55   |
| 4  | 50   | 100 | 43   | 55   |
| 5  | 54   | 100 | 42   | 55   |
| 6  | 58   | 100 | 41   | 55   |
| 7  | 63   | 100 | 40   | 55   |
| 8  | 67   | 100 | 39   | 55   |
| 9  | 71   | 100 | 38   | 55   |
| 10 | 75   | 100 | 37   | 55   |
| 11 | 79   | 100 | 36   | 55   |

Fig. 24

| A  | DATOS DE DISEÑO DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AIRE VAVVAIRE |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2  | C  | D      | E      | F      | G      | H      | I      | J      | K      | L      | M      | N      |
| 5  | 110250   | 126000 | 157500 | 189000 | 220500 | 252000 | 283500 | 315000 | 346500 | 378000 | 409500 | 441000 |
| 6  | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   | 55.0   |
| 7  | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   | 54.9   |
| 8  | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   | 23.1   |
| 9  | 300  | 400    | 500    | 600    | 700    | 800    | 900    | 1000   | 1000   | 800    | 600    | 400    |
| 10 | 6  | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     |
| 15 | 35%  | 35%    | 35%    | 35%    | 35%    | 35%    | 35%    | 35%    | 35%    | 35%    | 35%    | 35%    |
| 16 | 55   | 54     | 53     | 52     | 52     | 52     | 52     | 52     | 52     | 52     | 52     | 52     |
| 17 | 54.9   | 53.9   | 52.9   | 51.9   | 51.9   | 51.9   | 51.9   | 51.9   | 51.9   | 51.9   | 51.9   | 51.9   |
| 18 | 23.1   | 22.5   | 21.9   | 21.3   | 21.3   | 21.3   | 21.3   | 21.3   | 21.3   | 21.3   | 21.3   | 21.3   |
| 19 | 6  | 8      | 13     | 18     | 23     | 29     | 35     | 41     | 47     | 53     | 60     | 67     |
| 20 | 30.4   | 31.6   | 31.6   | 31.6   | 31.6   | 31.6   | 31.6   | 31.6   | 31.6   | 31.6   | 31.6   | 31.6   |
| 22 | 117531   | 137948 | 159012 | 182014 | 208016 | 236864 | 26864  | 30400  | 34200  | 38200  | 42400  | 46800  |
| 23 | 300  | 400    | 500    | 600    | 700    | 800    | 900    | 1000   | 1000   | 800    | 600    | 400    |