

Manual de experimentos

Revision: Dezember 2007, Dipl.-Ing. Frank Jebavy

Antes de la primera puesta en marcha del equipo lea atentamente las medidas de seguridad!

Indice General

1	Introducción.	1
1.1	Objetivos de las investigaciones	2
1.2	Uso conforme al previsto.	2
2	Descripción del equipo	3
2.1	Funcionamiento del equipo	3
2.1.1	Circuito de agua	3
2.1.2	Circuito de aire	4
2.2	Estructura del equipo	4
2.3	Magnitudes de medición	6
2.3.1	Disposición de los sensores de medición	8
2.4	Descripción de los componentes.	9
2.4.1	Columna de refrigeración	9
2.4.2	Caudalímetro	9
2.4.3	Sensor combinado temperatura-humedad	10
2.4.4	Bomba	10
2.4.5	Tobera de pulverización	11
2.4.6	Segregador de gotas	11
2.4.7	Calefacción.	11
2.4.8	Ventilador	12
2.5	Conservación/Mantenimiento	13
2.5.1	Generalidades	13
2.5.2	Filtro de agua	13
2.6	Puesta en marcha	14
2.6.1	Llenar/vaciar los depósitos de agua	15
2.6.2	Montaje de la columna de refrigeración	16
2.6.3	Conexión de los sensores de medición	16

2.6.4	Medición de pérdida de presión	17
2.6.5	Regulación de la corriente volumétrica del agua	17
2.7	Adquisición de datos de medición con PC	18
2.7.1	Instalación del software	18
2.8	Descripción y manejo del software WL 320	19
2.8.1	Diagrama del sistema	21
2.8.2	Diagrama de cálculo	22
2.8.3	Diagrama h,x	23
2.8.4	Gráfica	24
3	Seguridad	26
3.1	Peligros para la vida y la integridad física	26
3.2	Peligros para el equipo y su funcionamiento	27
4	Teoría	28
4.1	Generalidades	28
4.2	Cambios de estado del aire húmedo	29
4.2.1	Diagrama h,x	30
4.3	Magnitudes características	33
4.3.1	Caudal nominal	33
4.3.2	Anchura de zona frigorífica	33
4.3.3	Límite de enfriamiento	34
4.3.4	Acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo	35
4.3.5	Coficiente de enfriamiento	36
4.3.6	Pérdida de agua	36
4.3.7	Caudal calorífico	37
4.3.8	Densidad de lluvia	37
4.3.9	Densidad de empaquetadura	37
5	Ensayos	38
5.1	Introducción	38

5.2	Realización de ensayos.	39
5.3	Evaluación del ensayo.	39
5.3.1	Registro del proceso de refrigeración en el diagrama h,x.	40
5.3.2	Cálculo de la corriente volumétrica de aire.	42
5.3.3	Cálculo de la capacidad frigorífica	46
5.3.4	Cálculo del caudal calorífico	48
5.3.5	Cálculo del acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo	49
5.3.6	Cálculo del coeficiente de enfriamiento	49
5.3.7	Cálculo de la pérdida de agua	49
5.4	Determinación de las magnitudes características con diferentes columnas de refrigeración	50
5.4.1	Realización de ensayos	50
5.4.2	Evaluación del ensayo	52
5.4.3	Relación entre el acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo y la densidad de empaquetadura	54
6	Anexo	56
6.1	Datos técnicos.	56
6.2	Diagrama h,x para aire húmedo	59
6.3	Hojas de trabajo para el registro de valores de medición	60
6.4	Símbolos en las fórmulas y unidades	62
6.5	Referencias bibliográficas	64
6.6	Volumen de suministro	64

1 Introducción

En la industria se utilizan torres de refrigeración para evacuar el calor excedente del agua. Se emplean torres de refrigeración con circuito de agua abierto y cerrado. Ambos tipos trabajan como cambiadores de calor según el principio de contracorriente.

En la torre de refrigeración WL 320 se rocía agua desde arriba en la torre y se reparte en la mayor superficie posible mediante piezas agregadas. En la dirección contraria se sopla aire ambiente en la torre de refrigeración. Así se extrae calor de evaporación del agua y se humedece el aire. La parte de agua evaporada debe reponerse.

La **torre de refrigeración por agua WL 320** está pensada para transmitir el funcionamiento y las magnitudes características cualitativos y cuantitativos de una torre de refrigeración.

Todos los valores de medición necesarios son registrados por sensores de medición y visualizados en indicadores digitales. La evaluación de los resultados de ensayo está asistida por PC.

1.1 Objetivos de las investigaciones

El objetivo es investigar y comprender la influencia de

- la corriente volumétrica de aire
- la temperatura del agua refrigerante
- la corriente volumétrica del agua
- y la densidad de empaquetadura

sobre los parámetros de rendimiento de la torre de refrigeración. Para ello se representan también los cambios de estado del aire húmedo en el diagrama h,x .

1.2 Uso conforme al previsto

WL 320 es un banco experimental concebido para la enseñanza, especialmente para realizar ensayos en laboratorios de prácticas, con el objetivo de que pequeños grupos de estudiantes obtengan conocimientos de forma autónoma. La estructura total robusta y el fácil manejo apoyan este objetivo.

- 2 Descripción del equipo
- 2.1 Funcionamiento del equipo
- 2.1.1 Circuito de agua

El agua que se debe enfriar es tomada de un depósito de agua con calefactor por una bomba centrífuga y transportada al circuito. Durante este proceso, fluye regularmente por un filtro de agua instalado en la dirección de flujo, que filtra las partículas del agua.

El filtro de agua montado delante del caudalímetro impide que se tape la tobera dentro del caudalímetro, así como la tobera en la cabeza de la columna.

Una vez que se ha medido la temperatura del agua y que el agua se ha rociado homogéneamente sobre la primera fase de la columna de refrigeración mediante una tobera de pulverización, fluye por las superficies hasta la parte inferior de la columna. Cuando el agua sale de la columna se mide su temperatura y, finalmente, se alimenta de nuevo en el depósito de agua.

Durante este proceso se genera, mediante un ventilador, una corriente de aire que fluye en la dirección opuesta a la corriente de agua. En el proceso entran en contacto ambos fluidos. El tiempo de paso del agua y del aire se prolonga debido a la gran superficie de la columna de refrigeración, para apoyar así la transferencia de calor mediante un intercambio de materia.

Las cantidades de agua absorbidas por el aire deben compensarse rellenado con agua del depósito de reserva.

2.1.2 Circuito de aire

El aire ambiente es aspirado mediante un ventilador e introducido en la columna de refrigeración a través de una cámara de aire. Aquí se miden la temperatura y la humedad relativa del aire. Gracias al remolino del aire dentro de la cámara de aire, se logra una distribución homogénea del aire a lo largo de toda la sección transversal de la columna de refrigeración. La corriente volumétrica del aire se puede variar mediante una válvula mariposa en la salida del ventilador.

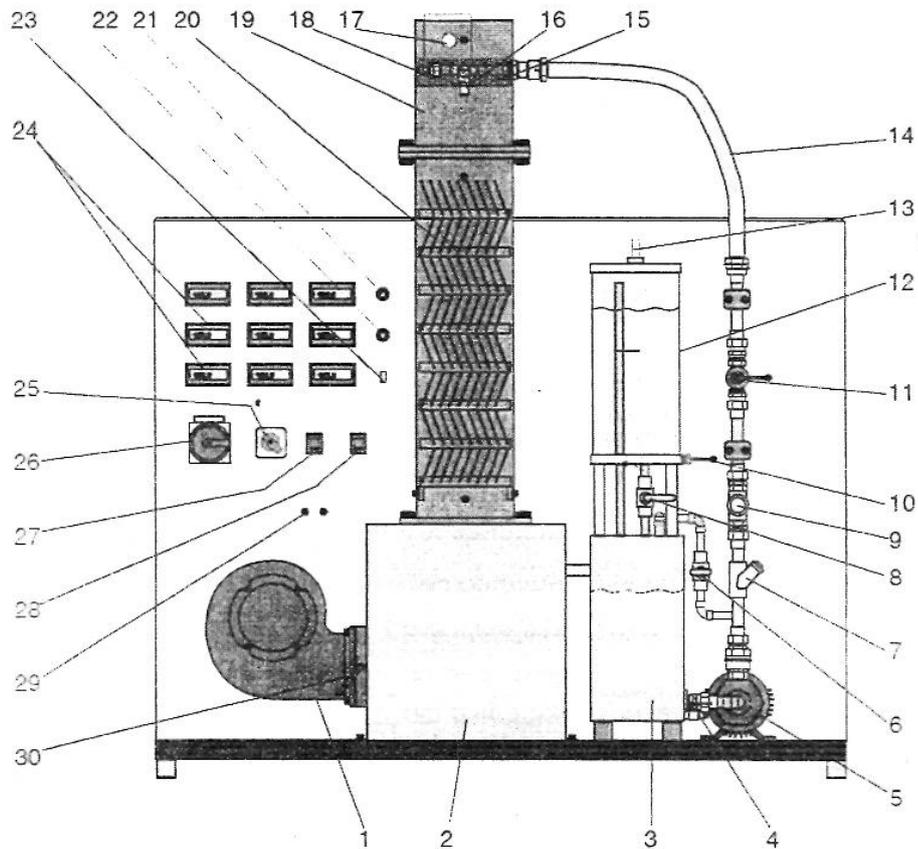
Cuando el aire fluye por la columna de refrigeración, aumenta su grado de humedad y disminuye la temperatura del agua.

Las gotas de agua arrastradas por la corriente de aire son separadas mediante un segregador de gotas ubicado delante de la apertura de salida en la parte superior de la columna y conducidas de vuelta a la columna de refrigeración. De esa forma se reduce la pérdida de agua.

Sensores de medición en la salida de aire de la columna miden la humedad y la temperatura.

2.2 Estructura del equipo

La disposición de los diferentes componentes del banco de ensayos se representa en la siguiente visión de conjunto de la instalación.



- | | |
|---|--|
| 1 Ventilador radial | 16 Tobera de pulverización |
| 2 Cámara de aire | 17 Sensor de temperatura/de humedad |
| 3 Depósito de agua con calefacción | 18 Sensor de temperatura para agua |
| 4 Grifo de purga para depósito de agua | 19 Cubierta |
| 5 Bomba | 20 Columna de refrigeración |
| 6 Derivación con grifo de bola | 21 Conexión sensor de temp./humedad (17) |
| 7 Filtro de agua | 22 Conexión sensor temperatura (18) |
| 8 Grifo de purga para depósito de reserva | 23 Hembrilla de elemento térmico para módulo adicional |
| 9 Válvula de regulación | 24 Indicadores digitales |
| 10 Sonda térmica | 25 Interruptor para calefacción |
| 11 Caudalímetro | 26 Interruptor principal |
| 12 Depósito de reserva | 27 Interruptor para ventilador |
| 13 Tapón roscado | 28 Interruptor para bomba |
| 14 Manguera de conexión | 29 Conexión medición de presión |
| 15 Segregador de gotas | 30 Válvula mariposa |

2.3 Magnitudes de medición

Las siguientes magnitudes se miden y visualizan digitalmente en el equipo de experimentación:

- Temperatura en la entrada de aire [$^{\circ}\text{C}$]
- Humedad relativa del aire en la entrada de aire [%]
- Temperatura en la salida de aire [$^{\circ}\text{C}$]
- Humedad relativa del aire en la salida de aire [%]
- Temperatura en la entrada de agua [$^{\circ}\text{C}$]
- Temperatura en la salida de agua [$^{\circ}\text{C}$]
- Presión diferencial entre la entrada y la salida de la columna de refrigeración y a través del diafragma en la salida de aire [Pa]
- Corriente volumétrica del agua [l/h]

Mediante la adquisición de datos de medición asistida por PC del equipo de experimentación se calculan las siguientes magnitudes:

- Caudal másico de aire [kg/s]
- Capacidad frigorífica aire [W]
- Anchura de zona frigorífica [K]
- Potencia calorífica agua [W]
- Acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo [K]
- Coeficiente de enfriamiento
- Pérdida de agua [kg/h]
- Corriente volumétrica de aire [m^3/h]
- Presión diferencial [Pa]

Para las investigaciones se pueden variar las temperaturas de entrada del agua, las corrientes volumétricas del agua, las columnas de refrigeración y las corrientes volumétricas del aire.

2.3.1 Disposición de los sensores de medición

La disposición de los sensores queda más clara si se hace un esquema de la instalación.

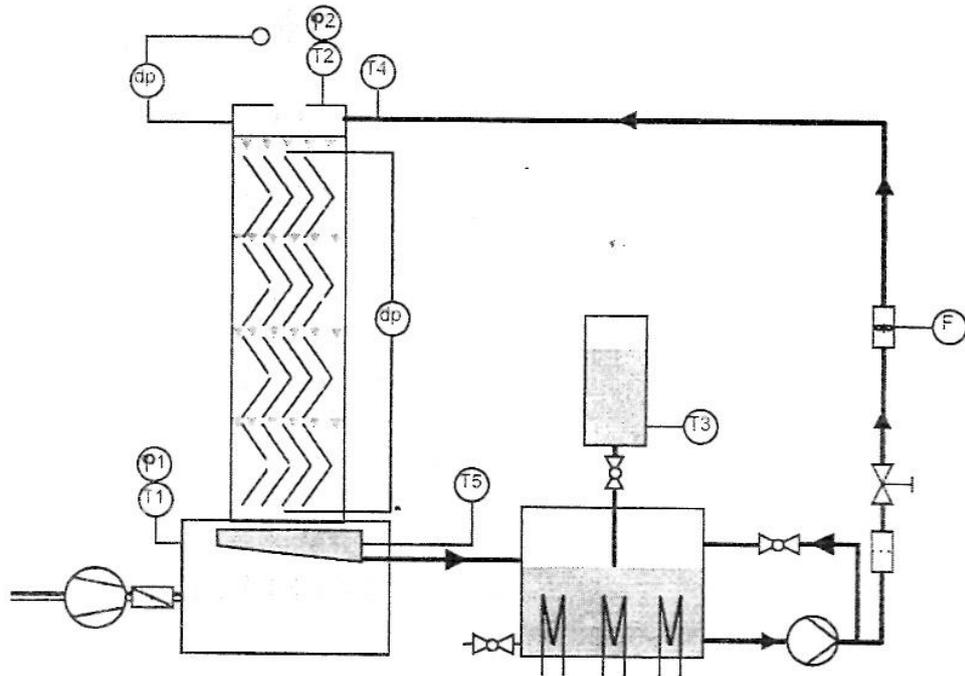


Fig. 2.1 Representación esquemática de la disposición de los sensores de medición

T1 / ϕ 1	Sensor combinado temperatura/humedad
T2 / ϕ 2	Sensor combinado temperatura/humedad
dp	Conexiones de medición para sensor de presiones diferenciales a través de diafragma y de columna de refrigeración
T4	Sensor de temperatura en entrada de agua
T5	Sensor de temperatura en salida de agua
T3	Sensor de temperatura en depósito de reserva de agua
F	Rueda de palas caudalímetro (miniturbina)

2.4 Descripción de los componentes

2.4.1 Columna de refrigeración

La columna de refrigeración está montada en la cámara de aire. Es transparente y permite así observar el recorrido del agua en el interior. Las diferentes fases de la columna de refrigeración están colocadas en posición angular una respecto a la otra, de manera que el tiempo de paso del agua sea lo más grande posible.

La densidad de empaquetadura de una torre de refrigeración es la relación entre la suma de las superficies de todas las fases con respecto al volumen del canal. La densidad de empaquetadura de la columna de refrigeración (tipo 1) suministrada con el banco experimental es de $110 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

La pérdida de presión a través de la columna se puede medir mediante un sensor de presión.

2.4.2 Caudalímetro

En la medición de caudal, el medio fluye por la carcasa de flujo y hace que rote una rueda de palas. Ese movimiento giratorio se explora sin contacto de forma optoelectrónica y se convierte en una señal de frecuencia. La frecuencia es proporcional a la velocidad de flujo.

2.4.3 Sensor combinado temperatura-humedad

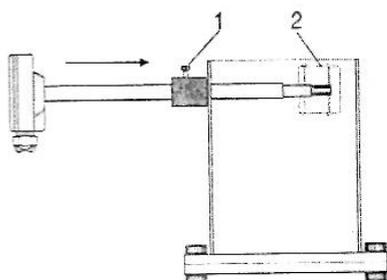


Fig. 2.2 Sensor temperatura/humedad

La humedad relativa se registra mediante elementos de medición de humedad capacitivos en la parte superior e inferior de la columna (ver Fig. 2.1). La capacidad eléctrica cambia con la humedad relativa del aire ambiente. En un dispositivo electrónico postconectado, el cambio de capacidad se convierte en una señal estandarizada de 0...10 V CC.

La temperatura se registra con un elemento de medición de capa fina, cuya resistencia eléctrica cambia de conformidad con la temperatura del entorno. Ese cambio se convierte, asimismo, en una señal estandarizada de 0...10 V CC.

El sensor en la parte superior de la columna se posiciona centrado debajo de la salida de aire. A continuación, el sensor se fija con un tornillo (1).

El tubo protector (2) se fija con un total de seis tornillos en la carcasa del sensor, alrededor del sensor. El tubo ofrece protección contra el contacto directo de las gotas, pero permite el paso del aire que debe medirse.

2.4.4 Bomba

El agua que se debe refrigerar es transportada hasta el circuito por una bomba centrífuga. El caudal máximo se determina en base a las pérdidas de presión en el sistema de tubos (válvula de regulación, caudalímetro y tobera). El caudal se puede ajustar a través de un grifo de bola en la derivación y una válvula de regulación en la corriente principal.

2.4.5 Tobera de pulverización

La tobera de pulverización está montada en la entrada de agua de la torre de refrigeración. Esta tobera genera un rociado cónico completo con una superficie de impacto cuadrada. De esa forma, se aplica homogéneamente agua finamente pulverizada a toda la sección transversal de la columna de refrigeración.

2.4.6 Segregador de gotas

El segregador de gotas en la salida de aire de la torre de refrigeración es un tipo de lana de filtrado que impide que las gotitas de agua arrastradas por el aire salgan por la parte de arriba de la torre. Las gotitas quedan atrapadas en las fibras y vuelven a caer. De esta manera se minimiza la pérdida de agua.

2.4.7 Calefacción

La carga frigorífica es generada por una calefacción eléctrica integrada en el depósito. La calefacción puede conectarse en 3 etapas. En función de la etapa, se obtienen las siguientes potencias caloríficas:

Etapa 1: 0,5 kW

Etapa 2: 1,0 kW

Etapa 3: 1,5 kW

Se requieren los siguientes tiempos para calentar el agua en el tanque (contenido 6 l) de 20 °C hasta 40 °C:

Etapa 1: aprox. 17 minutos

Etapa 2: aprox. 8 minutos

Etapa 3: aprox. 6 minutos

La temperatura se controla mediante un termostato. Cuando se sobrepasan los 50 °C, se desconecta la calefacción.

2.4.8 Ventilador

Un ventilador radial genera la corriente de aire. Está abridado directamente en la cámara de aire. La cámara de aire está configurada de manera que el aire fluya homogéneamente por toda la sección transversal de la columna. La regulación de la corriente volumétrica de aire se puede realizar mediante una válvula mariposa entre el ventilador radial y la cámara de aire.

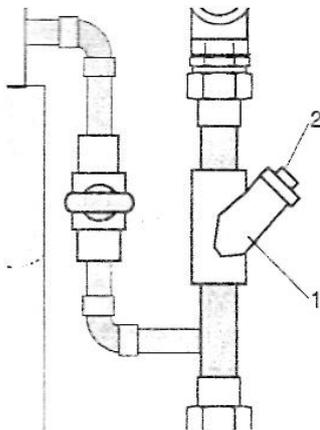
2.5 Conservación/Mantenimiento

2.5.1 Generalidades

La torre de refrigeración requiere poco mantenimiento y muy pocos trabajos de conservación. La torre de refrigeración se puede operar con agua desmineralizada o bien con agua normal del grifo. Para evitar la formación de algas o de lodo cuando se emplea agua del grifo, el equipo debe vaciarse por completo regularmente y llenarse de nuevo con agua fresca.

Cuando el equipo no se hace funcionar durante varios días, no debe permanecer lleno de agua.

2.5.2 Filtro de agua



Si la corriente volumétrica del agua varía considerablemente y después de cada cambio de agua, debe limpiarse el filtro de agua, ya que el agua lava el polvo del aire y lo concentra.

Limpieza del filtro de agua:

- Abrir la caperuza de cierre (2) en la carcasa del filtro (1)
- Retirar el filtro
- Limpiar el filtro con un cepillo y enjuagarlo con agua clara
- Colocar el filtro
- Cerrar la caperuza de cierre.

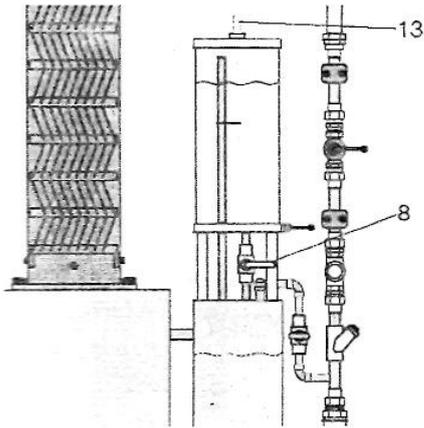
2.6 Puesta en marcha

A continuación se describen los pasos para la puesta en marcha.

- Llenar los depósitos de agua
- Montar la columna de refrigeración
- Conectar el sensor de medición:
Sensor combinado temperatura-humedad
Sonda térmica
- Conectar el equipo a la red eléctrica
- Encender el aparato mediante el interruptor principal
- Conectar el PC
- Encender la calefacción y seleccionar el nivel de calor
- Conectar el ventilador
- Ajustar la corriente de aire
- Conectar la bomba
- Ajustar la corriente volumétrica del agua

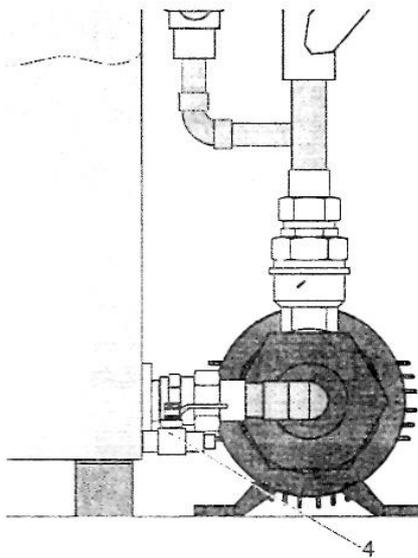
2.6.1 Llenar/vaciar los depósitos de agua

Llenar:



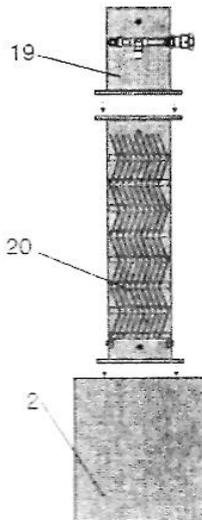
- Llenar el depósito de agua con aprox. 6 l de agua
- Llenar el depósito de reserva con aprox. 3 l de agua
 - Cerrar el grifo de purga (8) entre el depósito y el depósito de reserva
 - Abrir el tapón roscado (13), llenar el depósito con agua y, a continuación, cerrar de nuevo el tapón
 - Durante el ensayo, abrir de nuevo el grifo de purga (8)

Vaciar:



- Conectar la manguera de plástico en el grifo de purga (4) y conducirla al cubo
- Abrir los grifos de purga (4) y (8) y recoger el agua en el cubo
- Limpiar el depósito de agua vaciado con papel y una esponja
- Cerrar de nuevo los grifos de purga

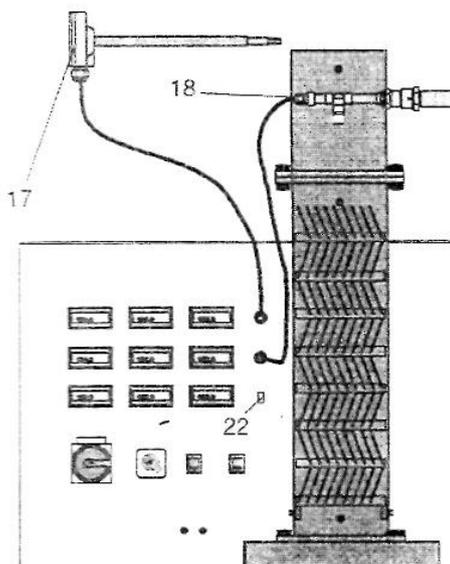
2.6.2 Montaje de la columna de refrigeración



Para el montaje de la columna de refrigeración deben seguirse los siguientes pasos:

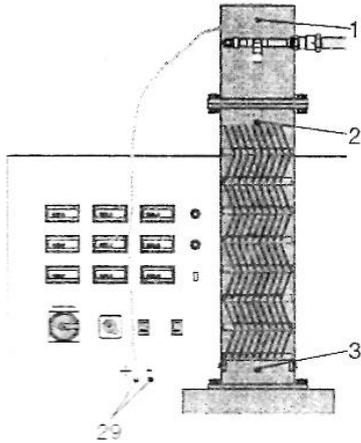
- Colocar la columna de refrigeración (20) sobre la cámara de aire (2) y enroscarla
- Colocar la cubierta (19) sobre la columna de refrigeración (20) y atornillarla también
- Colocar la manguera de conexión entre la cubierta y la línea de alimentación de agua, y asegurarla con abrazaderas para que no se resbale

2.6.3 Conexión de los sensores de medición



- Enchufar el conector del sensor de temperatura (18) en la hembrilla (de 3 polos) que se encuentra en la placa frontal
- Enchufar el conector del sensor combinado de temperatura/humedad (17) en la hembrilla (de 5 polos) que se encuentra en la placa frontal
- Hembrilla de elemento térmico (22) para módulo adicional opcional

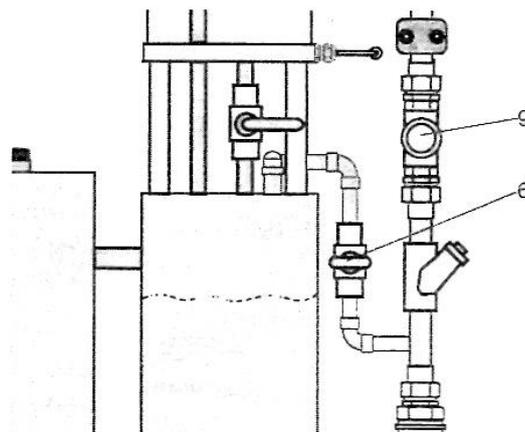
2.6.4 Medición de pérdida de presión



La presión se puede medir a través de tres tubuladuras de toma de presión (1, 2, 3). Como base para el cálculo de la corriente volumétrica de aire, se mide la presión diferencial a través del diafragma en la salida de aire. Para ello se une la conexión positiva del sensor de presión (+) con la tubuladura de toma de presión (1) en la cubierta. La conexión negativa del sensor de presión (-) no se utiliza, es decir que mide la presión del entorno. La pérdida de presión sobre la columna se puede medir mediante las tubuladuras de toma de presión 2 y 3. Para ello, conectar la manguera con la presión más alta en la conexión positiva (+) y la manguera con la presión más baja en la conexión (29) identificada con el signo de menos (-).

2.6.5 Regulación de la corriente volumétrica del agua

La corriente volumétrica de agua puesta a disposición por la bomba debe observarse continuamente y, en caso dado, corregirse. Para ello, se realiza un ajuste aproximado con el grifo de bola regulable (6) en la derivación y, a continuación, se lleva cabo el ajuste fino con la válvula de regulación (9).



2.7 Adquisición de datos de medición con PC

La conexión con el PC se establece mediante un cable de cinta plana, que se introduce en una hembra a la izquierda del equipo. El otro extremo se conecta a una tarjeta multifuncional en el PC. Durante la puesta en marcha de la instalación asistida por PC es indispensable tener en cuenta lo siguiente:

1. Conectar la instalación con el interruptor principal
2. Conectar el PC
3. Iniciar el software

Si la instalación se opera sin PC, debe interrumpirse el cableado con el PC para suprimir eventuales señales externas hacia los sensores de medición.

2.7.1 Instalación del software

Ver las instrucciones de instalación adicionales para el software "Instalación de software PCI-Lab-View".

2.8 Descripción y manejo del software WL 320

Una vez que la instalación finaliza con éxito, se inicia el programa a través de "Inicio-Programas-G.U.N.T.-WL320". Se presenta la ventana "Diagrama del sistema".

Mediante el **menú "Inicio"** se pueden abrir otras ventanas de la siguiente manera:

- Gráfica
- Diagrama h-x
- Diagrama del sistema
- Diagrama de cálculo
- Acerca de GUNT
- Salir

El **menú "Idioma"** se encuentra en todas las ventanas. Se puede elegir entre cuatro idiomas.



Menú principal			INICIO
Ventana	Menú	Submenú	Funcionamiento
Gráfica	Archivo	Nuevo	Abre un nuevo archivo
		Abrir	Abrir archivo disponible
		Imprimir	Imprime los datos disponibles del protocolo de medición
	Ver	Borrar gráfico	Se borra el gráfico disponible
		Play/ Pause	Iniciar e interrumpir la grabación de la gráfica
Diagrama h-x	Archivo	Guardar tabla	Guardar valores de medición
		Imprimir tabla	Imprimir la tabla de los valores de medición
	Ver	Diagrama h,x	Diagrama h, x para aire húmedo, p = 1013mbar
		Tabla	Representar los valores de medición de forma tabular
		Psychrometric chart	Representación anglosajona del diagrama h, x
Diagrama del sistema			Representación de los valores medidos por los sensores de la instalación en el esquema del proceso
Diagrama de cálculo			Representación de los valores de medición calculados por el PC

Tab. 2.2 Visualizaciones de menú

2.8.1 Diagrama del sistema

Aquí se visualizan los valores de medición actuales en el esquema del proceso de la instalación.

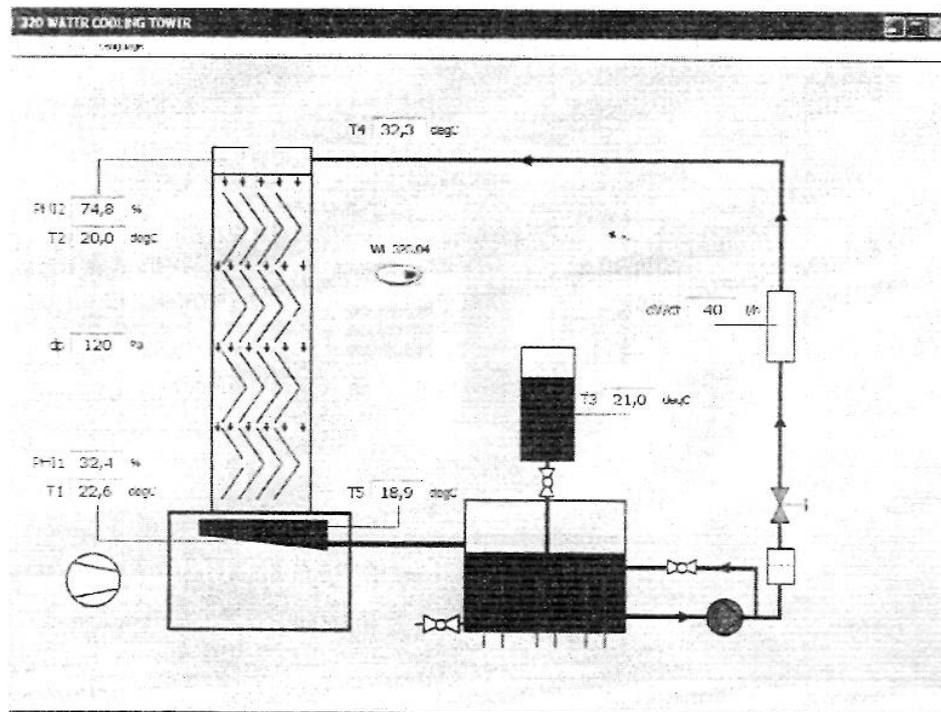


Fig. 2.3 Diagrama del sistema WL 320

<i>T1</i>	Temperatura en la entrada de aire [°C]
<i>PH1</i>	Humedad relativa del aire en la entrada de aire [%]
<i>T2</i>	Temperatura en la salida de aire [°C]
<i>PH2</i>	Humedad relativa del aire en la salida de aire [%]
<i>T4</i>	Temperatura en la entrada de agua [°C]
<i>T5</i>	Temperatura en la salida de agua [°C]
<i>dp</i>	Presión diferencial [Pa]
<i>dV/dt</i>	Corriente volumétrica del agua [l/h]

2.8.2 Diagrama de cálculo

Aquí se visualizan los valores calculados.

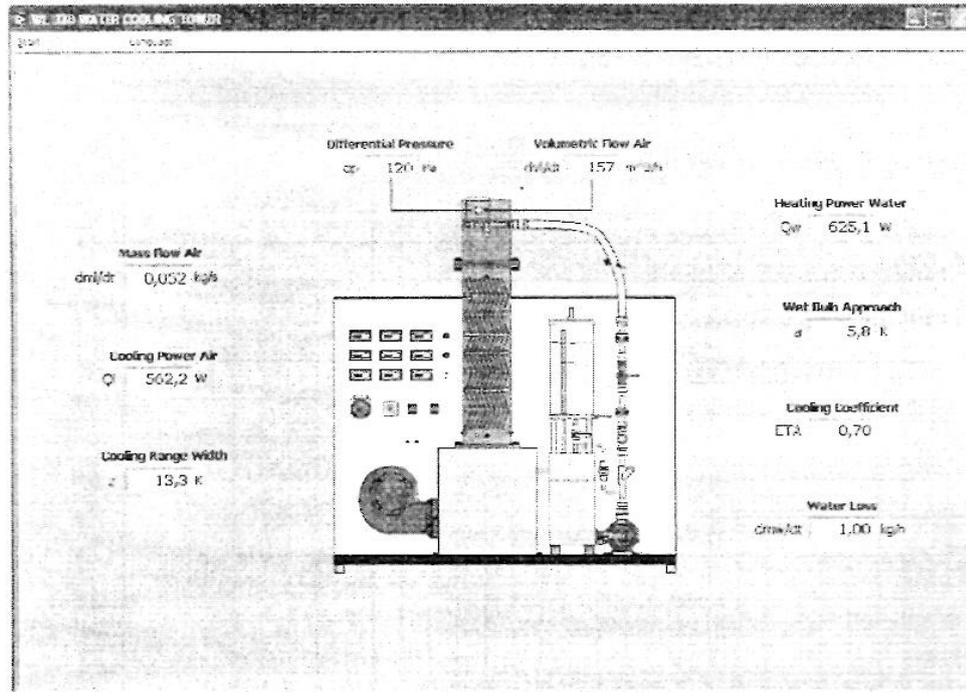


Fig. 2.4 Diagrama de cálculo WL 320

dm/dt	Caudal másico de aire [kg/s]
Ql	Capacidad frigorífica del aire [W]
z	Anchura de zona frigorífica [K]
Qw	Potencia calorífica del agua [W]
a	Acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo [K]
ETA	Coefficiente de enfriamiento
dmw/dt	Pérdida de agua [kg/h]
dVl/dt	Corriente volumétrica de aire [m³/h]
dp	Presión diferencial [Pa]

2.8.3 Diagrama h,x

Aquí se representan los valores de estado actuales del aire de la entrada/salida de la torre de refrigeración en el diagrama h,x.

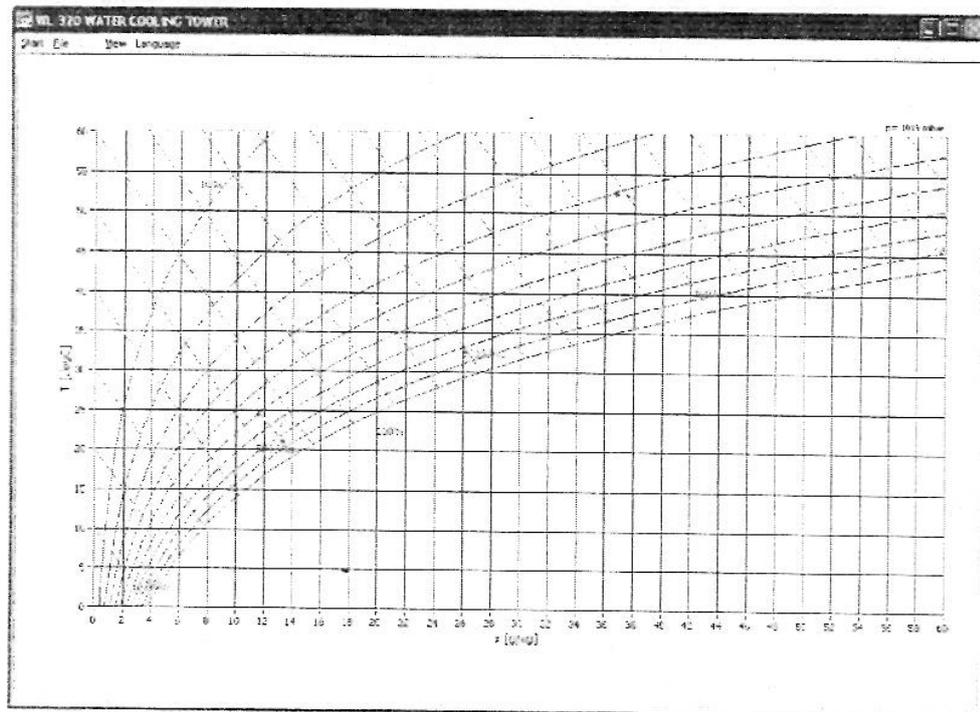


Fig. 2.5 Diagrama h,x WL 320

2.8.4 Gráfica

Esta parte del programa permite la representación de las temperaturas medidas y de la humedad relativa del aire como función del tiempo.

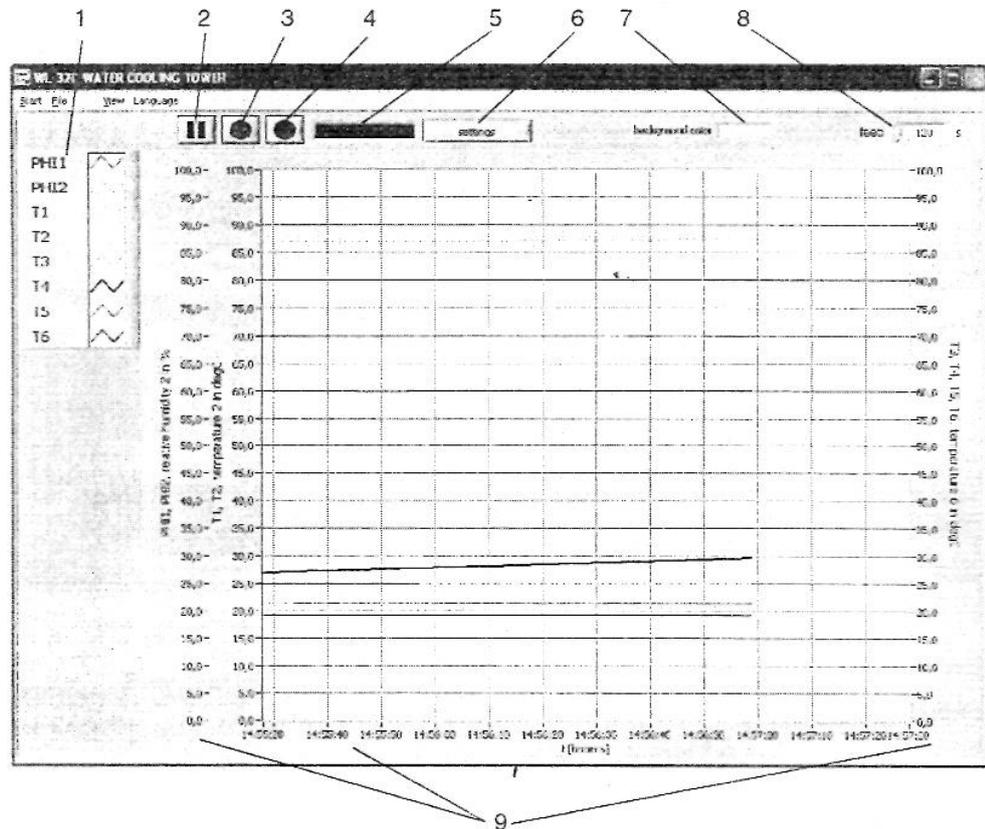


Fig. 2.6 Gráfica WL 320

- 1 Cambiar las características de la curva
- 2 Inicio / Pausa
- 3 Guardar un registro de datos en un momento determinado
- 4 Guardar registros de datos dentro de un intervalo de tiempo específico
- 5 Señal óptica a través de almacenamiento de registros de datos
- 6 Selección de intervalo de medición y archivo de valores de medición
- 7 Ajuste del color de fondo
- 8 Ajuste de avance en [s]
- 9 Cambio manual de la división de medidas haciendo clic con el ratón

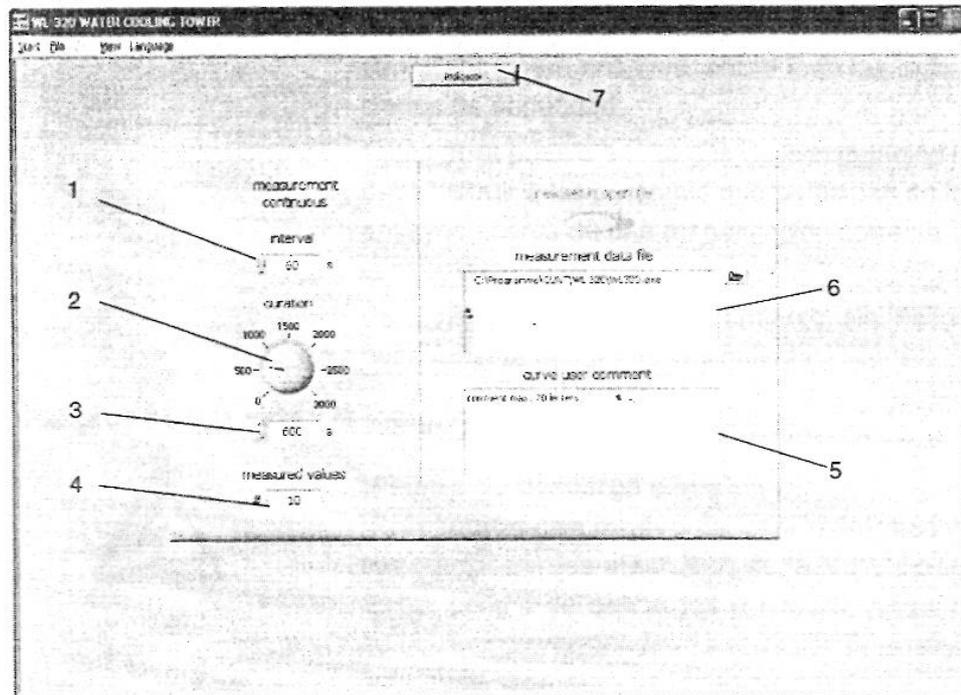


Fig. 2.7 Selección intervalo de medición y archivo de medición WL 320

- 1 Ajuste numérico del intervalo de medición en [s],
- 2 Ajuste de la duración total de registro en [s]
- 3 Introducción numérica de la duración del ensayo en [s]
- 4 Visualización numérica sobre la cantidad de valores de medición
- 5 Comentario del usuario
- 6 Visualización del archivo de valores de medición
- 7 Regresar al panel de indicadores "Gráfica"

- **Acerca de GUNT**
Informaciones sobre Gunt
- **Salir**
Finaliza el programa

3 Seguridad

Antes de la puesta en marcha se deben leer las instrucciones para ensayos, sobre todo las indicaciones de seguridad.

Antes de la puesta en marcha de la instalación se debe instruir a las personas que participan en los ensayos acerca de una manipulación correcta de la misma.

Para garantizar un funcionamiento sin peligro debe tenerse en cuenta lo siguiente:

3.1 Peligros para la vida y la integridad física



¡Peligro de descarga eléctrica!

¡Precaución con motivo de intervenciones en los componentes eléctricos de la instalación!

Existe peligro de descargas eléctricas. Antes de cualquier intervención en la instalación de ensayo, ésta debe separarse de la red eléctrica.

Los trabajos los debe efectuar exclusivamente personal especializado.



¡PELIGRO!

Nunca se debe operar el equipo sin el conductor de puesta a tierra correctamente instalado.

En caso de incumplimiento no queda garantizada una protección suficiente para las personas y el equipo.

El conductor de puesta a tierra debe ser instalado por personal especializado.

3.2 Peligros para el equipo y su funcionamiento

**¡PELIGRO!****No conectar nunca el calefactor en seco**

En caso de incumplimiento existe peligro de destrucción a causa de sobrecalentamiento.

**¡PELIGRO!****No conectar nunca la bomba en seco**

En caso de incumplimiento existe peligro de destrucción de la bomba a causa de refrigeración insuficiente.

**ATENCIÓN**

Almacenar la instalación siempre en un lugar seco y libre de heladas.

**¡ATENCIÓN!****Durante la limpieza utilizar sólo un detergente apto para plástico y agua (ningún disolvente).**

En caso de incumplimiento existe peligro de destrucción de las piezas de plástico a causa de disolventes agresivos.

NOTA!

Cuando se utiliza agua desmineralizada, no se presentan sedimentos de cal durante la limpieza.

**¡PRECAUCIÓN!****El sensor de humedad en la salida de aire está protegido contra una precipitación de agua en la célula de medición mediante un tubo protector.**

En caso de incumplimiento el equipo visualiza valores de medición incorrectos. En ese caso, dejar secar la célula de medición al aire.

4 Teoría
4.1 Generalidades

En una torre de refrigeración con circuito de agua abierto, se extrae calor del agua debido al intercambio de sustancias y de calor que tiene lugar con el aire ambiente. Mientras más intenso es ese contacto del aire y el agua, mayor es el intercambio de calor. La torre de refrigeración es una forma especial de intercambiador térmico, porque además del intercambio de calor tiene lugar también un intercambio de sustancias debido a la evaporación.

Cuando un líquido se evapora a la fase gaseosa de otra sustancia a causa de quedar por debajo de su presión de vapor de saturación en esa fase gaseosa, se habla de evaporación. En ese proceso el líquido se enfría extrayéndose su calor de evaporación. La capacidad del aire de absorber agua es una medida para la refrigeración. Con una humedad relativa del aire del 100% se alcanza la capacidad de absorción máxima del vapor de agua en el aire y ya no es posible ninguna refrigeración por evaporación más.

La transferencia convectiva de calor contribuye también a la refrigeración. En este caso se trata de una transferencia de calor pura, sin ningún intercambio de materias. El factor decisivo en este caso es la caída de temperatura entre el agua y el aire.

4.2 Cambios de estado del aire húmedo

Para simplificar, el aire sin vapor de agua, es decir el **aire seco L** en la gama de presión y temperatura relevante para la ventilación y climatización, puede considerarse un gas ideal.

Gracias a sus bajas presiones parciales, el **vapor de agua D** puede considerarse también un gas ideal. La **mezcla** de aire seco y vapor de agua se denomina **aire húmedo**.

La presión total del aire p se compone de la suma de la presión parcial del aire seco p_L y de la presión parcial para el vapor de agua p_D .

$$p = p_L + p_D \quad (4.1)$$

La masa total del aire m se compone, análogamente, de la masa parcial del aire seco m_L y de la masa parcial del vapor de agua m_D .

$$m = m_L + m_D \quad (4.2)$$

Los estados y los cambios de estado del aire húmedo se pueden representar en un **diagrama h, x** .

4.2.1 Diagrama h,x

Las siguientes magnitudes de estado están incluidas en un diagrama h,x:

- T Temperatura del aire [$^{\circ}\text{C}$]
 p Presión parcial del vapor de agua [mbar]
 h Entalpía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
 x Humedad absoluta del aire $\left[\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right]$

$$x = \frac{m_D}{m_L} \quad (4.3)$$

- v Volumen específico $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right]$

$$v = \frac{V}{m} \quad (4.4)$$

$$V = V_L = V_D$$

(ambos gases ocupan el volumen total)

Para la densidad rige:

ρ Densidad de la parte de aire seco:

$$\rho_L = \frac{m_L}{V} = \frac{1}{v_L} \quad (4.5)$$

Densidad de la parte de vapor de agua:

$$\rho_D = \frac{m_D}{V} \quad (4.6)$$

Densidad total del aire húmedo:

$$\rho = \rho_L + \rho_D = \rho_L \cdot (1 + x) \quad (4.7)$$

La influencia del contenido absoluto de agua sobre la densidad total del aire húmedo es reducida, ya que x es casi siempre inferior a 20 g/kg.

No obstante, cabe mencionar que la densidad del aire húmedo a una presión y una temperatura constantes se reduce a medida que aumenta el contenido absoluto de agua (x sube, ρ_t baja), es decir que mientras más húmedo es el aire, más ligero es.

El motivo es la menor masa (mol) de las moléculas de agua en comparación con las moléculas de nitrógeno u oxígeno sustituidas.

La relación de la presión parcial del vapor de agua en el aire p_D respecto a la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura del aire T es la **humedad relativa del aire** φ in [%]

$$\varphi = \frac{p_D}{p_{Ds}(T)} \quad (4.8)$$

$p_{Ds}(T)$ = Presión de saturación del vapor de agua a la temperatura del aire T

La cantidad de moléculas de agua que pueden ser absorbidas por el aire de forma invisible depende en gran medida de la temperatura. A mayor temperatura, mayor capacidad de absorción. Cuando sube la temperatura, aumenta la presión de ebullición (presión de saturación) del agua y, con ello, la capacidad del aire de absorber agua

$$p_D \leq p_{Ds}(T).$$

Se habla en este caso de **aire húmedo no saturado** $\varphi \leq 100\%$.

Aire húmedo saturado $\varphi=100\%$ significa que la presión parcial del vapor de agua en el aire es igual a la presión de saturación o presión de ebullición del agua, es decir:

$$p_D = p_{Ds}(T).$$

Si el aire contiene más moléculas de agua que las que corresponderían a la presión de saturación, se condensarían moléculas de agua a temperaturas superiores a 0 °C. Se habla de **aire húmedo sobresaturado** y se encuentra en el diagrama h, x debajo de la línea de saturación, en la zona de niebla.

Toda las derechos reservados. G.U.N.T. - Großlobau GmbH, Brandlhub, Alemania 122007

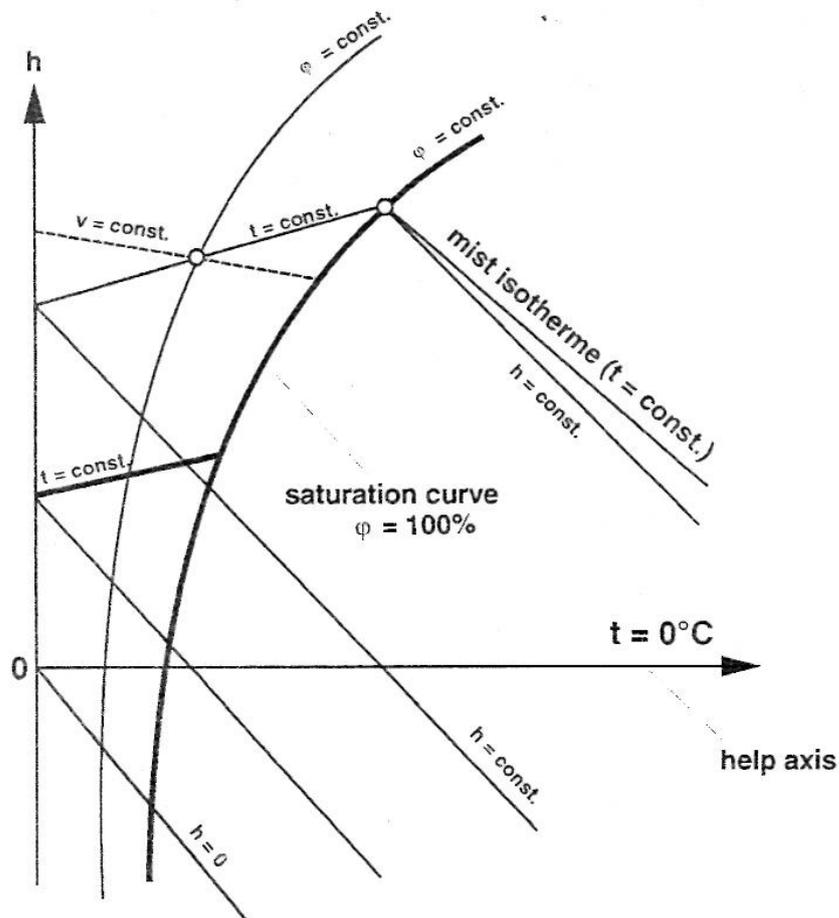


Fig. 4.1 Detalle del diagrama h.x

4.3 Magnitudes características

4.3.1 Caudal nominal

El caudal nominal es el caudal de agua para el que está dimensionada una torre de refrigeración. Esta instalación de ensayo está dimensionada para un caudal nominal de 1 m³/h. Para los siguientes cálculos se puede tomar como base para la densidad del agua $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$.

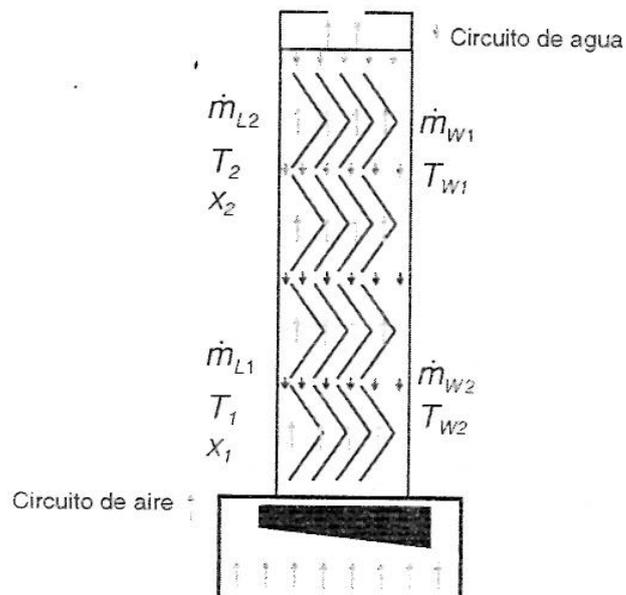


Fig. 4.2 Balance energético y de sustancias en la torre de refrigeración WL 320

4.3.2 Anchura de zona frigorífica

La anchura de zona frigorífica z es la diferencia entre la temperatura del agua caliente T_{w1} al entrar en la torre de refrigeración, y la temperatura del agua fría T_{w2} al salir de la torre de refrigeración.

$$z = T_{w1} - T_{w2} \quad (4.9)$$

4.3.3 Límite de enfriamiento

El límite de enfriamiento es la temperatura del agua fría que se puede alcanzar en un caso extremo. Ésta coincide con la temperatura de bulbo húmedo T_7 del aire ambiente.

El aire se puede humectar mediante la evaporación de agua hasta alcanzar el estado de saturación. Si el agua que se debe evaporar tiene ya la temperatura del aire, sólo se requiere para su evaporación calor latente que se extrae del aire eliminando refrigeración por evaporación.

Así, se obtiene en este caso un cambio de estado con una entalpía constante hasta alcanzar la presión de saturación (punto de intersección con la línea de saturación). La temperatura de ese punto de intersección se denomina en la técnica de climatización "temperatura de bulbo húmedo", "temperatura húmeda" o "límite de enfriamiento".

En la figura 4.3 resulta una temperatura de bulbo húmedo de $T_7 = 11.2^\circ\text{C}$ a una temperatura $T_1 = 17^\circ\text{C}$ y $x = 6.2 \text{ g/kg}$.

En el estado de saturación del aire, la temperatura de bulbo húmedo es igual a la temperatura de bulbo seco.

La temperatura final del agua de refrigeración que sale de la torre de refrigeración después del enfriamiento depende de la temperatura del medio refrigerante (aire) y del dimensionamiento de la torre de refrigeración.

4.3.5 Coeficiente de enfriamiento

El coeficiente de enfriamiento η está influenciado por la relación de los caudales máscicos aire/agua (comparar la figura 4.2). Para este cálculo se requieren la temperatura límite de enfriamiento T_{ff} , la temperatura del agua caliente en la entrada de la torre de refrigeración T_{w1} y la temperatura del agua fría en la salida de la torre de refrigeración T_{w2} . El coeficiente de enfriamiento η se determina de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{(T_{w1} - T_{ff})} \quad (4.11)$$

4.3.6 Pérdida de agua

En las torres de refrigeración con circuito de refrigeración abierto, se evacúa una cierta cantidad de agua debido al intercambio de sustancias. Esa cantidad de agua \dot{m}_w resulta de la diferencia de las humedades absolutas en la entrada y en la salida de la torre de refrigeración, multiplicada por el caudal máscico de aire \dot{m}_L .

$$\dot{m}_w = (x_2 - x_1) \cdot \dot{m}_L \quad (4.12)$$

4.3.7 Caudal calorífico

Se denomina caudal calorífico Q_W al producto del caudal de agua \dot{m} , de la capacidad calorífica específica del agua c_{pW} y de la anchura de zona frigorífica z .

$$Q_W = \dot{m} \cdot c_{pW} \cdot z \quad (4.13)$$

4.3.8 Densidad de lluvia

La densidad de lluvia R es la superficie básica sobre la que cae la lluvia A_R (*sección horizontal del elemento de refrigeración*) respecto al caudal de agua \dot{m} .

$$R = \frac{\dot{m}}{A_R} \quad (4.14)$$

4.3.9 Densidad de empaquetadura

La densidad de empaquetadura A_B de una torre de refrigeración es la relación entre el volumen de la columna de refrigeración V_K y las superficies de todas las fases de la columna de refrigeración A_s en $[\text{m}^2/\text{m}^3]$.

$$A_B = \frac{\sum A_s}{V_K} \quad (4.15)$$

5 Ensayos

5.1 Introducción

A continuación se describen algunos ensayos que pueden realizarse con este banco experimental. La selección de ensayos no pretende ser exhaustiva, sino que más bien se trata de una sugerencia para crear series de ensayos propias.

Los resultados de medición representados no son valores de referencia o de calibración que deben obtenerse bajo cualquier circunstancia. En función de la ejecución de los componentes individuales, de la habilidad en el campo de la técnica de ensayo y de las condiciones del entorno, pueden aparecer divergencias menores o mayores en el propio ensayo.

Para un funcionamiento satisfactorio, el equipo debe ser mantenido en buen estado por parte de la dirección o del personal del laboratorio.

5.2 Realización de ensayos

La puesta en marcha de la instalación de ensayo se realiza de conformidad con el capítulo 2.6. Se recomiendan los siguientes ajustes para los ensayos:

- Columna de refrigeración: Tipo 1
Densidad de empaquetadura A_B 110 m^2/m^3
Densidad de lluvia R: 0,49 kg/s m^2
- Potencia calorífica: 1,0 kW
Para poner a disposición una carga térmica, toda el agua en el depósito se calienta hasta aprox. 30 °C.

5.3 Evaluación del ensayo

Una vez que se observa un estado operativo constante, se leen los siguientes valores de medición.

A_B [m^2/m^3]	110
T_1 [°C]	22,5
ϕ_1 [%]	32,4
T_2 [°C]	20,0
ϕ_2 [%]	74,8
T_4 [°C]	32,3
T_5 [°C]	18,9
Δp [Pa]	119

A continuación se pueden leer los siguientes valores del diagrama:

- Humedad absoluta

$$x_1 = 5,56 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \quad x_2 = 11,36 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

- Entalpía

$$h_{x(1+x)} = 37,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_{x_2(1+x)} = 49,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

con índice "(1+x)"

Este índice indica que el valor se refiere a 1 kg de aire seco y x kg agua

- Temperatura húmeda

$$T_{f1} = 13,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{f2} = 17,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Presión de vapor parcial

$$p_{D1} = 9,04 \text{ mbar} \quad p_{D2} = 18,21 \text{ mbar}$$

- Volumen específico

$$v_1 = 0,84 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad v_2 = 0,85 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Al leer la entalpía específica en el diagrama h,x hay que tener en cuenta que entalpías en el diagrama del aire húmedo se refieren a la masa del aire seco.

Los valores indicados arriba se listan en la adquisición de datos de medición por PC en una tabla, en la ventana "Diagrama h,x". A continuación se describe del índice (1+x).

En la tabla 5.2 se presentan las magnitudes determinadas por el PC. A continuación se calculan las magnitudes características.

\dot{m}_L [kg/s]	0,051
Q_L [W]	575,1
z [K]	13,4
Q_W [W]	615
a [K]	5,8
η	0,70
\dot{m}_W [kg/h]	1,01

5.3.2 Cálculo de la corriente volumétrica de aire

La presión diferencial que se mide sobre el diafragma en la salida de aire constituye la base para el cálculo de la corriente volumétrica de aire. El índice 1 se refiere a los valores en la sección transversal del canal, y el índice 2 a los valores en la sección transversal del diafragma.

Para la velocidad de fluido w_2 resulta teóricamente de la ecuación de Bernoulli

$$p_1 + \frac{\rho}{2} w_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} w_2^2 \quad (5.1)$$

y de la ecuación de continuidad

$$A_1 \cdot w_1 = A_2 \cdot w_2 \quad \text{con} \quad w_1 = \frac{A_2}{A_1} \cdot w_2 \quad (5.2)$$

resulta

$$w_2 = \frac{\sqrt{\frac{2}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho}}}{\sqrt{\frac{2}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho}}} \quad (5.3)$$

Teniendo en cuenta la ecuación para el caudal másico de aire,

$$\dot{m}_L = w_2 \cdot A_2 \cdot \rho \quad (5.4)$$

resulta tras la conversión:

$$\dot{m}_L = \sqrt{\frac{2A_2^2}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}} \cdot \sqrt{(p_1 - p_2)\rho}} \quad (5.5)$$

Las secciones de corriente A_1 y A_2 son constantes.

$$A_1 = a \cdot b = 150 \cdot 150 = 22500 \text{ mm}^2 = 0.0225 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \frac{(80 \text{ mm})^2}{4} = 5026.5 \text{ mm}^2 = 5.0265 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Por este motivo, la ecuación para el caudal másico de aire se puede simplificar mediante una constante c :

$$c = \sqrt{\frac{2A_2^2}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (0.0050625 \text{ m}^2)^2}{1 - \frac{0.0050625^2}{0.0225^2}}} = 7.3 \cdot 10^{-3} \quad (5.6)$$

Tras la conversión de la ecuación de continuidad (5.2) se obtiene la relación de apertura m de la siguiente manera:

$$m = \frac{w_1}{w_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (5.7)$$

Mediante la relación de apertura m se toma de la norma EN ISO 5167 y de la versión alemana DIN 1952 el índice de caudal α . Se asume el índice de expansión ε .

$$\varepsilon = 0,98$$

$$\text{con } m = \frac{A_2}{A_1} = 0,22$$

$$\alpha = 0,605$$

Para el caudal másico de aire real rige, con $c = 0,0073$, la siguiente relación:

$$\dot{m}_L = \alpha \cdot \varepsilon \cdot c \cdot \sqrt{(\rho_1 - \rho_2) \rho} \quad (5.8)$$

$$\dot{m}_L = \alpha \cdot \varepsilon \cdot c \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{v_f}}$$

$$\dot{m}_L = 0.605 \cdot 0.98 \cdot 0.0073 \cdot \sqrt{\frac{119 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{0.85 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}} = 0.0512 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

La corriente volumétrica de aire se calcula en base al producto del caudal másico de aire y del volumen específico del aire húmedo de la siguiente manera:

$$\dot{V} = \dot{m}_L \cdot v_f \quad (5.9)$$

$$\dot{V} = 0.0512 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0.85 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0.0435 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 156.7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

para la velocidad de fluido real en el canal resulta entonces:

$$w_1 = \frac{\dot{V}}{A_1} = \frac{0.0435 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.0225 \text{ m}^2} = 193 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.10)$$

5.3.3 Cálculo de la capacidad frigorífica

La diferencia de entalpía entre la entrada y la salida de aire multiplicada por el caudal másico de aire da como resultado la capacidad frigorífica del aire.

$$Q_L = (h_2 - h_1) \cdot \dot{m}_L \quad (5.11)$$

$$Q_L = \left(49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 37,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cdot 0,0512 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 594 \text{ W}$$

La capacidad frigorífica del aire se compone de la parte proveniente de la evaporación Q_v y de la parte proveniente de la convección Q_k .

$$Q_L = Q_v + Q_k \quad (5.12)$$

Para la parte de la capacidad frigorífica proveniente de la evaporación rige:

$$Q_v = \dot{m}_L \cdot r \cdot (x_2 - x_1) \quad (5.13)$$

$$\text{con } r = 2501,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$Q_v = 0,0512 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2501,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot \left(0,01136 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - 0,00556 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_v = 743 \text{ W}$$

5.3.4 Cálculo del caudal calorífico

Debido a las pérdidas de calor, la carga calorífica real no es igual al nivel seleccionado en el calefactor eléctrico. Por tanto, la carga calorífica se calcula en base al fluido volumétrico, la densidad específica y la capacidad térmica específica del agua c_{pw} , así como la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del agua.

$$Q_w = \dot{V}_w \cdot \rho_w \cdot c_{pw} (T_w - T_{2w}) \quad (5.15)$$

$$Q_w = 40 \frac{\text{dm}^3}{\text{h}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4.198 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (323^\circ\text{C} - 18.9^\circ\text{C})$$

$$Q_w = 625 \text{ W}$$

La diferencia entre el caudal calorífico y la potencia de refrigeración del aire se forma por convección. El agua que sale por la pared de la columna de refrigeración calienta la membrana exterior de la torre de refrigeración. La refrigeración de la camisa de la torre de refrigeración se realiza también mediante el aire que no fluye por la parte interior de la columna.

Dado que, sin embargo, para el cálculo de la capacidad frigorífica sólo se tiene en cuenta el aire que refrigera el agua en el interior de la columna, se produce una diferencia al elaborar un balance energético.

$$Q_w = Q_L = Q_V + Q_K \quad (5.16)$$

$$\dot{m}_w \cdot c_{pw} \cdot (T_w - T_{2w}) = \dot{m}_L \cdot r \cdot (x_2 - x_1) + \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot (T_2 - T_1) \quad (5.17)$$

5.3.5 Cálculo del acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo

El acercamiento a es la diferencia entre la temperatura del agua fría T_{w2} y la temperatura de bulbo húmedo del aire T_{ff} .

El límite de enfriamiento es la temperatura del agua fría que se puede alcanzar en un caso extremo (temperatura límite de enfriamiento). Coincide con la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente.

$$a = T_{w2} - T_{ff} = 18,9 \text{ °C} - 13,4 \text{ °C} = 5,5 \text{ °C}$$

5.3.6 Cálculo del coeficiente de enfriamiento

El coeficiente de enfriamiento η es la relación entre la anchura de zona frigorífica z y la diferencia entre la temperatura del agua caliente en la entrada de la torre de refrigeración y la temperatura húmeda T_{ff}

$$\eta = \frac{z}{(T_{w1} - T_{ff})} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{T_{w1} - T_{ff}}$$

$$\eta = \frac{323 \text{ °C} - 18,9 \text{ °C}}{323 \text{ °C} - 13,4 \text{ °C}} = 0,71$$

5.3.7 Cálculo de la pérdida de agua

La cantidad de agua eliminada por el aire m_w resulta de la diferencia entre la humedad absoluta en la entrada y la salida de la torre de refrigeración multiplicada por el caudal másico de aire \dot{m}_L .

$$\dot{m}_w = (x_2 - x_1) \cdot \dot{m}_L$$

$$\dot{m}_w = (11,36 - 5,56) \frac{\text{g}}{\text{kg}} \cdot 0,0512 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,297 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

$$= 1,07 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

5.4 Determinación de las magnitudes características con diferentes columnas de refrigeración

G.U.N.T ofrece como accesorio de la estructura del ensayo WL 320, adicionalmente, diferentes columnas de refrigeración con distintas densidades de empaquetadura.

Además de las investigaciones y cálculos realizados, se puede determinar también la influencia de las distintas columnas de refrigeración sobre las magnitudes características de la torre de refrigeración.

5.4.1 Realización de ensayos

La puesta en marcha de la instalación de ensayo se realiza de conformidad con el capítulo 2.6. Se recomiendan los siguientes ajustes para los ensayos:

- Potencia calorífica: 1,0 kW
Para poner a disposición una carga térmica, toda el agua en el depósito se calienta hasta aprox. 40 °C.
- Densidad de lluvia: 0,9 kg/sm²
- La presión diferencial se mantiene constante a 21 Pa mediante la válvula mariposa.

Montar la columna de refrigeración de tipo 4

- Columna de refrigeración: Tipo 4
Densidad de empaquetadura $A_B: 0 \text{ m}^2/\text{m}^3$

La columna de refrigeración de tipo 4 se sustituye por una de tipo 2

- Columna de refrigeración: Tipo 2
Densidad de empaquetadura $A_B: 77 \text{ m}^2/\text{m}^3$

WL 320

TORRE DE REFRIGERACIÓN POR AGUA/PC

La columna de refrigeración de tipo 2 se sustituye por una de tipo 3

- Columna de refrigeración: Tipo 3:
Densidad de empaquetadura A_B : 200 m^2/m^3

5.4.2 Evaluación del ensayo

Una vez que se observa un estado operativo constante, se leen los siguientes valores de medición.

Tab. 50,3 Resultados de medición columna de refrigeración tipo 4

A_B [m ² /m ³]	0
T_1 [°C]	25,1
φ_1 [%]	58,8
T_2 [°C]	27,1
φ_2 [%]	92,6
T_4 [°C]	44,1
T_5 [°C]	22,1
Δp [Pa]	21

Tab. 5.4 Magnitudes calculadas columna de refrigeración de tipo 4

\dot{m}_L [kg/s]	0,021
Q_L [W]	570
z [K]	23
Q_W [W]	1070,6
a [K]	2,7
η	0,89
\dot{m}_W [kg/h]	0,74

Tab. 5.5 Resultados de medición columna de refrigeración de tipo 2 y tipo 3

A_B [m ² /m ³]	77	200
T_1 [°C]	24.7	24.9
ϕ_1 [%]	57.5	54.5
T_2 [°C]	24.4	23.1
ϕ_2 [%]	86.3	94.8
T_4 [°C]	42.7	45.2
T_5 [°C]	24.1	22.8
Δp [Pa]	21	21

Tab. 5.6 Magnitudes calculadas columna de refrigeración de tipo 2 y tipo 3

A_B [m ² /m ³]	77	200
\dot{m}_L [kg/s]	0.021	0.021
Q_L [W]	288.8	294.5
z [K]	18.5	22.2
Q_W [W]	864.1	1041.6
a [K]	5.3	4.3
η	0.78	0.84
\dot{m}_W [kg/h]	0.42	0.47

5.4.3 Relación entre el acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo y la densidad de empaquetadura

Tab. 5.7 Comparación columna de refrigeración de tipo 1 y tipo 4

A_B [m ² /m ³]	110	0
Q_L [W]	575,1	570
z [K]	13.4	23
a [K]	5.8	2.7
η	0.70	0.89

El acercamiento de la columna de tipo 4 sin piezas agregadas es mucho mejor que con piezas agregadas. Es de conocimiento general que a medida que se reduce el tamaño de las gotas de agua, aumenta notablemente la superficie total de todas las gotas (p. ej., un litro de niebla de agua alcanza aproximadamente la superficie de un campo de fútbol).

A diferencia de las columnas de tipo 1, tipo 2 y tipo 3, en la columna tipo 4 no se forma ninguna película de agua ni gotas grandes, sino niebla de agua. Gracias a la gran superficie de las gotas de agua rociadas, el aire puede absorber el calor de evaporación mediante la evaporación del agua N.N. >200 m²/m³.

Tab. 5.8 Comparación columna de refrigeración de tipo 2, tipo 3 y tipo 4

A_B [m ² /m ³]	77	200	0
a [K]	5.3	4.3	2.7



WL 320

TORRE DE REFRIGERACIÓN POR AGUA/PC

A medida que aumenta la densidad de empaquetadura, disminuye el acercamiento a . La niebla de agua debe considerarse como una empaquetadura con una gran densidad de empaquetadura.

6 Anexo

6.1 Datos técnicos

Bastidor

Carcasa, recubierta de polvo, color blanco	
Bastidor, recubierto de polvo, color negro	
Anchura	1100 mm
Profundidad	460 mm
Alto	1230 mm
Peso	aprox. 90 kg

Alimentación de tensión

230 V / 50 Hz, 16A

(Alternativas opcionales, ver placa de características)

Calefacción

Potencia hidráulica	1500 W
Ajustable en 3 etapas	500W/1000W/1500W
Termostato	50 °C, desconecta

Ventilador

Potencia	0,25 kW
Presión diferencial máx.:	430 Pa
Flujo volumétrico máx.	13 m ³ /mín
Alimentación	230 V / 50 Hz

Bomba

Potencia	0,66 kW
Altura de elevación máx.	34 m
Flujo volumétrico máx.	34 l/min
Número de revoluciones	2800 1/min
Alimentación	230 V / 50 Hz

Columna de refrigeración

Diámetro de diafragma	80 mm
Sección transversal	150 x 150 mm

WL 320: Columna de refrigeración de tipo 1

Densidad de empaquetadura	110 m ² /m ³
Sección transversal afluida:	150 × 150 mm
L × An × Al:	210 × 210 × 630 mm
Peso :	aprox. 5 kg

WL 320.01: Columna de refrigeración de tipo 2

como tipo 1

Densidad de empaquetadura:	77 m ² /m ³
----------------------------	-----------------------------------

WL 320,02: Columna de refrigeración de tipo 3

como tipo 1

Densidad de empaquetadura:	200 m ² /m ³
----------------------------	------------------------------------

WL 320,03: Columna de refrigeración de tipo 4

como tipo 1, sin piezas agregadas

Densidad de empaquetadura:	0 m ² /m ³
----------------------------	----------------------------------

WL 320,04: Columna de refrigeración de tipo 5

Densidad de empaquetadura:	variable
N° de fondos distribuidores:	3
Rango de medición de temperatura:	0 ... 50 °C
L × An × Al:	210 × 210 × 960 mm

Transmisor de presión diferencial

Rango de medición	0 - 10 mbar
Señal de salida	0 -10 V CC
Alimentación	24 V CC