

Manual de experimentos

WL 110 Unidad de inter-
cambiador de calor

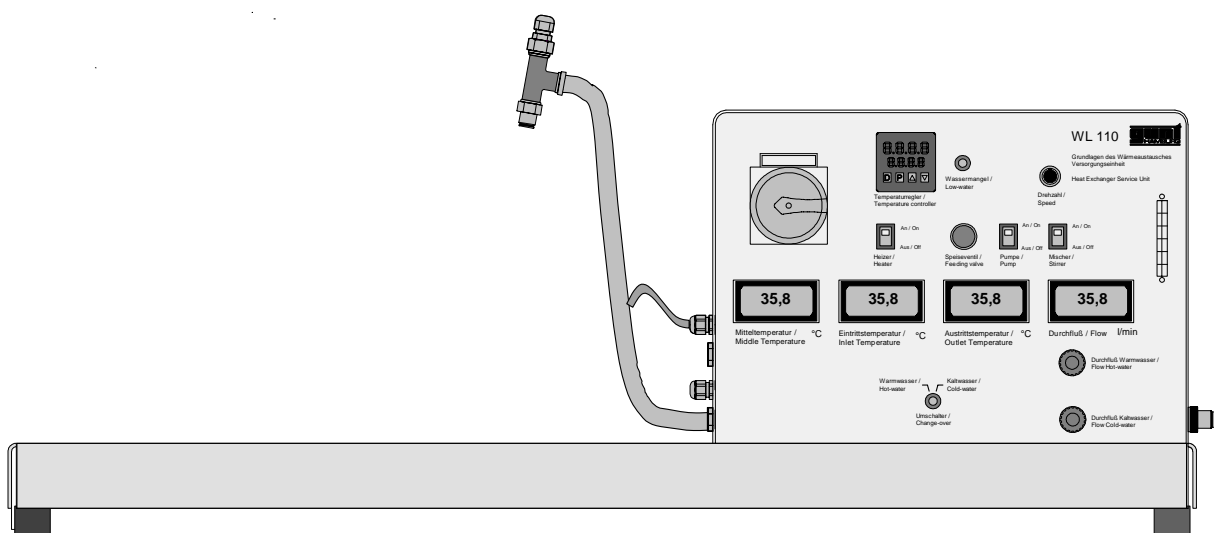
G.U.N.T. Gerätebau GmbH

Fahrenberg 14

D-22885 Barsbüttel • Alemania

Teléfono +49 (40) 670854-0

Telefax +49 (40) 670854-42



Manual de experimentos

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

¡El equipo sirve exclusivamente para educación y formación así como para investigación! ¡No ha sido concebido para el uso industrial!

Indice General

1	Introducción	1
2	Descripción del equipo	2
2.1	Estructura del equipo	2
2.2	Manejo	3
2.3	Esquema de proceso	5
2.4	Funcionamiento	5
2.5	Montaje del accesorio	6
2.6	Puesta en marcha	7
2.7	Conservación	7
2.8	Preparación del registro de datos de medición en PC	8
2.8.1	Montaje de la tarjeta de registro de datos de medición	8
2.8.2	Instalación del software	8
2.8.3	Inicio del software	9
2.9	Manejo del software	9
2.9.1	Menú de inicio	9
2.9.2	Pantalla "Chart" (Diagrama)	10
3	Indicaciones de seguridad	12
3.1	Peligros para la salud	12
3.2	Peligros para el equipo y su funcionamiento	12
4	Teoría del intercambiador de calor de tubo	13
4.1	Función de un intercambiador de calor	13

4.2	Funcionamiento del intercambiador de calor	13
4.2.1	Transmisión de calor del medio a la pared	14
4.2.2	Conducción de calor dentro de la pared	15
4.2.3	Coeficiente de transmisión térmica	15
4.3	Flujo calorífico a través del intercambiador de calor	17
4.4	Pérdidas en el intercambiador de calor	19
4.5	Evolución de la temperatura	19
5	Experimentos sobre el intercambiador de calor de tubo WL 110.01	22
5.1	Preparativos para los ensayos	22
5.1.1	Calentamiento del depósito de agua caliente	22
5.1.2	Purga del aire del intercambiador de calor	22
5.2	Realización de ensayos	23
5.3	Evaluación del ensayo	24
6	Anexo	27
6.1	Signos de fórmula y unidades	27
6.1.1	Signos	27
6.1.2	Indices	28
6.2	Fórmulas	28
6.3	Tablas	30
6.4	Hojas de cálculo:	32
6.4.1	Experimentos con corriente paralela (intercambiador de calor de tubo WL 110.01)	32
6.4.2	Experimentos con corriente inversa (intercambiador de calor de tubo WL 110.01)	33
6.5	Datos técnicos	34
6.6	Índice	35

1 Introducción

En muchas áreas de la industria la transmisión de calor **por convección** es de gran importancia. La transmisión de calor por convección se realiza a través del contacto y la conducción.

La transmisión de calor convectiva se divide en convección libre y forzada. En la convección forzada, el fluido que se debe calentar se envía a las bandas del intercambiador a través de un aparato de transporte (bomba, soplador); en cambio, en la convección libre el líquido calentado sólo fluye debido a la diferencia de densidad.

El **WL110 Unidad de intercambiador de calor con registro de datos de medición en PC de G.U.N.T.** ofrece la posibilidad de aproximarse experimentalmente al complejo mundo de la transmisión de calor por convección con sus múltiples variables. Gracias a las distintas superficies de intercambiador (accesorio opcional) y a la estrangulación del fluido en masa, permite conocer la aplicación industrial de la transmisión de calor y de la supervisión de procesos mediante PC.

En la realización de estas instrucciones para ensayos se ha intentado sobre todo mantener un orden lógico desde el punto de vista didáctico. Por eso, primero se explican las relaciones teóricas; después, mediante ensayos, algunas características habituales de la transferencia de calor. Poder guardar los datos de medición permite, posteriormente, procesar fácil y extensamente los resultados del ensayo.

2 Descripción del equipo

El equipo básico contiene todos los dispositivos de alimentación, por ejemplo bomba, indicadores de valores de medición y depósito de agua. Como **accesorio** se pueden adquirir diversos intercambiadores de calor:

WL 110.01 Intercambiador de calor de tubo

WL 110.02 Intercambiador de calor de placas

WL 110.03 Intercambiador de calor de haz de tubos

WL 110.04 Intercambiador de calor de doble revestimiento

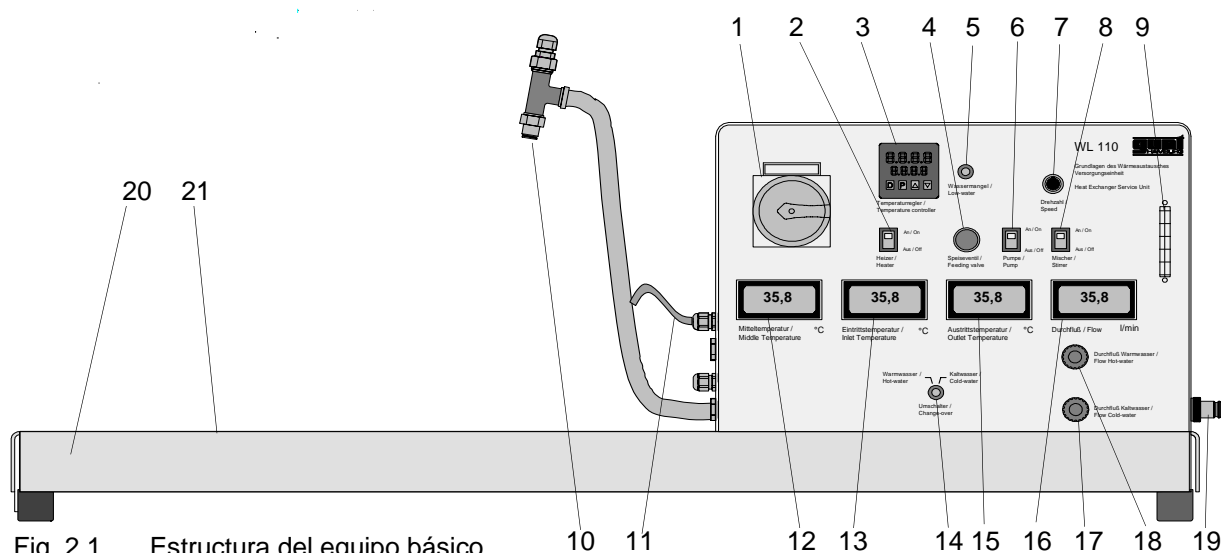


Fig. 2.1 Estructura del equipo básico

2.1 Estructura del equipo

Caja de distribución con

- Interruptor primario (1)
- Potenciómetro (7) de número de revoluciones de mezclador (accesorio)
- Interruptor por aumento de presión para válvula de alimentación de agua fría (4)
- Indicador de falta de agua en el depósito (5)

- Interruptor basculante de mezclador (8, accesorio), calefactor (2) y bomba (6)
- Termostato (3)
- Indicador de caudal (18) en el circuito de agua fría o en el de agua caliente
- Conexión para la tarjeta de registro de datos de medición en PC (9)
- 2x toma de agua fría con acoplamiento rápido (10)
- 2x toma de agua caliente con acoplamiento rápido (11)
- Indicadores de temperatura en el circuito de agua fría y en el de agua caliente: Temperatura de entrada (13), temperatura en el intercambiador de calor (12) y temperatura de salida (15)
- Conmutador de indicador de circuito de agua fría/agua caliente (14)
- Válvula de control del caudal de agua fría (17)
- Válvula de control del caudal de agua caliente (18)
- Salida de depósito, alimentación y evacuación de agua fría (19)
- Bastidor (20) con cubeta de recogida (21)

2.2 Manejo

La caja de distribución del equipo básico presenta varios indicadores y ajustes:

En primer lugar, el equipo se conecta mediante el **interruptor primario** (1).

El nivel de llenado del depósito de agua se supervisa con un **interruptor de flotador** (indicador luminoso 5). Si el indicador se ilumina, con el pulsador (4) se puede añadir agua fresca hasta que se vuelva a apagar el indicador luminoso (5). Para evitar que sufra daños, cuando el nivel de agua es demasiado bajo la calefacción se desconecta automáticamente.

La **bomba del circuito de agua caliente** se enciende con el interruptor (6) y la **calefacción** del circuito de agua caliente con el interruptor (2).

Si se utiliza el accesorio WL 110.04 Intercambiador de calor de doble revestimiento, con el interruptor (8) o el potenciómetro (7) se pueden ajustar la **hélice mixta** y su **número de revoluciones**. La hélice mixta se encarga de distribuir la temperatura homogéneamente en el calentador de agua del accesorio.

El equipo dispone de varios sensores para indicar las temperaturas y los caudales en el circuito de agua fría y en el de agua caliente. El **conmutador (14)** se encarga de indicar las temperaturas o caudales en los indicadores 12, 13, 15 y 16 según la tabla siguiente:

N indicador	Posición de agua caliente	Posición de agua fría
13	Temperatura de entrada T ₁	Temperatura de entrada T ₄

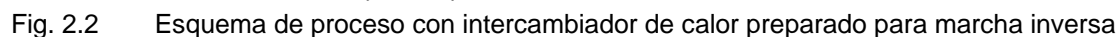
Tab. 2.1 Posiciones del conmutador (15)

Con la válvula (17) o (18) se puede ajustar el caudal en el circuito de agua fría o en el de agua caliente.

Si se utiliza el **sistema de registro de datos de medición en PC WL 110.05** (accesorio), el cable de conexión se debe enchufar a la hembra (9).

Asimismo, el equipo permite **regular la temperatura de entrada del agua caliente T₁** mediante una sonda térmica colocada en el depósito de agua caliente. Para ello el termostato (3) se debe ajustar correspondientemente; encontrará información al respecto en las instrucciones adjuntas de manejo del regulador. El elemento de ajuste en esta sencilla regulación de dos posiciones es la calefacción del equipo básico.

Todos los derechos reservados . G.U.N.T. Gerätebau GmbH., Alemania 02/01



La bomba centrífuga, que funciona a un número de revoluciones constante, transporta el agua desde el depósito de reserva y la hace pasar por el **circuito de agua caliente**. Unas válvulas permiten ajustar los caudales V_w (del circuito de agua caliente) y V_K (del circuito de agua fría). Dentro del intercambiador de calor, el agua caliente transmite parte de su energía inherente al agua fría del circuito de agua fría y vuelve a fluir al interior del depósito. Una calefacción eléctrica colocada en el depósito se encarga de calentar el agua. El **circuito de agua fría** se puede alimentar a través de la red local o de la red del laboratorio. Las temperaturas en el lado de agua caliente y en el lado de agua fría del intercambiador de calor se registran en puntos de medición de la temperatura situados a

la entrada, en el centro y a la salida del intercambiador.

Si se cambian los acoplamientos rápidos del intercambiador de calor, éste puede funcionar con corriente paralela y con corriente inversa.

2.5 Montaje del accesorio

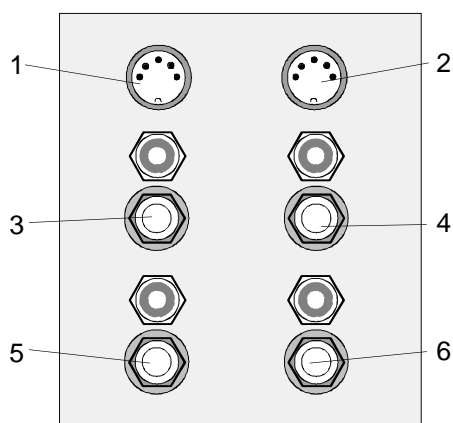


Fig. 2.3 Asignación de las conexiones

Los accesorios se montan en el área de trabajo del equipo básico y se conectan a éste mediante tubos flexibles de unión y conexiones eléctricas.

Estas son las conexiones que el equipo básico presenta en el área de trabajo:

1 - Sensor de temperatura (temperatura en el centro T_5) en el circuito de agua fría

2 - Sensor de temperatura (temperatura en el centro T_2) en el circuito de agua caliente

3 - Salida de agua caliente (del intercambiador de calor) con temperatura T_3

4 - Entrada de agua caliente (del intercambiador de calor) con temperatura T_1

5 - Entrada de agua fría (del intercambiador de calor) con temperatura T_4 / T_6 (corriente inversa/corriente paralela)

6 - Entrada de agua fría (al intercambiador de calor) con temperatura T_6 / T_4 (corriente inversa/corriente paralela)

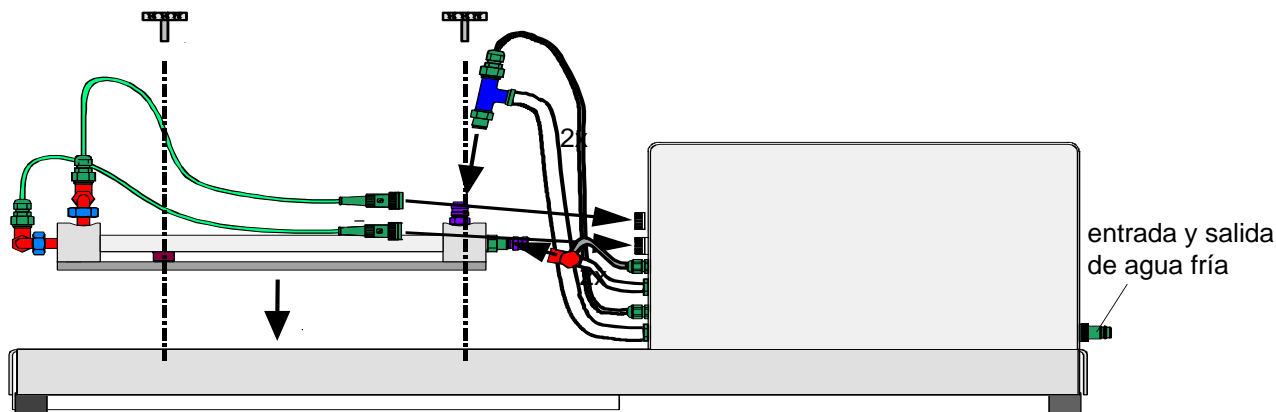


Fig. 2.4 Ejemplo de montaje del WL 110.01 Intercambiador de calor de tubo

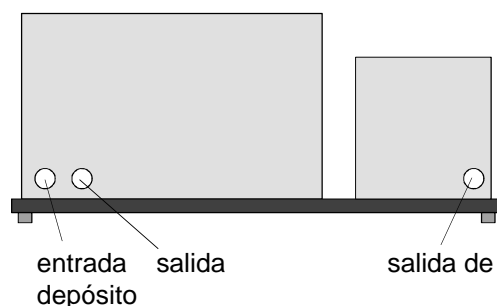


Fig. 2.5 Conexión a la canalización de agua local (vista lateral)

La entrada y la salida de agua fría se abastecen de la red local de agua. La entrada y la salida se conectan como se muestra en la figura de la izquierda (Fig. 2.5).

2.6 Puesta en marcha

- Conectar el equipo básico y el accesorio como se ha explicado anteriormente, y establecer una alimentación de tensión de 230 V, ~50 Hz.
- Abrir la entrada de agua fría.
- Encender el aparato mediante el interruptor primario.
- Presionar el palpador de agua de alimentación hasta que se apague el indicador luminoso de falta de agua. Ahora el depósito está lleno.
- El equipo ya está listo para realizar ensayos.

2.7 Conservación

- Las manchas de cal se deben eliminar periódicamente con un limpiador suave.
- Cuando se vaya a guardar el accesorio WL 110.01 Intercambiador de calor de tubo, vaciar toda el agua para evitar la formación de algas.
- Cuando sea necesario, limpiar la cubeta de recogida.

2.8 Preparación del registro de datos de medición en PC

2.8.1 Montaje de la tarjeta de registro de datos de medición

Antes de poner en funcionamiento la instalación hay que montar la tarjeta de registro de datos de medición en un PC:

- Apagar el PC y desconectar el enchufe de red.
- Abrir la torre del PC (¡atención!, tenga en cuenta las condiciones de garantía).
- Buscar una toma ISA libre en la placa base (comprobar que la dirección 0320 HEX del PC aún no esté ocupada).
- Introducir la tarjeta con cuidado y atornillarla. Procurar no tocar los componentes electrónicos del ordenador, ya que hay peligro de que los componentes se descarguen de electricidad y sufran daños.

Volver a cerrar la torre del PC. Conectar el equipo y la tarjeta de registro de datos de medición mediante un cable de cinta plana.

2.8.2 Instalación del software

- Encender el PC e iniciar Windows.
- Introducir el primer disquete de instalación en la disquetera.
- Seleccionar la unidad de disco en que se encuentre el disquete de instalación.
- Buscar el archivo install.exe y hacer doble clic en él para ejecutarlo.

El software se instala en el PC siguiendo la guía del usuario.

2.8.3 Inicio del software

Antes de encender el ordenador se debe conectar el banco de ensayos a una alimentación.

- Iniciar Windows.
- Hacer clic en el icono correspondiente para iniciar el software.

2.9 Manejo del software

Para visualizar los datos de medición se utiliza el software Visual Designer. Este software se ejecuta en Windows. Los medios gráficos utilizados hacen que sea muy claro. El programa incluye un total de 2 imágenes, ordenadas jerárquicamente:

2.9.1 Menú de inicio

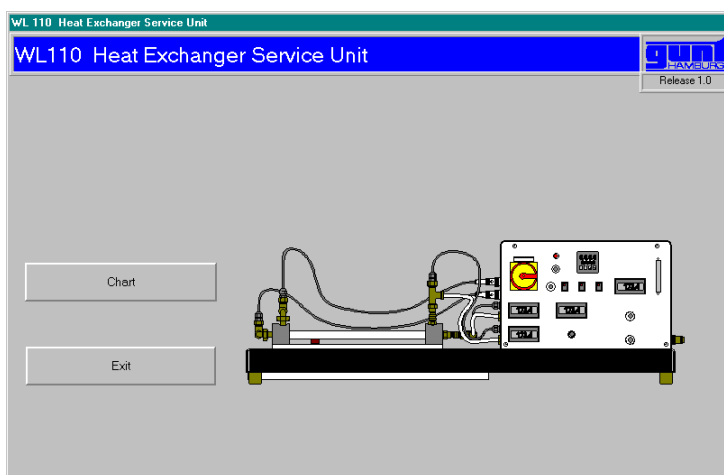


Fig. 2.6 Pantalla del menú de inicio

Desde aquí se puede pasar a la pantalla "Chart" (Diagrama) o finalizar el programa con "Exit" (Salir).

2.9.2 Pantalla "Chart" (Diagrama)

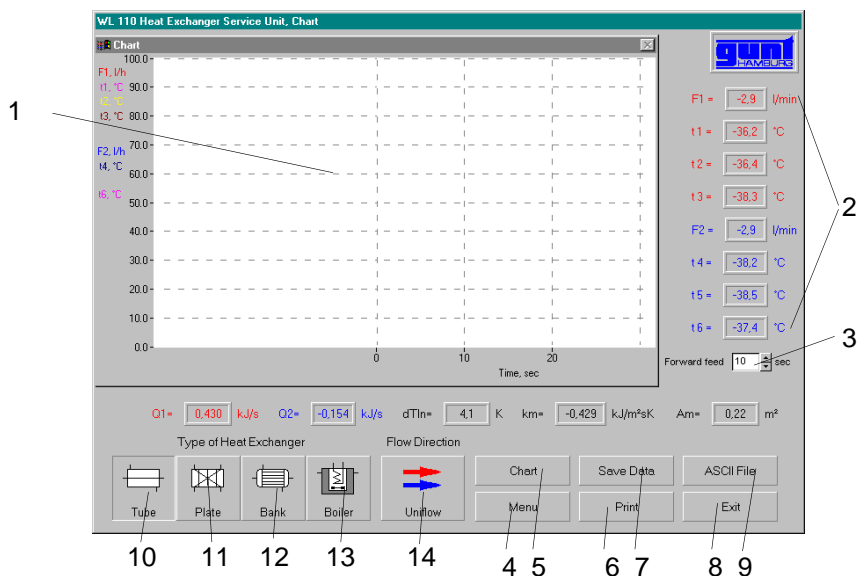


Fig. 2.7 Pantalla "Chart" (Diagrama)

En el área 1 de esta pantalla se registran los valores de medición de la temperatura ($T_1 \dots T_6$), así como los caudales $V_w (=V_1)$ y $V_k (=V_2)$ a lo largo del tiempo t . En el área 2 se muestran los valores de medición actuales. La escala horizontal se puede modificar en (3).

Debajo del diagrama se muestran algunos valores calculados.

Si se presiona el botón (5), se pasa a la visualización de los perfiles de temperatura característicos en el intercambiador de calor.

Los valores de medición se pueden guardar en un archivo. Con el botón (9) se especifica el nombre del archivo; con el botón (7), se registran los valores en el momento del accionamiento y se guardan junto con la hora actual en formato ASCII.

Los datos se pueden procesar gráficamente más adelante en un programa de tratamiento adecuado (por ejemplo, MS-Excel).

Con el botón (6), el contenido de la pantalla se envía a una impresora.

Se debe seleccionar el accesorio que se va a utilizar con el selector de accesorio. Las correspondencias son las siguientes:

- Botón (10) - WL 110.01 Intercambiador de calor de tubo
- Botón (11) - WL 110.02 Intercambiador de calor de placas
- Botón (12) - WL 110.03 Intercambiador de calor de haz de tubos
- Botón (13) - WL 110.04 Intercambiador de calor de doble revestimiento

Según el accesorio que se seleccione, se debe elegir el sentido de flujo en el intercambiador de calor mediante el botón (14): corriente paralela o inversa.

3 Indicaciones de seguridad

3.1 Peligros para la salud

Cuando se trabaja con el **Banco de ensayos WL 110 de los principios del intercambio térmico** y sus accesorios se deben tener en cuenta los siguientes aspectos relacionados con la **seguridad durante el trabajo**:



- **¡PELIGRO!** Precaución al abrir el equipo de manejo e indicación y manipular las demás conexiones eléctricas.
Peligro de descarga eléctrica. Desconectar primero el enchufe de red.
- Utilizar sólo fusibles con el valor adecuado.
- **¡PELIGRO!** No desatornillar las tapas del elemento calefactor. Las piezas se encuentran bajo tensión.
- **¡PELIGRO!** El circuito de agua caliente puede llegar a temperaturas de hasta 85 C.
Peligro de quemaduras por contacto con el agua caliente o los elementos conductores calientes.

3.2 Peligros para el equipo y su funcionamiento

- En el indicador digital del equipo de manejo e indicación aparecen valores incorrectos cuando las salidas están abiertas (cuando el sensor o los elementos calefactores no están conectados).

4 Teoría del intercambiador de calor de tubo

4.1 Función de un intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor se utilizan para transmitir calor entre dos medios. Durante la transmisión, los medios no entran en contacto directo ni se mezclan. El calor se transporta del medio caliente al frío a través de una pared divisoria termoconductora. Un ejemplo de intercambiador de calor son los radiadores de coche (medios: agua/aire), los radiadores de aceite (medios: aceite/aire o agua) o los serpentines refrigerantes en armarios de hielo (medios: aire/refrigerante). En el banco de ensayos WL 110 se utiliza agua para los dos medios.

4.2 Funcionamiento del intercambiador de calor

El medio caliente fluye a lo largo de una pared divisoria a la que transmite calor, lo que hace que el medio se vaya enfriando. La pared divisoria calentada transmite el calor al medio frío que fluye al otro lado de ésta. El medio frío se calienta. Así pues, la transmisión de calor a la pared divisoria se puede subdividir en tres procesos separados.

1. El medio caliente transmite calor a la pared
2. La pared divisoria conduce el calor de la superficie caliente a la fría
3. La pared divisoria transmite calor al medio frío

En la figura 4,1 se representa un esquema de la evolución de la temperatura. Cada paso de la transmisión de calor tiene asignada una diferencia de temperatura: ΔT_1 , ΔT_w y ΔT_2 .

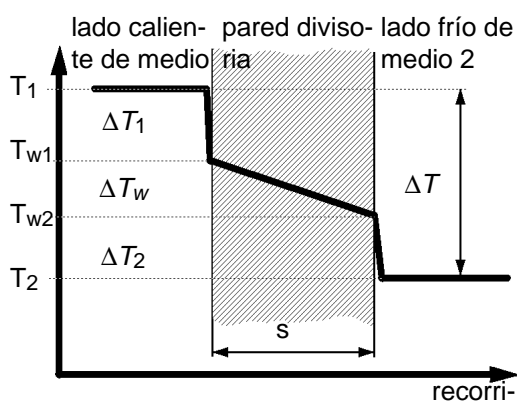


Fig. 4.1 Evolución de la temperatura durante la transferencia y la conducción de calor a la pared

Observación: En lo sucesivo, se hará referencia a las magnitudes de la parte caliente con el índice **1** y a las de la fría con el **2**. Los índices **E** y **A** hacen referencia a la entrada y a la salida, respectivamente, mientras que el índice **w** se refiere a la pared divisoria.

La efectividad de un intercambiador de calor a través del transporte de calor se determina en los tres procesos de transmisión de calor.

4.2.1 Transmisión de calor del medio a la pared

La capacidad de transmitir calor de un medio a una pared o a la inversa se describe mediante los coeficientes de transferencia de calor α .

$$Q = \alpha A \Delta T t \quad (4.1)$$

La fórmula facilita la cantidad de calor Q transmitida durante el tiempo t . Junto al coeficiente de transferencia de calor α y a la superficie de pared A , también es decisiva para la transmisión de calor la diferencia de temperatura ΔT entre el medio y la pared. Por norma general, lo interesante es conocer el flujo calorífico, es decir, la cantidad de calor por unidad de tiempo que transmite un intercambiador de calor. El flujo calorífico se expresa en una unidad de medida de potencia, por ejemplo kW o kJ/s.

En general, para el flujo calorífico \dot{Q} es válida la ecuación siguiente:

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T \quad (4.2)$$

O, dado el caso, del lado de pared caliente con el medio 1 o del lado frío con el medio 2:

$$\dot{Q} = \alpha_1 A \Delta T_1 \quad (4.3)$$

$$\text{Siendo } \Delta T_1 = T_1 - T_{w1} \quad (4.4)$$

$$\dot{Q} = \alpha_2 A \Delta T_2 \quad (4.5)$$

$$\text{Siendo } \Delta T_2 = T_2 - T_{w2} \quad (4.6)$$

4.2.2 Conducción de calor dentro de la pared

Dentro de la pared, el calor se transmite del lado caliente al frío por conducción. En este caso se establece la relación siguiente:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda A \Delta T_w}{s} \quad (4.7)$$

$$\text{Siendo } \Delta T_w = T_{w1} - T_{w2} \quad (4.8)$$

λ es el coeficiente de conducción del calor del material de la pared divisoria y s es el grosor de la pared.

4.2.3 Coeficiente de transmisión térmica

Como el flujo calorífico en estado estacionario es igual durante las 3 fases, se puede afirmar que:

$$\dot{Q} = \alpha_1 A \Delta T_1 = \frac{\lambda A \Delta T_w}{s} = \alpha_2 A \Delta T_2 \quad (4.9)$$

o, dicho de forma más sencilla, el **coeficiente medio de transmisión térmica** del intercambiador de calor k_m es:

$$k_m = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (4.10)$$

El flujo calorífico \dot{Q} es, entonces:

$$\dot{Q} = k_m A \Delta T \quad (4.11)$$

$$\text{Siendo } \Delta T = T_1 - T_2 \quad (4.12)$$

El coeficiente medio de transmisión térmica es característico del intercambiador de calor. Permite comparar entre sí distintos intercambiadores de calor. Si se toma un tipo de construcción determinado, el coeficiente medio de transmisión térmica es relativamente constante, por lo que contribuye a dimensionar intercambiadores de calor de tipo de construcción similar.

Como la temperatura a lo largo de la pared divisoria no es constante, hay que contar con una diferencia de temperatura media. La evolución de la temperatura no es lineal; por eso, en vez de la media aritmética, se debe utilizar la media logarítmica ΔT_{\ln} . Además, por norma general la superficie del lado caliente y del frío no es igual de grande; por ejemplo, en los intercambiadores de calor de tubo del banco de ensayos, la superficie interna y externa del tubo son distintas, por lo que también se debe utilizar una superficie media A_m .

De aquí se deriva la siguiente ecuación para \dot{Q} :

$$\dot{Q} = k_m A_m \Delta T_{\ln} \quad (4.13)$$

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})}{\ln \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} \right)} \quad (4.14)$$

$$A_m = \frac{A_1 - A_2}{\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)} \quad (4.15)$$

Observación: *ln* representa el logaritmo natural de base **e = 2,71828**.

4.3 Flujo calorífico a través del intercambiador de calor

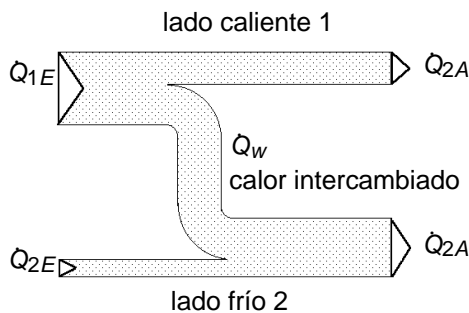


Fig. 4.2 Flujo de la energía dentro del intercambiador de calor sin tener en cuenta las pérdidas

En la figura 4.2 se representa esquemáticamente el flujo de energía y calor en un intercambiador de calor. No se han incluido las pérdidas.

El flujo calorífico intercambiado \dot{Q}_w se calcula a partir de la diferencia entre el flujo de entrada y el de salida \dot{Q}_E y \dot{Q}_A . Si se toma un intercambiador de calor ideal sin pérdidas, para el cálculo se puede utilizar tanto el medio caliente como el frío (véase figura 4.2). Por norma general, el flujo calorífico se calcula a partir del caudal másico \dot{m} , la capacidad térmica específica c_p y la temperatura absoluta T :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot T \quad (4.16)$$

De este modo, el flujo calorífico intercambiado es:

$$\dot{Q}_{w1} = \dot{Q}_{1A} - \dot{Q}_{1E} = m_1 c_{p1} (T_{1A} - T_{1E}) \quad (4.17)$$

para el medio 1

$$\dot{Q}_{w2} = \dot{Q}_{2A} - \dot{Q}_{2E} = m_2 c_{p2} (T_{2A} - T_{2E}) \quad (4.18)$$

para el medio 2

Si no hay pérdidas:

$$\dot{Q}_w = - \dot{Q}_{w1} = \dot{Q}_{w2} \quad (4.19)$$

Si los dos flujos caloríficos son distintos, el intercambiador de calor tendrá pérdidas, por lo que en el cálculo siguiente se utiliza el valor medio.

$$\dot{Q}_{wm} = \frac{(- \dot{Q}_{w1}) + \dot{Q}_{w2}}{2} \quad (4.20)$$

De este modo se puede calcular el coeficiente medio de transmisión térmica k_m del intercambiador de calor.

$$k_m = \frac{\dot{Q}_{wm}}{A_m \Delta T_{\ln}} \quad (4.21)$$

$$k_m = \frac{m_2 c_{p2} (T_{2A} - T_{2E}) - m_1 c_{p1} (T_{1A} - T_{1E})}{2 A_m (\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})} \ln \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} \right) \quad (4.22)$$

$$\text{Siendo } m_1 = \rho_1 V_1 \quad (4.23)$$

$$\text{Y siendo } m_2 = \rho_2 V_2 \quad (4.24)$$

4.4 Pérdidas en el intercambiador de calor

Si hay un defecto en el aislamiento, se presentan pérdidas en el intercambiador de calor. Cuando se quiera definir un grado de efectividad que tenga en cuenta estas pérdidas, se debe distinguir entre dos casos. El grado de efectividad se define básicamente como la relación entre uso y consumo. En el caso del enfriamiento del medio caliente, el uso es el calor emitido por el medio caliente y el consumo es el calor que debe transportar el medio frío.

$$\eta_{kühl} = \frac{Q_{w1}}{Q_{w2}} \quad (4.25)$$

Las pérdidas, por ejemplo por radiación o convección, mejoran el grado de efectividad en este caso. En el caso del calentamiento de un medio, el uso es la cantidad de calor absorbida por el medio frío y el consumo es el calor que produce el medio caliente.

$$\eta_{heiz} = \frac{Q_{w2}}{Q_{w1}} \quad (4.26)$$

4.5 Evolución de la temperatura

La evolución de la temperatura a través del intercambiador de calor en sentido longitudinal es muy difícil de calcular. En consecuencia, aquí sólo se explicará grosso modo el procedimiento para solucionar el problema.

La caída y la subida de la temperatura son proporcionales a la cantidad de temperatura intercambiada a través de la pared divisoria. Ésta, a su vez, es también proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos medios. Así pues, para los intercambiadores de calor de corriente paralela son válidas las relaciones diferenciales siguientes:

Emisión de calor, medio 1

$$\frac{dQ}{dx} = - m_1 c_{p1} \frac{dT_1}{dx} \quad (4.27)$$

Absorción de calor, medio 2

$$\frac{dQ}{dx} = m_2 c_{p2} \frac{dT_2}{dx} \quad (4.28)$$

Conducción de calor a través de la pared

$$dQ = k (T_1 - T_2) dA \quad (4.29)$$

$$\text{Siendo } dA = b dx \quad (4.30)$$

Aquí A es la superficie de intercambiador de calor con ancho b y longitud x . k es el coeficiente de transmisión térmica local. Si se parte de la sencilla suposición de que las dimensiones son independientes de la temperatura, estas ecuaciones dan lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden para la evolución de la temperatura según el recorrido x .

$$\frac{dT_1(x)}{dx} = - k_1 T_1(x) + k_1 T_2(x) \quad (4.31)$$

$$\text{Siendo } k_1 = \frac{k b}{c_{p1} m_1} \quad (4.32)$$

$$\frac{dT_2(x)}{dx} = k_2 T_1(x) - k_2 T_2(x) \quad (4.33)$$

$$\text{Siendo } k_2 = \frac{k b}{c_{p2} \dot{m}_2} \quad (4.34)$$

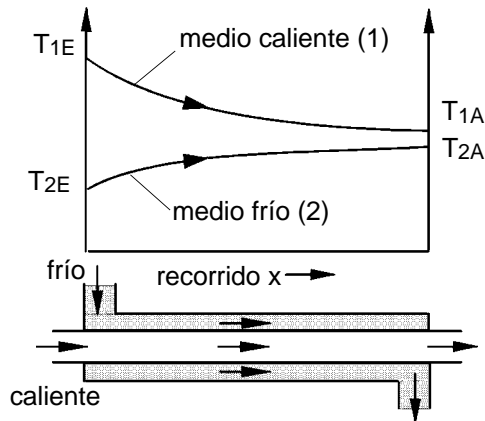


Fig. 4.3 Evolución de la temperatura en el intercambiador de calor en sentido longitudinal

Las soluciones a este sistema de ecuaciones de evolución de la temperatura a través del intercambiador de calor en sentido longitudinal tienen la estructura siguiente.

Con corriente paralela:

$$T_1(x) = (A_0 + A_1 x) e^{-(k_1 + k_2) x} \quad (4.35)$$

$$T_2(x) = (B_0 + B_1 x) e^{-(k_1 + k_2) x} \quad (4.36)$$

Con corriente inversa:

$$T_1(x) = (C_0 + C_1 x) e^{-(k_2 - k_1) x} \quad (4.37)$$

$$T_2(x) = (D_0 + D_1 x) e^{-(k_2 - k_1) x} \quad (4.38)$$

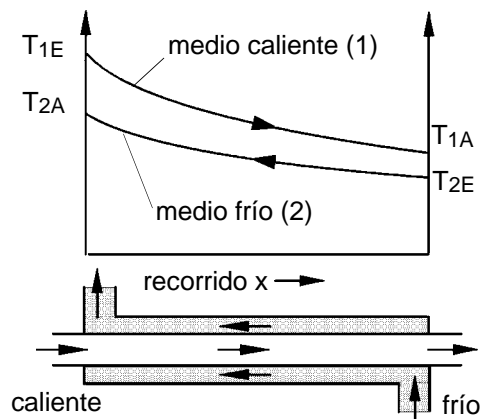


Fig. 4.4 Evolución de la temperatura en el intercambiador de calor en sentido longitudinal

Las constantes $A - D$ son expresiones muy complejas que, para simplificar el conjunto, no se detallan. Lo importante es que las temperaturas evolucionan de forma exponencial y no lineal. Con corriente inversa, se da un caso especial: si las constantes k_1 y k_2 son iguales, la evolución puede ser lineal y paralela. La evolución de la temperatura se muestra gráficamente en las figuras 4.3 y 4.4. También es interesante el hecho de que, con corriente inversa, la temperatura de salida T_{2A} del medio calentado puede ser mayor que la temperatura de salida del medio enfriado T_{1A} . En cambio, en el caso de la corriente paralela, la temperatura de salida T_{2A} es siempre menor que T_{1A} .

5 Experimentos sobre el intercambiador de calor de tubo WL 110.01

5.1 Preparativos para los ensayos

5.1.1 Calentamiento del depósito de agua caliente

- Comprobar el nivel de agua en el depósito y llenarlo si es necesario.
- Encender el interruptor primario.
- Ajustar en el termostato la temperatura que se desea del agua caliente.
- Encender la calefacción. Para aumentar la temperatura ambiente de 20 °C a 60 °C se necesitan unos 20 min. Mientras se calienta el agua, se puede empezar a purgar el aire.

5.1.2 Purga del aire del intercambiador de calor



- Conectar el intercambiador de calor al equipo básico mediante los tubos según si se desea trabajar con corriente paralela o inversa. Sólo hay que cambiar los tubos de agua fría del intercambiador de calor. De lo contrario, existe **peligro de quemaduras**.
- Ajustar un caudal alto de agua fría mediante la válvula reguladora de precisión. Dejar fluir el agua unos instantes hasta que no queden burbujas.
- Conectar la bomba.
- Ajustar un caudal alto de agua caliente mediante la válvula reguladora de precisión. Dejar fluir el agua unos instantes.

Precaución cuando el sistema esté caliente:
Peligro de quemaduras con el agua de salida.

5.2 Realización de ensayos

La corriente de agua caliente conserva el sentido con ambos modos de funcionamiento.

- Ajustar los caudales que se desee en las válvulas de regulación de precisión.
- Una vez ajustados los caudales, esperar a que se alcance un equilibrio térmico. Esto ocurre cuando las temperaturas cambian menos de 1 C por minuto. Para ello basta con observar en los termómetros las dos temperaturas de salida T_3 y T_6 (con corriente paralela) o T_3 y T_4 (con corriente inversa). Si no se alcanza un equilibrio térmico, los caudales determinados por el intercambiador de calor serán falsos.
- Después de alcanzarse un estado térmico estable, las temperaturas se leen y se registran en una hoja de cálculo, junto con los caudales ajustados, o se guardan mediante el registro de datos de medición en PC. Se debe tener en cuenta la asignación de puntos de medición de la temperatura establecida en la hoja de cálculo. Varía según si se utiliza corriente paralela o inversa.

Nota: El agua fría que sale de las tuberías suele tardar bastante tiempo en fluir a una temperatura constante. Por eso es importante que un rato antes de realizar los ensayos el agua fluya con caudal máximo.

5.3 Evaluación del ensayo

Los ensayos se evalúan con la hoja de trabajo y las fórmulas recogidas en el capítulo 6, o con el registro de datos de medición en PC. Los valores necesarios c_p y ρ se obtienen de la tabla conforme a la temperatura media T_2 . Si la temperatura no aparece en la tabla, los valores se pueden interpolar linealmente. En el caso de los caudales y de los caudales máxicos, hay que prestar especial atención a que todas las magnitudes hagan referencia a segundos conforme al sistema internacional de unidades SI. Las temperaturas se deben indicar en grados Kelvin, como es habitual en termodinámica. Ahora bien, como siempre se trata de diferencias de temperatura, no es necesario realizar la conversión de forma expresa. Hay que prestar especial atención a la correcta asignación de las temperaturas de entrada y salida (tabla 5.1).

	Corriente paralela	Corriente inversa
Entrada AF (T_{E2})	T_4	T_6
Salida AF (T_{A2})	T_6	T_4
Entrada AC (T_{E1})	T_1	T_1
Salida AC (T_{A2})	T_3	T_3

Tab. 5.1 índice de temperatura con corriente paralela e inversa

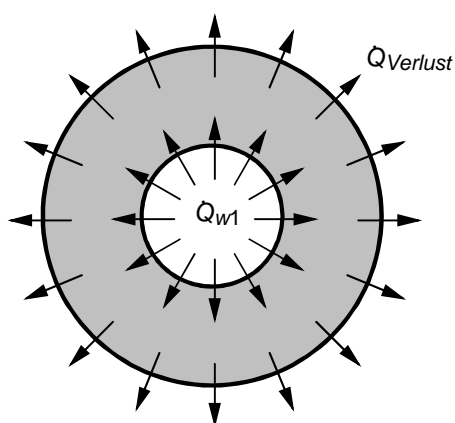


Fig. 5.1 Tubo doble (por dentro agua caliente, por fuera agua fría)

El flujo calorífico que realmente se intercambia (ecuación 4.20) entre el flujo de agua caliente y el flujo de agua fría depende del tipo de intercambiador de calor. Las pérdidas de calor en el intercambiador de calor de tubo WL110.01 y el intercambiador de calor de haz de tubos WL 110.03 según la figura 5.1 **sólo se producen en el tubo exterior** (lado del agua fría). De este modo, el flujo calorífico (en el centro) se desvía respecto a la ecuación 4.20

$$Q_{wm} = -\dot{Q}_{w1} \quad (5.1)$$

En las páginas siguientes se muestra un ejemplo de evaluación de una serie de ensayos. Los valores se han registrado mediante el registro de datos de medición en PC y se han elaborado gráficamente con un programa de hoja de cálculo. Se detallan en la tabla 5.2. La temperatura del agua

\dot{V}_1 en l/min	\dot{V}_2 en l/min	T_1 en °C	T_2 en °C	T_3 en °C	T_4 en °C	T_5 en °C	T_6 en °C	Q_1 en W	Q_2 en W	k_m en $\text{kJ/m}^2\text{sK}$
3	1,5	62,8	58,3	54,6	10,6	17,9	22,7	-1694	1264	1,81
3	1,5	62,2	58,1	53,4	10	17,9	24	-1816	1462	1,97
3,53	5,4	54,1	49	44,4	10,2	12,3	14,5	-2357	1620	2,85
3,53	5,4	58	52,7	47,2	9,6	12,4	15,8	-2623	2335	2,90
Corriente paralela										
Corriente inversa										

Tab. 5.2 Ejemplos de valores de medición y de cálculo (corresponden a 1 ensayo cada uno, con el mismo caudal de corriente paralela e inversa)

caliente se ha ajustado a 60 °C; la temperatura del agua fría era la de la canalización.

En la figura 5.2 se representa la evaluación de la temperatura con corriente paralela; en la figura 5.3, la evaluación de la temperatura con corriente inversa. En los diagramas se han reflejado la temperatura

T en °C

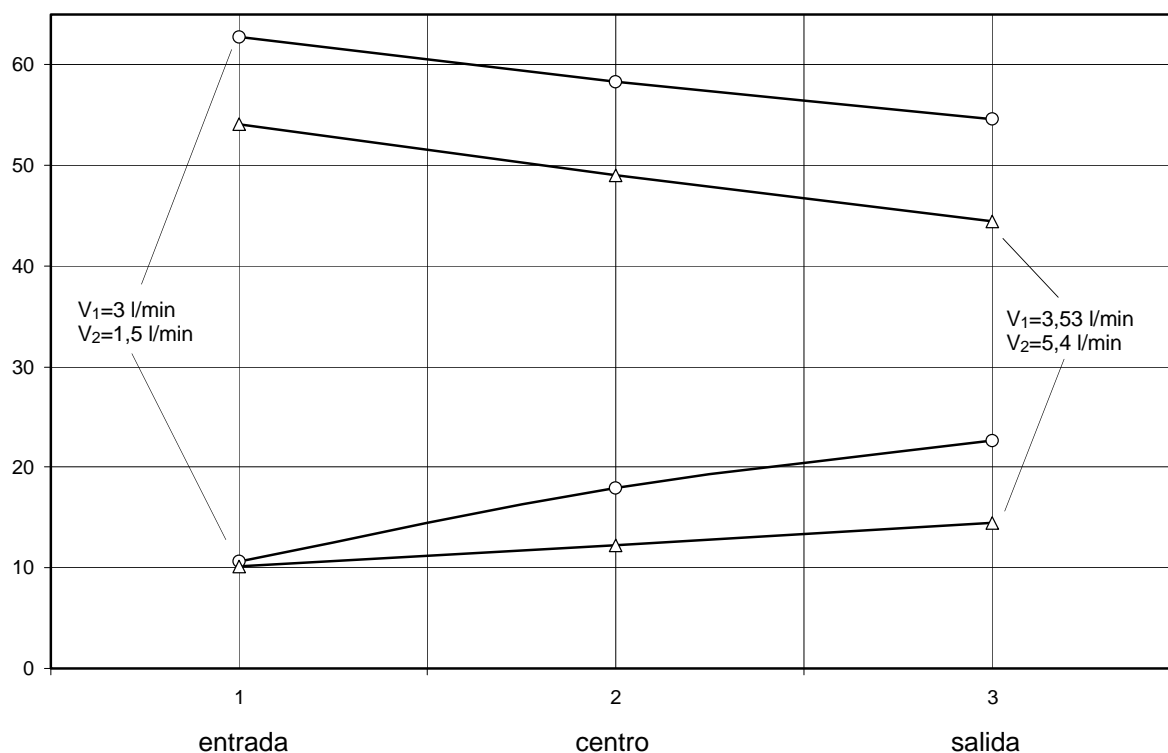


Fig. 5.2 Perfil de temperatura con corriente paralela

T en °C

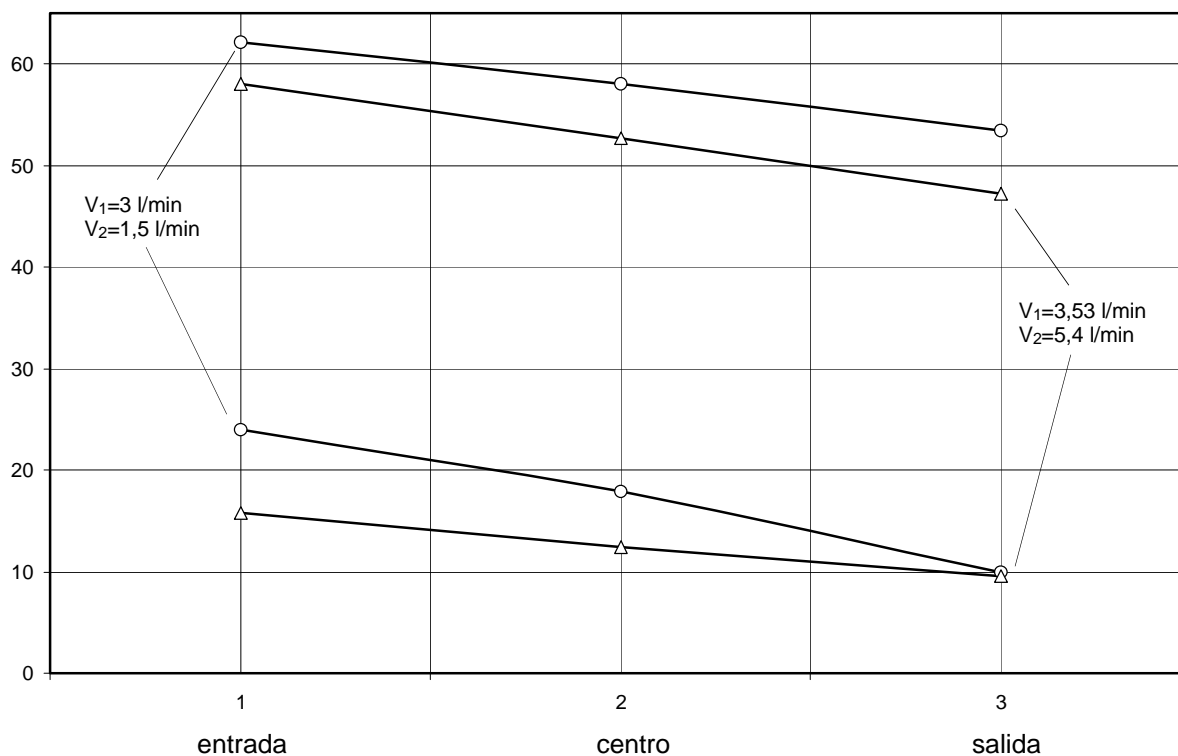


Fig. 5.3 Perfil de temperatura con corriente inversa

de entrada y de salida T_E y T_A , así como la temperatura T_M (en la mitad del intercambiador de calor).

El coeficiente de transmisión térmica k_m crece cuando aumenta el caudal. Eso se debe a que el aumento de la velocidad de fluido mejora la transferencia de calor. Una capa límite entre el líquido y la pared del tubo ejerce de aislante térmico. A medida que la inundación se vuelve más turbulenta, esta capa límite queda destruida y se mejora la transferencia de calor.

Además, se puede ver que el coeficiente de transmisión térmica de los caudales constantes es independiente del sentido de flujo. En consecuencia, el coeficiente de transmisión térmica se utiliza a menudo en el diseño de intercambiadores de calor.

6 Anexo

6.1 Signos de fórmula y unidades

6.1.1 Signos

A, B, C, D : constantes de un sistema de ecuaciones

A : superficie de intercambiador de calor m^2

A_m : superficie intercambiador calor logarítm. media m^2

Q : cantidad de calor J

\dot{Q} : flujo calorífico W

T : temperatura K

\dot{V} : caudal $\frac{m^3}{s}$

ΔT_{\ln} : diferencia temperat. logarítm. media K

b : ancho de intercambiador de calor m

c_p : capacidad térmica específica $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

k : coeficiente de transmisión térmica local $\frac{kJ}{m^2 \cdot s \cdot K}$

k_m : coeficiente medio de transmisión térmica $\frac{kJ}{m^2 \cdot s \cdot K}$

\dot{m} : caudal másico $\frac{kg}{s}$

s : grosor de la pared m

x : largo de recorrido m

α : coeficiente de transferencia de calor $\frac{m^2}{s}$

η : grado de efectividad

λ : coeficiente de conductibilidad térmica $\frac{W}{K \cdot m}$

ρ : densidad $\frac{kg}{m^3}$

ν : viscosidad cinemática $\frac{m^2}{s}$

6.1.2 Indices

A: salida

E: entrada

M: centro

m: medio

w: pared

1,2,3,4,5,6: puntos de medición de la temperatura

1: lado de agua caliente

2: lado de agua fría

Δ : diferencia

6.2 Fórmulas

$$Q = \alpha A \Delta T t \quad (4.1)$$

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda A \Delta T_w}{s} \quad (4.7)$$

$$Q = \alpha_1 A \Delta T_1 = \frac{\lambda A \Delta T_w}{s} = \alpha_2 A \Delta T_2 \quad (4.9)$$

$$\dot{Q} = k_m A \Delta T \quad (4.10)$$

$$k_m = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (4.12)$$

$$\dot{Q} = k_m A_m \Delta T_{ln} \quad (4.13)$$

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})}{\ln \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} \right)} \quad (4.14)$$

$$A_m = \frac{A_1 - A_2}{\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)} \quad (4.15)$$

$$\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot T \quad (4.16)$$

$$\dot{Q}_{w1} = \dot{Q}_{1A} - \dot{Q}_{1E} = m_1 c_{p1} (T_{1A} - T_{1E}) \quad (4.17)$$

$$\dot{Q}_{w2} = \dot{Q}_{2A} - \dot{Q}_{2E} = m_2 c_{p2} (T_{2A} - T_{2E}) \quad (4.18)$$

$$\dot{Q}_w = - \dot{Q}_{w1} = \dot{Q}_{w2} \quad (4.19)$$

$$\dot{Q}_{wm} = \frac{(- \dot{Q}_{w1}) + \dot{Q}_{w2}}{2} \quad (4.20)$$

$$k_m = \frac{\dot{Q}_{wm}}{A_m \Delta T_{\ln}} \quad (4.21)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (4.23)$$

$$\eta_{\text{kühl}} = \frac{\dot{Q}_{w1}}{\dot{Q}_{w2}} \quad (4.25)$$

$$\eta_{\text{heiz}} = \frac{\dot{Q}_{w2}}{\dot{Q}_{w1}} \quad (4.26)$$

$$\frac{dQ}{dx} = - m \cdot c_p \frac{dT}{dx} \quad (4.27)$$

$$dQ = k (T_1 - T_2) dA \quad (4.29)$$

$$dA = b dx \quad (4.30)$$

$$\frac{dT_1(x)}{dx} = -k_1 T_1(x) + k_1 T_2(x) \quad (4.31)$$

$$k_1 = \frac{k b}{c_{p1} \dot{m}_1} 2(x) \quad (4.32)$$

$$T_1(x) = (A_0 + A_1 x) e^{-(k_1 + k_2) x} \quad (4.35)$$

$$T_2(x) = (B_0 + B_1 x) e^{-(k_1 + k_2) x} \quad (4.36)$$

$$T_1(x) = (C_0 + C_1 x) e^{-(k_2 - k_1) x} \quad (4.37)$$

$$T_2(x) = (D_0 + D_1 x) e^{-(k_2 - k_1) x} \quad (4.38)$$

6.3 Tablas

Temperatura		Densidad ρ [kg/dm ³]	Capacidad térmica específica c_p [kJ/kg K]
T [°C]	T [K]		
0	273	0,9998	4,220
20	293	0,9982	4,183
40	313	0,9921	4,178
60	333	0,9830	4,191
80	353	0,9720	4,199
100	373	0,9580	4,216

Tab. 6.1 Valores del agua (a 1.013 mbar)

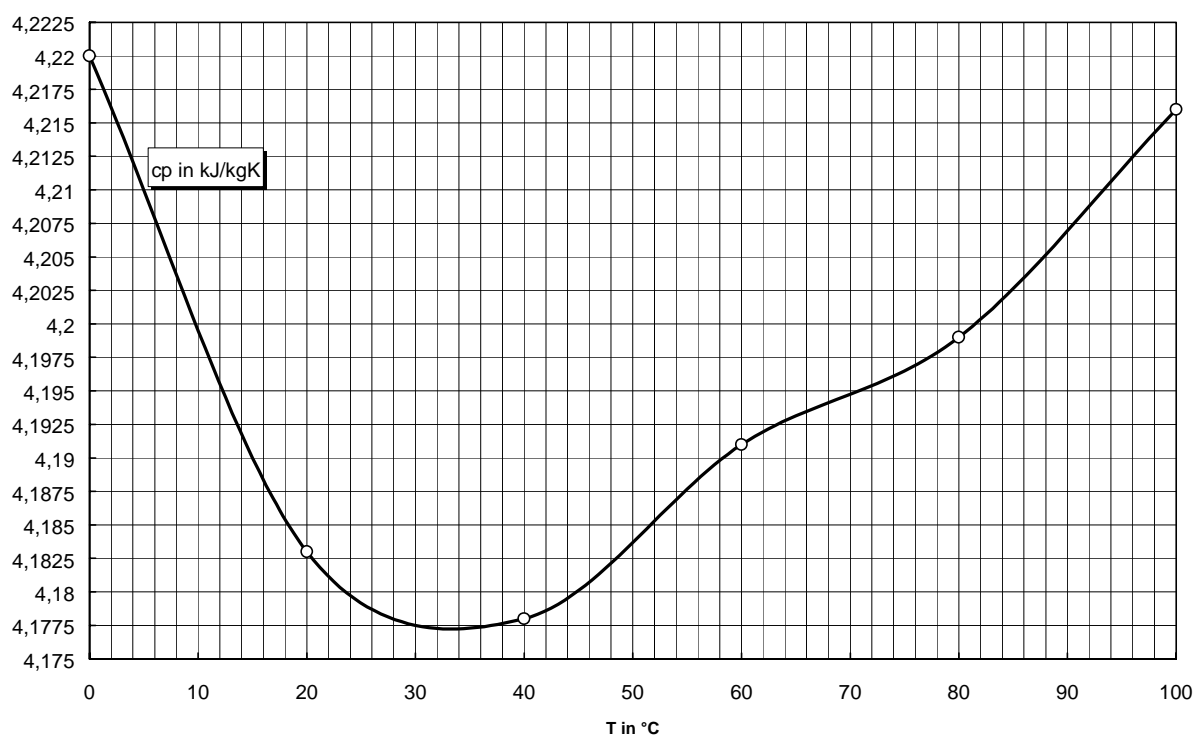


Fig. 6.1 Capacidad térmica especial del agua según la temperatura

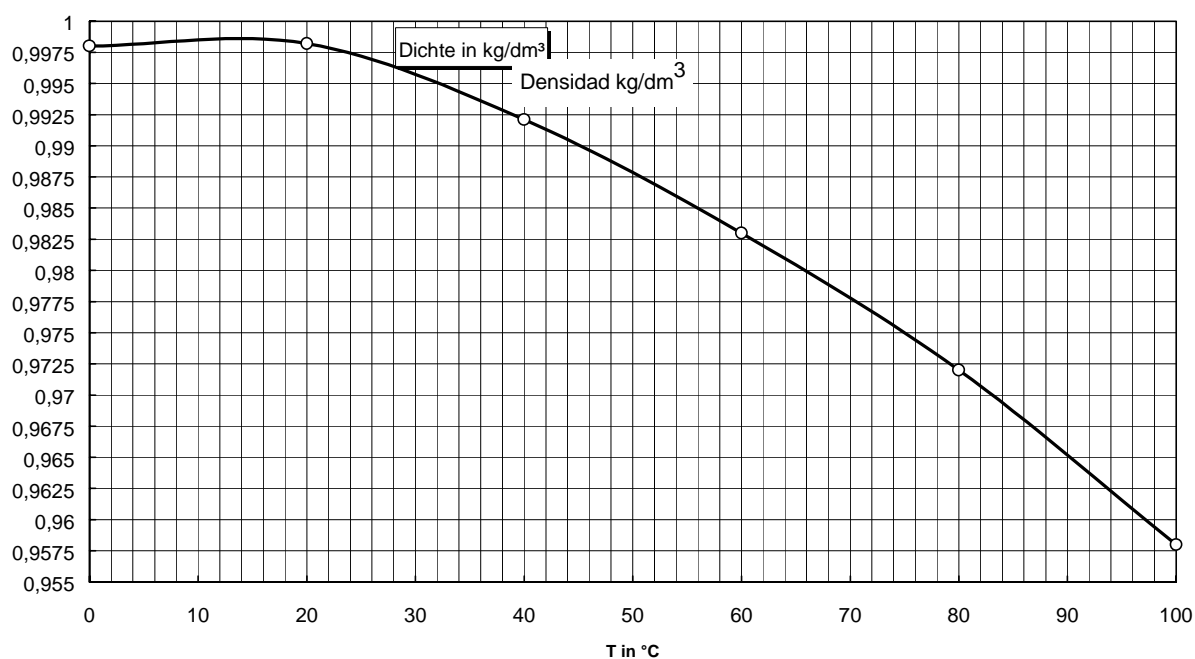


Fig. 6.2 Densidad del agua según la temperatura

6.4 Hojas de cálculo:

6.4.1 Experimentos con corriente paralela (intercambiador de calor de tubo WL 110.01)

T₁: T_{1E}; T₂: T_{1M}; T₃: T_{1A}; T₄: T_{2E}; T₅: T_{2M}; T₆: T_{2A},
superficie intercambiador calor logarítm. media $A_m = 0,0227 \text{ m}^2$

	Flow rate		Temperatures				Spec. heat capac. $C_{p1,2}$ [kJ/kgK]	Density ρ [kg/l]	Mass flow rate $m_{1,2}$ [kg/s]	Heat flux $Q_{w1,2}$ [kJ/s]
	V [l/h]	V [l/h]	T _{1,2E} [°C]	T _{1,2A} [°C]	T _{1,2M} [°C]	$\Delta T_{1,2}$ [K]				
1 (hot)										
2 (cold)										
	Mean heat flux Q_{wm} [kJ/s]		Log. temp. difference ΔT_{ln} [K]		Coefficient of mean heat transmission k_m [kJ/m ² sK]		Remarks			
	Flow rate		Temperatures				Spec. heat capac. $C_{p1,2}$ [kJ/kgK]	Density ρ [kg/l]	Mass flow rate $m_{1,2}$ [kg/s]	Heat flux $Q_{w1,2}$ [kJ/s]
	V [l/h]	V [l/h]	T _{1,2E} [°C]	T _{1,2A} [°C]	T _{1,2M} [°C]	$\Delta T_{1,2}$ [K]				
1 (hot)										
2 (cold)										
	Mean heat flux Q_{wm} [kJ/s]		Log. temp. difference ΔT_{ln} [K]		Coefficient of mean heat transmission k_m [kJ/m ² sK]		Remarks			

6.4.2 Experimentos con corriente inversa (intercambiador de calor de tubo WL 110.01)

$T_1: T_{1E}; T_2: T_{1M}; T_3: T_{2A}; T_4: T_{2A}; T_5: T_{2M}; T_6: T_{2E}$,
superficie intercambiador calor logarítm. media $A_m = 0,0227 \text{ m}^2$

	Flow rate		Temperatures				Spec. heat capac. $c_{p1,2}$ [kJ/kgK]	Density ρ [kg/l]	Mass flow rate $m_{1,2}$ [kg/s]	Heat flux $Q_{w1,2}$ [kJ/s]
	V [l/h]	V [l/h]	$T_{1,2E}$ [°C]	$T_{1,2A}$ [°C]	$T_{1,2M}$ [°C]	$\Delta T_{1,2}$ [K]				
1(hot)										
2(cold)										
	Mean heat flux Q_{wm} [kJ/s]		Log. temp. difference ΔT_{ln} [K]		Coefficient of mean heat transmission k_m [kJ/m ² sK]		Remarks			
	Flow rate		Temperatures				Spec. heat capac. $c_{p1,2}$ [kJ/kgK]	Density ρ [kg/l]	Mass flow rate $m_{1,2}$ [kg/s]	Heat flux $Q_{w1,2}$ [kJ/s]
	V [l/h]	V [l/h]	$T_{1,2E}$ [°C]	$T_{1,2A}$ [°C]	$T_{1,2M}$ [°C]	$\Delta T_{1,2}$ [K]				
1(hot)										
2(cold)										
	Mean heat flux Q_{wm} [kJ/s]		Log. temp. difference ΔT_{ln} [K]		Coefficient of mean heat transmission k_m [kJ/m ² sK]		Remarks			

6.5 Datos técnicos

Dimensiones:	1000 x 600 x300 <i>mm</i>
Peso:	aprox. 80 <i>kg</i>
Depósito de agua, cantidad:	10 <i>L</i>
Bomba:	230 <i>V</i> , 50 <i>Hz</i>
Caudal:	540 <i>l/h</i>
Altura de elevación:	25 <i>m</i>
Calefactor:	3000 <i>W</i>
Termostato:	0 a 80 °C
Superficie de intercambiador de calor (WL 110.01):	
lado caliente:	0,0197 <i>m</i> ²
lado frío:	0,0259 <i>m</i> ²
logarítmica media:	0,0227 <i>m</i> ²
Caudal visualizado	
lado caliente y frío:	600 <i>l/h</i>
Elemento PTC:	-40 a 150 <i>C</i>

6.6 Indice

A	
	agua de alimentación 7
C	
	cable de cinta plana 8
	calefacción 4
	cantidad de calor 14
	capacidad térmica específica 17
	caudal másico 17
	circuito de agua caliente 5
	circuito de agua fría 5
	coeficiente de conducción del calor 15
	coeficiente de transferencia de calor 14
	coeficiente de transmisión térmica 16
	convección 1
D	
	descarga eléctrica 12
	diferencia de temperatura 14
	disquete de instalación 8
E	
	evaluación de la temperatura 25
	evolución de la temperatura 13, 19
	Excel 10
F	
	flujo calorífico 14
G	
	grado de efectividad 19
H	
	hélice mixta 4
I	
	indicador digital 12
	intercambiador de calor 13
	interruptor de flotador 3
P	
	perfil de temperatura 10
R	
	red local de agua 7
	registro de datos de medición 4
S	
	seguridad durante el trabajo 12
	sistema de ecuaciones diferenciales 20
	superficie de pared 14

WL 110 Unidad de intercambiador de calor



T	
	tarjeta de registro de datos de medición. 8
	transmisión de calor 1, 13
	transporte de calor 13
V	
	válvula de control 3