

Mecánica de corriente



Física → Mecánica → Mecánica de los líquidos y los gases

ciencia aplicada → Ingeniería → Mecánica Aplicada → Fluidos y Aerodinámica

ciencia aplicada → Medicina → Biomecánica



Nivel de dificultad

difícil



Tamaño del grupo

2



Tiempo de preparación

20 minutos



Tiempo de ejecución

45+ minutos

This content can also be found online at:



<http://localhost:1337/c/605f8330230ae00003eef1b6>

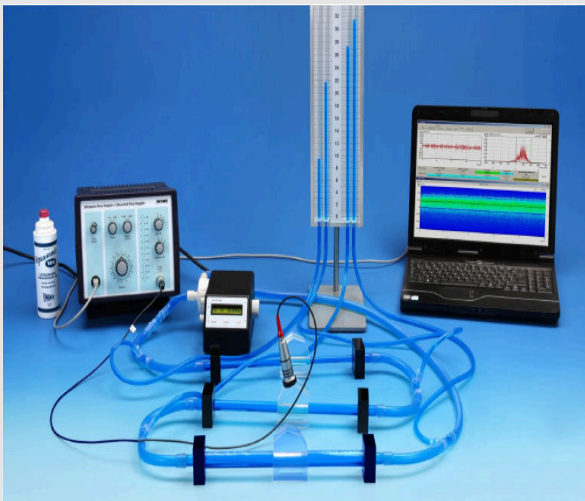
PHYWE



Información para el profesor

Aplicación

PHYWE



Montaje

Los bajos laminares y turbulentos son la base de innumerables aplicaciones técnicas, desde las centrales eléctricas hasta los aviones. Por ello, la comprensión de su comportamiento individual es muy importante para entender por qué vuelan los aviones y cómo se transportan la materia y la energía a través de los fluidos.

Información adicional para el profesor(1/3)

PHYWE



Conocimiento

Previo



Principio

Los conocimientos previos para este experimento se encuentran en la sección de principio.

El efecto Doppler de los ultrasonidos se utiliza para estudiar las leyes de los líquidos que fluyen de forma constante y laminar en un circuito de tubos, que constituyen la base de numerosas aplicaciones técnicas. El experimento se centra especialmente en la relación entre la velocidad del flujo y el área transversal del tubo (condición de continuidad), así como en la relación entre la resistencia al flujo y el diámetro del tubo (ley de Hagen-Poiseuille). Si se conoce la geometría, ambas relaciones pueden utilizarse para determinar la viscosidad o fluidez dinámica.

Información adicional para el profesor(2/3)

PHYWE



Objetivo



Tareas

El objetivo de este experimento es aprender sobre la mecánica general del flujo.

1. Determinar el desplazamiento de frecuencia Doppler medio y máximo (f_{mean} , f_{max}) para cuatro velocidades diferentes de la bomba y tres diámetros diferentes del tubo con la unidad de ultrasonido Doppler.
2. Calcular la velocidad media del flujo de acuerdo con la ley Doppler, así como los caudales basados en la sección transversal conocida del tubo y de acuerdo con la ecuación de continuidad.
3. Medir la caída de presión para las diferentes velocidades de flujo y diámetros de tubo con la ayuda de los tubos verticales.

Información adicional para el profesor (3/3)

PHYWE



Tareas

1. Calcular la resistencia al flujo según la ley de Ohm en función de la pérdida de carga y del caudal. Examinar la dependencia de la resistencia al flujo del diámetro del tubo (ley de Hagen-Poiseuille).
2. Calcular la viscosidad dinámica a partir de la ley de Hagen-Poiseuille y de la geometría conocida.
3. Calcular el número de Reynolds para los diferentes diámetros de tubo en función de las velocidades de flujo y haga una declaración sobre las características de flujo de los diferentes tubos.

Principio (1/4)

PHYWE

Mediciones de ultrasonido Doppler

Si una onda ultrasónica con la frecuencia f_0 choca con un objeto en movimiento, lo que provoca un desplazamiento de la frecuencia correspondiente al efecto Doppler. Lo siguiente se aplica a una baja velocidad de movimiento v del objeto con respecto a la velocidad del sonido c en el medio: $\Delta f = f_0 \frac{v}{c} (\cos(\alpha) + \cos(\beta))$ (1)

α y β son los ángulos entre v y la normal de la onda. En el caso de un sistema de pulso-eco con un emisor=receptor de ultrasonidos, $\alpha = \beta$ y por lo tanto: $\Delta f = 2f_0 \frac{v}{c} \cos(\alpha)$ (2)

Para la medición con el prisma unido al tubo rígido, el siguiente ángulo Doppler resulta de la ley de refracción:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin\left(\alpha_P \frac{c_P}{c_L}\right)\right) \quad (3)$$

Con α_P - ángulo de irradiación acústica, c_P - velocidad del sonido del prisma, c_L - velocidad del sonido del líquido. La velocidad media del flujo se puede calcular con esta ecuación y con la ecuación Doppler (2).

Principio (2/4)

PHYWE

Las leyes del flujo:

Lo siguiente se aplica a un flujo constante:

Ecuación de continuidad: $A_1 v_1 = A_2 v_2 = Q = \text{const.}$ (4)

con v_1 y v_2 siendo la velocidad media en los tubos 1 y 2. A_1 y A_2 son las secciones de los tubos.

La ecuación de Bernoulli: $p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = p_0$ o para un tubo horizontal: $p + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_0$ (5)

es decir, la suma de la presión estática (p) y la presión de estancamiento (presión hidrodinámica) es constante. Ley de Ohm para medios que fluyen (flujo laminar): $\Delta p = RQ$ (6)

$$R = \frac{8}{\pi} \frac{1}{r^4} \eta \quad (7)$$

Principio (3/4)

PHYWE

Aquí, R es la resistencia al flujo de un tubo de la longitud l y del radio r en el que un líquido con la viscosidad dinámica η fluye. La proposición fundamental de la ley de Hagen-Poiseuille es la fuerte dependencia de la resistencia al flujo en el diámetro del tubo:

$$R \propto \frac{1}{r^4} \quad (7a)$$

En el caso de un flujo laminar (Hagen-Poiseuille), la pérdida de presión es proporcional a la velocidad del flujo (caudal). En el caso de un flujo turbulento, la resistencia al flujo R depende de la velocidad del flujo y la pérdida de presión es aproximadamente proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo.

$$\text{Número de Reynolds: } \Re = \frac{v_{\text{mean}} \rho d}{\eta} \quad (8)$$

Principio (4/4)

PHYWE

Para el flujo de tubos, la cantidad geométrica d es igual al diámetro del tubo. El número de Reynolds crítico para la transición del flujo laminar al turbulento es de aproximadamente 2320.

En el caso de un flujo laminar en el tubo, la relación entre la velocidad media del flujo v_{mean} y la velocidad máxima del flujo v_{max} es de aproximadamente 1:2. En el caso de los flujos turbulentos, la relación se reduce a aproximadamente 1:1,25.

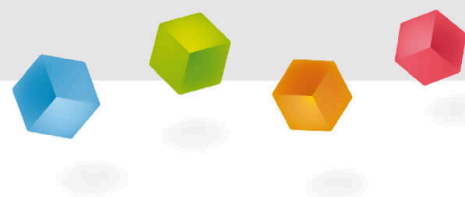
Relación entre las unidades de presión (medición de la escala de presión): El valor que se lee en la escala de presión en cm de columna de líquido se puede convertir en unidades del SI con la ayuda de la densidad del líquido y la aceleración gravitatoria.

$$\Delta p[\text{Pa}] = \frac{\Delta p(\text{mm liquid column})}{1000} \rho_{\text{F}} g (9)$$

Material

Posición	Material	Artículo No.	Cantidad
1	Set Básico: Tecnología Doppler II de Ultrasonido	13926-99	1
2	Kit de extensión: mecánica de flúidos	13923-01	1

PHYWE



Montaje y ejecución

Montaje (1/10)

PHYWE

Montaje del experimento

La figura 1 muestra el montaje completo del experimento. En la siguiente sección se describen los pasos individuales y se proporciona información sobre la puesta en marcha de los distintos dispositivos. Sugerimos que el experimento sea montado por el personal del curso de laboratorio, ya que la primera puesta en marcha requiere mucho tiempo y es propensa a errores.

Disposición del sistema de flujo:

El sistema de flujo consta de tres tubos de flujo rígidos con diferentes diámetros. Están conectados entre sí con dos tubos flexibles (longitud 30 cm, diámetro interior 10 mm).

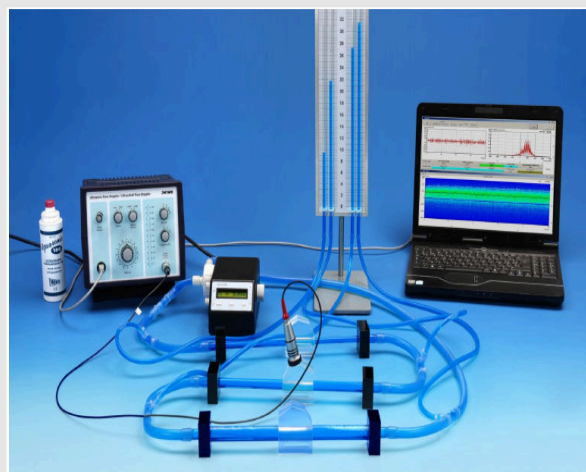


Figura 1

Montaje (2/10)

PHYWE

Los ramales para la conexión a los tubos verticales para la medición de la presión se encuentran en el centro de estos trozos de tubo flexible. La conexión a la bomba se realiza con dos tubos adicionales (diámetro interior de 10 mm). El tubo con la rama (conector de llenado) debe conectarse al lado de aspiración de la bomba (conector central). El tubo más largo con la bifurcación hacia el tubo vertical cerca del primer tubo de medición (diámetro exterior de 20 mm) debe conectarse al lado de impulsión (conector tangencial) de la bomba. El orden de los tubos es el siguiente en la dirección del flujo: tubo 1 (diámetro exterior 20 mm, pared 2 mm), tubo 2 (diámetro exterior 15 mm, pared 2,5 mm) y tubo 3 (diámetro exterior 10 mm, pared 1,5 mm). Los cuatro tubos verticales se conectan a los tubos con conectores Luer de izquierda a derecha en el orden de la dirección del flujo (véase también el diagrama de montaje). Para sostener la escala de presión se utiliza una varilla de soporte (diámetro de aproximadamente 12 mm) con un pie.

Nota: Alinear la escala de presión en la plomada cuando no hay flujo para asegurar que todas las escalas muestran el mismo valor.

Montaje (3/10)

PHYWE

Atención: Para garantizar una conexión estanca, los puntos de conexión de los tubos flexibles con los tubos rígidos y los conectores de la bomba deben asegurarse con bridas para cables (incluidas en el suministro). Colocar los tubos de forma que no se doblen para evitar cualquier resistencia adicional al flujo.

Llenado de los tubos rígidos y flexibles Antes de llenar los tubos, mezcle bien el líquido del maniquí Doppler. El líquido incluye partículas de dispersión para medir la señal de dispersión de los ultrasonidos. Estas partículas tienen una densidad mayor que el líquido y, por lo tanto, tienden a depositarse en el fondo del frasco.

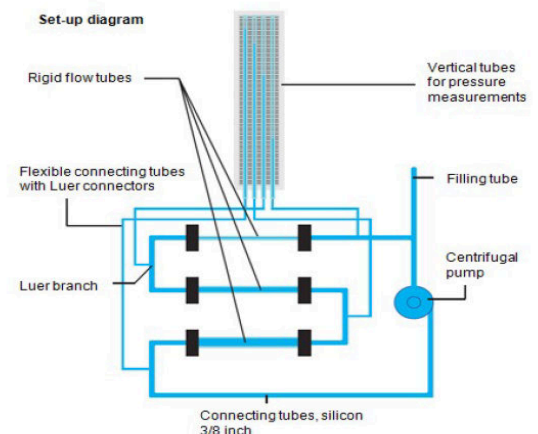


Fig. 2: Esquema de montaje

Montaje (4/10)

PHYWE

Para la mezcla, poner el frasco boca abajo y girar suavemente hasta que el depósito (partículas de dispersión) se haya desprendido. A continuación, agitar el frasco enérgicamente para mezclar el contenido por completo. Cada vez que haya que rellenar el sistema de tubos, hay que volver a mezclar el líquido.

Llenar el sistema a través del tubo de llenado y con la ayuda del embudo que se incluye en el suministro. Insertar el embudo sólo sin apretar en el tubo flexible para que el aire del sistema pueda salir. Para facilitar la manipulación, el tubo para el llenado del sistema debe sujetarse también en un sistema de soporte. Llenar el líquido lentamente para que el aire pueda salir más fácilmente. Agitar el frasco repetidamente para agitar las partículas dispersas. Esperar un momento después del llenado hasta que todas las burbujas de aire hayan subido a los tubos. Las burbujas de aire producen una señal de ultrasonido muy fuerte, que puede hacer que el dispositivo de medición Doppler se sobrepase y, por lo tanto, distorsione el resultado de la medición. Si es necesario, ventilar la cabeza de la bomba inclinándola. Para aprovechar al máximo la escala de presión, llene los tubos verticales aproximadamente por la mitad (valor de la escala de aproximadamente 50 a 55 cm). A continuación, la

El tubo de llenado puede cerrarse con un tapón (incluido en el suministro). La ventilación adicional se realiza mediante un bombeo lento a través de los tubos verticales.

Montaje (5/10)

PHYWE

Atención: Antes de poner en marcha la bomba, asegurarse de que el control de velocidad de la bomba centrífuga se gira en sentido antihorario hasta el tope. En el caso de velocidades de flujo elevadas, la presión en el sistema de tubos aumenta fuertemente, por lo que la columna de líquido de la escala de presión puede superar su máximo y el líquido puede escapar. Limitar la velocidad máxima de la bomba para el sistema semilleno a aproximadamente el 50 % o conectar los extremos superiores de los tubos verticales con tubos flexibles de silicona.

Determinación de la presión estática

Para las mediciones de presión, el valor de la escala se lee en los tubos verticales para cada ajuste de flujo diferente. Este valor corresponde a la presión estática con la unidad "cm de columna de líquido". Los depósitos de partículas dispersas pueden provocar diferencias de concentración en los tubos verticales. Debido a la presión osmótica, esto provocará diferentes niveles de líquido en los tubos, que deben determinarse y restarse en consecuencia antes de la medición de la presión (sin flujo).

Montaje (6/10)

PHYWE

Nota: Los puntos de medición de la presión están situados en puntos de idéntico diámetro de tubo y, por lo tanto, para flujos laminares con idéntica velocidad de flujo para poder medir la caída de presión a través de los puntos de medición directamente a través del cambio de la presión estática.

Atención: Los tubos de flujo rígidos y el conjunto de tubos flexibles pueden limpiarse con los productos de limpieza disponibles en el mercado. Sin embargo, para eliminar los restos de gel, basta con utilizar agua con un poco de detergente y, si es necesario, un paño suave. Si los tubos no se han utilizado durante un período de tiempo prolongado, las partículas de dispersión del líquido fantasma de los ultrasonidos se depositarán en el fondo de los tubos y pueden flocular. Estos copos, sin embargo, pueden disolverse de nuevo tras un cierto periodo de bombeo rápido y girando los tubos.

Nota: Si el circuito lleno se deja en reposo durante un periodo de tiempo más largo, recomendamos sellar los tubos verticales para evitar que el agua del líquido se evapore.

Montaje (7/10)

PHYWE

Fijación de los prismas Doppler:

La velocidad del flujo se mide con la unidad de ultrasonidos Doppler "FlowDop" y los prismas Doppler. Para ello, el prisma Doppler se fija al tubo que se va a examinar. El punto de fijación no debe situarse directamente detrás de la entrada del tubo, ya que podrían producirse remolinos y turbulencias en el flujo, que a su vez podrían afectar a los resultados de la medición. En el caso de los tubos de 10 y 15 mm de diámetro, se realizará una medición en la zona del centro del tubo hasta el extremo del mismo, y en el caso del tubo de 20 mm de diámetro exterior, se realizará una

La medición en el extremo del tubo (salida del flujo) proporcionará los mejores resultados. Antes de fijar el prisma, debe aplicarse una capa de gel de ultrasonidos a la superficie curva. Esto es necesario para lograr un buen acoplamiento acústico entre el prisma y el tubo. Colocar el prisma al tubo y girarlo y moverlo ligeramente para distribuir la capa de gel de manera uniforme y sin burbujas.

Montaje (8/10)

PHYWE

En el siguiente paso, la superficie del transductor de ultrasonidos y las superficies angulares del prisma también se tratan con gel. Siempre debe haber una cantidad suficiente de gel entre el transductor y el prisma durante la medición para lograr intensidades de señal suficientes. Utilizar la superficie de 30° del prisma Doppler para medir la velocidad del flujo (la mejor relación entre la intensidad de la señal y el ángulo Doppler para todos los diámetros de tubo y los caudales que se utilizan para este experimento).

Unidad de ultrasonido Doppler:

La medición utiliza una sonda ultrasónica de 2 MHz, que debe conectarse a la unidad Doppler. Ajustar la frecuencia del transductor de 2 MHz con la ayuda del interruptor de selección de frecuencia. El ajuste del interruptor "Volumen de la muestra" es muy importante. Para la medición de la velocidad media del flujo, este conmutador debe ajustarse en "Large" (en el caso de "Small", sólo se medirán las señales procedentes de una pequeña parte del tubo). La potencia de transmisión se puede variar con el regulador "Potencia", mientras que "Ganancia" controla la ganancia de recepción. "Potencia" y "Ganancia" deben ajustarse siempre de forma que la intensidad de la señal que muestra el software sea lo suficientemente alta sin sobrepasarse.

Montaje (9/10)

PHYWE

Si el líquido Doppler está bien mezclado y si hay suficientes partículas de dispersión en el volumen de medición, recomendamos utilizar los ajustes "Potencia"=Alta y "Ganancia"=20 dB. Evitar cambiar los ajustes durante una medición. El volumen de la señal sonora de la medición se puede controlar con el regulador "Volumen de audio".

Nota: Si la amplitud de la señal disminuye fuertemente durante la medición, asegurarse de que no se han depositado demasiadas partículas de dispersión en el fondo (vuelva a mezclar el líquido). Para obtener un espectro de frecuencias Doppler que se corresponda con la velocidad media del flujo, hay que asegurar de que hay suficientes partículas de dispersión en la zona de medición del tubo y que estas partículas están distribuidas uniformemente.

Nota: Ajustar la ganancia de la unidad Doppler para que la señal no se sobrepase, lo que de otro modo daría lugar a errores en la determinación de la frecuencia.

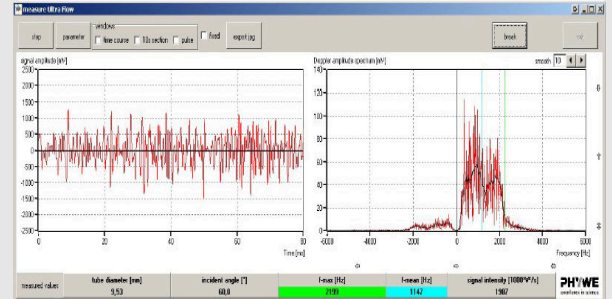
Montaje (10/10)

PHYWE

Software

El software lee los datos de medición de la unidad de ultrasonidos Doppler y los presenta en forma de gráfico. La ventana de la izquierda muestra las intensidades de dispersión actuales, mientras que la ventana de la derecha muestra el espectro de estos datos. El espectro se utiliza para determinar y mostrar los dos valores de frecuencia f_{mean} y f_{max} . Si se conocen las condiciones geométricas, se puede calcular la velocidad media y máxima del flujo a partir de estos valores y de acuerdo con la ley Doppler.

Atención: Tener en cuenta las instrucciones especiales de funcionamiento y seguridad que figuran en los manuales de instrucciones de la unidad de ultrasonido Doppler y de la bomba centrífuga.



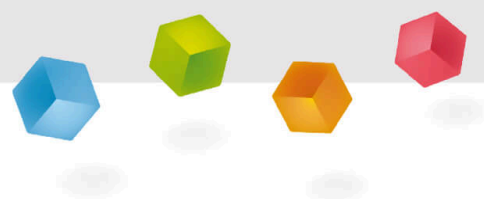
Ejecución

PHYWE

Ajustar cuatro velocidades de flujo diferentes en % en la bomba centrífuga (por ejemplo, 20 %, 30 %, 40 % y 50 %). Para cada velocidad, medir los desplazamientos de frecuencia media y máxima f_{max} y f_{mean} para los tres tubos rígidos con la unidad de ultrasonido Doppler y leer los valores de los tubos verticales.

Nota: Esperar un tiempo para medir en condiciones de flujo constante (sin cambios en la escala de presión).

PHYWE



Resultados

Resultados (1/14)

PHYWE

Longitud del tubo: 300 mm

Longitud de las piezas intermedias del tubo flexible 300 mm (150 mm cada uno desde el tubo rígido hasta la rama de medición de la presión)

Diámetro interior (pieza intermedia) Aprox.: 10 mm

Características del líquido Doppler:

Velocidad del sonido: 1800 m/s

Viscosidad: 12 mPa/s

Densidad: 1,15 g/cm³

Características de la medición Doppler:

Velocidad del sonido del prisma: 2700 m/s

Frecuencia Doppler: 2,0 MHz

Ángulo de irradiación: 30°.

	d (exterior) [mm]	Pared [mm]	d (interior) [mm]	Sección transversal [mm ²]
Tubo 1	20.0	2.0	16.0	201.1
Tubo 2	15.0	2.5	10.0	78.5
Tubo 3	10.0	1.5	7.0	38.5

Cuadro 1: Geometrías

Resultados (2/14)

PHYWE

Ángulo Doppler calculado con la ecuación (3):

Bomba	Tubo 1		Tubo 2		Tubo 3	
[%]	f_{\max} [Hz]	f_{mean} [Hz]	f_{\max} [Hz]	f_{mean} [Hz]	f_{\max} [Hz]	f_{mean} [Hz]
20	110	60	200	110	400	220
30	210	120	460	250	950	510
40	325	180	690	390	1450	800
50	420	240	990	540	2820	1110

Tabla 2: Ángulo de irradiación en el líquido: 19,5°
 Ángulo Doppler: 70,5°

Bomba	Presión p1	Presión p2	Presión p3	Presión p4
[%]	[cm columna liq.]	[cm columna liq.]	[cm columna liq.]	[cm columna liq.]
20	58.8	57.0	54.4	47.8
30	66.0	60.8	54.0	37.2
40	76.3	66.4	53.5	21.3
50	89.3	73.3	53.0	1.8

Tabla 3: Valores de medición de la presión estática:

Resultados (3/14)

PHYWE

Ángulo Doppler calculado con la ecuación (3):

Bomba	Tubo 1			Tubo 2			Tubo 3		
[%]	v_{\max} [cm/s]	v_{mean} [cm/s]	v_{\max}/v_{mean}	v_{\max} [cm/s]	v_{mean} [cm/s]	v_{\max}/v_{mean}	v_{\max} [cm/s]	v_{mean} [cm/s]	v_{\max}/v_{mean}
20	14.9	8.1	1.83	27.0	14.9	1.82	54.0	29.7	1.82
30	28.4	16.2	1.75	62.1	33.8	1.84	128.3	68.9	1.86
40	43.9	24.3	1.81	93.2	52.7	1.77	195.8	108.0	1.81
50	56.7	32.4	1.75	133.7	72.9	1.83	272.7	149.9	1.82

Tabla 4

Resultados (4/14)

PHYWE

Cuanto menor sea el diámetro del tubo, mayor será la velocidad del flujo. Esto se corresponde con la ley de continuidad. Las relaciones entre la velocidad media y la velocidad máxima del flujo están en el rango de 1,8 para todas las mediciones y, por lo tanto, se acercan a la relación del flujo laminar del tubo de 2. El método de dispersión Doppler se utiliza para determinar la velocidad de las partículas en el líquido y no del propio líquido. Dado que, en el caso ideal, la velocidad máxima del flujo en el centro del tubo está representada por una sola partícula de dispersión al máximo, no puede determinarse con el método de dispersión Doppler. Se necesita una señal de dispersión que supere el ruido electrónico y también varias partículas de dispersión que se muevan a una velocidad cercana a la máxima. En consecuencia, siempre estará infradeterminado. Dado que la relación no aumenta aunque aumente la potencia de la bomba (velocidad), no se puede medir una transición a un flujo turbulento dentro del rango de medición de los tubos.

Resultados (5/14)

PHYWE

Caudales (calculados a partir de la ecuación de continuidad (4)):

Bomba	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Q
[%]	Q [min/l]	Q [min/l]	Q [min/l]	Media R2 R3 [l/min]
20	0.98	0.70	0.69	0.69
30	1.95	1.59	1.59	1.59
40	2.93	2.48	2.49	2.49
50	3.91	3.44	3.46	3.45

Cuadro 5

En el diagrama 1 se muestran los caudales calculados a partir de las secciones transversales y las velocidades medias del flujo.

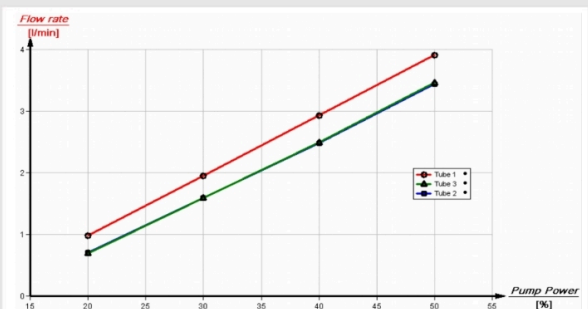


Diagrama 1

Resultados (6/14)

PHYWE

Según la ecuación de continuidad, los caudales deberían ser idénticos para todos los diámetros de tubo con los mismos ajustes de la bomba. Sin embargo, esto sólo es así para el tubo 2 y el tubo 3. En el caso del tubo 1 (el de mayor diámetro), el caudal que se calcula a partir de la velocidad media y la sección transversal del tubo es demasiado elevado. Esto se debe a que la velocidad del caudal se determina demasiado alta. Este error se produce independientemente de la velocidad de bombeo y de la frecuencia Doppler. La razón de esto podría ser la inercia de las partículas de dispersión. Salen del tubo de conexión a mayor velocidad (diámetro menor) y no se adaptan a la velocidad del líquido en el tubo rígido a lo largo de 30 cm. Esto puede comprobarse mediante mediciones de frecuencia Doppler a lo largo de la sección transversal del tubo. La unidad de ultrasonidos Doppler mide la velocidad de las partículas que se dispersan.

Además, la media de los caudales que se midieron en el tubo 2 y en el tubo 3 se utiliza como base para el cálculo.

Las mediciones de la presión estática en los puntos de medición 1 a 4 se utilizan para determinar las diferencias de presión Δp (pérdidas de carga) a través de los tubos rígidos con piezas de conexión.

Resultados (7/14)

PHYWE

Diferencias de presión entre los puntos de medición

Q [l/min]	1-2 Δp [mm columna liq.]	2-3 Δp [mm columna liq.]	3-4 Δp [mm columna liq.]
0.69	18	26	66
1.59	52	68	168
2.49	99	129	322
3.45	160	203	512

Cuadro 6

Para la determinación de la caída de presión a través de las secciones de tubo rígido, se supone que la caída de presión a través de las secciones de tubo flexible con una conexión a los tubos verticales (secciones de medición) corresponde aproximadamente a la caída de presión a través del tubo 2 debido a las condiciones geométricas similares, es decir:

$$\Delta p(\text{tube connector}) = \Delta p(\text{tube 2}) \frac{\Delta p(2-3)}{2}$$

Esto conduce a la siguiente caída de presión a través de los tubos:

Resultados (8/14)

PHYWE

Caída de presión a través de los tubos:

Q [l/min]	Sección de medición	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3
	Δp [mm columna liq.]	Δp [mm columna liq.]	Δp [mm columna liq.]	Δp [mm columna liq.]
0.69	13.0	5.0	13.0	53.0
1.59	34.0	18.0	34.0	134.0
2.49	64.5	34.5	64.5	257.5
3.45	101.5	58.5	101.5	410.5

Cuadro 7

La densidad del líquido puede utilizarse para calcular la pérdida de carga en unidades del SI (Pa) de acuerdo con la ecuación (9):

Caída de presión a través de los tubos en Pascal:

Q [l/min]	Sección de medición	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3
	Δp [Pa]	Δp [Pa]	Δp [Pa]	Δp [Pa]
0.69	147	56	147	598
1.59	384	203	384	1512
2.49	728	389	728	2905
3.45	1145	660	1145	4631

Cuadro 8

Resultados (9/14)

PHYWE

En el caso de los flujos laminares, la caída de presión tendría que aumentar linealmente en función del caudal (velocidad del flujo). Para examinar esta dependencia para las distintas secciones de tubo, las pérdidas de carga se normalizan con respecto al caudal más bajo y se representan en el diagrama 2.

Caída de presión a través de los tubos (normalizada):

Q [l/min]	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3
	Δp [Pa]	Δp [Pa]	Δp [Pa]
0.69	1.0	1.0	1.0
1.59	3.6	2.6	2.5
2.49	6.9	5.0	4.9
3.45	11.7	7.8	7.7

Cuadro 9

Resultados (10/14)

PHYWE

La caída de presión no es realmente lineal para ninguna de las secciones del tubo. Dado que los cambios en los tubos 2 y 3 son idénticos, independientemente de los diferentes diámetros y velocidades de flujo, es probable que haya pérdidas de presión adicionales en las ramas de los tubos para los puntos de medición de la presión. El tubo 1, por el contrario, tiene pérdidas de presión turbulentas donde el flujo procedente del tubo flexible entra en el tubo rígido. Esto también puede observarse a partir del comportamiento de las partículas de dispersión cuando cambia el caudal de la bomba (flujos de retorno parciales). Como resultado, las resistencias siguientes de las secciones de tubo que se calcularon con la ecuación (6) y, por tanto, también las viscosidades que se calcularon con la ecuación (7) contienen errores, especialmente para el tubo 1 (los valores son demasiado altos).

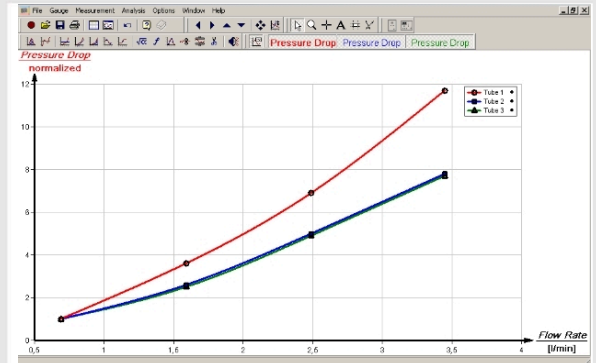


Diagrama 2

Resultados (11/14)

PHYWE

Resistencia del tubo

Q	Tubo		Tubo		Tubo	
[l/min]	1		2		3	
	Δp	R [MPa	Δp	R [MPa	Δp	R [MPa
	[Pa]	s/m ³]	[Pa]	s/m ³]	[Pa]	s/m ³]
0.69	56	4.98	147	12.70	598	51.78
1.59	203	7.66	384	14.47	1512	57.04
2.49	389	9.39	728	17.55	2905	70.07
3.45	660	11.49	1145	19.93	4631	80.59

Cuadro 10

Dependencia de la resistencia del tubo con respecto a los diámetros

Q [l/min]	0.69	1.59	2.49	3.45
d [mm]	R [MPa s/ m ³]	R [MPa s/ m ³]	R [MPa s/ m ³]	R [MPa s/ m ³]
7.0	51.8	57.0	70.1	80.6
10.0	12.7	14.5	17.6	19.9
16.0	4.9	7.7	9.4	11.5

Cuadro 11

La dependencia de la resistencia del diámetro del tubo según (7a) se muestra en el diagrama 3.

Resultados (12/14)

PHYWE

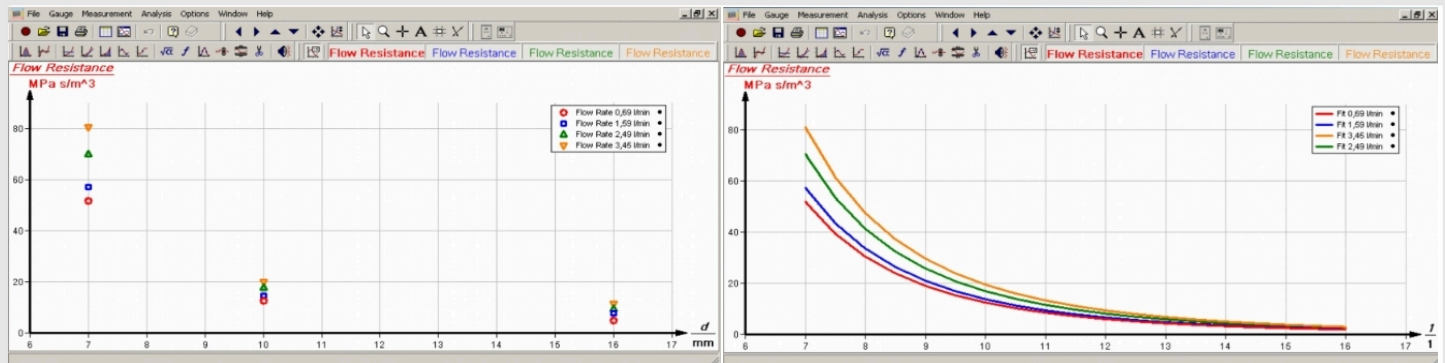


Diagrama 3

Resultados (13/14)

PHYWE

Viscosidad del líquido Doppler:

Q [l/min]Tubo 1				Tubo 2				Tubo 3			
d [mm]		R [MPa s/m³]	η [MPa s]	d [mm]		R [MPa s/m³]	η [MPa s]	d [mm]		R [MPa s/m³]	η [MPa s]
0.69	16.0	5.0	26.2	10.0	12.7	10.4	7.0	51.8	10.2		
1.59	16.0	7.7	41.1	10.0	14.5	11.8	7.0	57.0	11.2		
2.49	16.0	9.4	50.3	10.0	17.6	14.4	7.0	70.1	13.8		
3.45	16.0	11.5	61.6	10.0	19.9	16.3	7.0	80.6	15.8		

Cuadro 12

En el caso del tubo 2 y del tubo 3, la viscosidad para los caudales más bajos coincide muy bien con la viscosidad determinada reológicamente (12 mPa s). En cuanto al tubo 2, no se cumplen las condiciones de la ley de Hagen-Poiseuille (véase el error relativo a la determinación de la resistencia que se ha comentado anteriormente). La tabla 13 muestra los números de Reynolds de las distintas secciones del tubo que se determinaron con ayuda de la ecuación (6).

Resultados (14/14)

PHYWE

Número de Reynolds

BombaTubo 1		Tubo 2		Tubo 3		
[%]	v_{mean} [cm/s]	Re	v_{mean} [cm/s]	Re	v_{mean} [cm/s]	Re
20	8.1	57	14.9	134	29.7	342
30	16.2	73	33.8	268	68.9	792
40	24.3	89	52.7	345	108.0	1242
50	32.4	97	72.9	421	149.9	1723

Cuadro 13

Para todos los tubos y velocidades de flujo, los números de Reynolds están por debajo de 2300 y, por tanto, también por debajo del valor crítico. Con estos caudales, las pérdidas turbulentas adicionales en el circuito no se producen en las propias secciones de los tubos, sino principalmente en los puntos de unión y ramificación.