

Análisis Numérico, Metroológico y Experimental de Caudalímetros Ultrasonicos Domésticos mediante el uso de la Mecánica de Fluidos Computacional

M. J. Rincón^(1, 3, *), S. Graner⁽¹⁾, P. Cortés⁽²⁾ y M. Reclari⁽¹⁾

⁽¹⁾ Kamstrup A/S, Departamento de Calidad y Sostenibilidad
Industrivej 51, Skanderborg, Dinamarca.

⁽²⁾ Kamstrup Spain S.L., Departamento de Ventas y Servicio Técnico
Nuñez de Balboa, 29, Madrid, España.

⁽³⁾ Universidad de Aarhus, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Producción
Inge Lehmans Gade 10, 8000, Aarhus, Dinamarca.

^(*) Correspondencia: +45 21 33 48 40, mjrp@kamstrup.com, mjrp@mpe.au.dk.

RESUMEN: Los caudalímetros ultrasónicos de pequeño diámetro presentan un interesante problema fluido-mecánico debido a su geometría única y compleja interacción con el flujo. Estos caudalímetros están sujetos a estrictas leyes metroológicas que deben ser respetadas y, aun así, deben ser ofrecidos a un coste mucho más bajo en comparación con otras tecnologías de caudalímetros especializados (p.ej. magnéticos o coriolis). En este estudio, se utiliza la dinámica de fluidos computacional para predecir el flujo turbulento dentro de un caudalímetro ultrasónico residencial con una configuración intrusiva de dos estantes reflectores. Los resultados de las simulaciones se comparan con experimentos de visualización de vórtices, pérdida de carga y velocimetría láser Doppler de manera tanto cualitativa como cuantitativa. En general, los resultados que mejor predicen las estructuras de flujo, la velocidad axial y la caída de presión se logran mediante el modelo RANS k- ω SST con resolución de la capa límite. El modelo k- ω SST con modelado en la pared predice diferencias menores, por lo tanto se concluye que éste último es un buen candidato para realizar estudios de optimización paramétricos debido a su reducido coste computacional.

1. INTRODUCCIÓN

Los caudalímetros ultrasónicos son instrumentos de alta precisión que se basan en la propagación de ultrasonidos para medir la el flujo volumétrico de un fluido en movimiento a través de un conducto [1]. En comparación con la tecnología no ultrasónica, los caudalímetros ultrasónicos tienen varias ventajas: el equipo es fácil de manejar e instalar; el régimen de flujo puede ser laminar, transitorio o turbulento; se reduce la pérdida de carga; la precisión de la medición puede ser tan baja como 0.1%; los costes de compra, operación y mantenimiento son muy razonables, y el fluido puede ser monofásico o multifásico [2].

Uno de los instrumentos más utilizados de esta familia son los caudalímetros ultrasónicos residenciales para la medición de agua. Estos caudalímetros funcionan siguiendo el *transient-time method* (método de tiempo transitorio) donde transductores envían y reciben ondas ultrasónicas. La velocidad de la onda sonora varía debido a su interacción con el medio, lo que permite predecir el flujo volumétrico en función del diferencial de tiempo. Tradicionalmente, en los caudalímetros ultrasónicos, se puede suponer que el sonido viaja en línea recta. El perfil de velocidad se integra el perfil a lo largo de la línea de la ruta del sonido, lo que proporciona un diferencial temporal que se usa para estimar el flujo volumétrico [3]. Sin embargo, a medida que avanza la tecnología, se utilizan con más frecuencia técnicas más avanzadas, como la trayectoria múltiple y la trayectoria del sonido reflejada (donde el sonido es redirigido por reflectores dentro de la tubería entre los transductores) para obtener una medición más precisa [4].

En términos de mecánica de fluidos, los caudalímetros ultrasónicos de pequeño diámetro con trayectoria del sonido reflejada presentan un interesante problema de flujo interno. Comprender y evaluar cómo funcionan estos dispositivos desde una perspectiva fluido-mecánica permite evaluar y optimizar con confianza los caudalímetros residenciales para diversas condiciones de flujo de entrada y minimizar la pérdida de carga en la red de distribución. Para lograrlo, los métodos numéricos con dinámica de fluidos computacional (CFD) son un candidato eficiente para predecir el comportamiento fluido-mecánico en estos dispositivos.

Hasta la fecha, en la literatura, la suposición principal es modelar el caudalímetro como una sección recta de tubería, por lo tanto, no ha habido ningún estudio de confianza que prediga numéricamente la interacción del flujo con un caudalímetro ultrasónico con configuración intrusiva de dos soportes.

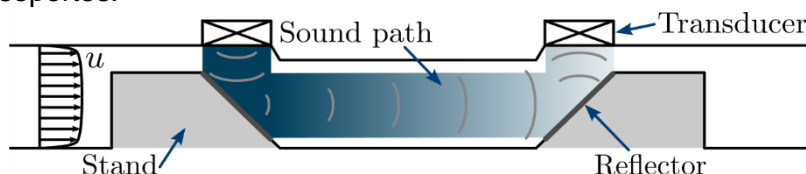


Fig. 1 Esquema de un caudalímetro ultrasónico de dos soportes con trayectoria de sonido reflejada.

En este estudio, herramientas CFD con diferentes modelos de turbulencia basados en Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) se analizan junto con métodos experimentales para verificar y validar la predicción de flujo en la zona de medición del caudalímetro. Para realizar esta validación, se eligen experimentos de visualización de estructuras de flujo vorticales, pérdida de carga y velocimetría láser Doppler (LDV).

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Las ecuaciones que gobiernan el flujo y que se utilizan en este estudio son la forma incompresible de las ecuaciones de Navier-Stokes, excluyendo la transferencia de calor. Estas están escritas siguiendo la convección sumatoria de Einstein en su forma convectiva [5] como

$$\partial_i u_i = 0, \quad (1a)$$

$$\partial_t u_i + u_j \partial_j u_i = -\partial_i p + \nu \partial_j \partial_j u_i, \quad (1b)$$

donde u es el vector de velocidad, p es la presión cinemática y ν es la viscosidad cinemática molecular. Estas ecuaciones se desarrollan para los métodos RANS utilizados en este estudio. El tensor de esfuerzos de Reynolds se puede aproximar mediante la hipótesis de Boussinesq y obtener el cierre del sistema de ecuaciones mediante los dos modelos de turbulencia aplicados en este estudio: $k-\epsilon$ [6] y $k-\omega$ SST [7].

A su vez, las ecuaciones del movimiento de fluidos se resuelven numéricamente mediante el software abierto y de propósito general OpenFOAM [8].

2.1. Dominio computacional y mallas

Una versión simplificada de un caudalímetro ultrasónico de dos soportes basado en el *flow/Q 2200* del fabricante Kamstrup A/S, está parametrizado y generado con Diseño Asistido por Ordenador (CAD) en 3D. La geometría simplificada está diseñada teniendo en cuenta las dificultades de fabricación y las áreas que podrían dar lugar a una generación de mallas numéricas de baja calidad. Por lo tanto, la geometría elegida en la Figura 2 exhibe un balance entre la fidelidad real del caudalímetro, aplicaciones numéricas y experimentales. La geometría se parametriza en detalle como se muestra en la Tabla 1 con un diámetro de tubería de $D = 20$ mm.

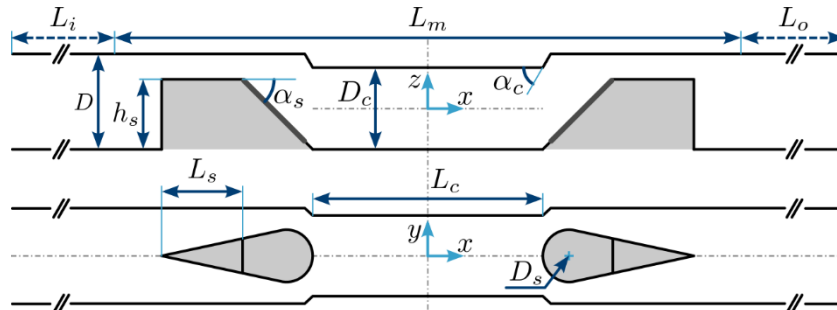


Fig. 2 Descripción paramétrica de la geometría del caudalímetro elegida. Tenga en cuenta que los bordes afilados en los soportes se filetean con un radio constante de 1 mm para facilitar la generación de la capa de extrusión de la malla. Además, tenga en cuenta que el origen de coordenadas se encuentra en el punto medio de la sección de constricción.

Parámetro	D	D _i	L _i	L _o	L _m	L _c	L _s	D _s	h _s
Valor	20 mm	0,865D	5D	5D	7,5D	2,25D	0,915D	0,6125D	0,7785D

Tabla 1 Valores y relaciones de los parámetros geométricos. Tenga en cuenta que los subíndices *i*, *o*, *m*, *s*, *c* representan entrada (*inlet*), salida (*outlet*), caudalímetro (*meter*), soporte (*stand*) y constricción (*constriction*), respectivamente.

En este estudio se utilizan dos tipos de mallas hexaédricas: una malla con resolución de la capa límite y otra modelada en la pared. Ambas mallas se comparan para validar los métodos y seleccionar el mejor enfoque hacia un futuro problema de optimización basado en el Diseño/Análisis de Experimentos Informáticos (DAE).

Las paredes se consideran perfectamente lisas y el modelo de pared utilizado se basa en la predicción de la viscosidad cinemática turbulenta en función de la energía cinética turbulenta (denominada *nutkWallFunction* en OpenFOAM). Además, se realiza un estudio de independencia de malla basado en el modelo RANS *k- ω SST* y se aplican condiciones de contorno de simetría en el plano *x-z*, por lo tanto, los resultados se reflejan durante el postproceso para mostrar la tubería completa.

2.2. Condiciones iniciales y de contorno

Se define una simulación estándar para el caudal nominal del caudalímetro según los estándares de la industria. Por lo tanto, todas las simulaciones numéricas realizadas en este estudio siguen las mismas condiciones:

- Agua pura como medio fluido.
- Flujo volumétrico de entrada $Q = 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$, lo que equivale a una $u = 1,41 \text{ m/s}$ uniforme.
- Temperatura de entrada de $T = 20^\circ\text{C}$, equivalente a $\nu = 1.00381 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.
- Esquema de divergencia lineal limitada con corrección del gradiente de velocidad en coeficientes de interpolación. Este esquema es implícito, acotado y de precisión de segundo orden para evitar restricciones de estabilidad [9-10].

Las condiciones iniciales de turbulencia en RANS se calculan de siguiendo las mejores prácticas en CFD para problemas de flujo interno en tuberías circulares [11-12].

2.3. Métodos experimentales

Los métodos experimentales no intrusivos actuales, como PIV y LDV, son capaces de generar datos cualitativos y cuantitativos con una influencia mínima en el flujo. Sin embargo, la configuración experimental y las condiciones de flujo deben adaptarse adecuadamente a los métodos para generar datos de alta calidad. Para realizar estos experimentos, se fabrican un conjunto de tubería y soporte 1:1. Por un lado, la tubería se fabrica taladrando un bloque de

polimetilmetacrilato (PMMA) bien pulido en tres operaciones; mientras que la fabricación aditiva se elige para fabricar el conjunto de los soportes. Se elige PMMA como material para minimizar la difracción de la luz entre el agua y el material, ya que ambos compuestos tienen un índice de refracción similar. Por otro lado, los soportes están fabricados con polvo de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) negro. (Figura 3).



Fig. 3 Imagen ráster de la tubería de prueba y los soportes utilizados en los experimentos.

La tubería y los soportes se colocan en un banco de pruebas en el laboratorio de fluidos de la empresa Kamstrup A/S, los cuales tienen un control preciso del flujo volumétrico y la temperatura del flujo, manteniendo las condiciones constantes a lo largo de las pruebas. Para llevar a cabo los experimentos con LDV, se introducen en el conducto partículas reflectantes de 15 μm de diámetro.

En cuanto a LDV, para obtener las medidas se utiliza un láser Nd:YAG de 100 mW y una longitud de onda de 532 nm, tomando un mínimo de 500 ráfagas válidas por punto. También se utiliza un equipo transversal 2D para tomar con control las medidas en diferentes puntos y se crea una malla uniformemente espaciada de 232 puntos para evaluar la velocidad axial de la sección transversal (x-planos normales) (vea Figura 4).

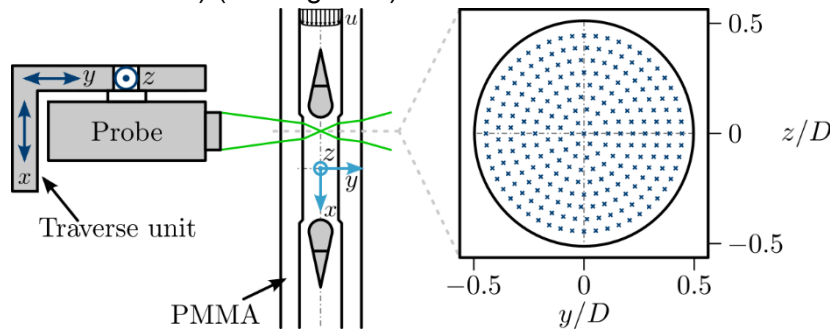


Fig. 4 Configuración experimental y malla de LDV.

Además, los datos de caída de presión son tomados por dos transductores de presión de alta precisión OMEGA PX429-100GI con una incertidumbre de medición de $\pm 0.08\%$ colocados justo aguas arriba y abajo de la tubería de medición.

Finalmente, se introduce en el banco de pruebas una válvula que permite la inclusión de burbujas de aire controladas en el caudal. Como se muestra en la Figura 5, una válvula de bola manual controla la fracción de gas en el agua, lo que permite visualizar estructuras de vórtices a diferentes niveles de intensidad. Dado que las burbujas de aire coalescen en las regiones de baja presión del flujo, se utiliza un registro de este fenómeno con una cámara de alta velocidad a 9000 fps para analizar cualitativamente el problema y hacer un estudio comparativo del comportamiento del flujo y las estructuras de vórtices.

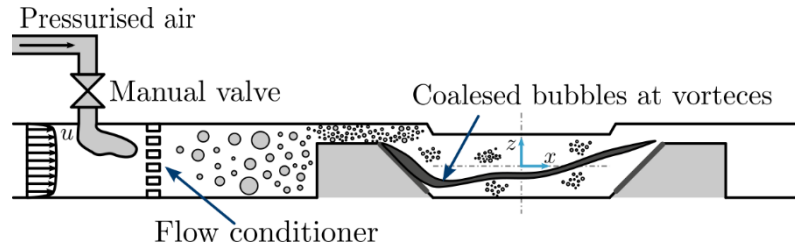


Fig. 5 Configuración experimental de visualización de vórtices.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados numéricos y experimentales. En cuanto a los métodos numéricos, los casos estudiados se dividen por malla y modelo de turbulencia: RANS $k-\epsilon$ y $k-\omega$ SST con mallas modeladas y resueltas en las paredes.

3.1. Estructuras vorticales

En soluciones numéricas, los gradientes de presión locales y suficientemente altos en el flujo producen estructuras vorticales que se pueden predecir mediante métodos de visualización de vórtices como el criterio λ_2 [13], mientras que, experimentalmente, la inclusión de aire en el flujo de agua y su distribución uniforme permite la visualización de burbujas coalescidas en las regiones de baja presión donde se forman los vórtices. La geometría del sistema se puede observar en la Figura 6, la cual muestra una representación de las imágenes instantáneas y promediadas de los experimentos de visualización de vórtices a diferentes intensidades, así como iso-contornos numéricos de λ_2 .

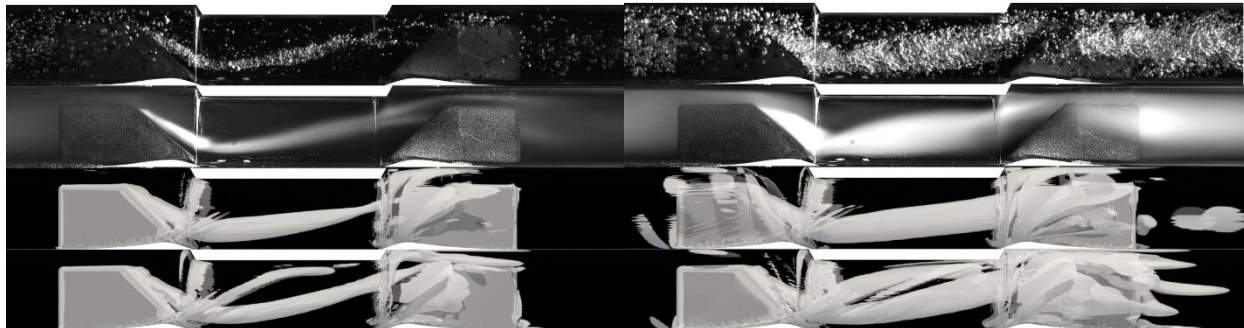


Fig. 6 Experimento de visualización de vórtices. Toma instantánea, imagen promedia del experimento, $k-\epsilon$ resuelto en la pared y $k-\omega$ SST resuelto en la pared, respectivamente, de arriba a abajo. La intensidad de los vórtices está definida por iso-superficies de $\lambda_2 = 10^5$ y $\lambda_2 = 4 \cdot 10^4$ (izquierda); y $\lambda_2 = 3 \cdot 10^4$ y $\lambda_2 = 10^4$ (derecha) para $k-\omega$ SST y $k-\epsilon$ respectivamente. Tenga en cuenta que la diferencia de fracción de gas en los experimentos se logra variando la cantidad de aire en la tubería. Además, la dirección del flujo axial positivo sigue de izquierda a derecha.

La estructura de flujo más característica del sistema son los vórtices a lo largo de la constricción. Debido a la importancia de la constricción para la medición de caudal en caudalímetros ultrasónicos, es ciertamente importante realizar un estudio cualitativo de esta sección de tubería para asegurar la validación de los métodos numéricos.

3.2. Pérdida de Carga

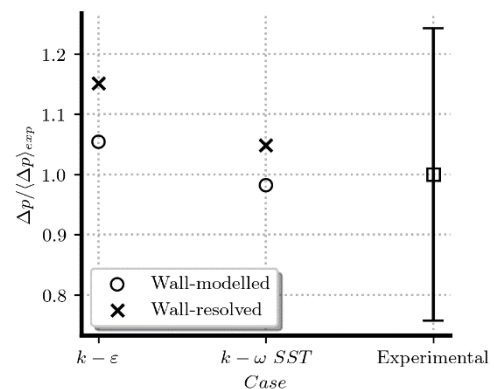


Fig. 7 Comparación de pérdida de carga entre RANS y resultados experimentales. La barra de error muestra la desviación estándar (σ) de los datos experimentales.

Los resultados experimentales y numéricos de Δp se muestran en la Figura 7 donde ambos modelos predicen la pérdida de carga dentro de la desviación estándar del experimento. Considerando que, $k-\epsilon$ tiende a predecir en exceso Δp con valores de 105,4% y 115,1% de la media experimental para sus cuadrículas modeladas en pared y resueltas en pared, respectivamente; $k-\omega$ SST muestra una mejor concordancia con una predicción de 98,2% y 104,9% del valor experimental medio para las mallas modeladas y resueltas en pared, respectivamente.

3.3. Distribución de la velocidad

Los contornos de velocidad axial se muestran en esta sección para realizar un análisis comparativo entre los datos experimentales de LDV y los métodos numéricos. La Figura 8 muestra datos de velocidad axial para experimentos LDV y métodos numéricos en diferentes secciones transversales de la tubería.

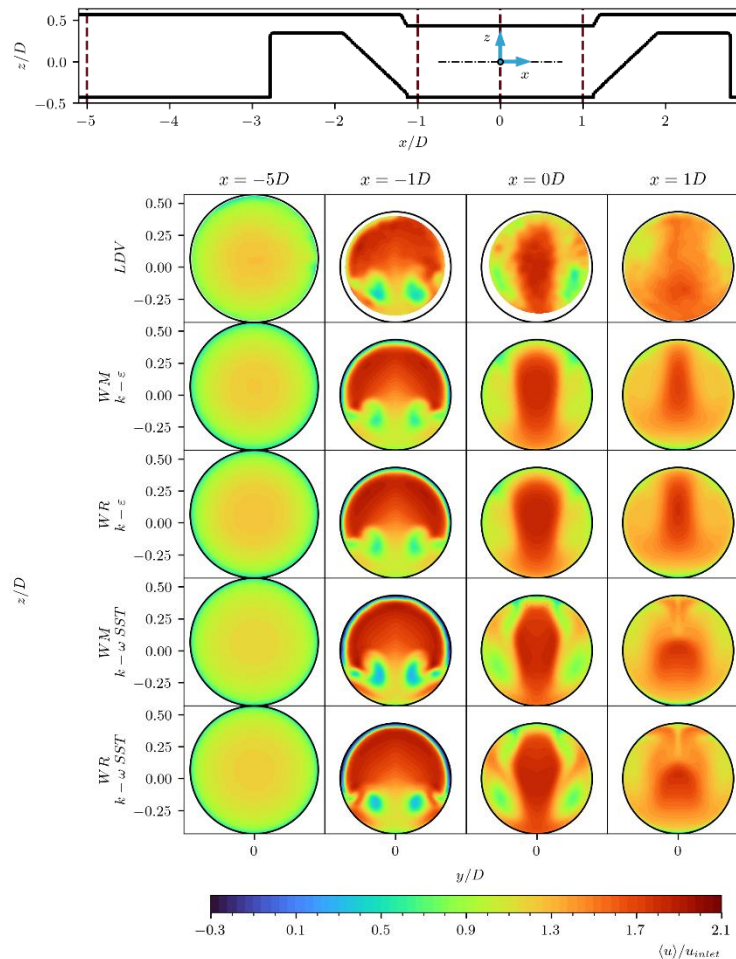


Fig. 8 Resultados experimentales de LDV y contornos de velocidad axial CFD en los planos $x = [-5, -1, 0, 1]D$. Las abreviaturas WM (*wall-modelled*) y WR (*wall-resolved*) corresponden a mallas modeladas y resueltas en pared, respectivamente. Tenga en cuenta la ubicación del centro de coordenadas en la constricción y los cambios en la sección transversal debido a la geometría del sistema a lo largo de la dirección de la corriente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, todos los métodos numéricos son capaces de predecir con precisión la mayoría del caudal de forma cualitativa. Se pueden ver diferencias mínimas entre las dos mallas evaluadas, con la excepción del tamaño de vórtices pronosticado por $k-\omega$ SST en $x = -1D$. Mientras que RANS $k-\epsilon$ predice una alta difusividad que afecta la

propagación de los vórtices, $k-\omega$ SST predice el flujo con mayor precisión con capas de corte más definidas de acuerdo con los datos de LDV.

3.4. Análisis de perfiles de velocidad

Para realizar un estudio más preciso y completo del flujo, los perfiles de velocidad axial numéricos y experimentales a lo largo de y para diversos planos normales de x se evalúan y comparan como se muestra en la Figura 9. Los perfiles evaluados se representan mediante líneas discontinuas en $z = [-0.2125, -0.125, 0.125]D$ respectivamente a $x = [-1, 0, 1]D$. Los resultados de WR $k-\omega$ SST se eligen para definir estas ubicaciones ya que 1D LDV no puede reproducir suficientes datos para ubicar los centros de los vórtices. Estos perfiles específicos se eligen para comparar los gradientes y las magnitudes de las regiones vorticales, las cuáles son las ubicaciones más representativas del flujo.

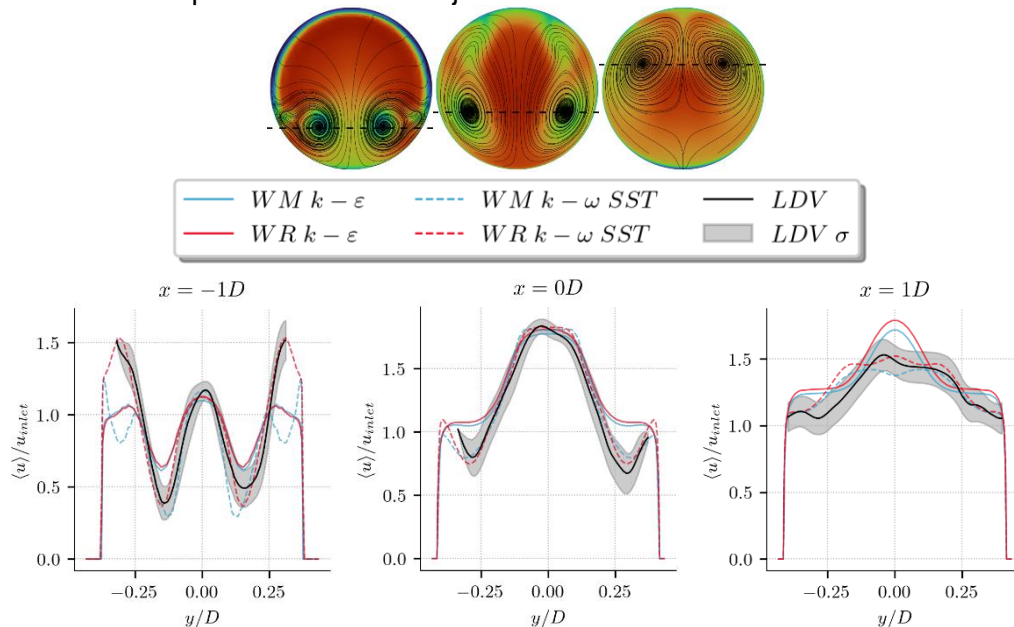


Fig. 9 Análisis cuantitativo de los perfiles de velocidad en diferentes ubicaciones en el medidor de flujo. Las líneas discontinuas representan las ubicaciones evaluadas de las diferentes figuras. Las líneas azules y rojas representan los métodos que utilizan la malla resuelta o modelada en la pared, respectivamente.

Los perfiles de velocidad en otras ubicaciones también se analizan mostrando resultados consistentes con la Figura 9. Por lo tanto, en aras de la simplicidad y la limitación de espacio, no se muestran. En resumen, los métodos RANS evaluados son capaces de predecir las estructuras de flujo dentro de la constricción del caudalímetro. Sin embargo, en términos de gradientes de velocidad axial y magnitud, $k-\omega$ SST concuerda con los datos experimentales más que $k-\epsilon$. En general, RANS $k-\omega$ SST es capaz de predecir con mucha más precisión las ubicaciones de los vórtices y la velocidad axial que $k-\epsilon$, donde $k-\omega$ SST resuelto en la pared predice el flujo dentro de 2σ niveles experimentales de incertidumbre.

4. CONCLUSIONES

Este estudio mostró tanto que los modelos numéricos como las mallas estudiadas fueron capaces de predecir con precisión la mayor parte del flujo en toda la región de medición del caudalímetro. RANS $k-\omega$ SST mostró una mayor concordancia general con los experimentos que RANS $k-\epsilon$. Todos los modelos predijeron estructuras coherentes en forma de vórtices, sin embargo, RANS $k-\epsilon$ no fue capaz de predecir correctamente la magnitud y propagación de vórtices de menor intensidad. La pérdida de carga fue predicha por ambos modelos dentro de los márgenes de incertidumbre de 2σ donde RANS $k-\omega$ SST obtuvo la concordancia más alta. Por lo tanto, $k-\omega$ SST predijo con precisión la región de medición del medidor de flujo.

Se observaron diferencias insignificantes en la velocidad axial predicha entre las mallas resueltas y modeladas en paredes para todos los métodos, donde los resultados en la malla modelada en paredes se obtuvieron con un factor de 25 veces menos tiempo computacional requerido que para las mallas resueltas en paredes.

Finalmente, el trabajo realizado en este estudio mostró la solidez y precisión de los métodos CFD frente a datos experimentales para predecir flujos complejos limitados por paredes. Los estudios futuros apuntan a optimizar la geometría interna del caudalímetro basado en CFD y CADE mediante el uso de k- ω SST modelado en la pared como el método más preciso y eficiente en el tiempo.

5. REFERENCIAS

- [1] E. Mandard, D. Kouame, R. Battault, J.-P. Remenieras, F. Patat, Methodology for developing a high-precision ultrasound flow meter and fluid256 velocity profile reconstruction, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control 55 (1) (2008) 161–172.257
- [2] L. Lynnworth, Y. Liu, Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005, Ultrasonics 44 (2006) e1371–e1378.258
- [3] B. Lüscher, T. Staubli, T. Tresch, P. Gruber, Accuracy analysis of the acoustic discharge measurement using analytical, spatial velocity259 profiles, Proceedings of the Hydro (2007).260
- [4] E. Thompson, Fundamentals of multipath ultrasonic flow meters for gas measurement, Proceedings of the American School of Gas Measure-261 ment Technology (2011) 23.262
- [5] S. B. Pope, Turbulent flows (2001).281
- [6] B. E. Launder, D. B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows, in: Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and282 combustion, Elsevier, 1983, pp. 96–116.283
- [7] F. R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA journal 32 (8) (1994) 1598–1605.284
- [8] H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby, A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques,285 Computers in physics 12 (6) (1998) 620–631.286
- [9] P. K. Sweby, High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws, SIAM journal on numerical analysis 21 (5) (1984)287 995–1011.288
- [10] R. M. Beam, R. F. Warming, An implicit finite-difference algorithm for hyperbolic systems in conservation-law form, Journal of computational289 physics 22 (1) (1976) 87–110.290
- [11] D. C. Wilcox, et al., Turbulence modeling for CFD, Vol. 2, DCW industries La Canada, CA, 1998, pp. 122–130.291
- [12] J. E. Bardina, P. G. Huang, T. J. Coakley, Turbulence modeling validation, testing, and development, Tech. rep. (1997).292
- [13] J. Jeong, F. Hussain, On the identification of a vortex, Journal of fluid mechanics 285 (1995) 69–94.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio es el resultado del proyecto de investigación financiado por el Fondo de Innovación de Dinamarca (IFD) bajo la Subvención No. 0153-00051B y Kamstrup A/S.