

Conducto en T biomimético para reducir la resistencia local de un sistema de ventilación y aire acondicionado

Ran Gao, Kaikai Liu, Angui Li, Zhiyu Fang, Zhiqiang Yang, Beihua Cong
Xi'an University of Architecture and Technology (Shaanxi)
China Renewable Energy Engineering Institute (Beijing)
Tongtai Fire and Security Co., (Shanghái)

El ahorro de energía en los edificios es una de las medidas importantes que se utilizan para reducir la escasez de energía y fomentar el desarrollo sostenible¹⁻³. El consumo de energía de los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado (como, por ejemplo, los tipos de sistemas de transporte y distribución de aire) ha recibido considerable atención. El consumo de energía del ventilador causado por la resistencia de los sistemas de ventilación y aire acondicionado representa aproximadamente del 20% al 40% del consumo de energía de los edificios públicos; para algunos edificios, los niveles son incluso superiores a los de los sistemas de refrigeración acondicionados^{4,5}. Por lo tanto, determinar cómo optimizar el rendimiento de los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado, reduciendo así la resistencia y disminuyendo el consumo de energía del ventilador, se ha convertido en un tema clave.

Al buscar equipo eficiente de energía para edificios, los investigadores han considerado la morfología y comportamiento de animales y plantas como inspiración. Por ejemplo, Chen (2017) estudió el método de búsqueda de fuentes de contaminación mediante robots a través de la simulación de los comportamientos del olfato y búsqueda por parte de diversos animales⁶. Liu Z (2017) introdujo un modelo de estimación rápida para la concentración de contaminantes basado en el aprendizaje automático⁷⁻⁸. Zeiny (2012) aplicó principios biomiméticos a los diseños de construcción tipo concha y usó la luz del sol para reducir el consumo de energía de la iluminación interior⁹. Reddi (2012) abordó el rendimiento autoajutable de la temperatura y la estabilidad estructural del suelo basándose en la piel animal¹⁰. Zhao (2010) estudió la estructura de un nido de termitas y su capacidad para mantener una temperatura ambiente constante y aplicó los hallazgos al *Zimbabwe Eastgate Center*¹¹. Zalewski (2002) analizó la aplicación y optimización de termosifones en las chimeneas solares^{12,13}. Kirchner (2002) propuso un modelo de evacuación con base en el comportamiento de los rebaños y analizó los factores que influyen en el tiempo de evacuación¹⁴. A partir del principio de reparación

celular en tejidos animales, Zhang (2001) incorporó microcápsulas autorreparadoras en hormigón para desarrollar un hormigón autorreparable¹⁵. Estos estudios previos han demostrado que las estructuras biomiméticas pueden ser altamente efectivas. Con respecto a los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado, las plantas pueden servir como un “maestro” natural. Dada esta inspiración, el presente estudio tiene como objetivo determinar si puede desarrollarse un método de reducción de resistencia usando la morfología de las plantas.

Nomenclatura

ΔP	Diferencia de presión entre dos secciones, Pa
P	Valor de presión en la sección de prueba, Pa
$\overline{\Delta P}$	Diferencia de presión promedio entre dos secciones, Pa
\overline{P}	Valor de presión promedio en la sección de prueba, Pa
v	Velocidad de flujo en el conducto, m / s
U_i	El i -ésimo componente de velocidad de fluctuación, m / s
Q	Volumen de flujo, m ³ / s
F	Área de sección transversal, m ²
N	Consumo de energía del ventilador, W
H	Altura de protrusión, m
R	Radio del arco de protrusión, m
L_a	Longitud de arco, m

Símbolos griegos

ξ	Coefficiente de resistencia local, -
ϕ	Función de disipación, W • m ⁻³
ρ	Densidad del aire, kg / m ³
μ	Viscosidad dinámica del aire, Pa•s
σ	Desviación estándar

La resistencia a la ventilación y los componentes del conducto de aire acondicionado se exploraron por primera vez en los años setenta y ochenta, en particular por Miller, del Reino Unido, y Gilman, de los Estados Unidos, entre otros^{16,17}. Desde entonces, los académicos han revisado e incorporado el conocimiento relevante en el Manual de la *Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado* (ASHRAE), la *Guía de la Institución Profesional de Ingenieros de Servicios de Edificio* (CIBSE), y otros manuales de diseño¹⁸⁻²⁰. Con base en un resumen de estudios previos, cabe constatar la existencia de cinco tipos de conductos de ventilación y de conductos de aire acondicionado: curvatura lateral,

chablán lateral doble, lateral sin chablán, inclinación lateral y chablán lateral de 45° (Tabla 1). Desde la década de 1970, no se han implementado mejoras en estos cinco tipos tradicionales de estructuras en T (o sus diseños estructurales de baja resistencia). Por lo tanto, el componente local representado por el conducto ofrece una gran potencialidad para la reducción de la resistencia y ahorro de energía.

Actualmente, la mayoría de los conductos encontrados en varios tipos de medios se miden sobre la base del coeficiente de resistencia de los cinco tipos tradicionales de conductos. Por ejemplo, Morales (2017) exploró la pérdida de resistencia en la transmisión neumática de flujos bifásicos de gas-sólidos en T²¹. Yin (2017) se centró en la reducción de la presión de las estructuras en T teniendo en cuenta varios ángulos de aletas guía²².

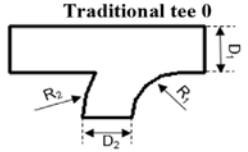
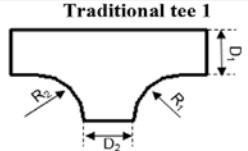
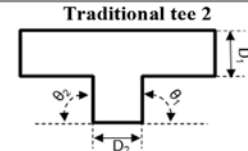
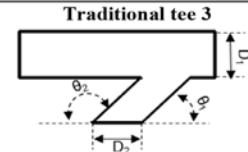
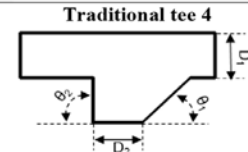
No.	Tees	Features	01	02	R1	R2
T0	 <p>Traditional tee 0</p>	lateral curved	\	\	D ₂	2D ₂
T1	 <p>Traditional tee 1</p>	lateral double chamfer	\	\	D ₂	D ₂
T2	 <p>Traditional tee 2</p>	lateral non-chamfer	90°	90°	\	\
T3	 <p>Traditional tee 3</p>	lateral tilting	45°	135°	\	\
T4	 <p>Traditional tee 4</p>	lateral 45° chamfer	45°	90°	\	\

Tabla 1. T tradicionales y dimensiones estructurales utilizadas en este estudio

Li (2005) investigó la resistencia local del condensado de vapor que fluye a través de una estructura en T mediante la simulación CFD (*Dinámica de Fluidos*

Computacional). El análisis cuantitativo se realizó para estudiar el impacto de la temperatura del medio y las burbujas de vapor sobre la resistencia local²³. Mika (2013) investigó la pérdida de resistencia de las suspensiones de hielo utilizando un dispositivo de derivación de flujo horizontal y propuso una fórmula para calcular la resistencia local en condiciones laminares²⁴. Cabral (2011) analizó la resistencia de los productos alimenticios líquidos que fluyen en los conductos²⁵. A partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, se pudo concluir que la esencia de la resistencia es la disipación de energía resultante de la deformación del fluido. La manifestación de la deformación del fluido es la caída de presión. La mayoría de los trabajos existentes han analizado la resistencia sobre la base de la caída de presión en lugar de la disipación de energía. Por lo tanto, la disipación de energía del conducto aún no se ha estudiado.

La unión en T, un componente local de los conductos de ventilación y aire acondicionado, se encuentra ampliamente en los edificios. El problema de energía causado por la resistencia de la unión en T es generalizado. Proponemos, de este modo, un método de reducción de resistencia utilizando una estructura de protrusión desde la perspectiva de las estructuras biomiméticas. El método propuesto se ha aplicado posteriormente a una estructura en T. Se ha evaluado el mecanismo de reducción de resistencia del método propuesto y combinado las características de resistencia entre las uniones en T con protuberancias y las uniones en T tradicionales. Finalmente, se ha verificado que la efectividad del método de reducción de resistencia se confirma a través de experimentos.

Proposición de un método de reducción de resistencia

Posible caso de reducción de resistencia en biología

Ya existe un sistema de conductos eficaz en la naturaleza: las plantas. Las plantas transmiten agua desde el suelo a las hojas a través de la transpiración, después de lo cual el agua se evapora a la atmósfera²⁶. En un sistema vegetal, la hoja equivale al “usuario”, el rizoma y el tallo son equivalentes al “sistema de conductos” y la corriente generada por la evaporación de agua es equivalente a la “potencia”. A través de miles de millones de años de selección natural, se considera que las plantas con una eficiencia inferior han sido eliminadas. El sistema de conductos actual de las plantas es altamente eficiente, con baja resistencia²⁷. Sobre esta base, las formas estructurales de los sistemas de conductos con baja resistencia pueden ser investigadas haciendo hincapié en la estructura morfológica de las plantas.

Ciertas plantas comunes exhiben protuberancias alrededor de sus ramas (Fig. 1). Aunque estas protuberancias existen solo en algunas plantas, esta observación fue

una fuente de inspiración que llevó a incorporar protrusiones en los sistemas de conductos de ventilación y acondicionamiento para probar la efectividad de dicha estructura.



Fig. 1. Protrusiones en plantas

Análisis del mecanismo de reducción de resistencia de protuberancias

El flujo en el conducto y en los flujos en los rizomas y tallos de la planta satisfacen las ecuaciones de Navier-Stokes. En estas ecuaciones, la resistencia al flujo se puede expresar como la disipación de energía de la siguiente manera²⁸⁻²⁹:

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right]$$

Donde u_x , u_y , y u_z son subvelocidades, x , y , y z , son los vectores de coordenadas, ϕ es la función de disipación, y μ es el coeficiente de viscosidad. En función de esta ecuación, la función de disipación es la función de gradiente de velocidad, mientras que el gradiente de velocidad es el cambio de velocidad. En los componentes locales de los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado, la velocidad no se mantiene constante debido al desvío y derivación del fluido; es decir, los cambios de velocidad (o sea, gradientes de velocidad) son inevitables para un componente local. Incluso si el gradiente de velocidad no puede eliminarse, hipotetizamos que existe un método para reducirlo.

Cuando las protrusiones de las plantas que divergen naturalmente en el flujo están expuestas (Fig. 2) a un volumen de flujo constante, la velocidad del flujo en el conducto es inversamente proporcional al área de la sección transversal²⁹. Este fenómeno puede expresarse como

$$Q = F \times V \tag{2}$$

Donde Q es el volumen de flujo en m^3 / s , F es el área de sección transversal en m^2 , y V es la velocidad de flujo en m / s . Las protuberancias pueden aumentar el área de la sección transversal y reducir la velocidad absoluta del fluido en un conducto. En última instancia, tanto el gradiente de velocidad como los valores de disipación de energía podrían reducirse.

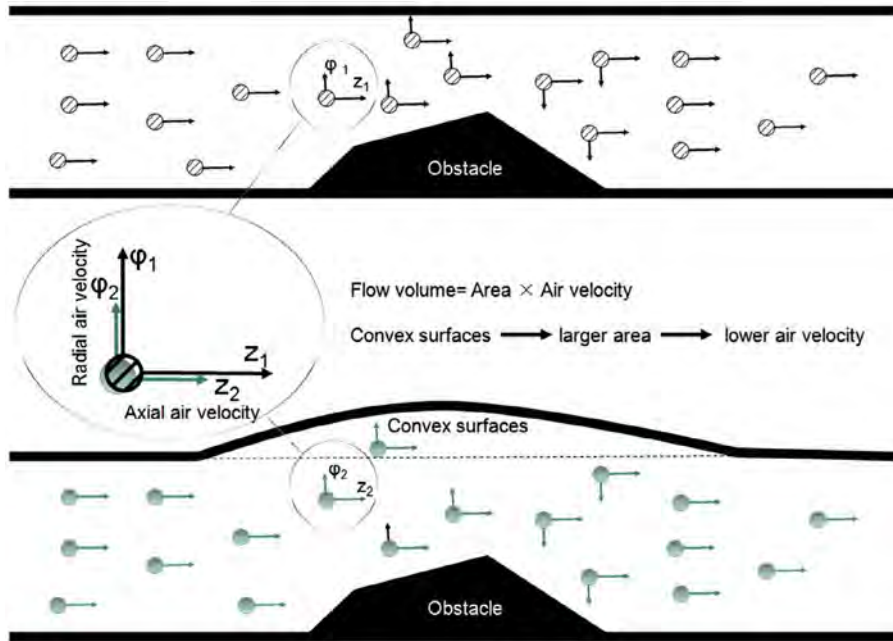


Fig. 2. Posible mecanismo para la reducción de la resistencia

Sin embargo, el uso de protuberancias es equivalente a expandir el área de la sección transversal del conducto. Dicha configuración proporciona al fluido un espacio de flujo adicional, que luego introduce una deformación adicional del fluido y gradientes de velocidad que, a su vez, pueden aumentar aún más la resistencia del fluido.

Por lo tanto, se cree que las protuberancias causan dos cambios en términos de resistencia:

- (1) Las protuberancias debilitan la velocidad absoluta. Cuando se reduce el gradiente de velocidad, la disipación de energía y la resistencia también se reducen.
- (2) Las protuberancias causan deformación del fluido, lo que aumenta la disipación y la resistencia de la energía.

Estos dos impactos se contrarrestan. Para lograr la menor resistencia, nuestro objetivo es determinar un grado apropiado de protrusión para equilibrar estas dos fuerzas. Se considera adecuado, en este sentido, una simulación numérica o experimento para determinar el grado apropiado. Por lo tanto, en este estudio, definimos el grado de distancia que sobresale como la “altura de protrusión adimensional”, que puede expresarse por

$$h=H/D \tag{3}$$

Donde h es la altura de protrusión adimensional, H es la altura absoluta de protrusión, y D es el diámetro del conducto. Las mismas variables corresponden a las de la esquina inferior derecha de la Fig. 3. Para obtener una variedad de características de los conductos y velocidades de flujo, usamos 28 tipos de alturas de protrusión adimensionales (-0.28, -0.25, -0.22, -0.19, -0.16,..., 0.44, 0.47, 0.50, 0.53 y 0.56, de tal manera que una altura de protrusión negativa indica una superficie cóncava) para determinar el valor óptimo.

Análisis de ingeniería

Se seleccionó una unión en T, un componente local común en los sistemas de conductos de ventilación y aire acondicionado, como objeto de análisis. Es un componente local de flujo fluido y desviación que está sujeto a resistencia en dos direcciones. Como se muestra en la Fig. 3, la T roja 1-2 está sujeta a la resistencia del fluido que fluye de las secciones 1-2 (ΔP_{1-2}) y la resistencia del fluido que fluye de las secciones 1-9 (ΔP_{1-9}). Un estudio previo mostró que la resistencia total del sistema está controlada por el bucle con la mayor resistencia³⁰. Si la sección del conducto 1-2-3-4-5-6-7-8 es el circuito que resiste más fuertemente el flujo, entonces la resistencia de todo el conducto es

$$\Delta P_t = \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + \Delta P_{3-4} + \Delta P_{4-5} + \Delta P_{5-6} + \Delta P_{6-7} + \Delta P_{7-8} \tag{4}$$

Si la sección del conducto 1-9-10-11-12-13 es el bucle con la mayor resistencia al flujo, entonces la resistencia de todo el conducto es

$$\Delta P_t = \Delta P_{1-9} + \Delta P_{9-10} + \Delta P_{10-11} + \Delta P_{11-12} + \Delta P_{12-13} \tag{5}$$

Para reducir la resistencia de ΔP_t , no se requiere que las resistencias ΔP_{1-2} y ΔP_{1-9} disminuyan al mismo tiempo. Por el contrario, solo se debe reducir la resistencia al flujo ΔP_{1-2} o ΔP_{1-9} , que se encuentra en el circuito de alta resistencia. Si 1-2-3-4-5-6-7-8 es el circuito de alta resistencia, entonces ΔP_{1-2} debe reducirse, y

los cambios en ΔP_{1-9} pueden ser anulados. Incluso si ΔP_{1-9} aumenta, el bucle no afectará la efectividad de la reducción de resistencia porque ΔP_{1-9} no está involucrado en el cálculo del bucle de alta resistencia³⁰. En proyectos actuales, el ciclo de alta resistencia se determina en el proceso de diseño. Por lo tanto, solo tenemos que desarrollar una T con el mínimo ΔP_{1-2} o el mínimo ΔP_{1-9} y luego seleccionar la T de acuerdo con la bifurcación en el bucle de alta resistencia.

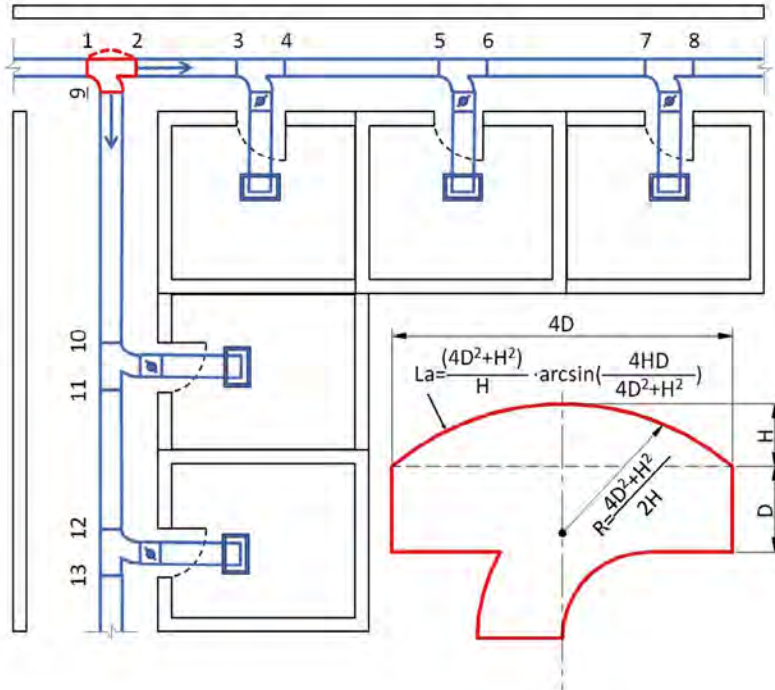


Fig. 3. Aplicación típica de una T y su diagrama de cálculo hidráulico

La forma de la estructura protuberante en la T del conducto se muestra en la Fig. 3. Para facilitar la fabricación, la forma de la protuberancia es un arco. El centro del círculo está en la línea central de la T del conducto. El ancho de la superficie del arco es $4D$ según el molde de fabricación. La altura de protrusión, H , se da en la Tabla 2. A través del cálculo geométrico simple, el radio del arco, R , es $\frac{4D^2 + H^2}{2H}$, y la longitud del arco, La , es $\frac{(4D^2 + H^2)}{H} \cdot \arcsin\left(\frac{4HD}{4D^2 + H^2}\right)$. De hecho, es más sencillo fabricar la T del conducto de acuerdo con la longitud del arco calculada.

Tabla 2. Altura de protrusión óptima y normalizada para varias relaciones de aspecto y relaciones de flujo

Relación de aspecto	Relación de flujo	Optimización de la resistencia en dirección de flujo 1-4		Optimización de la resistencia en dirección de flujo 1-6	
		Altura óptima de protrusion (H/D)	Altura normalizada de protrusion (H/D)	Altura óptima de protrusion (H/D)	Altura normalizada de protrusion (H/D)
5:1	1:3	0.09	0.09	0.16	0.25
5:1	1:2	0.09		0.22	
5:1	1:1	0.13		0.22	
5:1	2:1	0.09		0.19	
5:1	3:1	0.22		0.28	
5:1	4:1	0.19		0.34	
5:1	5:1	0.06		0.38	
4:1	1:3	0.09	0.09	0.13	0.28
4:1	1:2	0.13		0.19	
4:1	1:1	0.13		0.22	
4:1	2:1	0.19		0.16	
4:1	3:1	0.03		0.25	
4:1	4:1	0.09		0.19	
4:1	5:1	0.03		0.19	
3:1	1:3	0.22	0.13	0.34	0.25
3:1	1:2	0.13		0.09	
3:1	1:1	0.09		0.25	
3:1	2:1	0.16		0.25	
3:1	3:1	0.06		0.16	
3:1	4:1	0.25		0.38	
3:1	5:1	0.16		0.44	
2:1	1:3	0.25	0.19	0.09	0.19
2:1	1:2	0.19		0.47	
2:1	1:1	0.13		0.13	
2:1	2:1	0.16		0.19	
2:1	3:1	0.16		0.50	
2:1	4:1	0.16		0.44	
2:1	5:1	0.19		0.22	
1:1	1:3	0.16	0.13	0.25	0.28
1:1	1:2	0.19		0.19	
1:1	1:1	0.28		0.25	
1:1	2:1	0.19		0.31	
1:1	3:1	0.13		0.28	
1:1	4:1	0.13		0.31	
1:1	5:1	0.22		0.53	

Métodos de investigación

Para determinar la efectividad de la reducción de la resistencia de protuberancias, se llevó a cabo la simulación numérica y el experimento a gran escala centrándose en el grado adecuado de protrusión que puede lograr la resistencia más baja. Para la simulación numérica CFD se utilizaron varias alturas de protrusión adimensionales, una metodología de estudio conocida y económica³¹⁻³³. Para asegurar la exactitud de los resultados numéricos, la selección del modelo de turbulencia, la configuración de capa límite, la generación de malla y la independencia de la simulación se verificaron antes realizar la CFD^{34, 35}. Finalmente, la altura de protrusión adimensional seleccionada se probó en condiciones de funcionamiento típicas en un experimento a escala completa.

Experimento a gran escala

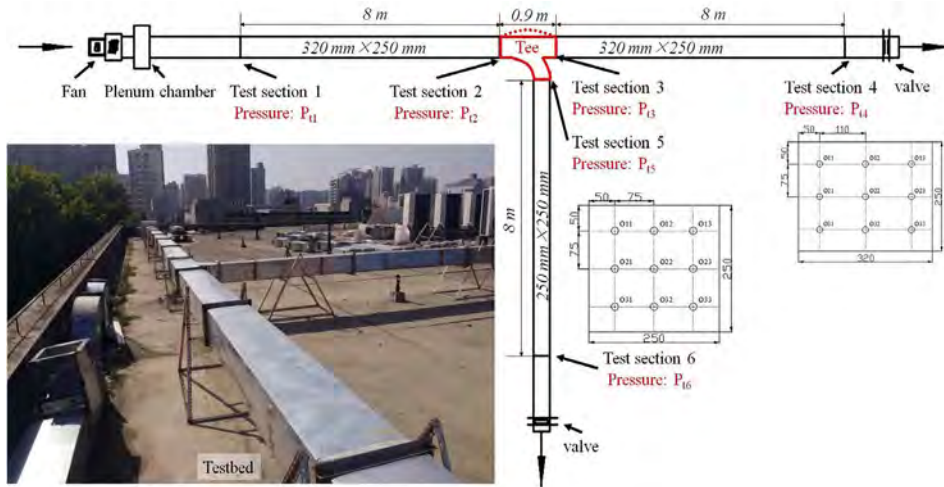
Un experimento a gran escala es el medio más preciso pero también el más caro para estudiar la resistencia de los conductos de ventilación y aire acondicionado. En esta investigación, se utilizó un banco de pruebas de tamaño completo con una longitud de más de 30 m para el experimento (Fig. 4). El banco de pruebas constaba de un ventilador de velocidad ajustable, una caja de presión estática, una estructura T para pruebas, conductos rectos y orificios de prueba. El aire exterior, que ingresó en la caja de presión estática a través del ventilador, fue dirigido para compartir la corriente; esta configuración aseguró que el fluido pudiera alcanzar fácilmente un estado de flujo completamente desarrollado. El volumen de flujo en cada rama fue regulado por la válvula en el extremo de la rama y el regulador del ventilador.

El diámetro designado del conducto principal era el adecuado para la ventilación y los conductos de aire acondicionado (específicamente, 320 mm × 250 mm). El diámetro del conducto de ramificación fue de 250 mm × 250 mm. Se seleccionaron seis secciones de prueba. El diseño de los puntos de prueba en las secciones de prueba 1-4 y 5-6 es el mismo, como se muestra en la Fig. 4. Cada sección contenía nueve puntos de prueba, y cada punto de prueba se midió cinco veces. Los valores máximo y mínimo fueron excluidos por el presente estudio, y se tomó información del valor promedio de la prueba.

Con base en estudios previos, el fluido que ingresa en el componente local debe desarrollarse por completo para garantizar la exactitud de la medición de la resistencia local de componentes. De forma similar, la resistencia del componente local no debe limitarse al componente local, ya que pueden aparecer vórtices que afecten las secciones de los conductos superior e inferior conectados al componente local^{36, 37}. Por lo tanto, en el presente estudio, establecemos la distancia entre

los puntos de prueba y la unión en T a 8 m, un valor 25 veces mayor que el diámetro del conducto (es decir, 25D). Esta disposición aseguró además que el aire que entraba en la T estaba completamente desarrollado y la resistencia causada por la T en el flujo ascendente y descendente también estaba incluida en la medición. La exactitud de los parámetros experimentales medidos se muestra en la Tabla 3.

Fig. 4. Banco de pruebas de la Resistencia de la estructura en T.



Al calcular la resistencia de la T, se tuvieron en cuenta los vórtices producidos por los componentes locales en la parte de arriba y abajo, y las resistencias unidireccionales de los conductos de la parte de arriba y de abajo no se incorporaron en la resistencia local de la T^{16, 17}. Se realizaron dos experimentos para cada condición de trabajo. En primer lugar, la velocidad de flujo de las secciones de conductos 1-2, 3-4 y 5-6 se estableció en 9.4, 7 y 3 m/s, respectivamente. A continuación, se probaron las presiones promedio para las secciones de prueba 1, 4 y 6 (es decir, $\overline{P_{t1}}$, $\overline{P_{t4}}$ y $\overline{P_{t6}}$) a la velocidad de flujo especificada. Posteriormente, se retiró el dispositivo y se ajustó la velocidad del flujo. Se probó la resistencia en el camino de la sección 1-2 del conducto con una velocidad de flujo de 9,4 m / s ($\overline{P'_{t1}} - \overline{P'_{t2}}$), seguida de la sección del conducto 3-4 con una velocidad de flujo de 7 m / s ($\overline{P'_{t3}} - \overline{P'_{t4}}$) y para la sección de conducto 5-6 con una velocidad de flujo de 3 m / s ($\overline{P'_{t5}} - \overline{P'_{t6}}$). Los valores de resistencia de las dos direcciones de flujo fueron los siguientes:

Dirección del flujo 1-4:

$$\overline{\Delta P_{14}} = \overline{P_{t1}} - \overline{P_{t4}} - \overline{P'_{t1}} - \overline{P'_{t2}} - \overline{P'_{t3}} - \overline{P'_{t4}} .$$

Dirección del flujo 1-6:

$$\overline{\Delta P}_{16} = \overline{P}_{t1} - \overline{P}_{t6} - \overline{P}'_{t1} - \overline{P}'_{t2} - \overline{P}'_{t5} - \overline{P}'_{t6} .$$

La resistencia local puede ser expresado como:

Tabla 3. Exactitud de los parámetros experimentales medidos

Parámetro medido	Instrumento	Rango	Precisión	Resolución
Velocidad del aire	TSI-9545	0-30 m/s	0.015m/s	0.01 m/s
Presión	Testo 51 2-1	0-200 Pa	0.25Pa	0.1 Pa

$$\zeta = \frac{\overline{\Delta P}}{0.5\rho v^2} \quad (8)$$

Donde ζ es el coeficiente de resistencia local, ρ es la densidad del aire (tomada como 1.29 kg / m³), y v es la velocidad del flujo en la sección 1-2 del conducto. La resistencia al flujo puede expresarse mediante los siguientes coeficientes de resistencia local:

Dirección del flujo 1-4:

$$\zeta_{1-4} = \frac{\overline{\Delta P}_{14}}{0.5\rho v_{12}^2}$$

Dirección del flujo 1-6:

$$\zeta_{1-6} = \frac{\overline{\Delta P}_{16}}{0.5\rho v_{12}^2}$$

El error estándar se utilizó para caracterizar el error de los coeficientes de resistencia locales. Los errores estándar de la resistencia probada²⁸ fueron los siguientes:

Dirección del flujo 1-4:

$$\sigma_{\Delta p_{14}} = \sqrt{\sigma_{p_{t1}}^2 + \sigma_{p_{t4}}^2 + \sigma_{p'_{t1}}^2 + \sigma_{p'_{t2}}^2 + \sigma_{p'_{t3}}^2 + \sigma_{p'_{t4}}^2}$$

Dirección del flujo 1-6:

$$\sigma_{\Delta p_{16}} = \sqrt{\sigma_{p_{t1}}^2 + \sigma_{p_{t6}}^2 + \sigma_{p'_{t1}}^2 + \sigma_{p'_{t2}}^2 + \sigma_{p'_{t5}}^2 + \sigma_{p'_{t6}}^2}.$$

Los errores estándar del coeficiente de resistencia medido fueron los siguientes:

Dirección del flujo 1-4:

$$\sigma_{\zeta_{14}} = \overline{\zeta_{14}} \cdot \frac{1}{0.5\rho} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{p14}}{p_{14}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v12}}{v_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v12}}{v_{12}}\right)^2}$$

Dirección del flujo 1-6:

$$\sigma_{\zeta_{16}} = \overline{\zeta_{16}} \cdot \frac{1}{0.5\rho} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{p16}}{p_{16}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v12}}{v_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v12}}{v_{12}}\right)^2}$$

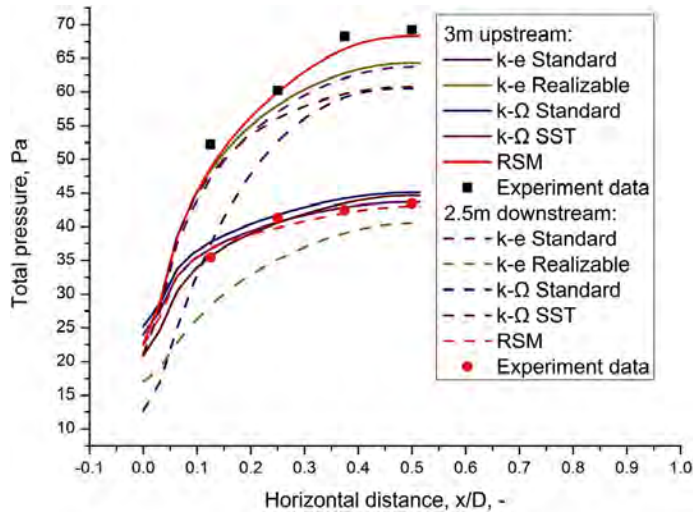


Fig. 5. Presiones seccionales para varios modelos de turbulencia

Simulación numérica

El factor más importante para garantizar la precisión numérica de la simulación es la selección de un modelo de turbulencia. Estudios previos en los flujos de conductos han usado comúnmente el estándar k-ε, k-ε realizable, k-ω estándar, k-ω SST, o el modelo de estrés de Reynolds (RSM) como modelo de turbulencia^{39, 40, 41}. En este estudio, se verificaron las simulaciones de los cinco modelos. Dado que este estudio se centró en el cambio de presión, los parámetros para la verificación fueron los valores de presión total del conducto sistema con la T en las secciones 2 y 3. La velocidad de flujo en el momento de la verificación corresponde a la velocidad de flujo típica descrita en la Sección 2.1. Los resultados de la verificación

se muestran en la Fig. 5. Con base en estos hallazgos, el valor de la presión del RSM fue el más cercano al valor experimental, y sus parámetros de turbulencia se establecieron con referencia a la literatura existente³⁴⁻³⁵. Este fenómeno se puede atribuir a la incorporación de la anisotropía del estrés de Reynolds en el RSM, lo que permite la simulación precisa del flujo secundario que prevalece en el conducto⁴².

En términos de la red, para un cálculo económico y preciso, se llevaron a cabo la verificación del refinamiento de la red local y de la independencia de la red. En estudios previos, el refinamiento de la cuadrícula se empleaba típicamente en regiones con grandes gradientes de velocidad, como en las capas límite y puntos de inflexión fluidos. De acuerdo con la ecuación (1), sugerimos que la energía la disipación es esencialmente el gradiente de velocidad. Por lo tanto, se simularon los campos de disipación de energía con la T y el refinamiento de la red se llevó a cabo donde la disipación de energía era grande. Los resultados del refinamiento de la red y el campo de función de disipación se muestran en la Fig. 6.

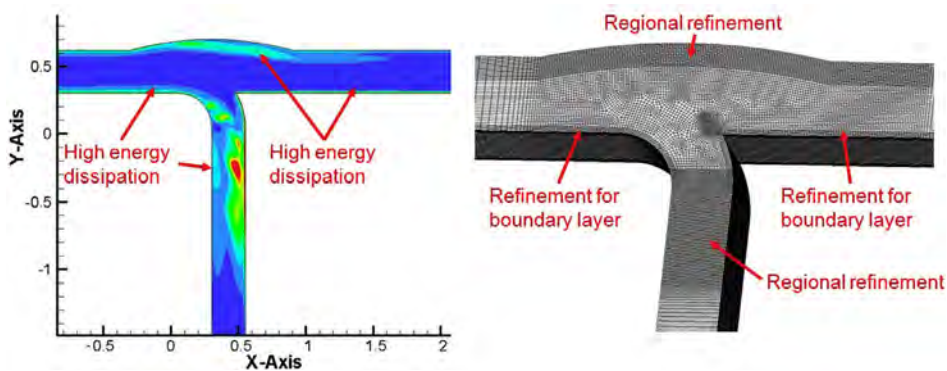


Fig. 6. Campo de disipación de energía seccional de la T y refinamiento de la red

Además, se verificó la independencia de la red, y se simuló el campo de presión de las secciones del sistema de conductos. El campo de presión fue evaluado en números de cuadrícula de 823k, 1,154k, 1,283k, 1,467k, 1,641k y 2,025k. Cuando el número de la cuadrícula era mayor que 1,641k, el campo de presión simulado no cambió. En otras palabras, la solución es independiente del tamaño de la cuadrícula; ver Fig. 7. En consecuencia, se seleccionó la estructura con un número de cuadrícula de 1,641 k para la simulación numérica. El volumen máximo de la cuadrícula en este sistema de cuadrícula era 2,4 cm³, mientras que el valor mínimo fue de 0,27 cm³.

Para controlar con precisión la relación de flujo en la entrada y la salida, elegimos la salida del ventilador como la entrada de presión y las salidas de las dos ramas como la salida de velocidad. La pared de deslizamiento se seleccionó como la pared, y se estableció la rugosidad absoluta en 0.15×10^{-6} m para que corres-

pondiese con un conducto de hierro galvanizado^{19, 43}.

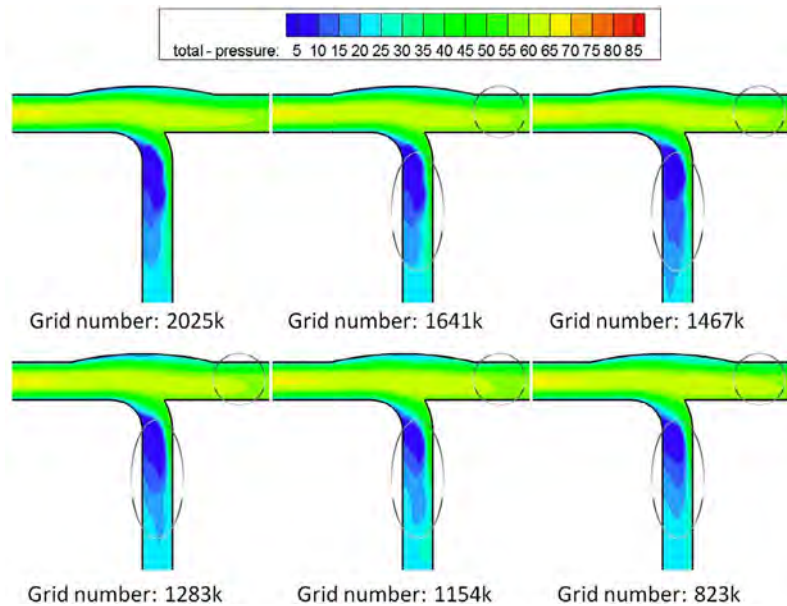


Fig. 7. Verificación de independencia de la red

Las ecuaciones de control se resolvieron usando un esquema segregado. El acoplamiento entre la presión y la velocidad de flujo se resolvió usando SIMPLE (Método semi-implícito para la ecuación de presión vinculada). Durante la simulación, el impulso, la energía cinética turbulenta, la tasa de disipación de turbulencia y discretización del estrés de Reynolds se expresaron y se calcularon en el esquema de contra-viento de segundo orden, y la discretización de la presión se expresó en forma estándar. La convergencia se determinó con base en la velocidad promedio y la presión promedio, cuyo cambio de valor entre las dos iteraciones fue menos de 10^{-3} y la magnitud del residuo normalizado fue inferior a 10^{-5} ⁴⁴.

Resultados y discusión

Eficacia de la reducción de resistencia de las protuberancias con diversos ratios de flujo y de aspecto

Como se discutió en la Sección 2.2, para equilibrar los dos impactos en la resistencia del conducto causada por la altura de protrusión, primero debería determinarse la altura apropiada. Por lo tanto, nos centramos en la resistencia del

conducto con relaciones de aspecto comunes (5:1, 4:1, 3:1, 2:1 y 1:1) y relaciones de flujo (5:1, 4:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2 y 1:3) para obtener el valor óptimo. Para cada relación de aspecto y relación de flujo, fueron testadas 28 alturas de protuberancia sin dimensiones (-0.28, -0.25, -0.22, -0.19, -0.16,..., 0.44, 0.47, 0.50, 0.53, y 0.56) para obtener la altura apropiada. Una altura con protrusión negativa implica una superficie cóncava.

En función de los resultados finales optimizados, cuando la altura de protrusión se estableció como la altura de protrusión optimizada (Tabla 2), la estructura en T exhibió el coeficiente de resistencia más bajo (Fig. 8).

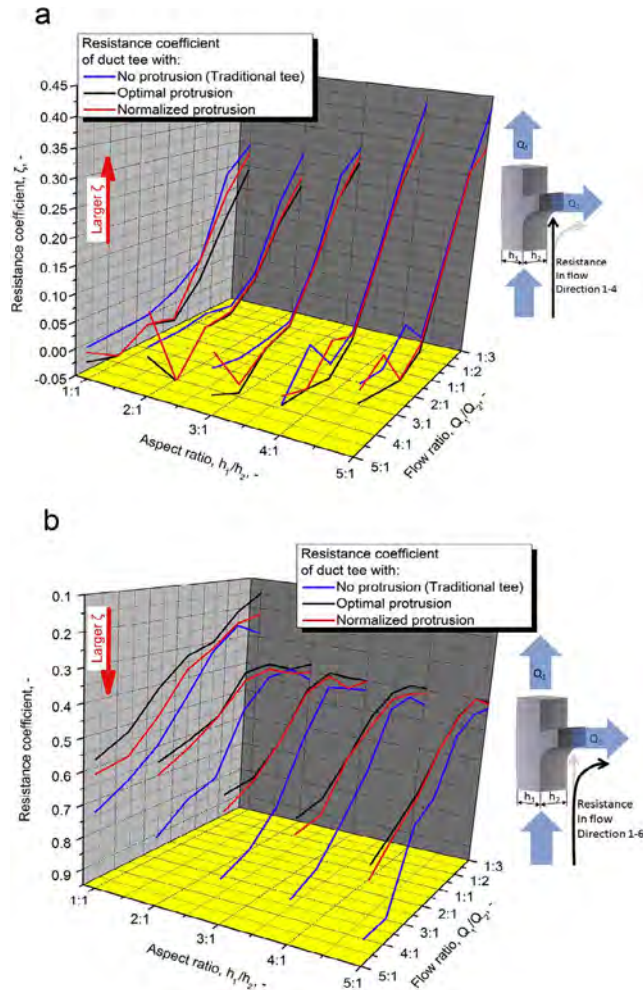


Fig. 8. Comparación de la resistencia de las T con protuberancias y la de las T tradicionales con varias relaciones de flujo y relaciones de aspecto: (a) resistencia en la dirección del flujo 1-4, (b) resistencia en la dirección del flujo 1-6.

Este hallazgo indica que las protuberancias pueden reducir la resistencia. Sin embargo, la turbulencia en sí misma, además de los vórtices y el flujo secundario dentro de la unión en T, es compleja. Por lo tanto, las alturas de protrusión son altamente aleatorias e irregulares. En los proyectos actuales, reemplazar una estructura en T por otra con una altura de protrusión designada es imposible porque el reemplazo genera la más baja resistencia para cada grupo de relación de aspecto y flujo. Por lo tanto, para cumplir los requisitos del proyecto en el presente estudio, consideramos una solución intermedia. La relación de aspecto se puede determinar en la etapa de diseño, pero la relación de flujo puede requerir un ajuste utilizando la válvula debido a los cambios estacionales. Por lo tanto, en este estudio calculamos el coeficiente de resistencia promedio para varias velocidades de flujo y las mismas relaciones de aspecto y alturas de protrusión. Posteriormente, los valores promedio fueron ordenados en orden ascendente para obtener la relación de aspecto con el mínimo coeficiente de resistencia. En este caso, fueron obtenidas las alturas de protuberancia con el coeficiente de resistencia promedio mínimo y diversas relaciones de flujo para cada relación de aspecto adquirido. En consecuencia, para una cierta relación de aspecto, la altura de protrusión es un valor constante, que se designa como una altura de protrusión normalizada. Aunque el coeficiente de resistencia con la altura normalizada es mayor que con las alturas óptimas, esta estrategia es, aun así, ventajosa porque es conveniente en aplicaciones prácticas de ingeniería.

La Fig. 8 indica que la resistencia en T con altura optimizada es significativamente más pequeña que el de las estructuras en T tradicionales, independientemente de la resistencia en las direcciones de flujo 1-4 y 1-6. La resistencia de la T con una altura normalizada se sitúa entre las estructuras en T con una altura optimizada y estructuras en T tradicionales. Este hallazgo muestra que es preferible la T con una altura de protrusión normalizada.

Con base en las tasas de reducción de resistencia del conducto para diferentes relaciones de aspecto, relativo a la T tradicional T0, las protuberancias redujeron la resistencia en aproximadamente 36% en la dirección del flujo 1-4 y aproximadamente 21% en la dirección del flujo 1-6; las tasas de reducción de resistencia en las direcciones de flujo 1-4 y 1-6 fueron aproximadamente un 24% y un 14% para la altura normalizada, respectivamente. En condiciones de trabajo, con altos caudales locales y bajas relaciones de aspecto, el hallazgo implica que la resistencia en la dirección de flujo 1-4 se reduce a valores negativos. En otras palabras, la tasa de reducción de la resistencia excede el 100%, y la resistencia se convierte en una fuerza impulsora. La razón es que cuando la relación de flujo en la dirección del flujo 1-6 es pequeño, aparece poca deformación de fluido en el flujo en esta dirección y la capa límite se separa cerca de la rama. En esta condición, si la resistencia de la T del conducto es suficientemente pequeña, entonces la resisten-

cia de la T del conducto en la dirección 1-6 será negativo. Además, el efecto de reducción de la resistencia de la estructura de protrusión actúa tanto en la T en sí y en el conducto recto conectado a la T. El efecto de reducción de la resistencia en el conducto recto se incluye en el método de cálculo utilizado para el coeficiente de resistencia local. Cuando este efecto es suficientemente fuerte, el coeficiente de resistencia local se vuelve negativo. Este fenómeno no es único. Las T tradicionales también pueden causar que los coeficientes de resistencia sean negativos en condiciones más estrictas. Las secciones 8-22 y las tablas 8-22 del manual HVAC describen el mismo fenómeno¹⁹.

Se compararon, además, las alturas de protrusión normalizadas en las dos direcciones de flujo, 1-4 y 1-6. Las dos direcciones de flujo se muestran en la Fig. 4. La altura de la protuberancia normalizada en la dirección del flujo 1-6 fue significativamente más grande que en la dirección de flujo 1-4 porque la deformación del fluido en la primera dirección es mucho más grande. Por lo tanto, se requiere una mayor altura de protrusión para reducir el valor absoluto de velocidad, y por lo tanto debilitar el gradiente de velocidad causado por la deformación.

Comparación de resistencia entre las T con protrusiones y T tradicionales

Estudios previos han identificado cinco tipos diferentes de T. Para demostrar el rendimiento de reducción de resistencia de las protuberancias, se comparó un conducto en T con protuberancias (a una altura optimizada y a una altura normalizada) con los cinco tipos tradicionales de T en términos de rendimiento (Fig. 9). La resistencia de la T con protuberancias fue significativamente más baja que la de los cinco tipos tradicionales de T. La tasa promedio de la reducción de la resistencia sobre los cinco tipos tradicionales de T fue de un 28% a un 48% en la dirección de flujo 1-4 y de un 22 a un 68% en la dirección de flujo 1-6. El descubrimiento establece la efectividad del método propuesto en este estudio de reducción de la resistencia de la protrusión.

Análisis de campo de disipación de energía

Tal y como se discutió en la Sección 2.2, la resistencia causa la disipación de energía. La disipación de energía cinética turbulenta es la principal disipación de energía debida al desarrollo completo de la turbulencia, y se puede utilizar para caracterizar la disipación de energía. En el presente estudio, se observó que el campo de disipación de energía en la T se identificaba directamente en las tres alturas de protrusión de $H/D=0.25$, $H/D=0.09$, y $H/D=0$ (que corresponde a una T tradicional); ver Fig. 10. La resistencia al flujo en la dirección del flujo 1-6 fue la más pequeña a una altura de protuberancia de $H/D=0.25$ y era más pequeña en

la dirección del flujo 1-4 a una altura de protuberancia de $H/D=0.09$. Las T tradicionales sin protrusiones fueron designadas a $H/D=0$. Posteriormente, la tasa de disipación de energía en la parte inferior de la rama del conducto en una condición de trabajo de $H/D=0.25$ fue significativamente menor que en el condición de trabajo de $H/D=0$; la fuerza de la disipación de energía (ver el área roja) y el área total de disipación de energía también fueron más pequeños. Además, el área de disipación de energía de la pared en T era más pequeña, y la longitud de trabajo fue más corta en las condiciones de trabajo de $H/D=0.09$ relativo al rendimiento en las condiciones de trabajo de $H/D=0$.

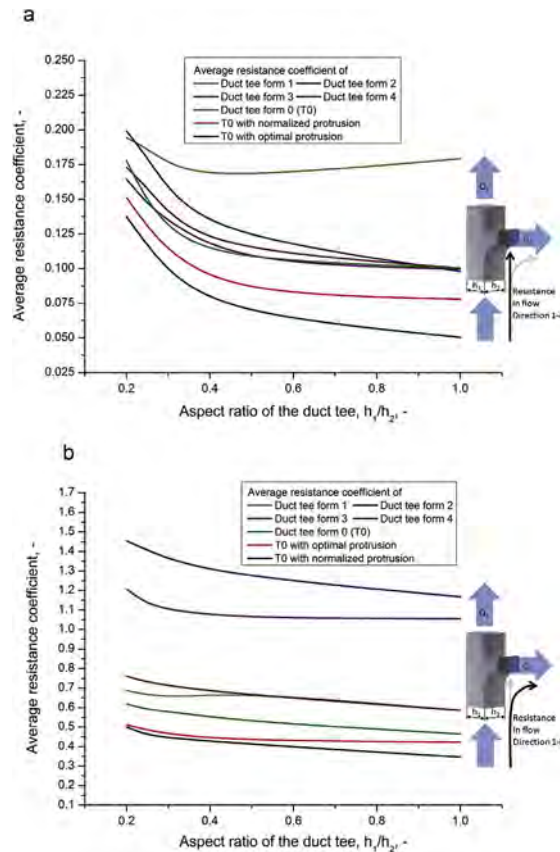


Fig. 9. Comparación de la resistencia de las T tradicionales con las T con protuberancias de varias relaciones de aspecto: (a) resistencia en el flujo en la dirección 1-4, (b) resistencia en la dirección del flujo 1-6.

Las dos comparaciones indican que las protrusiones pueden debilitar efectivamente disipación de energía del fluido a lo largo de las dos direcciones en la T, y por lo tanto, reducir la resistencia del fluido.

También se evaluó el consumo de energía del ventilador inducido por la resistencia de cada conducto en T, que fue calculado de la siguiente manera:

$$N = Q \cdot \overline{\Delta P}$$

El consumo de energía obtenido se muestra en la Fig. 10. Con el aumento de la disipación de energía, el consumo de energía disminuye. La tasa de ahorro de energía en la dirección de flujo 1-4 y 1-6 es 241% y 26%, respectivamente, con una relación de flujo típica de 3:1 y una relación de aspecto de 1.3: 1.

La tasa de ahorro de energía excede el 100% porque el valor de $\overline{\Delta P}$ es negativo. La explicación de por qué el valor de $\overline{\Delta P}$ es negativo se proporcionó en el quinto párrafo de la Sección 4.1.

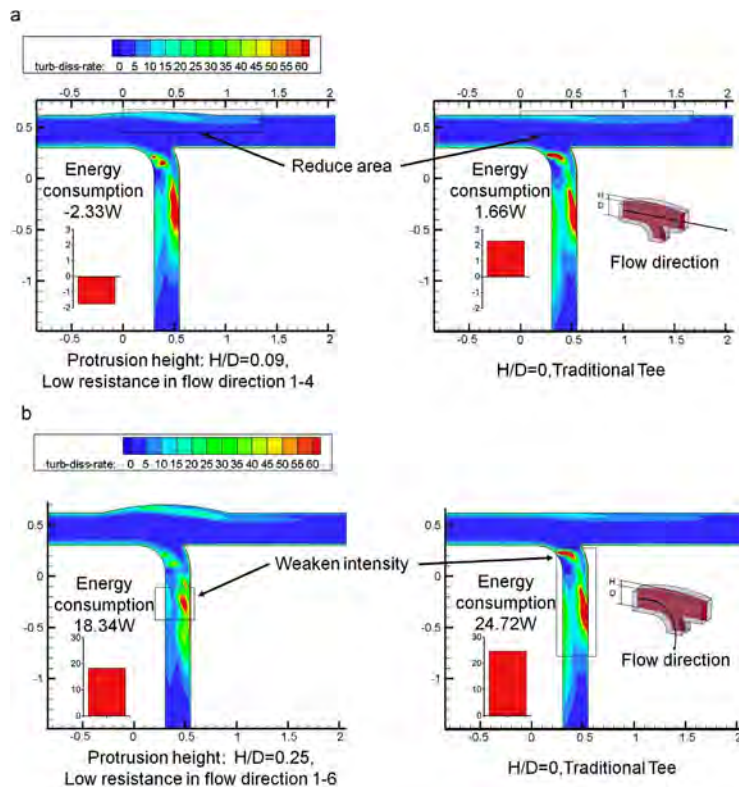


Fig. 10. Campo de disipación de energía en la T del conducto con protuberancias: (a) en la dirección del flujo 1-4, (b) en la dirección del flujo 1-6.

Verificación experimental de la efectividad de reducción de resistencia de las protuberancias

Para verificar la efectividad de reducción de resistencia de las protuberancias, comparamos las T con alturas de protrusión de $H/D=0.25$, $H/D=0.09$, y $H/D=0$ bajo diversas relaciones de flujo; ver Fig. 11. La Fig. 11 compara el resistencia de las dos T con alturas de protuberancia de $H/D=0.09$ y $H/D=0$; los resultados verifican la efectividad de la reducción de la resistencia de las protuberancias en la dirección del flujo 1-4. La figura 11b compara la resistencia de dos T con alturas de protrusión de $H/D=0.25$ y $H/D=0$, y las mismas observaciones confirman la efectividad de reducción de resistencia de las protuberancias en la dirección del flujo 1-6. El valor simulado coincide con el valor experimental, estableciendo la efectividad de reducción de resistencia de las protuberancias. El error estándar se usa para describir la confiabilidad de los valores del experimento. El error estándar (calculado como se describe en la Sección 3.1) de los coeficientes de resistencia locales se muestra en la Fig. 11. La precisión de los parámetros experimentales medidos se presentan en la Tabla 3.

Conclusiones

Hemos presentado un método de reducción de resistencia usando protuberancias desde la perspectiva de las estructuras biomiméticas basadas en la observación de la estructura ramificada de las plantas. El método se aplicó a un conducto en T. Se evaluó el mecanismo de reducción de la resistencia asociado con este método, la T del conducto se comparó con los cinco tipos tradicionales de T y se analizó la característica de resistencia de las T tras de la reducción de la resistencia. Finalmente, la efectividad del método de reducción de la resistencia fue verificada a través de experimentos.

En relación con el rendimiento de la T T0 tradicional (que tiene la menor resistencia de las T tradicionales), la resistencia de la T con protuberancias se redujo en un 36% y 21% en las dos direcciones de flujo. Las tasas de reducción de resistencia en las dos direcciones fueron aproximadamente de un 24% y de un 14% a la altura normalizada. En las condiciones de trabajo de alto flujo local y bajas proporciones de aspecto, la resistencia se volvió negativa; es decir, la tasa de reducción de la resistencia fue mayor al 100%, lo que implica que esa resistencia fue una fuerza impulsora.

Entre los dos conductos de ramificación, el que tiene la mayor deformación de fluido requiere una mayor altura de protrusión para debilitar su velocidad absoluta de flujo y deformación del fluido.

La T desarrollada para el presente estudio (con alturas de protrusión optimi-

zadas y normalizadas) se comparó con los cinco tipos de T tradicionales. Después de la reducción de la resistencia mediante la introducción de protuberancias, la resistencia de la T fue significativamente menor que la de las T tradicionales. La tasa promedio de reducción de resistencia sobre el cinco tipos de T tradicionales eran del 28% al 48% en la dirección del flujo 1-4 y entre el 22% y el 68% en la dirección del flujo 1-6. Este hallazgo refleja completamente la efectividad de las protuberancias en la reducción de la resistencia.

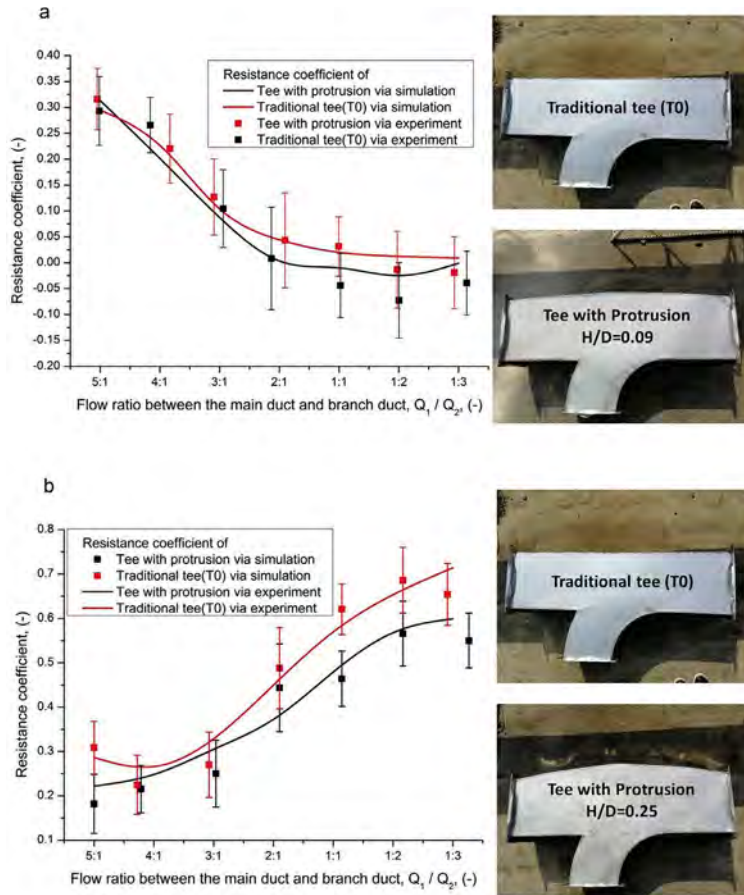


Fig. 11. Verificación experimental de la efectividad de la reducción de la resistencia de las protuberancias: (a) resistencia en la dirección del flujo 1-4, (b) resistencia en la dirección del flujo 1-6.

Finalmente, fue analizado el campo de disipación de energía en la T con protuberancias. La tasa de disipación de energía en el conducto se redujo significativamente; y el área total de disipación de energía era más pequeña. En otras palabras, las pro-

tuberancias efectivamente redujeron la disipación de energía del fluido en las dos direcciones de flujo de la estructura en T, disminuyendo así la resistencia del fluido.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación fue patrocinado por la *National Natural Science Foundation* de China (Grant n° 51508442), por el Programa de Apoyo a la Juventud de la Asociación de Shaanxi para Ciencia y Tecnología (Grant n° 20170515) y el Programa Nacional Clave de I + D de China (Grant N° 2017YFC0702800).

NOTAS

¹ Chastas, P., Theodosiou, T., Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: a literature review. *Build. Environ.* 105, 267–282.

² Pan, W. & Li, K. (2016). Clusters and exemplars of buildings towards zero carbon. *Build. Environ.* 104, 92–101.

³ Robert, A. & Kummert, M. (2012). Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Build. Environ.* 55 (3), 150–158.

⁴ Shan Hu, Da Yan, Siyue Guo, *et al.* (2017). A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China. *Energy Build.* 148, 366–378.

⁵ Tsinghua Building Energy Research Center. (2014). *Annual Report on China, Building Energy Efficiency*. Beijing: China architecture and building press.

⁶ Chen, Y., Cai, H., Chen, Z., *et al.* (2017). Using multi-robot active olfaction method to locate time-varying contaminant source in indoor environment. *Build. Environ.* 118, 101–112.

⁷ Liu, Z., Li, H., Cao, G. (2017). Quick estimation model for the concentration of indoor airborne culturable bacteria: an application of machine learning. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14 (8), 857.

⁸ Liu, Z., Cheng, K., Li, H. *et al.* (2017). Exploring the potential relationship between indoor air quality and the concentration of airborne culturable fungi: a combined experimental and neural network modeling study. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1–8.

⁹ El-Zeiny, R. M. (2012). Biomimicry as a problem solving methodology in interior architecture. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 50, 502–512.

¹⁰ Reddi, S., Jain, A. K., Yun, H. B. *et al.* (2012). Biomimetics of stabilized earth construction: challenges and opportunities. *Energy & Build.* 55 (55), 452–458.

¹¹ Zhao, J. L. & Ya-Qiong, X. U. (2010). Ecological wisdom inspired from termite mounds-analysis on biomimetric design of Zimbabwe eastgate center. *Build. Sci.* 2, 002.

¹² Zalewski, L., Chantant, M., Lassue, S. *et al.* (1997). Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy & Build.* 25 (1), 7–18.

¹³ Zalewski, L., Lassue, S., Duthoit, B. *et al.* (2002). Study of solar walls-validating a simulation model. *Build. Environ.* 37 (1), 109–121.

¹⁴ Kirchner, A. & Schadschneider, A. (2002). Simulation of evacuation processes using a bionics inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Phys. A*, 312, 260–276.

¹⁵ Zhang, G., Xi, Zh., Wang, Sh. *et al.* (2001). Study and progress of biological modelling self-healing concrete, *Concrete*, 137, 10–13.

¹⁶ Gilman, S. F. & Syracuse, N. Y. (April, 1955). Pressure losses of divided-flow fittings. *Heat. Pip. Air Cond.* 141–147.

- ¹⁷ Miller, D. S. (1990). *Internal flow system*. Bedford: BHRA. The Fluid Engineering Centre.
- ¹⁸ American Society of Heating (1972). *Refrigerating, and AirConditioning Engineers*. ASHRAE Handbook of Fundamentals.
- ¹⁹ Vedavaz, A., Hussain, M. I., Kumar, S. (2012). *HVAC: Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning for Design and Implementation*. South Norwalk: Industrial Press.
- ²⁰ CIBSE (1986). *Ventilation and Air Conditioning Requirements (CIBSE Guide B2)*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers.
- ²¹ Moraes, M. S. D., Torneiros, D. L. M., Rosa, V. D. S. *et al.* (2017). Experimental quantification of the head loss coefficient K for fittings and semi-industrial pipe cross section solid concentration profile in pneumatic conveying of polypropylene pellets in dilute phase. *Powder Technol*, 310, 250–263.
- ²² Yin, Y., Chen, K., Qiao, X. *et al.* (2017). Mean pressure distributions on the vanes and flow loss in the branch in a T Pipe junction with different angles. *Energy Procedia*, 105, 3239–3244.
- ²³ Li, S. Q., Wang, P., Lu, T. (2015). CFD based approach for modeling steam–water direct contact condensation in subcooled water flow in a tee junction. *Prog. Nucl. Energy*, 729–746.
- ²⁴ Mika, Ł. (2013). Pressure loss coefficients of ice slurry in horizontally installed flow dividers. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 45 (2), 249–258.
- ²⁵ Cabral, R. A. F., Telis, V. R. N., Park, K. J. *et al.* (2011). Friction losses in valves and fittings for liquid food products. *Food & Bioprod. Process*, 89 (4), 375–382.
- ²⁶ Herrmann, H. & Bucksch, H. (2014). *Plant Transpiration*. Heidelberg: Springer Berlin.
- ²⁷ Herrmann, H. & Bucksch, H. (2014). *Plant Morphology//Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*. Heidelberg: Springer.
- ²⁸ Reid, J. C., Brookes, S. J., Evans, D. J. *et al.* (2014). *The Dissipation Function: its Relationship to Entropy Production, Theorems for Nonequilibrium Systems and Observations on its Extremal[M]// Beyond the Second Law*. Heidelberg: Springer Berlin, pp. 31–47.
- ²⁹ Schobeiri, M. T. (2009). *Fluid Mechanics for Engineers*. Heidelberg: Springer Berlin.
- ³⁰ Mays, L. W. (2009). *Hydraulic Design Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- ³¹ Akhtar, S., Kumral, M., Sasmito, A. P. (2017). Correlating variability of the leakage characteristics with the hydraulic performance of an auxiliary ventilation system. *Build. Environ*, 121, 200–214.
- ³² Chen, H., Cai, W., Chen, C. (2016). Fan-independent air balancing method based on computation model of air duct system. *Build. Environ*, 105, 295–306.
- ³³ Lu, H. & Lu, L. (2015). Effects of rib spacing and height on particle deposition in ribbed duct air flows. *Build. Environ*, 92, 317–327.
- ³⁴ Wang, S., Zhao, B., Zhou, B. *et al.* (2012). An experimental study on short-time particle resuspension from inner surfaces of straight ventilation ducts. *Build. Environ*, 53 (6), 119–127.
- ³⁵ Phuong, N. L. & Ito, K. (2013). Experimental and numerical study of airflow pattern and particle dispersion in a vertical ventilation duct. *Build. Environ*, 59 (328), 466–481.
- ³⁶ Gao, R., Chen, S., Li, A. *et al.* (2017). Computational fluid dynamics study on the drag and flow field differences between the single and coupled bends. *Build. Serv. Eng. Res. Technol*, 38 (2), 163–175.
- ³⁷ Gao, R., Chen, S., Zhao, J. *et al.* (2016). Coupling effect of ventilation duct bend with different shapes and sizes. *Build. Simul*, 9 (3), 311–318.
- ³⁸ Robinson, K. D. (2003). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical sciences*. New York: McGraw-Hill.
- ³⁹ Wang, Y., Williams, K., Jones, M. *et al.* (2017). CFD simulation methodology for gas-solid flow in bypass pneumatic conveying - a review. *Appl. Therm. Eng*, 125, 185–208.
- ⁴⁰ Dehkordi, P. B., Colombo, L. P. M., Guilizzoni, M. *et al.* (2016). CFD simulation with experimental validation of oil-water core-annular flows through Venturi and Nozzle flow meters. *J.*

Petroleum Sci. Eng., 149, 540–552.

⁴¹ Shi, J., Gourma, M., Yeung, H. (2017). CFD simulation of horizontal oil-water flow with matched density and medium viscosity ratio in different flow regimes. *J. Petroleum Sci. Eng.*, 151, 373–383.

⁴² Ansys. Inc. Fluent 14.5, Theory Guide, (2012) USA.

⁴³ Gao, R. & Li, A. (2011). Modeling deposition of particles in vertical square ventilation duct flows. *Build. Environ.*, 46 (1), 245–252.

⁴⁴ Xiao Ye, Yanming Kang, Bin Zuo, *et al.* (2017). Study of factors affecting warm air spreading distance in impinging jet ventilation rooms using multiple regression analysis. *Build. Environ.*, 120, 1–12.