

Evaluación con técnicas CFD de un Flujómetro de Cuña

Alcides J. León Méndez

E-MAIL: aleonm@civil.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE

Johan Chirino Montano

E-MAIL: johan@ecmmariel.cu

Dirección Técnica de Ingeniería, Empresa de Construcción y Montaje (ECM), Zona Especial de Desarrollo Mariel, Artemisa, Cuba

RESUMEN

El trabajo enfoca la modelación con técnicas de la Mecánica de los Fluidos Computacional del flujómetro de cuña normado por la ISO 5167-6 del 2022. Los buenos resultados obtenidos en la calibración, con valores por debajo del 2,7% para la relación entre la diferencia de presión y el caudal y de menos del 1,9% para las pérdidas de carga permanentes en el conducto, permiten tener un modelo patrón, en cuanto a geometría, mallado y configuración de las condiciones de borde del modelo que permitirán acometer nuevas alternativas de diseño de este y de otros flujómetros para conductos forzados, con principios semejantes al del elemento evaluado. La modelación de las nuevas alternativas en el diseño del flujómetro ha permitido resolver el gran problema del flujómetro original, que son las altas pérdidas de carga permanentes que se producen en la conducción. Los nuevos diseños de cuñas asimétricas han permitido reducir las pérdidas en más de un 80% respecto a la cuña original.

PALABRAS CLAVES:

CFD, flujómetros, flujómetro de cuña, mecánica de los fluidos.

Evaluation with CFD techniques of a Wedge Flowmeter

ABSTRACT

The work focusses the modelling with Computational Fluid Mechanics techniques of the wedge flowmeter standardized by ISO 5167-6 of 2022. The good results obtained in the calibration, with values below 2,7% for the relationship between the pressure difference and the flow rate and less than 1,9% for the permanent pressure losses in the duct, allow for a standard model, in terms of geometry, meshing and configuration of the model's boundary conditions that will allow new design alternatives to be undertaken for this and other flowmeters for forced ducts, with principles similar to those of the evaluated element. The modelling of the new alternatives in the design of the flowmeter has made it possible to solve the major problem of the original flowmeter, which is the high permanent pressure losses that occur in the duct. The new asymmetric wedge designs have made it possible to reduce losses by more than 80% compared to the original wedge.

KEYWORDS: CFD, flowmeters, wedge flowmeter, Fluids Mechanics

01 INTRODUCCIÓN

La correcta medición de caudales tanto en conductos a presión como en conducciones libres, tiene un alto impacto económico y medioambiental. La diversidad de soluciones existentes permite una adecuada selección de la alternativa a emplear, siempre que se disponga de toda la información necesaria. En algunos casos la información proveniente del productor del flujómetro no es suficiente para realizar una adecuada comparación entre posibles opciones y en esos casos hay que recurrir a un estudio detallado a nivel de laboratorio, o empleando la modelación hidrodinámica.

En los últimos años la fortaleza de los programas para computadoras basados en la Dinámica de los Fluidos Computacional (DFC), conocida por sus siglas en inglés como CFD (Computational Fluids Dynamics), permite realizar estudios detallados del comportamiento de los flujómetros aportando mucha información valiosa acerca de su comportamiento.

Para el desarrollo de este trabajo se ha elegido estudiar el flujómetro de cuña por ser el flujómetro del tipo deprimógeno (caudal como función del diferencial de presión) más reciente normado por la Organización Internacional de Patrones (International Organization of Standardization, ISO).

La cuña además de ser un flujómetro muy robusto, es de fácil construcción y operación, tiene como desventaja los muy altos valores de pérdida de carga permanentes que introduce en la conducción, solo comparables a los de la Placa Orificio (Orifice Meter).

Los resultados obtenidos en la calibración del modelo DFC empleado para el estudio, arrojaron resultados altamente satisfactorios, lográndose valores de la diferencia de presión que provocan diferentes caudales con diferencias de menos del 2,7% respecto a lo normado por la ISO correspondiente y menos del 1,9% para las pérdidas permanentes que se introducen en la conducción respecto a las pérdidas normadas en la ISO. Esto permitió realizar un análisis del diseño de la cuña lográndose, a nivel de modelo DFC, obtener valores de pérdidas permanentes muy bajos en comparación con el modelo original.

Por otra parte, las características de geometría, mallado y configuración de las condiciones de borde del modelo permiten emplear esta configuración en futuros trabajos conducentes al estudio de flujómetros semejantes y obtener de los mismos resultados con alta credibilidad y un alto valor práctico.

02 DESARROLLO

ESTRUCTURA DEL MODELO

El flujómetro de cuña, al igual que todos los deprimógenos, permite medir el caudal midiendo la diferencia de presión que este genera al pasar por la restricción que crea el elemento en la sección de la tubería (Figura 1). La norma ISO 5167-6 del año 2022 (ISO,2022), norma en su segunda edición las características hidráulicas y constructivas de este flujómetro.

Para enfrentar el modelo DFC del flujómetro de cuña se empleó el programa ANSYS. Este programa es el software líder de simulación para análisis y simulación por elementos finitos de problemas relacionados a la Mecánica de los Fluidos.

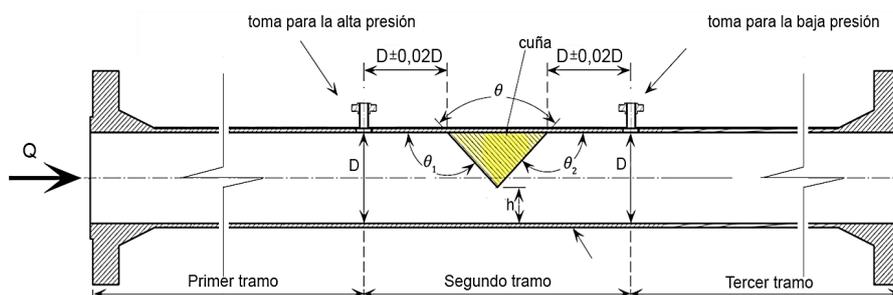


Figura 1. Perfil de la tubería con el flujómetro.

ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: preprocesador (creación de geometría y mallado), procesador y posprocesador. Tanto el preprocesador como el posprocesador están provistos de una interfaz gráfica.

De gran importancia en la modelación con ANSYS, o con cualquier plataforma que modele DFC, es el dimensionamiento del modelo y su mallado. La geometría del objeto que se desee analizar y su mallado en particular, puede generar errores en la solución debido a que si no se mantienen ciertos parámetros como son, en este caso de estudio, las longitudes de los tramos del modelo respecto a su diámetro, la densidad global de la malla y su refinamiento en zonas de interés particular, la forma de suministrar el caudal a modelar y otros más específicos, los resultados obtenidos se alejan mucho de los datos empleados como referencia para la calibración e incluso puede fallar a tal punto que afecte la convergencia del modelo.

ANSYS provee al usuario de parámetros para analizar la calidad del mallado de forma general, lo cual es muy importante en la fase de construcción del mismo y además mucha flexibilidad para la construcción geométrica del modelo y alternativas múltiples para crear las condiciones de borde e iniciales, pero solo la calibración de cada modelo en particular a partir de una base de datos confiable y segura arrojará los resultados finales en cuanto a las posibilidades del modelo calibrado de reproducir fielmente el proceso que se modela.

GEOMETRÍA

A partir de los estudios realizados anteriormente por los autores [2, 3] y de nuevos ensayos de prueba y error se logró obtener un diseño geométrico y un mallado, tanto global como refinado que, junto a la configuración de las condiciones de borde del modelo, que lograron disminuir los errores de calibración respecto a los obtenidos anteriormente.

Para el modelo se empleó una geometría de tubería circular de 300 milímetros de diámetro interno (D), de interior rugoso con una altura media de rugosidad de 0,15 mm, correspondiente a una tubería de hierro fundido nuevo con bridas o hierro galvanizado e incluso a tubos de fundición de buena calidad. La relación altura-diámetro (h/D) empleadas fueron la máxima y la mínima normada por la ISO y una media ($h/D = 0,6; 0,4; 0,2$) que representan coeficientes de contracción (β) con valores de 0,7916; 0,6113 y 0,3775 respectivamente. Estas tres contracciones cubren el intervalo de posibilidades de la cuña y su calibración garantiza que los resultados sean confiables.

La longitud total del modelo se subdividió en tres partes (Figura 1): un tramo de entrada, un tramo que contiene el flujómetro y un tramo para la descarga del caudal. La longitud del primer tramo fue de 10,00 metros ($\geq 30 \cdot$ diámetro interno del ducto) y la misma tiene una dependencia directa con la estrategia que se emplee para suministrar el caudal al modelo. ANSYS permite configurar este dato de entrada de muy diversas formas. En este trabajo se optó por un patrón de distribución de la

velocidad (León et al. 2023), que se obtuvo de pruebas adicionales, tal como se detallará en la subsección dedicada a la configuración de las condiciones de contorno e iniciales.

La longitud del segundo tramo se realiza acorde a lo normado para la geometría de este flujómetro por la norma ISO correspondiente (Chirino,2023) y abarca desde la toma de presión aguas arriba de la cuña hasta la toma de presión aguas debajo de ella. La longitud del tercer tramo se determinó en 12,00 metros ($\geq 40 \cdot \text{diámetro interno del ducto}$) a partir de la experiencia anterior acumulada y del resultado de los análisis de la estabilidad del patrón de velocidades hasta la descarga libre aguas abajo. Esta longitud es muy importante también ya que garantiza que la medición en el punto donde la rasante piezométrica se restituye (punto de medición, aguas abajo, de las pérdidas permanentes) y por tanto, no está influenciada por la perturbación creada por el flujómetro.

MALLADO

Por su parte la malla fue estudiado con varias opciones de mallado global y de refinación del mismo hasta lograr errores de calibración satisfactorios. La información del mallado global que se empleó en los tres tramos, así como la información de la las capas de inflación y los detalles de las esferas de influencia que se emplearon para refinar el mallado alrededor de los puntos de tomas de presión, la zona de la cuña y la zona donde se restituye la rasante piezométrica aparecen en la tabla 1 y en las figuras 2 y 3 se destacan algunas vistas de detalle. En términos medios, el mallado estuvo constituido por 1E07 nodos y 3,6E07 elementos.

Tabla 1. Detalles más relevantes del mallado.

Malla global		Inflación	
Tamaño mínimo=	0,01 m	Capas=	20
Tamaño máximo de la cara=	0,01 m	Altura de la primera capa=	0,00015m
Tamaño máximo=	0,01 m	Razón de crecimiento=	1,41
Ángulo normal de curvatura=	5°		
Esferas de influencia			
Radio de las esferas=	0,30 m	Tamaño de los elementos=	0,0025 m

En la figura 2 se detalla la posición de los ejes coordenados auxiliares definidos para ubicar las esferas de influencia que refinarán en mallado en puntos de importancia para el resultado. Debajo, en la misma figura, aparecen ubicadas las esferas de influencia, destacándose en importante solape obtenido entre las esferas ubicadas en los puntos de toma de presión aguas arriba y aguas debajo de la cuña y la ubicada en el vértice de la misma.

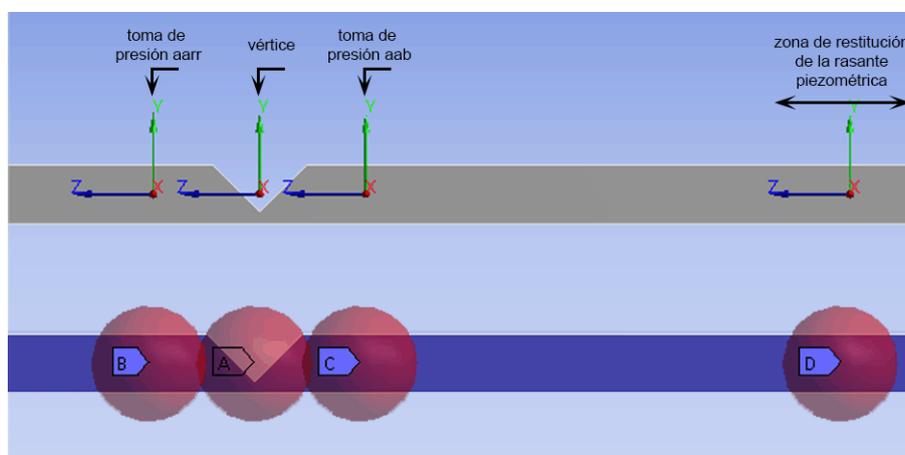


Figura 2. Detalles de las esferas de influencia.

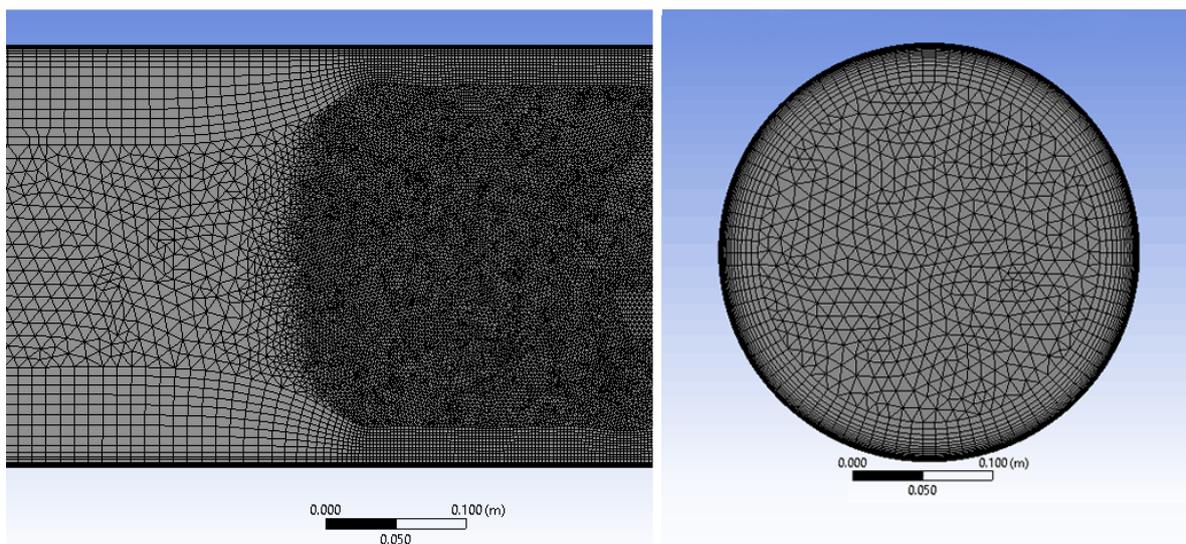


Figura 3. Detalles del mallado global, la frontera entre el global y la refinación y la inflación.

Parte importante es esta etapa del diseño es el análisis de la calidad del mallado. Para esto ANSYS tiene un grupo de parámetros que permiten conocer este importante factor. La tabla 2 muestra los parámetros que ANSYS CFX tiene para evaluar la calidad del mallado. De la tabla se infiere que la calidad de la malla empleada para la evaluación de este flujómetro cumple con altos índices los valores exigidos por ANSYS.

Tabla 2. Calidad del mallado.

Indicador	Intervalo	Modelo
Calidad de elementos (Element Quality)	1 óptimo 0 pésimo	Media= 0,791 Desv. Típica= 0,226
Relación de aspecto (Aspect Ratio)	1 óptimo Mientras sea > 1 es peor Menor que 100 es aceptable	Media= 3,4776 Desv. Típica= 7,3759
Relación Jacobiana (Jacobian Ratio)	1 óptimo Buena calidad entre 1 y 10	Media= 1,0085 Desv. Típica= 2,0808E-02
Asimetría (Skewness)	0 equilátero Mayor que 0 a 0,25 excelente Mayor que 0,25 a 0,5 bueno	Media= 0,19038 Desv. Típica= 0,12091
Calidad ortogonal (Orthogonal Quality)	0,95 a 1 excelente 0,70 a 0,95 muy bueno	Media= 0,89777 Desv. Típica= 8,6686E-02
Desviación paralela (Pararell deviation)	0 ideal 70 aceptable	Media= 3,4881 Desv. Típica= 5,539

CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno culminan la etapa de construcción del modelo y definen parámetros que tienen un papel protagónico en la obtención de los resultados. Una estrategia igual a la descrita en anterior publicación de los autores (León et al. 2023), se empleó para las condiciones de entrada un patrón de velocidades estable obtenido previamente en tubería de idénticas características para la misma velocidad de entrada. Para el modo de turbulencia a emplear los resultados obtenidos por Chirino (Chirino,2023), el sitio web DFC Online (<https://www.cfd-online.com/Tools/turbulence.php>) y del Langley Research Center (Rumsey,2024), brindaron la información necesaria para la selección de los valores iniciales del valor de la energía cinética turbulenta (k) y de la razón específica de

disipación de la energía cinética de la turbulencia a energía térmica interna (ω). En la mecánica de fluidos computacional, el modelo de turbulencia k -omega (k - ω) es un modelo de turbulencia de dos ecuaciones, utilizado como cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds. El modelo predice las características de la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales parciales de dos variables: k y ω .

La ejecución de cada modelo se prolongó hasta que la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de los residuos (Root Mean Square, RMS) fueran menor que una millonésima ($1E-06$), o el comportamiento respecto al tiempo mostrará un comportamiento estable respecto al eje de las iteraciones, o lo que es igual, respecto al tiempo de ejecución de la corrida.

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Para la obtención de los resultados se empleó una PC con una placa base B365M DS3H, memoria GPU compartida 3,9 Gb; procesador Core I5 de 9^{na} generación, 6 núcleos y 24 Gb de memoria RAM de 2666 MHz. La calibración se realizó por comparación contra la ecuación brindada por la ISO 5167-6 (ISO,2022) que relaciona el caudal con la diferencia de presión entre las tomas de presión definidas aguas arriba y aguas abajo de la cuña y la ecuación que relaciona la pérdida permanente de carga con el caudal.

CARACTERÍSTICAS DEL MODELO EMPLEADO

Las velocidades medias, empleadas para comprobar la fidelidad del modelo al reproducir la variación de los valores de la rasante piezométrica, para cada uno de los valores de la altura de la garganta del flujómetro (h), fueron 0,25 m/s; 0,50 m/s; 1,25 m/s y 2,00 m/s respectivamente. Los cuatro valores anteriores abarcan el intervalo de velocidades más común para la conducción de agua. La comprobación de estos valores de velocidad para el patrón de velocidades a la entrada y en la sección de medición de la presión aguas arriba de la cuña, se realizó empleando el método aritmético normado por la British Standard (BS,2008) tomando la máxima cantidad de puntos normado por radio (5 por radio). Los resultados para los cuatro caudales y las tres alturas de la cuña (h) aparecen en la tabla 3.

Tabla 3. Velocidad media de los patrones de velocidad

h (mm)	Velocidad (m/s)	Sección entrada		Sección de medición de p1	
		v_{media} (m/s)	Diferencia (%)	v_{media} (m/s)	Diferencia (%)
60	2,00	1,998	0,100	1,993	0,350
	1,25	1,251	-0,080	1,249	0,080
	0,50	0,499	0,200	0,497	0,600
	0,25	0,249	0,400	0,251	-0,400
120	2,00	2,038	1,866	2,018	0,914
	1,25	1,275	1,967	1,261	0,904
	0,50	0,511	2,153	0,505	1,012
	0,25	0,256	2,226	0,253	1,173
180	2,00	2,035	1,741	2,018	0,909
	1,25	1,266	1,294	1,261	0,900
	0,50	0,510	1,999	0,505	1,007
	0,25	0,255	2,099	0,253	1,181

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Los resultados obtenidos en la calibración tomando como base los resultados brindados por la ISO 5167-6 del 2022 (ISO,2022) aparecen en la tabla 4 y graficados en la figura 4.

Tabla 4. Resultados de la calibración

h (mm)	v (m/s)	Dp (Pa)			hf (Pa)		
		ISO	Modelo	error (%)	ISO	Modelo	error
60	0,250	2,784E+03	2,723E+03	2,20	2,205E+03	2,242E+03	1,70
	0,500	1,114E+04	1,087E+04	2,36	8,818E+03	8,952E+03	1,52
	1,250	6,960E+04	6,805E+04	2,23	5,511E+04	5,603E+04	1,67
	2,000	1,782E+05	1,744E+05	2,11	1,411E+05	1,434E+05	1,63
120	0,250	3,766E+02	3,710E+02	1,49	2,286E+02	2,290E+02	0,17
	0,500	1,506E+03	1,481E+03	1,69	9,145E+02	9,140E+02	0,05
	1,250	9,415E+03	9,382E+03	0,35	5,716E+03	5,701E+03	0,25
	2,000	2,410E+04	2,377E+04	1,38	1,463E+04	1,458E+04	0,33
180	0,250	9,899E+01	1,010E+02	2,03	4,600E+01	4,600E+01	0,01
	0,500	3,960E+02	4,050E+02	2,28	1,840E+02	1,810E+02	1,62
	1,250	2,475E+03	2,541E+03	2,67	1,150E+03	1,131E+03	1,64
	2,000	6,336E+03	6,502E+03	2,63	2,944E+03	2,888E+03	1,89

Los resultados menores del 2,7% para la relación entre el caudal y la diferencia de presión entre los puntos normados por la ISO 5167-6 del 2022 para este flujómetro y menores que 1,9% para los valores de las pérdidas de carga permanentes que introduce el flujómetro, permiten asegurar que el modelo está en capacidad de brindar nuevos análisis acerca de las características de este flujómetro empleando el DFC como herramienta de trabajo. Además, permite analizar posibles cambios en el diseño de este flujómetro, así como estudiar nuevos diseños con principios semejantes para la medición del caudal.

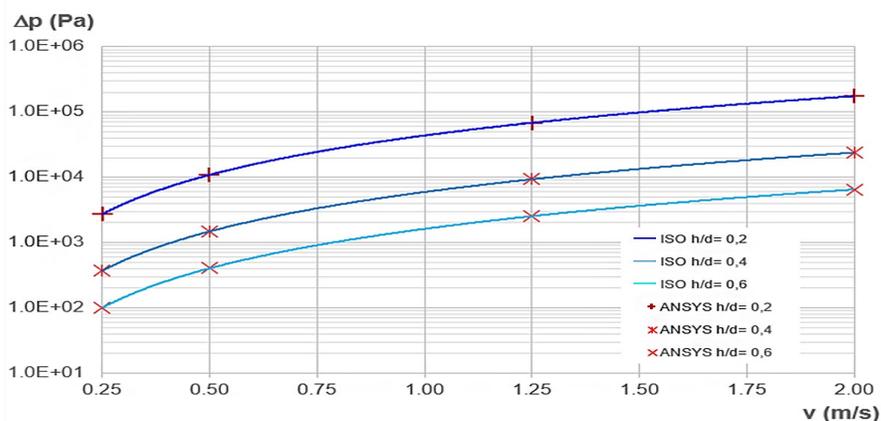


Figura 4. Resultados gráficos de los valores dados por la ISO 5167-6 y por el modelo

RESULTADOS INICIALES DEL MODELO CALIBRADO

Muchas son las respuestas que pueden obtenerse del modelo DFC de este flujómetro, e incluso nuevas versiones de diseño tratando de eliminar problemas que la cuña asimétrica produce.

Los cambios en la velocidad, la presión, la energía cinética turbulenta, la disipación de los remolinos turbulentos y la razón de cambios de los remolinos viscosos pueden analizarse mediante los modelos DFC calibrado. Las imágenes resultantes transmiten una idea muy completa del comportamiento hidrodinámico del modelo analizado.

La figura 5 muestra dos casos extremos estudiados. En un caso un modelo con alta velocidad y máxima penetración y el otro un modelo con mínima velocidad con mínima penetración. Para ambos se muestra los contornos de la distribución de la velocidad (v), la presión (p) y la distribución de la

energía cinética turbulenta (tke) son tres respuestas del modelo que informan sobre las zonas de interés para la disipación de la energía. Otras salidas del modelo que pueden obtenerse para completar la información son la disipación de los remolinos turbulentos (ted) y la frecuencia de los remolinos turbulenta (tef).

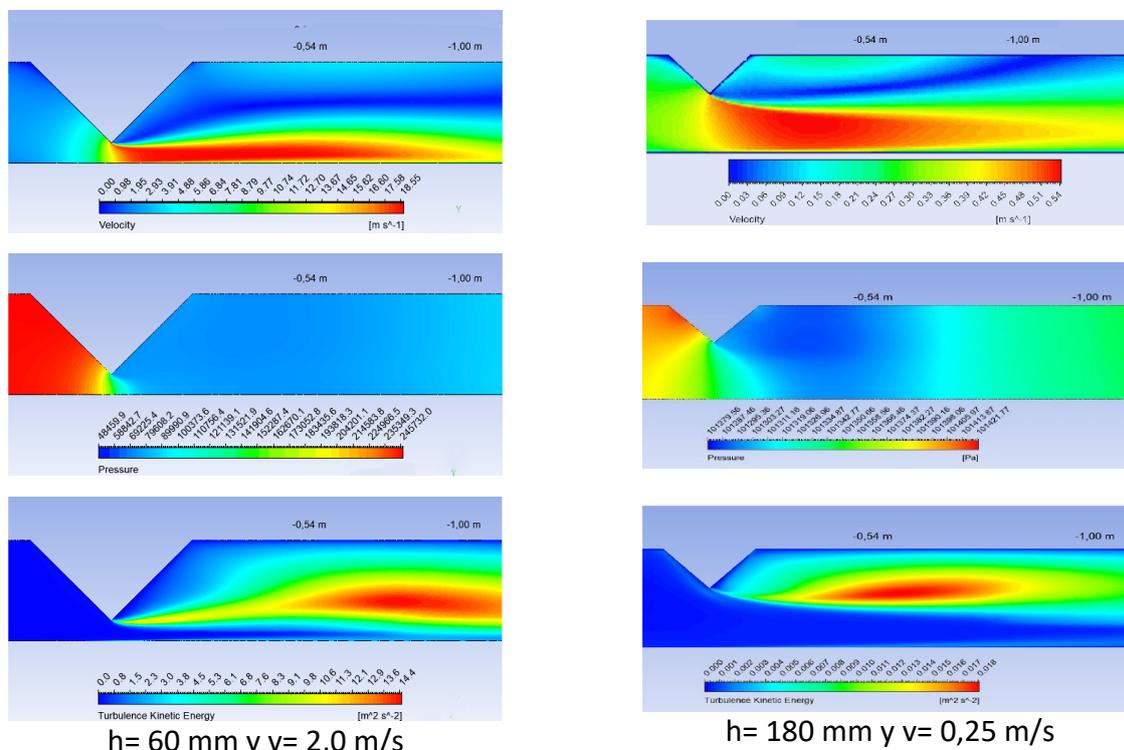


Figura 5. Algunos contornos de los resultados de la calibración

Esta información afirma lo que inicialmente puede pensarse sobre un elemento con un diseño geométrico como el de la cuña. Tanto la penetración del conducto por un solo lado como los ángulos de entrada y salida provocan una fuerte asimetría del chorro y una fuerte proyección del mismo hacia aguas abajo, contribuyendo al valor de las pérdidas permanentes en el conducto.

Nótese en la gráfica de velocidad la fuerte contracción del chorro para la menor abertura, junto a la tendencia de las altas velocidades a permanecer por un largo tramo cerca de la invertida del conducto. También es de notar la rápida restitución de la rasante piezométrica de la cuña que tiene la mayor abertura respecto a la de menor. Y por último la amplia zona de remolinos turbulentos a medida que la abertura se hace más pequeña.

RESULTADOS SOBRE LAS PÉRDIDAS PERMANENTES

Para la medición de las pérdidas permanentes, que introduce el flujómetro en el conducto, se empleó una técnica de análisis muy detallada. Esta consistió en medir la presión en 500 puntos, equidistantes entre sí, a lo largo del eje de simetría del conducto a partir del punto de medición de la presión aguas abajo (Figura 1). Esta información graficada y tabulada permitió obtener con gran exactitud el punto en que la rasante piezométrica generada por la obstrucción creada por el flujómetro, comienza a comportarse, de nuevo, como función de las características del conducto, o lo que es igual, deja de estar influenciada por la obstrucción. La figura 6 muestra un ejemplo de esto.

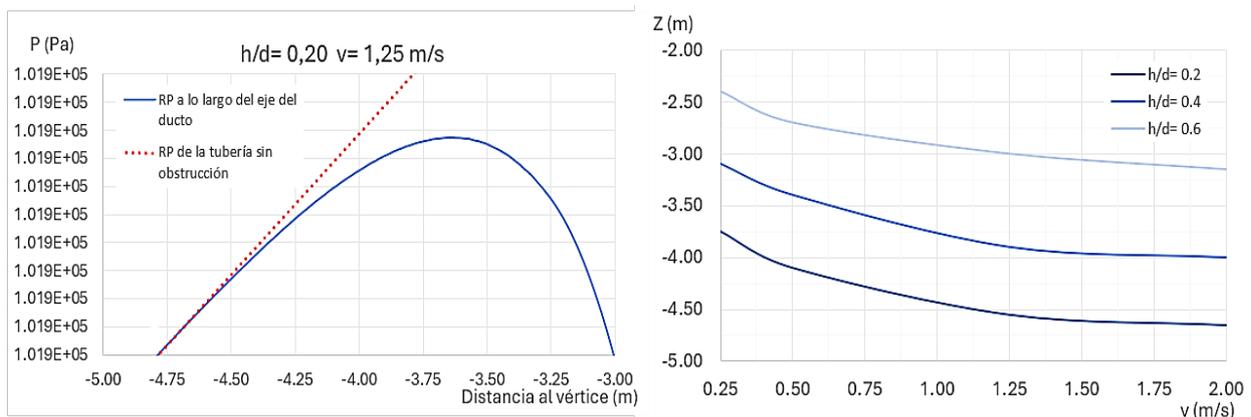


Figura 6. Movimiento de la rasante piezométrica aguas abajo de la obstrucción

En la figura 6 a la izquierda, aparece un detalle del comportamiento de la rasante piezométrica aguas abajo de la obstrucción creada por la cuña para un caso específico. Los valores de Z negativos son convencionales ya que para el modelo DFC se colocó el vértice de la cuña en la coordenada Z igual a cero ($Z= 0,00$); correspondiendo los valores positivos de Z al tramo de conducto aguas arriba de la cuña y viceversa. La figura 6, a la derecha, muestra un comportamiento no referenciado en la ISO 5167-6. En la imagen cada curva representa la distancia al eje en que la rasante piezométrica deja de estar influenciada por el elemento empleado como deprimógeno para la medición del caudal. El conocimiento de esta distancia es importante, ya que permite al proyectista de una instalación que emplee este flujómetro poder decidir a qué distancia colocar otro accesorio aguas abajo sin que el comportamiento hidrodinámico esté influenciado por el elemento empleado para la medición del caudal, en este caso la cuña.

No obstante, el comportamiento anterior, el patrón de velocidades aguas abajo sigue estando influenciado por la obstrucción asimétrica que provoca la cuña en la tubería. Un estudio detallado del comportamiento del patrón de velocidades aguas abajo de la cuña, acompañado del cálculo de la velocidad media de cada patrón indican lo siguiente:

- La característica del diseño de este flujómetro, donde la contracción del chorro se produce mucho más cerca de la invertida que de la corona interna del ducto, genera un chorro de alta velocidad muy cerca de la invertida, con concentración de remolinos de bajas velocidades en la dirección contraria. La figura 7 muestra, para dos casos extremos, la configuración de los vectores velocidad donde se observa las altas velocidades y los remolinos de baja velocidad producido por la obstrucción.

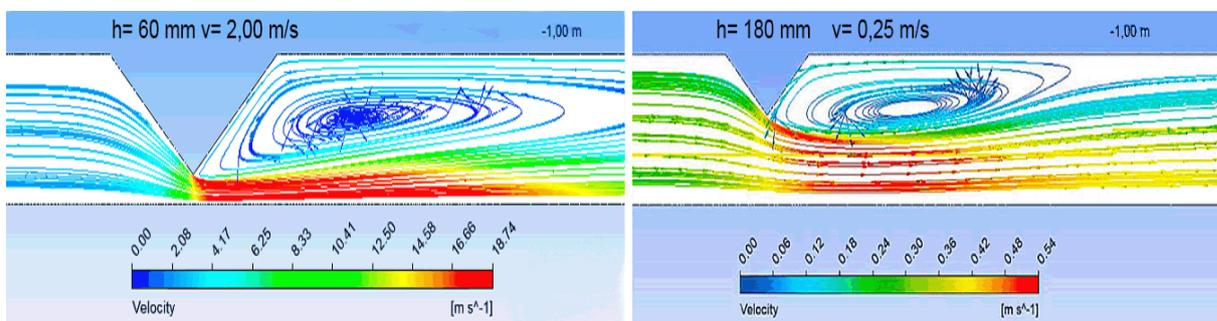


Figura 7. Vectores velocidad para los dos casos extremos del presente estudio

- El diseño de este flujómetro provoca que el patrón de distribución de velocidades tenga que avanzar un largo tramo, figura 8, hasta lograr su estabilización completa. Aunque la figura

solo recoge los casos extremos del estudio, en los doce escenarios modelados se pudo constatar que la velocidad media del patrón de entrada se restablecía en las secciones en que la rasante piezométrica dejaba de estar influenciada por la cuña. Y además, que la forma asimétrica del patrón viajaba mucho más hacia aguas abajo, influenciando secciones hasta diez metros aguas abajo del vértice de la cuña.

- El ángulo del tramo convergente y del tramo divergente de la cuña (ambos con 45° respecto a la horizontal) tiene una gran influencia en el alto valor de las pérdidas permanentes que introduce en el conducto, comparada con otros flujómetros deprimógenos. En la hidrodinámica está muy bien estudiado la influencia del diseño del tramo de salida de un conducto, libre o forzado, que su sección transversal haya tenido un estrechamiento y ángulos tan fuertes como el de la cuña no son los más aconsejables si se quieren minimizar las pérdidas permanentes (Idel'cik, 1969). La figura 9 muestra un ejemplo de las pérdidas permanentes que introducen varios deprimógenos para una misma razón de contracción ($\beta = \text{área reducida} / \text{área de la sección}$), el mismo diámetro de conducto y las cuatro velocidades medias empleadas en el estudio. Estas altas pérdidas permanentes que introduce la cuña solo son superadas por la Placa Orificio.

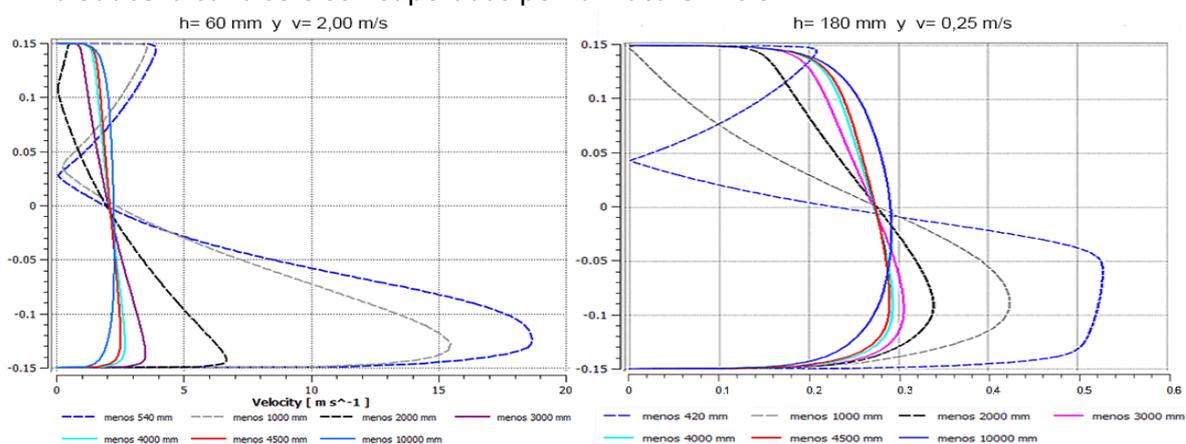


Figura 8. Comportamiento del patrón de velocidades para los dos casos extremos del presente estudio

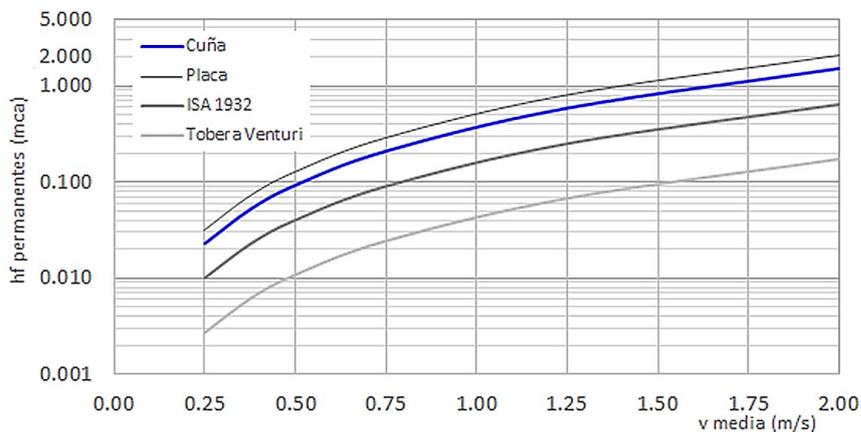


Figura 9. Pérdidas de carga permanentes de varios deprimógenos

A partir de tener calibrado el modelo y ratificar que el principal problema en este deprimógeno radica en las altas pérdidas de carga que introduce de forma permanente en el conducto se aborda

a continuación, la influencia que pueden tener dos elementos del diseño geométrico: los ángulos de entrada y salida y la asimetría del elemento respecto al eje de simetría del conducto.

UN NUEVO DISEÑO DE CUÑA

A partir de los resultados obtenidos anteriormente y con el objetivo de minimizar las pérdidas permanentes introducidas por la cuña se analizarán dos diseños nuevos: la cuña con diferentes ángulos de entrada y salida (SCuña) y una cuña doble, o lo que es igual, simétrica respecto al eje de simetría del conducto (DCuña) y también con diferentes ángulos de entrada y salida.

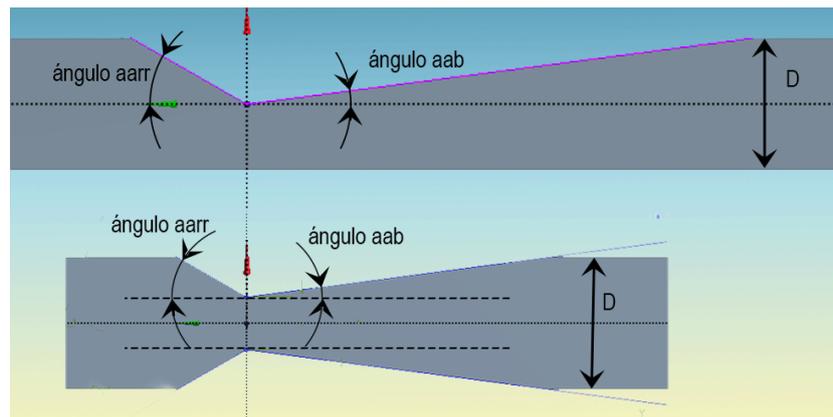


Figura 10. La SCuña y la DCuña para un mismo D y una misma contracción (8)

DISEÑOS GEOMÉTRICOS Y RESULTADOS DE LA SCUÑA Y LA DCUÑA

Los resultados obtenidos no abarcan todas las interrogantes que pueden presentarse en un nuevo diseño, pero, tal como se demuestra a continuación, dejan un camino abierto para futuros estudios.

Resultados de la SCUña

Para el primer diseño (SCuña) se analizarán las combinaciones de 45° en la entrada con 30°, 15° y 7,5° a la salida y posteriormente las mismas combinaciones a la salida con 30° a la entrada. Se mantuvo el diámetro interior de 300 mm y se modelarán para la cuna original y para el nuevo diseño las soluciones para una penetración de 150 mm ($h = 150$ mm) para velocidades desde 0,25 m/s hasta 2,0 m/s. La tabla 5 recoge los primeros resultados de los modelos.

Tabla 5. Reducción de h_f del modelo respecto a las h_f de la cuña original

v (m/s)	45° aarr			30° aarr			
	30° aab	15° aab	7,5° aab	45° aab	30° aab	15° aab	7,5° aab
0,250	0,92	0,72	0,31	0,75	0,74	0,41	0,18
0,375	0,92	0,71	0,31	0,75	0,74	0,41	0,18
0,500	0,92	0,71	0,31	0,75	0,74	0,40	0,18
0,750	0,92	0,71	0,30	0,74	0,73	0,40	0,18
1,250	0,91	0,70	0,30	0,74	0,73	0,39	0,18
2,000	0,91	0,70	0,30	0,74	0,72	0,39	0,18
Promedio=	0,92	0,71	0,31	0,74	0,73	0,40	0,18
Desv. típica=	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00

La tabla 5 muestra un grupo de resultados que son de gran valor práctico:

- 1º. El ángulo de salida de la SCUña tiene un gran peso en la disminución de las pérdidas de carga, obteniéndose reducciones en todos los casos y muy fuertemente para el ángulo de 7,5°.

- 2º. El ángulo de entrada tiene también un marcado efecto en el valor de las pérdidas, lo cual se evidencia en todos los casos, llegando a reducirse un 18% con la combinación 30º/7,5º.
- 3º. De interés es destacar que las combinaciones 30º/45º y 30º/30º no arrojaron diferencias significativas.

Si algo puede complicar el empleo de los ángulos estudiados es la longitud que toma el deprimógeno, sin contar las distancias aguas arriba y aguas abajo de las tomas de presión. Para el caso estudiado la longitud que abarca la cuña respecto a la cuña original (45º con 45º) va desde 1,37 veces para la combinación de 45º con 30º; hasta 4,66 veces para la combinación 30º con 7,5º.

Resultados de la DCuña

En busca de minimizar tanto las pérdidas permanentes como la longitud del elemento deprimógeno se ensayó una doble cuña simétrica al eje de simetría del conducto. Los resultados, solo para la mejor combinación obtenida para la SCuña, dan los valores que aparecen en la tabla 6.

Tabla 6. Reducción de hf y la longitud de las nuevas soluciones

v (m/s)	30º con 7,5º		L nueva solución/L original	
	SCuña	DCuña	SCuña	DCuña
0,250	0,18	0,16	4,66 (para la misma β)	2,78 (para la misma β)
0,375	0,18	0,16		
0,500	0,18	0,16		
0,750	0,18	0,16		
1,250	0,18	0,16		
2,000	0,18	0,16		
Promedio=	0,18	0,16		
Desv. típica=	0,001	0,0005		

Es significativo la reducción de la longitud de la DCuña, lo cual facilita su construcción y manejo en la práctica, mientras que las pérdidas permanentes no disminuyen significativamente respecto a la SCuña.

Obtener este valor de pérdidas de carga permanentes con estos ángulos coloca a este deprimógeno respecto a los otros normados por la ISO, tabla 7, con valores de pérdidas de carga muy por debajo de las Toberas ISA1932 y las Toberas de Radio Largo y ligeramente por encima de la Tobera Venturi.

Tabla 7. Comparación de las pérdidas con otros deprimógenos para una misma contracción (β)

v (m/s)	hf (m)					
	Plato	T. ISA 1932	TRL	T. Venturi	Scuña 30ºx7.5º	DCuña30ºx7.5º
0,250	0,0125	0,0040	0,0035	0,0013	0,0018	0,0016
0,375	0,0282	0,0089	0,0077	0,0029	0,0041	0,0036
0,500	0,0504	0,0158	0,0137	0,0052	0,0073	0,0063
0,750	0,1142	0,0355	0,0305	0,0117	0,0164	0,0143
1,250	0,3199	0,0982	0,0838	0,0325	0,0453	0,0398
2,000	0,8256	0,2509	0,2124	0,0831	0,1154	0,1020

Para concluir este último análisis sobre la efectividad de los cambios introducidos al modelo original del flujómetro de Cuña se presenta la figura 11 con una primera información visual del comportamiento de estos nuevos diseños.

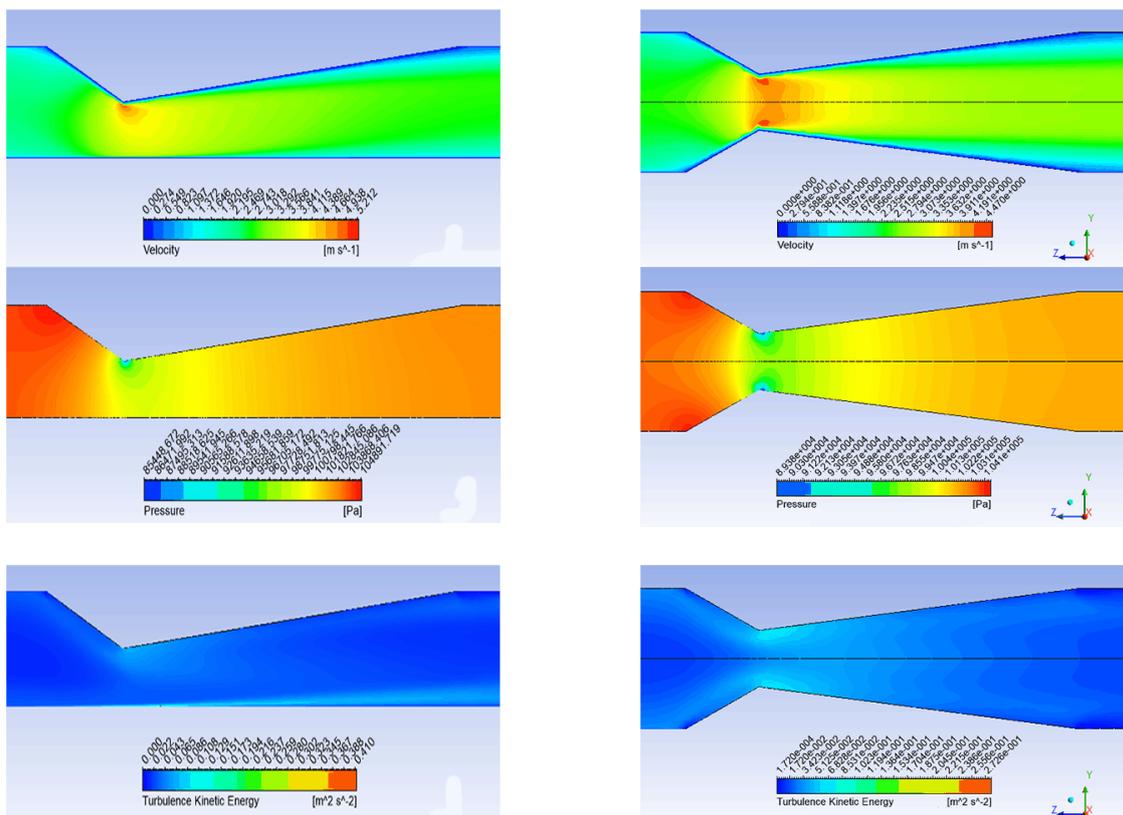


Figura 11. Comportamiento para 2 m/s de v , p y k_e para SCuña y la Dcuña con la variante de 30° con 7.5°

Se destaca en las imágenes la variación gradual de los contornos de velocidad y presión. En el caso de los contornos de la energía cinética turbulenta, resalta la poca variación lo cual es compatible con los resultados alcanzado en relación con las bajas pérdidas de presión que el diseño incorpora permanentemente en el conducto.

03 CONCLUSIONES

Se demostró que los parámetros empleados para el diseño geométrico, el mallado global, la refinación del mismo y las condiciones de contorno han resultado satisfactorios tanto para la obtención de la relación gasto versus diferencia de presión, como para la relación gasto versus perdidas permanentes en el conducto.

A partir de los resultados obtenidos se logró demostrar la alta incidencia de los ángulos de entrada y salida en el valor de la pérdida de carga permanente.

Como resultado del estudio de la SCuña con varias combinaciones de valores para los ángulos de entrada y salida, se llegó a obtener una pérdida de carga permanente con un valor equivalente al 18% de la perdida permanente que introduce la cuña original en el conducto.

De manera inicial se estudió y se presenta una variante del flujómetro con doble cuña simétrica, que produce muy bajas pérdidas permanentes y además reduce considerablemente la longitud de la nueva variante de flujómetro denominada SCuña.

04 REFERENCIAS

- International Standard (ISO). ISO 5167-6.** (2022). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 6: Wedge meters. Suiza, 2022. [Consultado julio de 2024]. Disponible en: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=ISO+5167-6+segunda+edici%C3%B3n>
- León A. J., Stefano E. y CHIRINO J.** (2023) “Reducción de longitudes de tubería en la simulación CFD de flujos a través de accesorios”. Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XLIV (3), (Jul-Sep 2023). ISSN 2788-6050, ISSN-L 1680-0338 y RNPS 2066. Disponible en: <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha>
- Chirino J.** (2023). “Estudio de la influencia de modelos RANS en la modelación de un flujo a través de una obstrucción. Caso de estudio en caudalímetro de cuña”. Tesis en opción del título académico de Ingeniero Hidráulico. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE, La Habana, Cuba. 2023.
- British Standard. BS ISO 3966** (2008). “Measurement of fluid flow in closed conduits. Velocity area method using Pitot static tubes”. Second Edition, British Standard, United Kingdom. ISBN 978 0 580 62863 4.
- Rumsey C.** (2004) “Turbulence Modeling Resource”. Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA), U.S.A, 2024 (actualizado 06/15/2024). [Consultado julio de 2024]. Disponible en: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/>
- Idel’cik I. E.** (1969) “Mémento des pertes de charge: coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement”. Editorial Eyrolles, OCLC Number 421565917. Paris, ©1969. [Citado: 30 de julio de 2024] Disponible en: https://www.amazon.com/stores/I.-E.-Idelcik/author/B00DQ6A1KO?ref=dbs_a_mng_rwt_scns_share&isDramIntegrated=true&shoppingPortalEnabled=true

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Alcides J. León Méndez

<https://orcid.org/0000-0002-5072-6438>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, desarrollo de la investigación, redacción del documento y análisis y discusión de los resultados.

Johan Chirino Montano

<https://orcid.org/0009-0001-3749-5938>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, desarrollo de la investigación y análisis y discusión de los resultados.