

Principios del flujómetro de Sector Circular

Alcides J. León MéndezE-MAIL: aleonm@civil.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba.

RESUMEN

En el trabajo se presenta el diseño geométrico de un flujómetro del tipo deprimógeno, que se conforma a partir de la obstrucción que se genera al interceptar parcialmente, a noventa grados, un tramo de tubo con otro de igual o mayor diámetro. Esta penetración entre las dos tuberías deja en la que va a conducir el flujo, una superficie denominada en geometría, silla de montar cilíndrica. Para validar su función como flujómetro, se modelan matemáticamente cuatro posibles diseños empleando el ANSYS CFD. El valor de las pérdidas de carga permanentes, que introduce cada diseño, se contrasta con el valor de las pérdidas que introduce un flujómetro de Cuña validado por la norma ISO 5167-6, por tener un principio semejante al aquí expuesto, obteniéndose resultados que permiten justificar las posibilidades del diseño propuesto como flujómetro.

PALABRAS CLAVE: *hidrometría, medidores de caudal, CFD*

Principles of the Circular Sector Flowmeter

ABSTRACT

This paper presents the geometric design of a deprimogenic flowmeter, which is formed from the obstruction created by partially intersecting, at a ninety-degree angle, a section of pipe with another of equal or greater diameter. This penetration between the two pipes leaves a surface in the pipe that will carry the flow, known in geometry as a saddle surface. To validate its function as a flowmeter, four possible designs are mathematically modeled using ANSYS CFD. The value of the permanent head loss introduced by each design is compared with the value of the losses introduced by a wedge flowmeter validated according to ISO 5167-6, due to its similar principle. The results obtained justify the viability of the proposed design as a flowmeter.

KEYWORDS: *hydrometry, flowmeters, CFD*

01 INTRODUCCIÓN

Para las conducciones forzadas hay numerosas alternativas para la medición, en tiempo real, del caudal que circula por la sección transversal de una conductora. Los flujómetros del tipo deprimógenos (caudal como función de la pérdida de presión), tienen la fortaleza de ser muy robustos, de adaptarse a la medición de grandes y pequeños caudales, de poder ser contruidos con la guía calificada de las actuales normas ISO y de permitir una fácil operación. Como elementos en contra se tiene, que introducen pérdidas permanentes de carga en el conducto, las cuales llegan a ser muy altas y en muchas de las variantes el proceso de construcción es tecnológicamente complejo y muy especializado.

Entre los últimos deprimógenos normados por las normas ISO está el que aparece en la ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b) denominado en español flujómetro de Cuña (Wedge meter) de relativa fácil construcción, pero que para el diseño que se propone en la norma, el valor de las pérdidas de carga que introduce en el flujo lo limita para algunas aplicaciones. En reciente publicación de León y Chirino (León & Chirino, 2024), se modifica el diseño clásico de este flujómetro. Pero aún en esta solución la construcción se vuelve algo compleja. Además, se hace muy difícil si se quiere emplear tuberías de PE como las fabricadas en estos momentos en nuestro país.

En Cuba la producción nacional de tubería de PEAD y PEMD ha ido sustituyendo las antiguas conductoras

existentes en los sistemas hidráulicos. Debido a lo anterior, más la imperiosa necesidad existente de tener medidores de caudal para medianos y grandes diámetros de conductoras, que se adapten a cualquier situación en particular y basado en la idea del flujómetro de Cuña, se ha generado una nueva solución, ideal para ser implementada en tubería de polietileno. A esta nueva solución se le ha denominado flujómetro de Sector.

Basado en lo anteriormente expuesto, este trabajo se encamina al desarrollo de los principios de diseño de la nueva solución para la medición de caudales en conductoras a presión, de fluidos que admitan una pequeña disminución de la energía debido a las pérdidas de carga local que introducirá este flujómetro.

Para concluir este primer trabajo sobre esta variante de flujómetro deprimógeno se incluye un breve análisis de su comportamiento hidrodinámico a partir de modelar cuatro alternativas de solución con el programa ANSYS, de reconocido prestigio para este tipo de trabajo y comparar los resultados obtenidos con los del flujómetro de Cuña ya que sus principios de diseño son muy similares al que se propone.

02 BASES PARA EL DISEÑO

El flujómetro de sector se conforma con dos tuberías que se interceptan (Fig. 2.1), una, que es la principal o conductora, por la que van a circular los caudales que se quieren medir y otra, que será la que genere la obstrucción. En la figura 2.1 superior derecha, la parte azul que queda “incrustada” en la conductora, es la superficie de la tubería una vez que se realiza el corte. A esa figura geométrica se le conoce como *silla de montar cilíndrica* (saddle surface en inglés). La segunda tubería, que es la que genera el estrechamiento en la conductora, debe tener un diámetro exterior igual o mayor que el diámetro interior de la principal, para que se creen las condiciones hidrodinámicas que permitan que las líneas de corriente converjan y diverjan lo más suavemente posible al pasar por el estrechamiento.

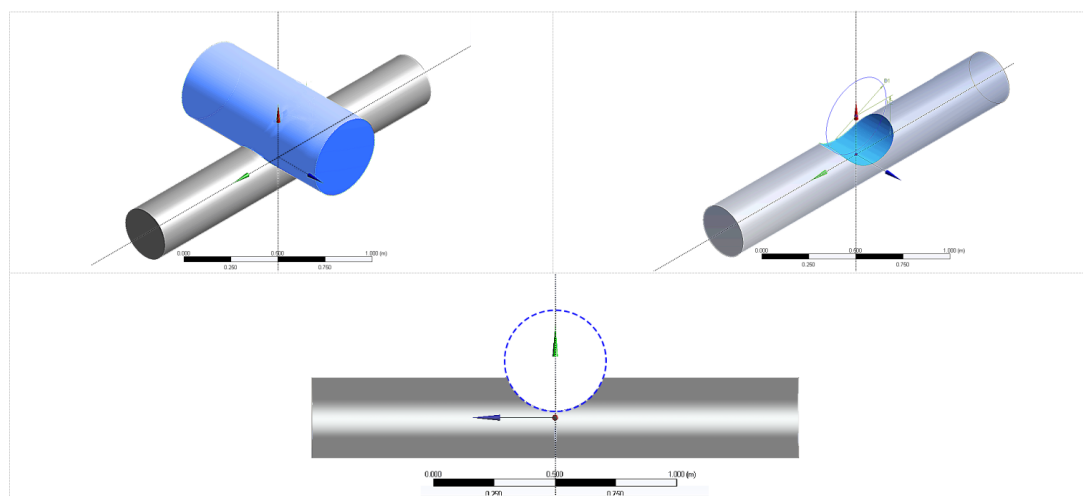


Figure 2.1. Secuencia de imágenes de la conformación del flujómetro en un tramo de tubería.

La construcción de este tipo de flujómetro es en extremo sencilla, ya que su base es tubería del mismo o diferente material que la conductora donde irá instalado el medidor. Para el tramo de tubería que forma parte del flujómetro y que está en línea con la conductora, se debe respetar los criterios de calidad que aparecen en la Norma ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b) y se debe producir limpiamente el corte que irá sellado por el tramo de tubo, recortando este último para que quede conformado tal como se ve en el esquema de la figura 2.1 superior derecha. El exterior de la tubería que sella la zona de la silla de montar cilíndrica, creada en la conductora, debe estar limpio, mediante inspección visual, de incrustaciones que sobresalgan de forma evidente.

La medición del caudal se efectúa, al igual que todos los deprimógenos, midiendo la diferencia de presión entre dos puntos. Esta diferencia de presión local, se genera al incrementarse la velocidad del agua al pasar

por la obstrucción creada (Fig. 2.2). En la figura 2.2 aparecen dos alternativas de flujómetro, el de una sola obstrucción, denominado de simple sector (SSector) y el de dos obstrucciones simétricas, denominado de doble sector (DSector).

La altura h de la sección de la garganta y la tubería de radio R , que se empleará para interceptar la tubería conductora y crear las condiciones necesarias de estrechamiento y ensanchamiento gradual para conformar el flujómetro, influyen en los ángulos de entrada y salida del flujo en el tramo de tubería donde se produce el estrechamiento.

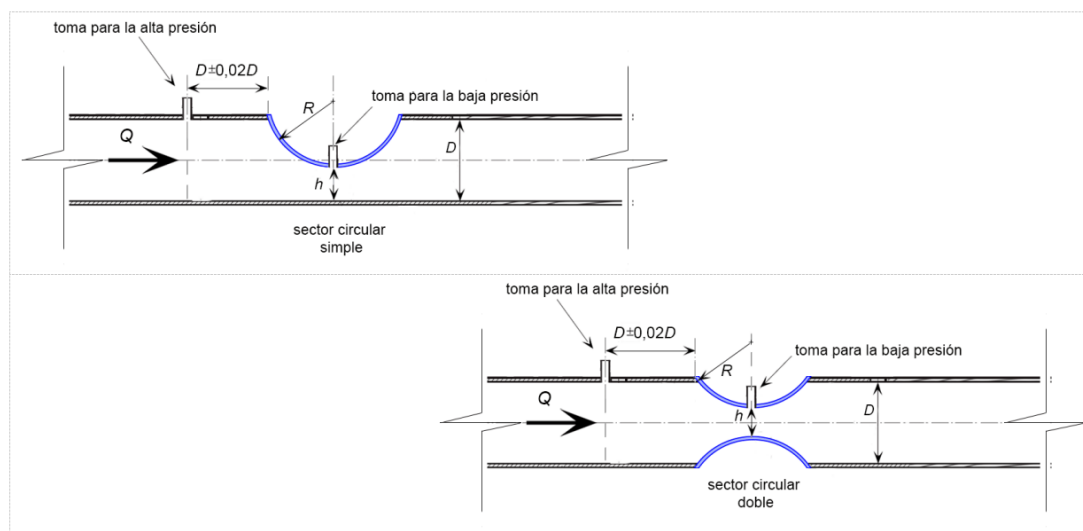


Figure 2.2. Perfil del tramo de tubería con el flujómetro.

A partir de ahora, se diferenciarán dos importantes variables: el diámetro interno de la tubería conductora, que se distinguirá con la letra D y el radio externo de la tubería que intercepta la conductora creando el estrechamiento, que se distinguirá con la letra R , o lo que es igual, R es la mitad del diámetro exterior del tubo que genera la silla de montar cilíndrica que se incrusta en la conductora.

2.1. Ángulos de entrada-salida y altura de la garganta (h)

Los flujómetros deprimógenos presentan una contradicción que debe resolverse para cada aplicación, dando peso relativo a cada una de las variables que intervienen en el proceso de medición del caudal. Las dos ecuaciones genéricas que intervienen en el proceso son la ecuación del gasto y la ecuación de las pérdidas de carga permanentes que cualquier deprimógeno introduce. Para lograr un buen diseño, en una aplicación dada, se debe llegar a una solución donde se obtenga un amplio intervalo de caudales a medir con las menores pérdidas de carga permanentes posibles.

Lograr lo anterior, implica un diseño retroactivo donde hay que ir analizando el peso relativo que cada variable tiene sobre el caudal mínimo y máximo posible a medir, las pérdidas de carga que se introducen y como esto influye en la calidad del servicio que brinda la conducción del agua.

La ecuación del gasto puede escribirse como a continuación se detalla:

$$Q = f(\text{tipo}, D, h, C_Q, \Delta p) \quad (2.1)$$

Donde: *tipo* se refiere al tipo de deprimógeno empleado (placa orificio, tobera ISA1932...); D es el diámetro interno de la conductora; h es la altura de la garganta del deprimógeno en la sección de mayor contracción; C_Q es el coeficiente de gasto del flujómetro, que a su vez es función del tipo de deprimógeno, de D y de h y en casos particulares, es una constante; y Δp es la diferencia de presión entre una sección aguas arriba de la entrada del flujómetro y otra en una sección intermedia, o aguas abajo de la salida.

Para una conductora de diámetro determinado, en la cual se ha colocado un tipo de deprimógeno en particular,

con una altura de garganta definida, la ecuación (2.1) puede reescribirse de la siguiente forma:

$$Q = f_1(\Delta p) \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) resume el principio de los flujómetros deprimógenos, que no es más que la relación entre el caudal que circula y el diferencial de presión local generado por el deprimógeno.

Por su parte, para una conductora de diámetro determinado, en la cual se ha colocado un tipo de deprimógeno en particular, con una altura de garganta definida la ecuación de las pérdidas de carga permanentes ($hf_{\text{permanentes}}$) puede escribirse de la siguiente forma:

$$hf_{\text{permanentes}} = f_2(\Delta p) \quad (2.3)$$

En el proceso de medición, para una conductora de diámetro dado con un tipo de deprimógeno intercalado, la geometría de la entrada y la salida del flujómetro juegan un importante papel sobre el valor de las pérdidas permanentes de carga, mientras que la altura de la garganta del medidor tiene un doble papel, ya que su valor incide tanto en las pérdidas de carga permanentes como en el intervalo de gastos posibles a medir, a partir del elemento secundario que se tenga para la medición del Δp .

2.2. Ángulos de entrada y salida

En una conducción forzada, el ángulo de entrada y salida del flujo en una obstrucción, creada por un accesorio o instrumento de mayor o menor diámetro que la conductora, tiene una gran repercusión en las pérdidas permanentes de energía que se introducen en el flujo que circula (Idel'cik, 1969; Mott, 2006). Un ejemplo muy contrastante de esto lo constituyen la Placa Orificio y el flujómetro Venturi. En el primer caso la entrada y salidas son bruscas, mientras que en el segundo el conducto de entrada que termina en la garganta del Venturi tiene ángulos muy pequeños al igual que el conducto de salida de la garganta a la conductora, esto hace que la diferencia entre las pérdidas de carga permanentes, para el resto de las condiciones iguales, sean entre 10 y 20 veces mayores para la placa, en dependencia de la relación de la altura de la garganta entre el diámetro del conducto (h/D).

El ángulo de entrada del flujómetro de sector es igual al ángulo de salida debido a la característica de la circunferencia que describe el radio exterior de la tubería que genera el sector (R). Estos ángulos dependen de la magnitud de R y de la altura h del estrechamiento que se requiera para el diseño del flujómetro. La figura 2.3 muestra, para un mismo diámetro interno de conductora, tres alternativas, entre las muchas posibles, para ilustrar esta característica de suma importancia a evaluar en el diseño.

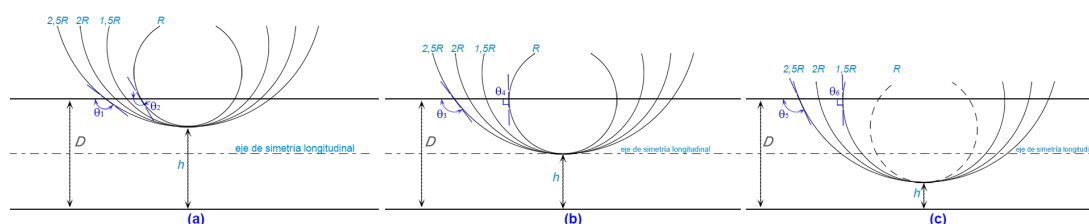


Figure 2.3. Imágenes mostrando la variación del ángulo de entrada y salida para diferentes valores de h y R .

Para los tres casos mostrados en la figura 2.3, el diámetro interno de la conductora (D) y el menor radio exterior de la tubería que genera el corte tienen una relación de 2:1. Esto se asume para facilitar las explicaciones actuales y futuras. Para los diseños prácticos las ecuaciones que se describirán más adelante definirán las dimensiones y características del corte a realizar en la conductora.

En la figura 2.3a, la altura del estrechamiento es la mayor de los tres casos presentados. Por tanto, los ángulos de entrada y salida de las variantes presentadas (R ; $1.5R$; $2R$ y $2.5R$) son los menores posibles en los tres casos analizados. Debe recordarse que para facilitar la explicación se ha asumido que D es igual a $2R$.

En la figura 2.3b, las cuatro tuberías interceptoras penetran más en la conductora hasta llegar a que la de

menor radio (R) toque el centro de la conductora, reduciendo la altura de la garganta a la mitad del diámetro ($h = 0,5D$) puede verificarse, tal como se indica en la imagen correspondiente, que el ángulo de entrada y salida es de 90 grados (90°). Esta condición es el límite para la tubería de radio R , ya que si penetrara más en la conductora el ángulo creado sería un fuerte obstáculo para las líneas de corriente, perdiéndose la geometría aerodinámica del sector y de la semicircunferencia como límite del sector. De igual forma el resto de los radios muestran ángulos de entrada y salida mayores que los mostrados en la figura 2.3a.

Por último, en la figura 2.3c se ha penetrado el corte de la conductora hasta el límite máximo que permite la tubería de radio $1,5R$. Exactamente igual que en el caso anterior los ángulos de entrada y salida disminuyen para los tres posibles cortes expuestos. Para este caso la altura de la garganta (h) ha disminuido provocando un estrechamiento al flujo mayor que en los casos anteriores. Para esta altura h la tubería de menor radio (R) quedó descartada.

2.3. La altura de la garganta (h)

La altura de la garganta de los flujómetros deprimógenos tiene un fuerte efecto en el valor del Δp y por consiguiente, en el valor de las pérdidas de carga permanentes. Al ser el Δp la variable de correlación con el caudal, para un diseño previamente definido, mantiene un fuerte vínculo con los caudales que podrían medirse a partir de haber definido con anterioridad el instrumento que se empleará para medir la diferencia de presión. El valor de h debe seleccionarse con mucho cuidado ya que tiene implicaciones técnicas y económicas, al influir directamente en las $hf_{\text{permanentes}}$ y en la determinación de los caudales mínimos y máximos que podrán medirse. Además para el flujómetro de sector que se está analizando, el valor de h está también ligado al radio (R) de la tubería que genera el sector, ya que tanto R como h tienen incidencia en los ángulos de entrada y salida de la obstrucción creada por el sector circular, figura 2.3 y estos influyen también en las pérdidas de carga permanentes que se producirán.

Todo lo anterior puede resumirse, para un diseño de flujómetro de sector en una conductora de diámetro conocido, en:

- A menor valor de h , se incrementa el valor de las pérdidas de carga permanentes para cada caudal pero se amplía la posibilidad de medir pequeños caudales.
- A mayor valor de h para una tubería interceptora de R conocido, menores ángulos de entrada y salida de la obstrucción y por tanto menores deben ser las pérdidas de carga permanentes.
- Para un valor de h definido previamente, a mayor valor del radio de la tubería interceptora (R), menores serán los ángulos de entrada y salida de la obstrucción y por tanto menores deben ser las pérdidas de carga permanentes.

2.4. Ecuaciones del sector circular

Las variables que se requieren conocer del sector circular que intercepta el tramo de la conductora donde irá colocado el flujómetro son: la longitud del arco (L_a), la longitud de la cuerda (L_c), los ángulos de entrada-salida (θ y β). Estas variables están en función de las dimensiones del diámetro interno de la conductora (D), del radio externo del tramo de tubería que generará el sector circular al interceptarse con la conductora (R) y el valor que se decida la altura de la garganta del flujómetro (h). Por tanto, puede escribirse que:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{R - D + h}{R} \right) \quad (2.4)$$

$$\theta = 90 + \alpha \quad (2.5)$$

$$\beta = 90 - \alpha \quad (2.6)$$

$$L_c = 2\sqrt{R^2 - (R - D + h)^2} \quad (2.7)$$

$$L_a = 2R\beta \quad (2.8)$$

La longitud de la cuerda definirá la posición de una de las dos tomas de presión, que se emplearán para

se consigue minimizar la distancia de ducto aguas arriba del flujómetro, con implicaciones directas en la menor cantidad de elementos necesarios para constituir la malla del modelo matemático. De otra parte, las conclusiones que se obtendrán, en este primer trabajo, son independientes de los valores específicos de los diámetros que se empleen y la relación de 3:1 entre los diámetros exteriores es suficientemente grande como para contrastar los resultados y representar las posibilidades de relaciones de diámetros con la tubería de PE que actualmente se fabrican (Chirino Montano, 2023).

Un detalle importante a señalar, es que para una misma relación de estrechamiento (h/D), cualquiera que este sea, el DSector tiene mayor área mojada en su garganta que el SSector. La figura 3.1 esquematiza esta característica de las secciones circulares.

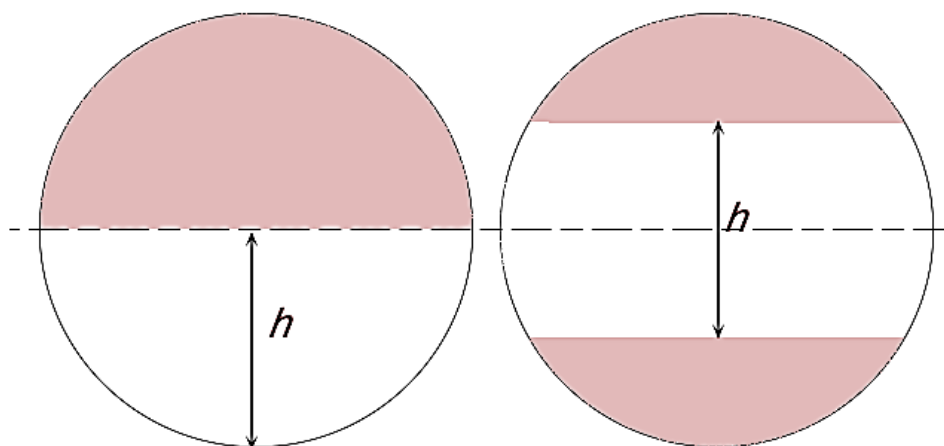


Figure 3.1. Garganta que se produce en el SSector y en el DSector para un mismo valor de (h/D) .

La norma internacional ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b) resuelve la comparación entre soluciones de flujómetros deprimógenos estableciendo que sean iguales las áreas de las gargantas y de esta forma se pueden evaluar comparativamente los resultados, por ejemplo, entre una Tobera de Radio Largo, el VCone y un flujómetro de Cuña. Por tanto, como altura de la garganta para la variante del SSector, estudiada en este trabajo, se tomará una relación h/D igual a 0,50. Mientras que para la variante estudiada del DSector la altura de la garganta se calculará tal que, las áreas de la obstrucción en los dos casos sean las mismas. En este caso para el DSector se obtiene un resultado de h/D igual a 0,404 para un área de garganta igual a 0,035345 m².

3.1. Primeros resultados con la modelación matemática

En trabajos anteriores sobre flujómetros, se ha detallado la estructura del modelo empleado y se ha demostrado que responde muy bien a las exigencias de calidad del ANSYS para este tipo de modelo (León & Chirino, 2024; León et al., 2023; Oficina Nacional de Normalización (NC), 2013). Más aún, en la calibración realizada del modelo del flujómetro de Cuña (León & Chirino, 2024), tomando como comparación la información brindada por la ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b) se obtuvieron diferencias muy pequeñas ($< 2,7\%$ para el Δp_{1-2} y $< 1,9\%$ para hf), lo cual valida el empleo de esta herramienta con lo establecido para la malla (*mesh*) y para la configuración (*setup*) (León & Chirino, 2024).

3.2. Estructura del modelo

Para el modelo se empleó, al igual que en casos estudiados anteriormente 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 galvanizado nuevo. La longitud total del modelo está conformada por un tramo de entrada hasta el punto donde se mide p_1 , un segundo tramo entre p_1 y una sección (sección 3), ubicada a una distancia igual al diámetro interno del conducto, medido a partir del final del sector, este tramo depende de la longitud de la cuerda del sector. El tercer tramo que va desde la sección 3 hasta la descarga. La longitud del primer tramo fue de 10,00 metros ($\geq 30 \times$ diámetro interno del ducto) y la misma tiene una

dependencia directa con la estrategia que se emplee para suministrar el caudal al modelo. El tercer tramo tiene 12,00 metros de longitud ($\geq 40 \times$ diámetro interno del ducto) que garantiza un restablecimiento de la rasante piezométrica, más una longitud adicional para la estabilidad del patrón de velocidades antes de su salida (León & Chirino, 2024; León et al., 2023; Oficina Nacional de Normalización (NC), 2013).

La estrategia adoptada para la entrada del caudal fue la misma que en anteriores trabajos, empleando un patrón de velocidades previamente obtenido de una tubería idéntica de mucha mayor longitud y sin flujómetro. Esto posibilitó la obtención de un patrón estable para cada velocidad media. Se decidió modelar con un patrón de velocidades parabólico a la entrada con una velocidad media de 3,99 m/s, lo que da como caudal másico de entrada un valor igual a 282,74 kg/s. Esta inusualmente alta velocidad genera un Número de Reynolds igual a $1,34E06$, valor que está dentro del intervalo admitido para estos flujómetros.

La alta velocidad adoptada para establecer las comparaciones del Sector con la Cuña y del Sector en sus cuatro diferentes alternativas de diseño, tiene como ventaja que los resultados contrastarán de forma evidente.

Un resumen de los principales parámetros adoptados para el mallado aparece a continuación en la Tabla 3.1. Por su parte, en la Tabla 3.2 se muestran los resultados de la calidad de la malla obtenida para estos primeros resultados.

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 (León et al., 2023). Para este modo de turbulencia los resultados obtenidos anteriormente, 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).

Table 3.1. Detalles más relevantes del mallado.

Malla global		Inflación	
Tamaño mínimo	0,002 m	Capas	12
Tamaño máximo de la cara	0,008 m	Altura de la primera capa	0,00025 m
Tamaño máximo	0,015 m	Razón de crecimiento	1,2
Ángulo normal de curvatura	10°		
Dimensionamiento de la silla de montar cilíndrica (Face Sizing)			
Tamaño de los elementos	0,002 m	Comportamiento	fuerte

Table 3.2. Calidad del mallado.

Indicador	Intervalo	Modelo
Calidad de elementos (Element Quality)	1 óptimo, 0 pésimo	Media = 0,77; Desv. típica = 0,37
Relación de aspecto (Aspect Ratio)	1 óptimo; mientras sea > 1 es peor; menor que 100 es aceptable	Media = 4,65; Desv. típica = 9,76
Relación Jacobiana (Jacobian Ratio)	1 óptimo; buena calidad entre 1 y 10	Media = 1,01; Desv. típica = 0,009
Asimetría (Skewness)	de 0 a 0,25 excelente; de 0,25 a 0,5 bueno	Media = 0,17; Desv. típica = 0,12
Calidad ortogonal (Orthogonal Quality)	0,95 a 1 excelente; 0,70 a 0,95 muy bueno	Media = 0,91; Desv. típica = $8,67E-02$
Desviación paralela (Parallel Deviation)	0 ideal; 70 aceptable	Media = 4,69; Desv. típica = 5,83

La ejecución de cada modelo se prolongó hasta que la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de los residuos

de las componentes de la velocidad (Root Mean Square, RMS) fueran menor que una millonésima ($1,0\text{E-}06$).

3.3. Resultados iniciales para la distribución de la velocidad y la presión

Sin pretender dar conclusiones finales sobre este flujómetro, se expondrán y analizarán los primeros resultados obtenidos, para, a partir de ellos, dar una primera respuesta a tres interrogantes: la reducción de las pérdidas de carga permanentes respecto al flujómetro de Cuña, la diferencia entre el SSector y el DSector y las ventajas iniciales que presenta el empleo de mayores diámetros de tubería para crear el sector.

Para el análisis, utilizando el corto espacio que permite este primer trabajo, se empleará una tubería de diámetro interior 300 mm interceptada, primero, por otra tubería de diámetro exterior 300 mm y posteriormente interceptada por una tubería de radio exterior de 900 mm. Tanto para el SSector como para el DSector, se empleará a la entrada un patrón de velocidades parabólico con una velocidad media de $3,995 \text{ m/s} \approx 4,0 \text{ m/s}$. La figura 3.2 muestra los primeros resultados visuales de la modelación para la velocidad y la presión estática.

En las figuras 3.2a, 3.2b, 3.2e y 3.2f, la relación entre el diámetro interno del conducto (D_{ducto}) y el diámetro externo de la tubería que genera el sector (D_{sector}) es igual a la unidad ($D_{ducto}/D_{sector} = D_r = 1$). Mientras que en la figura 3.2c, 3.2d, 3.2g y 3.2h la relación es 0,333 ($D_r = 0,333$).

Un primer análisis de los patrones de velocidad queda claramente establecido, que para el SSector con $D_r = 1$ (Fig. 3.2a), las zonas de bajas velocidades y fuertes cambios en la dirección del vector velocidad, abarcan mucha más área en comparación con igual solución pero con $D_r = 0,333$ (Fig. 3.2c). Lo mismo ocurre en el caso del DSector, donde también aparece una diferencia entre la solución generada con $D_r = 1$ en contraste con la solución generada con $D_r = 0,333$. En esta última, las zonas de bajas velocidades y cambios en la dirección del vector velocidad, abarcan mucha menos área lo cual indica que la expansión del flujo es menos brusca.

En todos los casos la velocidad media en la garganta es $\approx 8,0 \text{ m/s}$, ya que el área de la garganta es la mitad del área de la sección del conducto. En el caso de la distribución de velocidades en la garganta, aunque cualitativamente es semejante en los cuatro casos estudiados, la velocidad máxima en la vertical difiere de un caso a otro. En la Tabla 3.3 aparece, en una de las columnas el valor de la velocidad máxima en la garganta. Debido a la contracción del flujo al pasar por la garganta el mayor valor aparece en la solución SSector con $D_r = 1$.

Table 3.3. Valores de velocidad y presión de las diferentes soluciones.

Tipo	Característica	h/D	p_{2min} (mca)	$v_{max_garganta}$ (m/s)	Δp_{1-2} (mca)
Cuña ISO 5167-6	Cuña a 45°	0,500	-1,86	9,78	4,91
SSector	300x300 mm	0,500	-2,91	9,08	4,27
SSector	300x900 mm	0,500	-1,96	8,54	3,32
DSector	300x300 mm	0,404	-2,41	8,47	3,45
DSector	300x900 mm	0,404	-2,00	8,33	2,91

Al comparar los patrones de distribución de las presiones de las soluciones (Fig. 3.2b, 3.2d, 3.2f y 3.2h) y analizar la presión mínima (p_{2min}) que cada solución genera en el punto de medición aguas abajo, ubicado en la garganta, se nota un comportamiento menos abrupto en los cambios de presión tanto a lo largo del tramo del flujómetro como en una sección vertical por la garganta del estrechamiento en los dos casos en que D_r es igual a 0,333. Si además se analizan los valores de Δp_{1-2} que aparecen en la Tabla 3.3, también para esas dos soluciones se obtienen las menores diferencias.

Es muy importante tener en cuenta el valor Δp_{1-2} en los flujómetros deprimógenos, ya que define el caudal mínimo que podrá medirse con el instrumento secundario que se emplee para medir la presión (manómetro Bourdon diferencial, sensor digital de presión diferencial, rama manométrica u otro similar), ecuación (2.2). Para este análisis el mayor valor se obtiene con el SSector y $D_r = 1$ y el menor con el DSector y $D_r = 0,333$.

Por último, la Tabla 3.4 muestra los valores de las pérdidas de carga permanentes para cada una de las soluciones analizadas y la comparación de esta con la que produce, en las mismas condiciones, un flujómetro de Cuña (Wedge meter) en su diseño convencional (International Organization for Standardization (ISO), 2022b).

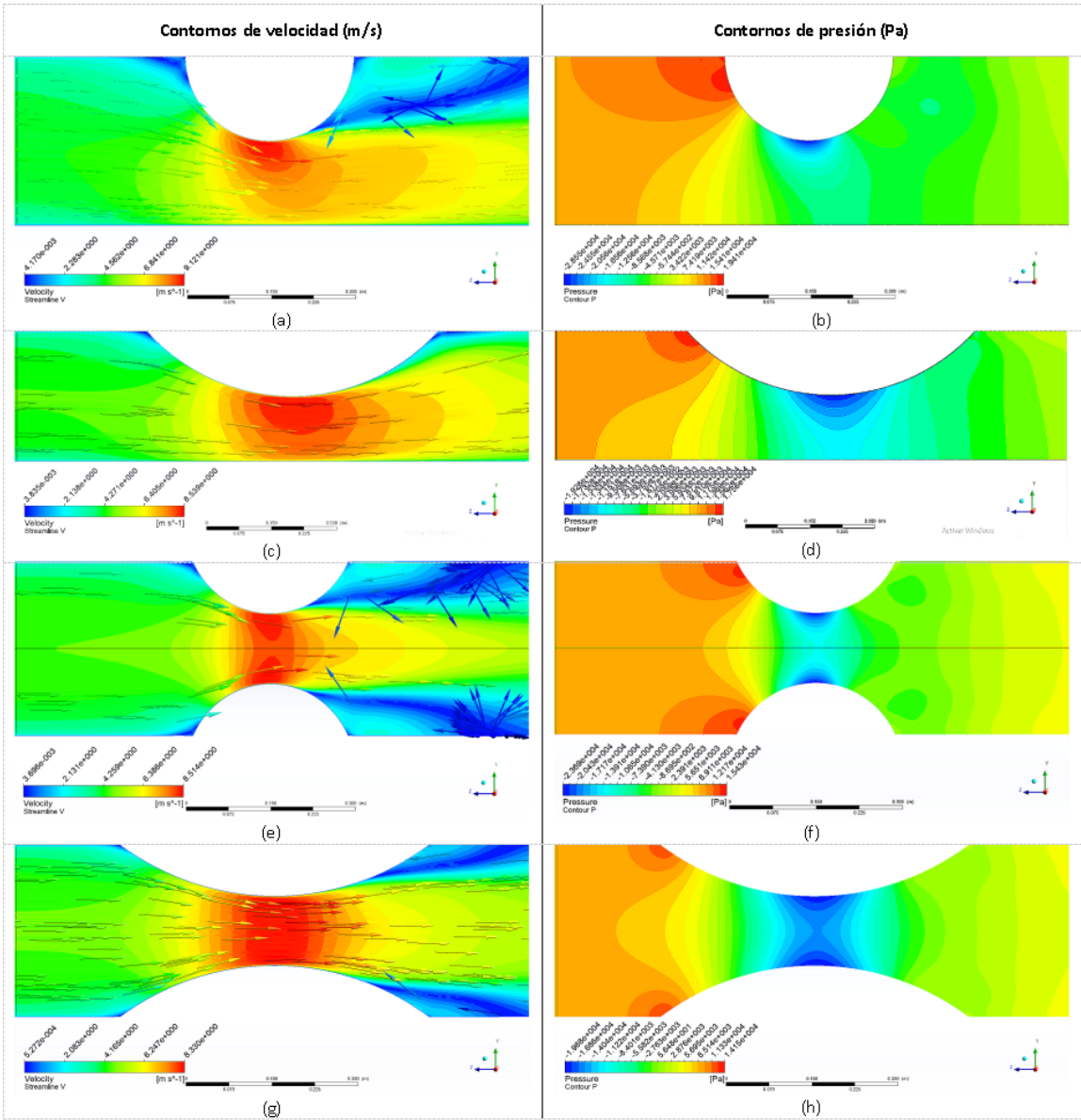


Figure 3.2. Mosaico mostrando los primeros resultados de los modelos.

Table 3.4. Comparación de las pérdidas de carga permanentes de las diferentes soluciones.

Tipo	Característica	h/D	h_f permanentes (m)	Reducción de h_f respecto a la Cuña (%)
Cuña ISO 5167-6	Planos a 45°	0,500	2,605	—
SSector	300x300 mm	0,500	0,817	68,64
SSector	300x900 mm	0,500	0,679	73,93
DSector	300x300 mm	0,404	0,484	81,42
DSector	300x900 mm	0,404	0,374	85,64

Al analizar los resultados de la Tabla 3.4, es significativa la reducción de las pérdidas de carga de cualquiera de las variantes del flujómetro de Sector respecto al flujómetro de Cuña. Además, hay una lógica indiscutible respecto al comportamiento de hf en los casos estudiados del Sector: a menor valor de D_r , menor valor de la hf , y, para un mismo valor de D_r , DSector reduce las pérdidas de carga permanentes a casi la mitad del valor para las condiciones estudiadas.

Todas las soluciones analizadas tienen muy bajas pérdidas de carga permanentes, lo cual representa una gran fortaleza para este flujómetro. Solo a manera de comparación con los dos deprímógenos líderes en bajas pérdidas de carga, el Tubo Venturi (International Organization for Standardization (ISO), 2003) y la Tobera Venturi (International Organization for Standardization (ISO), 2022a), evaluados para las mismas condiciones de tubería y caudal, presentan valores de las pérdidas de carga permanentes de 0,32 metros y 0,43 metros respectivamente, valores muy similares a los obtenidos con el DSector y D_r igual a 0,333.

Analizando otro aspecto de los resultados, la solución de DSector con D_r igual a 0,333 es la que menor diferencial de presión tiene, mientras que la solución con D_r igual a la unidad tiene el segundo mayor valor para el diferencial de presión entre las tomas 1 y 2, lo que implica mayor sensibilidad para pequeños caudales. Este resultado ubica a esta solución como una buena opción para balancear $hf_{permanentes}$ mínimas y Δp_{1-2} alto.

Para terminar este primer trabajo sobre estos flujómetros, se presenta en la figura 3.3, un contraste de la diferencia entre las pérdidas de carga generadas por el flujómetro Cuña y su similar del SSector con un D_r igual a 1, a través de los contornos de la Energía Cinética Turbulenta (TKE) y la Frecuencia de los Remolinos Turbulentos (TEF). Se ha incluido, además, una representación de los vectores velocidad en dirección y sentido para reforzar la comprensión de las diferencias entre las dos alternativas.

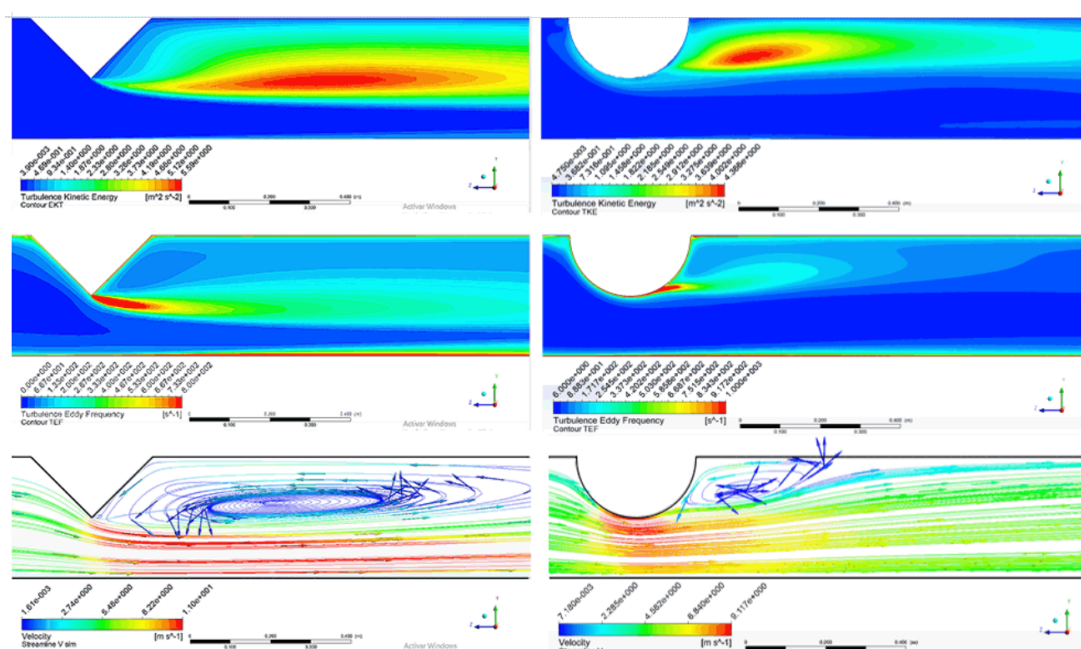


Figure 3.3. Comparación de la disipación de energía entre el flujómetro de Cuña y el SSector.

La relación entre las pérdidas de carga locales, la Energía Cinética Turbulenta (TKE) y la Frecuencia de los Remolinos (TEF) es directa y causal. TKE representa la energía asociada a las fluctuaciones turbulentas de la velocidad. En una obstrucción, el flujo se acelera y se generan fuertes gradientes de velocidad, por lo tanto, una alta producción de turbulencia arroja valores altos de TKE que implican altos valores de la intensidad turbulenta local. En los modelos de turbulencia de dos ecuaciones (como $k-\varepsilon$ o $k-\omega$), la TEF está relacionada con la tasa de disipación de la turbulencia (ε) o la frecuencia específica (ω). Una alta frecuencia significa remolinos pequeños y rápidos que disipan energía rápidamente; una baja frecuencia significa remolinos grandes y persistentes.

La obstrucción genera turbulencia debido a la aceleración del flujo (Fig. 3.3 inferior derecha e izquierda). Esto

crea un gradiente de presión adverso aguas abajo que provoca que el flujo se desprege de la pared, formando una zona de recirculación que implica la formación de remolinos estacionarios grandes. Como consecuencia de esto en la capa de mezcla entre el chorro central de alta velocidad y la zona de recirculación de baja velocidad, se genera una enorme cantidad de Energía Cinética Turbulenta (TKE), con valores máximos en el caso de la Cuña de $5,59 \text{ m}^2/\text{s}^2$, en contraste con las del SSector que alcanzan un máximo de $4,36 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Por otra parte es visualmente evidente, figura 3.3, que el área ocupada por bajos valores de TKE en la Cuña es muy superior a la ocupada en el SSector.

La TKE producida en los grandes remolinos (baja frecuencia), se transfiere a remolinos cada vez más pequeños (alta frecuencia), mediante el proceso denominado cascada de energía. Finalmente, los remolinos más pequeños (de alta frecuencia) son disipados por la viscosidad del fluido (disipación viscosa), convirtiendo la energía cinética del flujo en calor (Melamed & Filippov, 2019; Moffatt, 1991).

Las pérdidas de carga locales es la energía que pierde el flujo principal (presión) para generar y mantener esta turbulencia hasta que se disipa (Melamed & Filippov, 2019; Moffatt, 1991; Toapanta-Ramos et al., 2019). La comparación entre los flujómetros de Cuña y la variante del SSector, que aparece en la figura 3.3, esclarece la gran diferencia que aparece reflejada en la Tabla 3.4. Por lo tanto: a mayor TKE generada en la obstrucción, mayor cantidad de energía extraída del flujo y mayor pérdida de carga (Fig. 3.3 superior derecha e izquierda). Como complemento a lo anterior puede decirse que a mayor frecuencia de remolinos en la zona de disipación, aguas abajo, habrá una mayor tasa de disipación de esa TKE y la energía se pierde más rápidamente, pero la cantidad total de pérdida de carga ya está determinada por la TKE generada (Fig. 3.3 media derecha e izquierda).

04 CONCLUSIONES

Como conclusión a este primer trabajo, todas las soluciones analizadas tienen muy bajas pérdidas de carga permanentes, lo cual representa una gran fortaleza para este flujómetro. Solo a manera de comparación los dos deprimógenos líderes en bajas pérdidas de carga, la Tobera Venturi y el Tubo Venturi, presentan para las mismas condiciones, pérdidas de carga permanentes ligeramente menores a las obtenidas con el DSector con D_r 0,333.

Las dos variantes de doble sector (DSector) presentan una pérdida de carga permanente pequeña, aun con un alto caudal (Número de Reynolds $\approx 1,34\text{E}06$) y para estas condiciones la que tiene D_r igual a la unidad es la segunda mejor respecto al Δp_{1-2} entre los puntos para correlacionarlo con el caudal. Además, la reducción de las pérdidas de carga permanentes respecto al Flujómetro de Cuña es muy notable.

Debe destacarse que la variante de flujómetro presentada reúne características de robustez, facilidad constructiva y factibilidad de ser desarrollada por la industria cubana de tuberías de PE, o en cualquier taller donde se maquinen tuberías de hierro galvanizado o acero. Y puede ser empleada, además de como flujómetro, como parte de un flujómetro proporcional, como elemento para airear el flujo y como parte de los elementos para la inyección de sustancias solubles en la corriente líquida.

05 REFERENCIAS

- Chirino Montano, 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* [Trabajo de diploma]. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE.
- Idel'cik, I. E.** (1969). *Mémento des pertes de charge: Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement*. Éditions Eyrolles.
- International Organization for Standardization (ISO).** (2003). *Iso 5167-4. measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — part 4: Venturi tubes* (tech. rep.). ISO. Ginebra, Suiza.

- International Organization for Standardization (ISO).** (2022a). *Iso 5167-3. measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — part 3: Nozzles and venturi nozzles* (tech. rep.). ISO. Ginebra, Suiza.
- International Organization for Standardization (ISO).** (2022b). *Iso 5167-6. measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — part 6: Wedge meters* (tech. rep.). ISO. Ginebra, Suiza.
- León, A. J., & Chirino, J.** (2024). Evaluación con técnicas cfd de un flujómetro de cuña. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLV(3). <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha>
- León, A. J., Stefano, E., & Chirino, J.** (2023). Reducción de longitudes de tubería en la simulación cfd de flujos a través de accesorios. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLIV(3). <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha>
- Melamed, L. E., & Filippov, G. A.** (2019). Concepto de relleno de vórtice turbulento: Modelos y métodos. *Boletín de Instituciones de Educación Superior. Problema de Ingeniería Energética*, 21(5), 97–109. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-97-109>
- Moffatt, K.** (1991). Turbulencia y procesos estocásticos: Las ideas de kolmogorov 50 años después. *Proceedings of the Royal Society A*, 434, 1–240. <https://doi.org/10.1017/S0022112094212417>
- Mott, R. L.** (2006). *Mecánica de los fluidos* (6th ed.). Pearson Education.
- Oficina Nacional de Normalización (NC).** (2013). *Nc 969:2013. tuberías presurizadas de polietileno — especificaciones para el cálculo, diseño, transportación, manipulación, almacenamiento y colocación* (tech. rep.). Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
- Toapanta-Ramos, L. F., Zapata-Cautillo, J. A., Cholango-Gavilanes, A. I., Quitiaquez, W., Nieto-Londoño, C., & Zapata-Benabithé, Z.** (2019). Estudio numérico y comparativo del efecto de turbulencia en codos y dobleces para distribución de agua sanitaria. *Facultad de Ingeniería*, 28(53), 101–118. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.10156>

Conflicto de intereses

No hay conflicto de intereses.

ORCID de los autores

Alcides J. León Méndez <https://orcid.org/0000-0002-5072-6438>