

ANÁLISIS CFD DE CONTROL DE FLUJO MEDIANTE UNA VÁLVULA ESFÉRICA CFD ANALYSIS ON FLOW CONTROL USING A BALL VALVE

F. Hazzi^{*1}, C. S. Cardona¹, C. I. Pairetti^{1,2} y C. M. Venier^{1,2}

¹Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM) FCEIA - Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

²Centro de Investigación en Métodos Computacionales, CIMEC (CONICET - UNL), Santa Fe, Argentina.

Recibido: 30/10/21; Aceptado: 09/03/22

El control del flujo en sistemas de cañerías está presente en muchas aplicaciones de ingeniería y se efectúa mediante distintos componentes. En particular, la válvula esférica consta de un obturador con un orificio cilíndrico que regula el flujo mediante la rotación del mismo, modificando la sección de paso efectiva. En el presente trabajo se estudia este tipo de dispositivos mediante Fluido-dinámica Computacional (CFD). Las simulaciones se llevan a cabo utilizando la plataforma de cálculo SimScale, basada en el software libre OpenFOAM. El principal objetivo de este análisis es ajustar y validar la herramienta numérica para predecir la relación entre el porcentaje de apertura y la pérdida de carga para válvulas con geometrías complejas, observando las estructuras de flujo desarrolladas en las cercanías del obturador. Los modelos utilizados se validan en problemas axisimétricos de conductos con sección constante y con una estricción localizada, comparando con la solución analítica y con simulaciones de referencia, respectivamente. Luego se estudia el caso de una válvula esférica real en régimen turbulento a diferentes aperturas contrastando los resultados con datos experimentales y con simulaciones numéricas realizadas por otros autores. Se observa un buen acuerdo del coeficiente de pérdida de carga para cada uno de los ángulos de apertura estudiados, corroborando a su vez la independencia del mismo frente al número de Reynolds.

Palabras Clave: Válvula esférica, Flujo turbulento, OpenFOAM, Coeficiente de pérdida de carga.

Flow control in piping systems is present in many engineering applications and is carried out by different components. In particular, ball valves consist of a plug with a cylindrical orifice that regulates the flow through rotation, modifying the effective passage section. In the present work, this type of device is studied using Computational Fluid Dynamics (CFD). The simulations are carried out using the SimScale calculation platform, based on the free OpenFOAM software. The main objective of this analysis is to set and validate a numerical tool to predict the relationship between the opening percentage and the pressure loss for normalized valves, analyzing the flow structures developed in the vicinity of the plug. The models used are validated in axisymmetric problems of conduits with constant section and with a localized stricture, comparing with the analytical solution and with numerical simulations, respectively. Then the case of a real ball valve in a turbulent regime at different openings is studied, comparing the results with experimental data and with numerical simulations carried out by other authors. A good agreement of the pressure loss coefficient is observed for each of the opening angles studied, verifying its independence on the Reynolds number.

Keywords: Ball Valve, Turbulent flow, OpenFOAM, Loss coefficient.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2022.fluidos.21>

 ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Las válvulas esféricas son dispositivos para el control de flujo que operan de forma activa, regulando la sección de paso de fluido mediante la rotación de un obturador. Debido a su bajo costo y poca necesidad de mantenimiento son ampliamente utilizadas en diversos procesos industriales donde se requiera estrangulamiento o bloqueo completo del flujo. El desempeño y confiabilidad de las mismas se encuentran fuertemente ligadas a un correcto proceso de diseño y fabricación, es por ello que es necesario un entendimiento detallado de los patrones de flujo que se establecen dentro de la válvula.

Para el estudio del flujo dentro de las válvulas, en muchas ocasiones se recurren a técnicas experimentales [1]. Sin embargo, en las últimas décadas, con los avances tecnológicos en almacenamiento y procesamiento en computadoras personales, las técnicas de Fluidodinámica Computacional

(CFD) pasaron a ser una herramienta de gran utilidad para el análisis de tales procesos. Muchos autores en la literatura recurren a técnicas de CFD debido a que permiten observar estructuras de flujo complejas con un gran nivel de detalle sin requerir del uso de elementos físicos intrusivos para la toma de datos [2, 3].

En este trabajo, analizamos el flujo en la válvula esférica ensayada por Chern *et al.* [1], computando el campo medio de velocidades en régimen aplicando un modelo RANS del tipo $k - \epsilon$, considerando de flujo incompresible y Newtoniano utilizando la plataforma de código abierto OpenFOAM [4], a través de la interfaz web SimScale. En primera instancia se realiza un estudio de convergencia en malla en un problema de bloqueo simétrico para seleccionar un refinamiento espacial adecuado. Luego se simula la válvula esférica operando en regímenes con alto número de Reynolds ($Re > 10^5$), en condiciones de flujo turbulento totalmente desarrollado, calculando la pérdida de carga para diferen-

* fiorellahazzi@gmail.com

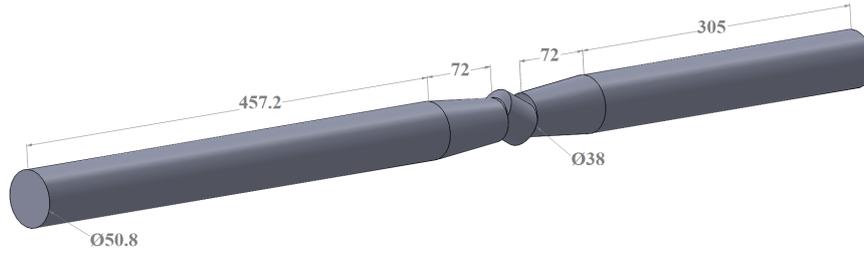


FIG. 1: Esquema de la geometría adoptada para la válvula esférica en posición $\phi = 30^\circ$.

tes ángulos de apertura y se contrastan los coeficientes de pérdida de carga para regímenes turbulentos contra los resultados experimentales de la literatura.

II. MÉTODOS

Modelo matemático

Esta sección presenta el abordaje general para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles por medio de métodos segregados de acoplamiento presión-velocidad de la familia SIMPLE [5]. Esto se realiza en el marco del Método de Volúmenes Finitos (FVM) en mallas colocadas. El algoritmo general se encuentra implementado en la plataforma libre y de código abierto OpenFOAM [4].

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden escribirse como:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \dot{\gamma}) + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}. \quad (2)$$

Aquí, \vec{u} y p representan la velocidad y la presión respectivamente, μ es la viscosidad dinámica, ρ es la densidad de la sustancia, $\dot{\gamma}$ es el tensor tasa de deformación y $\boldsymbol{\tau}$ es el tensor de esfuerzos de Reynolds. Para el computo de dicho tensor se adoptará el modelo de turbulencia $k - \epsilon$. Por medio de este tipo de modelado, dado el flujo inherentemente transitorio observado en las condiciones del presente problema, solo se resuelven las ecuaciones para el flujo medio modelando las escalas de la turbulencia.

Caso analizado

Se estudia una válvula esférica instalada en una tubería, cuyo diámetro nominal es 50.8 mm, que aguas arriba de la válvula se extiende por 457.2 mm (9 veces el diámetro) y aguas abajo de la misma la distancia corresponde a 304.8 mm (6 veces el diámetro) como se detalla en la Fig. 1. El diámetro de la cañería en donde se ubica la válvula es de 38 mm y el radio de la válvula esférica es de 33.3 mm. La transición del diámetro de 50.8 mm al de 38 mm se lleva a cabo a través de una contracción gradual y para el caso contrario existe una expansión gradual. Ambos tramos presentan una longitud de 72 mm y forman un semiángulo de 10.16° con el eje de la tubería.

El dispositivo mencionado se analiza en diferentes posiciones dadas por seis rotaciones del obturador: a 0° , 10° , 20° , 30° , 40° y 50° que corresponden a una apertura de 100%, 88.9%, 77.8%, 66.7%, 55.6% y 44.4% respectivamente. Para cada posición de la válvula se genera una geometría mediante Diseño Asistido por Computadora (CAD)

y se exportan en formato nativo del programa CAD al entorno de SimScale. Es de preferencia que se exporten de esta forma porque así SimScale reconoce menos cantidad de caras que si se exporta en formato genérico STEP. Al tener menor cantidad de caras en la geometría a mallas, SnappyHexMesh otorga una malla de mejor calidad donde los valores de volume ratio, non Orthogonality y skewness se encuentran en los recomendados por OpenFoam. A su vez, en cada posición se estudian las distribuciones de presión y velocidad para diferentes valores de velocidad de entrada que están dadas por los siguientes números de Reynolds: 1×10^5 , 3×10^5 , 5×10^5 , 7×10^5 y 1×10^6 . Para el análisis de la válvula esférica se trabaja en un régimen de flujo turbulento totalmente rugoso, donde los efectos viscosos que se presentan en el flujo, se deben principalmente a la rugosidad de la superficie y el aporte de la capa viscosa es despreciable. En estas condiciones, se ha verificado experimentalmente que la pérdida de carga es independiente del número de Reynolds.

Para este problema se emplearon esquemas de primer orden en el tiempo y *upwind* para la discretización del término advectivo. Como criterio de convergencia, se fijó un umbral de residuos para la presión de 1×10^{-5} y un máximo de 5000 iteraciones. En términos de costo computacional, una simulación típica requiere 5.35 horas-CPU. Estos fueron realizados en paralelo con 16 núcleos mediante el servicio de cálculo en la nube de Simscale.

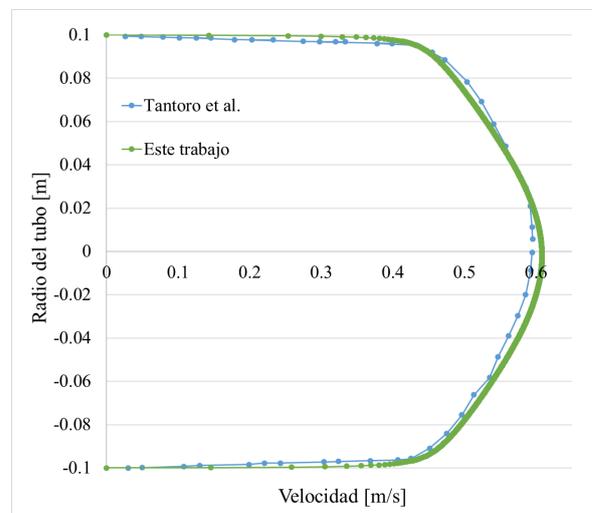


FIG. 2: Comparación entre perfiles de velocidad para el caso de una tubería con estricción axisimétrica.

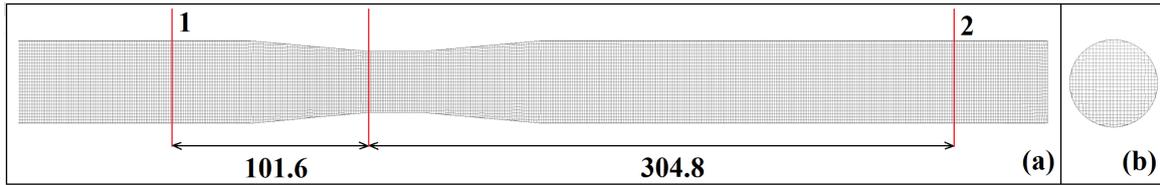


FIG. 3: Mallado de la válvula en posición $\phi = 0$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del modelo utilizado

Previo al estudio de la válvula esférica, se analizó un flujo Hagen-Poiseuille a través de una cañería de diámetro 10 cm. Como principal resultado se observó que, para un flujo laminar, se alcanza un buen acuerdo entre la solución analítica y la numérica cuando se emplea una resolución de 40 celdas en el diámetro. Posteriormente se estudió un flujo turbulento a través de una cañería que presenta una estrechadura axisimétrica con porcentajes de bloqueo que van de 0 a 95%. Los resultados que se obtuvieron fueron comparados con los reportados por Tantoro *et al.* [6], observando un buen acuerdo como se ilustra en la Fig. 2.

A raíz de estas simulaciones puede decirse que las condiciones de borde impuestas, las iteraciones realizadas y el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ son adecuados para utilizarlos en el estudio de la válvula esférica. Antes de analizar este dispositivo en profundidad se llevó a cabo un análisis de convergencia en malla, del cual se observó que una resolución de 30 celdas en el diámetro mayor y 1000 celdas en el largo de la cañería es suficiente para lograr que la solución sea independiente de la malla. Con esta disposición y cantidad de celdas se obtiene una malla uniforme compuesta por celdas cúbicas, sobre la cual se agregan refinamientos localizados en las regiones de las geometrías más complejas. La malla utilizada y la ubicación de los puntos en los que toman las presiones, que serán empleadas para obtener los resultados, se pueden observar en la Fig. 3.

Coefficiente de pérdida de carga

Se calcula el coeficiente de pérdida de carga K para cada situación mediante el cociente que se observa a continuación

$$K = \frac{\Delta P}{\rho V^2 / 2} \quad (3)$$

Donde ΔP es la caída de presión entre los puntos 1 y 2 marcados en la Fig. 3, ρ es la densidad del agua a 20°C ($\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$) y V es la velocidad de entrada calculada a partir del número de Reynolds. Observando la Tabla 1 se comprueba que para las distintas velocidades de entrada, los distintos números de Reynolds analizados, el coeficiente de pérdida de carga K se mantiene constante para una apertura determinada. Por este motivo se puede afirmar que K es independiente del número de Reynolds cuando se trata con un flujo turbulento totalmente rugoso.

Luego, como se muestra en la Fig. 4, se contrastan los resultados obtenidos tanto con valores experimentales como con los correspondientes a las simulaciones realizadas por otros autores [2, 3]. Puede observarse un buen acuerdo con los mismos y se destaca que la gráfica obtenida en

este trabajo se encuentra entre la curva experimental y las reportadas mediante simulación por los autores.

TABLA 1: Valores de K obtenidos con SimScale.

Ángulo[°]	Número de Re ($\times 10^5$)				
	1	3	5	7	10
0	0.260	0.198	0.176	0.163	0.150
10	1.738	1.745	1.749	1.753	1.758
20	3.737	3.683	3.692	3.662	3.716
30	9.743	9.733	9.743	9.756	9.842
40	20.059	20.072	20.090	20.098	20.136
50	42.050	42.112	42.156	42.234	42.271

Existen varias causas que podrían explicar las discrepancias entre experimento y simulación. Entre ellas se puede destacar que, dentro de los modelos de turbulencia, los modelos tipo RANS presentan limitaciones para replicar casos con desprendimiento de vórtices, como ocurre con los mayores ángulos de apertura. Asimismo, existen características del experimento que son omitidas por el modelado computacional como las pérdidas de carga localizadas provocadas por uniones entre la válvula y los tramos de cañería, las diferencias entre la rugosidad relativa del material y la estimación derivada de las leyes de pared, y los errores de apreciación en el ángulo de apertura reportado.

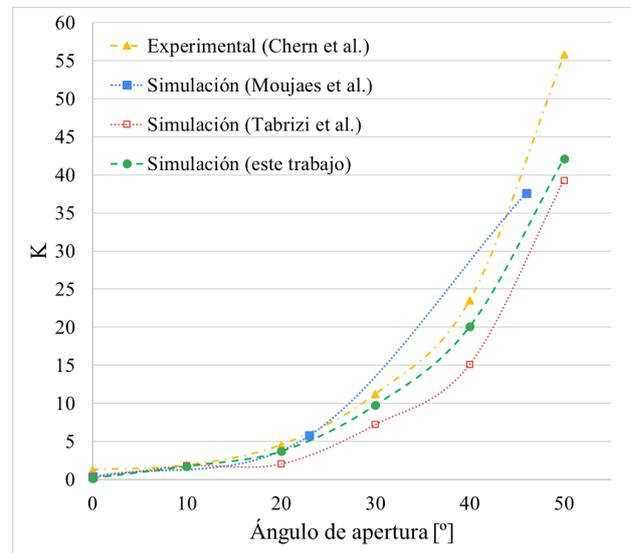


FIG. 4: Coeficiente de pérdida de carga para distintos grados de apertura de la válvula.

A una apertura total, las diferencias tienen una magnitud relativa importante, del 80%, ya que no existen grandes pérdidas de carga por lo que los valores de K son reducidos, del orden de 10^{-1} . Una pequeña desviación a la hora de obtener los datos del autor o la existencia de los primeros factores mencionados, contribuyen de gran manera a las diferencias entre los resultados para una apertura del 100%. Se tiene

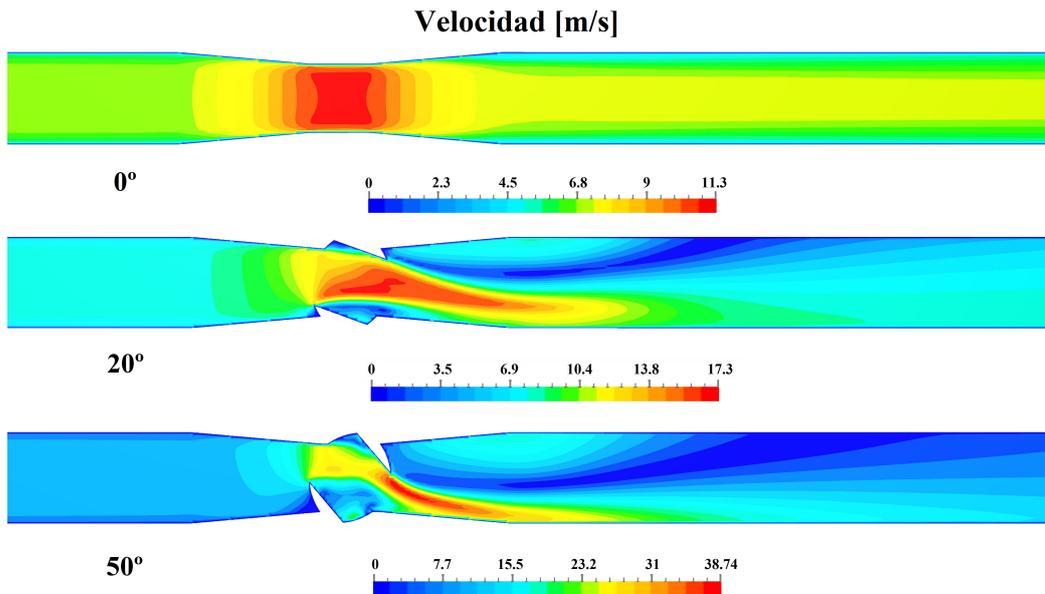


FIG. 5: Magnitud de velocidad para distintos grados de apertura en un corte normal al eje del obturador.

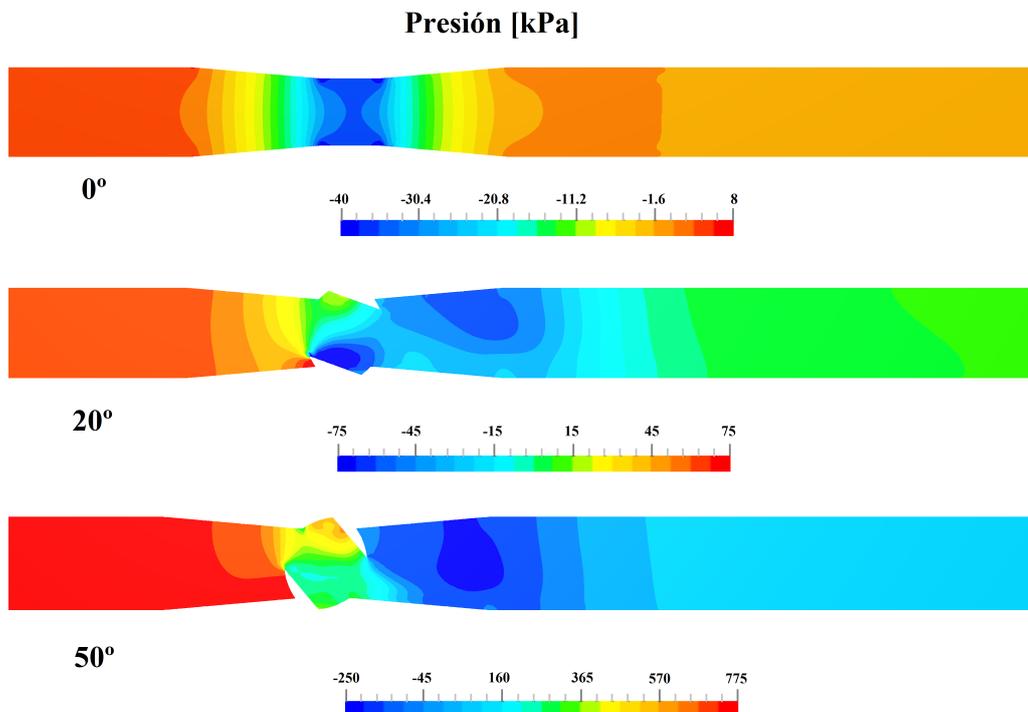


FIG. 6: Presión para distintos grados de apertura en un corte normal al eje del obturador.

una diferencia del 8% para un ángulo de 10°, del 19% para 20° rotados, del 13% para 30°, del 15% para 40° y por último del 24.5% para 50°. Puede decirse que, el aumento de las diferencias existentes entre los resultados experimentales y las simulaciones cuando la válvula se gira un ángulo mayor, puede atribuirse a la falta de exactitud al representar el fenómeno real con el modelo de turbulencia. En las Figs. 5 y 6 se observan las distribuciones de la magnitud de velocidad y presión respectivamente, para distintos grados de apertura de la válvula. Aquí se puede apreciar una estructura asimétrica de desprendimiento de vórtices para mayores grados de cierre del obturador generando una caída de presión localizada consistente con lo resultados presentes en la

literatura [1, 3].

Contraste entre estricción y válvula esférica

En la Fig. 7 puede observarse la distribución de velocidades cuando circula agua en régimen turbulento a través de una cañería que presenta una estricción axisimétrica. En la imagen se puede distinguir un aumento de velocidad en el sector donde se encoge el diámetro y una disminución de la misma al desbloquearse el flujo, es decir, cuando la tubería recupera el diámetro inicial. En este caso la estructura del flujo tiene una simetría axial tal como la que posee la estricción que se utiliza, lo cual permitiría optimizar la simulación a una geometría más sencilla bidimensional, con

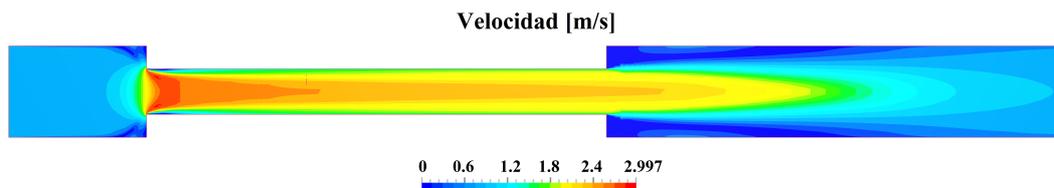


FIG. 7: Estricción axisimétrica. 50% de bloqueo.

celdas tipo “wedge” o “cuña” e imponiendo condiciones de simetría en la dirección azimutal. Por otro lado, como puede observarse en la Fig. 5, para el caso de la válvula esférica, cuando el obturador se rota el área de paso efectiva es menor que el área de la tubería y la velocidad aumentará a la salida del dispositivo. Aquí puede destacarse cómo el flujo cambia su estructura luego de atravesar la válvula. Aguas arriba de la misma es simétrico pero como la abertura de la válvula no se encuentra centrada en el eje de la cañería, sino que se encuentra en la parte inferior de ella (por la disposición que se muestra en las Figs. 5 y 6), se pierde la simetría. Se puede ver con claridad cómo el fluido se adhiere a la pared inferior de la tubería como consecuencia de la posición y tamaño de la abertura de la válvula. En este caso al perderse la simetría se imposibilita simplificar el problema.

IV. CONCLUSIONES

Se analizó un flujo a través de una válvula esférica y se contrastaron los resultados obtenidos mediante CFD con los de otros trabajos, tanto de simulaciones como análisis experimentales. Se ha obtenido un buen acuerdo con los mismos teniendo una cota máxima de 24.5% de diferencia para una rotación del obturador a un ángulo de 50°. Al lograr esta precisión compatible con los experimentos, puede utilizarse SimScale como una herramienta mediante la cual se pueden estudiar válvulas industriales.

REFERENCIAS

- [1] M.-J. Chern, C.-C. Wang y C.-H. Ma. Performance test and flow visualization of ball valve. *Experimental thermal and fluid science* **31**, 505-512 (2007).
- [2] S. F. Moujaes y R. Jagan. 3D CFD predictions and experimental comparisons of pressure drop in a ball valve at different partial openings in turbulent flow. *Journal of Energy Engineering* **134**, 24-28 (2008).
- [3] A. Tabrizi, M. Asadi, G. Xie, G. Lorenzini y C. Biserni. Computational fluid-dynamics-based analysis of a ball valve performance in the presence of cavitation. *Journal of engineering thermophysics* **23**, 27-38 (2014).
- [4] H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak y C. Fureby. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics* **12**, 620-631 (1998).
- [5] S. V. Patankar y D. B. Spalding. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **15**, 1787-1806 (1972).
- [6] B. Tantaró, Y. Wah y R. Yuen. Pressure Drop of Partially Blocked Hagen-Poiseuille Flow using CFD Simulation. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* **17**, 7552-7561 (2020).