

Análisis mediante dinámica de fluidos computacional del flujo de aire que pasa por una tobera convergente-divergente

Arellano Collí Antonio Isaac, Almaraz Gómez Aarón, Salas Rojas Erick,
García Méndez José Claudio Cenobio, Plascencia Barrera Gabriel, Jaramillo Vigueras David

CIITEC-IPN, Cerrada Cecati s/n, México, D.F., México, CP 02250.

larellanoc0900@alumno.ipn.mx

Fecha de aceptación: 31 de Agosto de 2015

Fecha de publicación: 23 de Septiembre de 2015

RESUMEN

Se ha estudiado el flujo de gas en un grupo de toberas cilíndricas con placa de orificio con variaciones en tres dimensiones críticas para generar diferentes geometrías. Algunas con la misma relación de diámetros de entrada y de garganta, pero otras variando la longitud de esta última. La razón de este estudio consiste en analizar el efecto que tiene el conducto por el que viaja el aire en la dinámica del gas durante inyección para un sistema monofásico. Este análisis se realiza mediante Dinámica de Fluidos Computacional (DFC), que es una herramienta importante en el diseño de elementos de Ingeniería. Los resultados de la simulación estarán en función de los patrones de flujo y campos de velocidad. Cada variación geométrica tendrá una morfología característica del jet en relación a dichos cambios y así se puede establecer una afinidad entre todas las variables involucradas. Se encontró que la relación de diámetros y longitud de garganta de la placa de orificio tiene un efecto significativo en la cantidad de energía que se transfiere a la salida del flujo. Aunque no se modifica la forma característica del jet se puede concluir que la morfología del jet es característica propia de la tobera con la forma geométrica de la placa de orificio y no de las condiciones de flujo.

Palabras clave: DFC, tobera, geometría, jet.

ABSTRACT

It has been studied a group of cylindrical nozzles with orifice plate which has variations in dimensions in order to generate different geometries. Some of them has the same entrance and throat diameters ratio, but also they have a variation of throat length. The reason for this study is to analyze the effect of the duct geometry in the morphology of the jet when the air flow is passing through the nozzle. The analysis it is made by using Computational Fluid Dynamics (CFD), which is a very useful tool in engineering elements design. Numerical Simulation results will be in function of the flow patterns and velocity fields obtained. Each geometrical variation in the nozzle will have its own characteristic jet morphology, which would be in function of all the variations involved. It has found that diameter ratio and throat length will have an important effect in the amount of energy that it is given to the air at the outflow. The analysis shown that even when the primary form of the jet does not suffer a bigger modification in shape, so this morphology is a product of the duct geometry and not of the flow conditions.

Key words: CFD, nozzle, geometry, jet.

INTRODUCCIÓN

La inyección sumergida de gases tiene como objetivo transferir la energía en forma de Momentum, energía que posee un gas en movimiento al ser inyectado en otro fluido, esto se usa frecuentemente para diversos procesos en la industria. La inyección de este tipo puede encontrarse en fenómenos de aereación, mezclado, agitación. También pueden involucrar la promoción de reacciones químicas mediante este proceso, por ejemplo, se utilizan en el diseño de turbomaquinaria, conversión de Cobre e incluso en aire acondicionado por mencionar algunas aplicaciones. La mayor interrogante en el comportamiento de los fluidos, como los gases invisibles en condiciones estándar, es saber la distribución de presiones y patrones de flujo, por lo tanto y en el entendido que los fluidos, ya sean gases o líquidos consisten de moléculas ligadas por uniones parcialmente débiles y capaces de fluir, se pueden entonces considerar como un medio continuo para propósitos de establecer cálculos en función de sus características cuando están en movimiento (Randald V. Giles, 1962). Por lo tanto se asumirá que un fluido en movimiento cambiará siempre que se encuentre sometido a esfuerzos cortantes sin importar que tan pequeño pueda ser (Irving H. Shames, 1995).

La inyección se ha realizado tradicionalmente con toberas de formas geométricas sencillas y no han sufrido cambios significativos ni sustanciales. Su principal función es acelerar un fluido que se traslada de una condición de entrada hacia una de salida de flujo a través de esta, obligando al fluido a pasar por una reducción de sección transversal, modificando así la transferencia de momentum. En la industria son utilizados diferentes métodos de inyección y es común encontrar diferentes problemas operativos cuando se realizan, dependiendo del modo de inyección que se use para cada proceso. Comúnmente se cambian las condiciones de flujo para intentar hacer más eficiente la inyección pero una mayor cantidad de gas por unidad de tiempo no asegura una mejor inyección. Lejos de cambiar la forma operativa de estos procesos en este trabajo se pone a discusión el uso de dispositivos que modifiquen la eficiencia y la manera en la que la inyección se lleva a cabo.

El término de flujo compresible se utiliza para establecer la densidad variable de un fluido, a diferencia de un fluido incompresible donde se define que la densidad es constante en todo el medio continuo. La mayoría de los gases se comportan como fluidos con densidad variable, mientras que los líquidos se consideran como fluidos con una densidad constante, aunque todos los fluidos son compresibles en cierto rango. La variación en la densidad de un fluido se atribuye a cambios de presión cuando el fluido se dirige de un punto a otro (Frank Kreith, Stanley Berger; et. al., 1999). Por lo tanto el modo de inyección requerida definirá la forma del dispositivo para llevarla a cabo, en términos de tamaño y forma de burbuja y también de la frecuencia de burbujeo.

En general, tanto el sistema monofásico de la tobera, como el sistema bifásico de la inyección sumergida son sistemas complejos por su naturaleza, donde se pueden distinguir diferentes regímenes de inyección y burbujeo. Es por esto que se hace uso de las herramientas computacionales disponibles para hacer dicho análisis.

METODOLOGÍA

El análisis de las toberas se realiza de manera sistemática, en función de los parámetros geométricos que se tienen en tres secciones importantes. La primera condición de entrada es donde el fluido experimentará una compresión debido al cambio de sección transversal del conducto, la segunda es la garganta donde el fluido alcanza la máxima aceleración, y por último la sección final divergente donde existirá una expansión y consecuentemente un cambio en la energía en forma de Momentum, como se muestra en la *Figura 1*.



Figura 1. Tobera convergente-divergente

Una vez que se han identificado las tres secciones importantes, es necesario hacer una ligera variación a la geometría para ver cómo se comporta el fluido que pasa a través de las diferentes secciones transversales. Por lo tanto, se establecen cambios geométricos graduales que se presentan a continuación en la **Figura 2**.

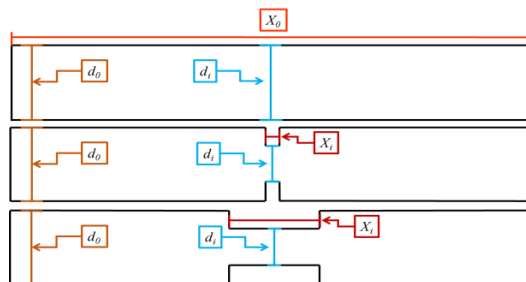


Figura 2. Parámetros geométricos

Donde d_i representa el diámetro de garganta d_o como el diámetro de entrada de la tobera, por otro lado X_i y X_o representan la longitud de garganta y longitud total de la tobera, respectivamente. El objetivo de hacer estos cambios graduales en las geometrías de las toberas es el de analizar los cambios que sufre un flujo de aire con la misma velocidad en todos los casos.

El proceso convencional de la simulación numérica involucra diferentes pasos a seguir, que de manera general se pueden clasificar como pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento. El procesamiento consiste en hacer el modelo a escala o a medida del fenómeno, es decir, el dibujo de la geometría, la discretización espacial y temporal, así como establecer las condiciones de frontera.

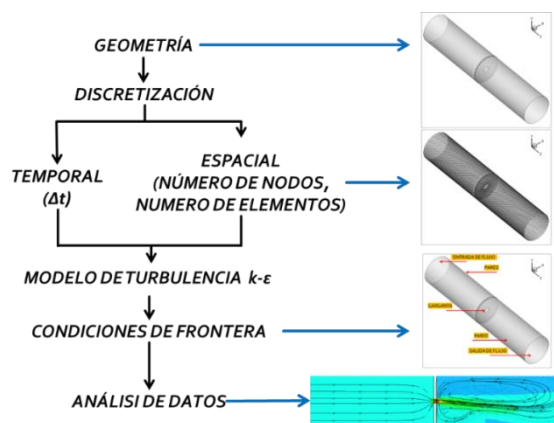


Figura 3. Proceso de simulación numérica

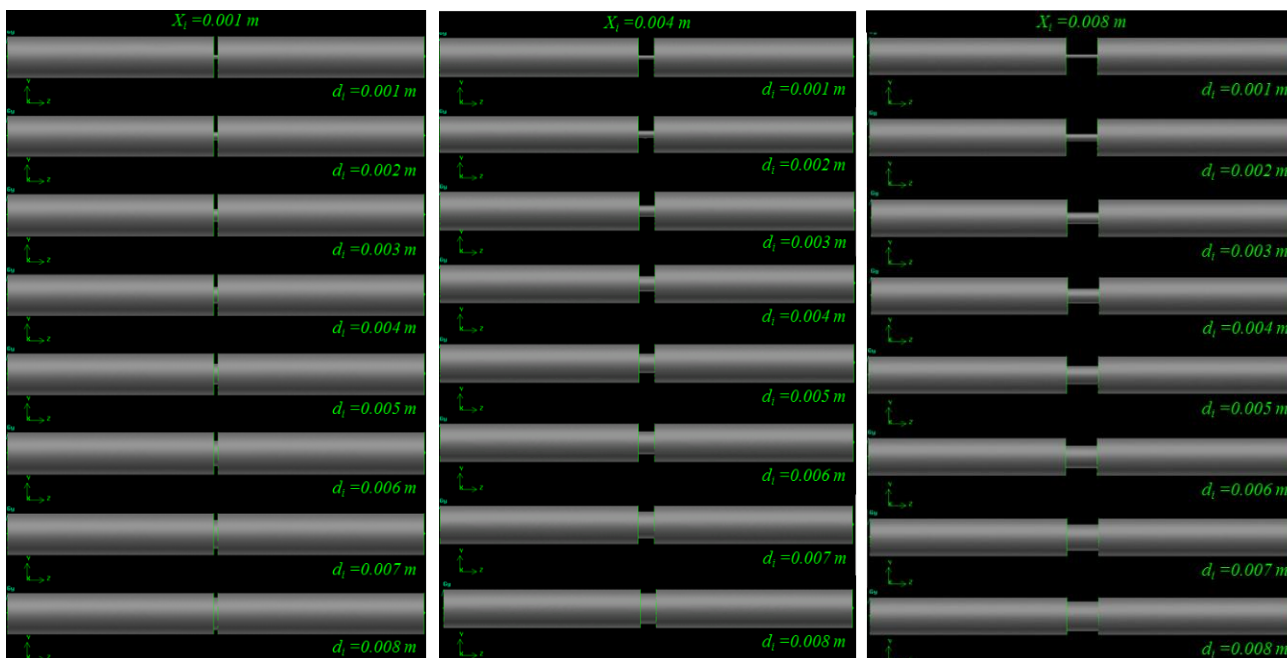


Figura 4. Variables geométricas de longitud (X_i) y amplitud de garganta (d_i)

El este caso se generaron las geometrías de cada una de las variables de longitud (X_i) y amplitud de garganta (d_i). Teniendo como resultado un total de veinticuatro posibilidades geométricas. Para establecer una razón entre el cambio de relación de diámetros de entrada, garganta y de la longitud de garganta se establecen las características de flujo, por ejemplo, se fija la velocidad de flujo por elemento de volumen, $Q = 2.49 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, para aire inyectado en condiciones estándar de presión y temperatura.

Con el objetivo de analizar el cambio en el patrón de flujo en función de las dimensiones de la geometría se propone hacer la simulación de la misma relación de diámetros pero con escalas de longitud variables, como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Dimensiones de toberas con relaciones de diámetros así como longitudes de garganta

Grupo de Toberas	d_i (m)	d_o (m)	x_i (m)	x_o (m)
1	0.001-0.008	0.01	0.001	0.011
2	0.001-0.008	0.01	0.002	0.012
3	0.001-0.008	0.01	0.003	0.013
4	0.001-0.008	0.01	0.004	0.014
5	0.001-0.008	0.01	0.005	0.015
6	0.001-0.008	0.01	0.006	0.016
7	0.001-0.008	0.01	0.007	0.017
8	0.001-0.008	0.01	0.008	0.018

Después de generar las geometrías se realiza la discretización espacial que consiste en dividir el dominio total en subdominios con formas geométricas definidas y tridimensionales. El mallado es la subdivisión del dominio computacional total en pequeños volúmenes tetraédricos donde se resolverán las ecuaciones para aproximar las soluciones numéricas con los recursos computacionales disponibles, la solución dichas ecuaciones de forma simultánea es difícil ya que existen variables de densidad, presión, temperatura y velocidad de flujo, así que se hacen diferentes consideraciones como tener un

flujo reversible isentrópico o adiabático (Frank M. White, 1999). Así mismo, se deben tomar en cuenta otros aspectos en la simulación numérica tales como el tiempo de cómputo y los recursos computacionales.

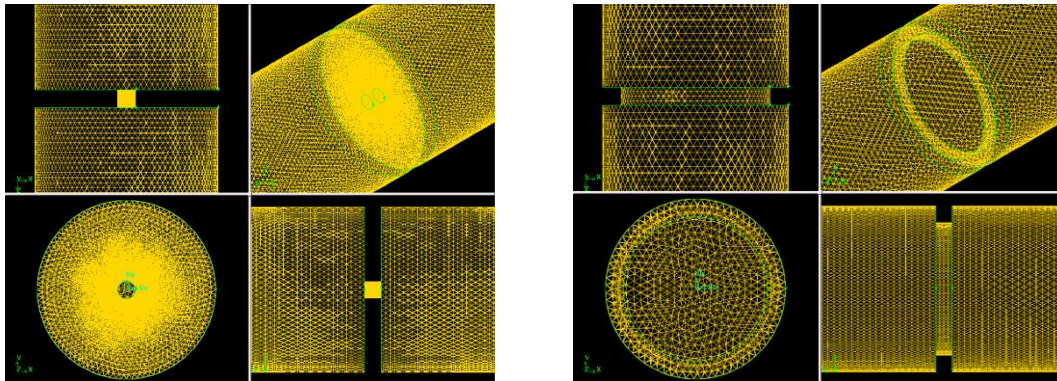


Figura 4. Discretización espacial de variables geométricas en toberas

Una vez que se genera la geometría de cada tobera existe un número de elementos tetraédricos correspondientes para cada geometría de tobera. Con la discretización del dominio se busca tener una buena aproximación al resultado sin sacrificar recursos computacionales y tiempo de procesamiento (Arellano I, 2012). El resultado del mallado de las toberas permitió procesar rápidamente la información. La simulación numérica para el caso de las toberas tomando en cuenta sólo el sistema monofásico, requiere pocos recursos computacionales en comparación a la simulación de procesos similares, como el flujo de un líquido por un conducto que descarga a un volumen de agua. Esta es una de las razones para establecer empíricamente un tamaño de paso igual a 0.1 segundos para realizar el proceso de cálculo numérico. Lo anterior aunado a que se trata de un sistema de flujo monofásico, puesto que se simula numéricamente el paso de aire por una reducción de la sección transversal de un conducto. El sistema de flujo monofásico utilizado requiere de establecer condiciones de frontera para la simulación numérica como se muestra en la **Figura 5**.

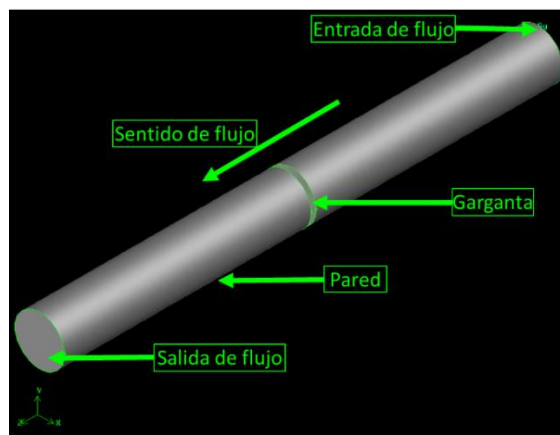


Figura 5. Condiciones de frontera para simulación numérica de toberas

Se determina un sentido de flujo y su magnitud de donde se obtendrá la velocidad de entrada para todas las condiciones geométricas. El aire está contenido en un conducto en el cual se reducirá la sección transversal, y a medida que el volumen del gas se desplaza dentro con esta condición pueden establecerse los cambios que sufrirá el aire fluyendo debido al cambio sección y la forma geométrica de las paredes del sistema. Otra condición de frontera es la salida del flujo en las paredes de la tobera

se considera que la condición de frontera es de no deslizamiento (Yunus A. Cengel & John M. Cimbala, 2006).

El fenómeno que se reproduce numéricamente tiene una condición de flujo con una perturbación en su camino que generará zonas de turbulencia. La turbulencia se puede definir como la fluctuación de presiones y velocidades dentro del flujo. La turbulencia se caracteriza por la generación aleatoria de remolinos, zonas de recirculación, así como la perturbación de las fuerzas que actúan sobre un fluido y a su vez mantienen en relativo equilibrio al sistema (Alexander J. Smits, 2003). Para seleccionar el modelo de turbulencia se debe tomar en cuenta la naturaleza del fenómeno. Para el caso de la simulación que se realizó para las toberas se utilizó el modelo de turbulencia $k - \epsilon$, donde k representa la energía cinética turbulenta y ϵ es la disipación de la energía cinética turbulenta. Este modelo de turbulencia ofrece resultados satisfactorios al modelar jets horizontales (Erwin Stein, 2004). Para determinar dichos parámetros en la entrada del sistema se utilizaron las siguientes relaciones:

$$k = 0.01 \times u_{in}^2 \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{2k^{\frac{3}{2}}}{D} \quad (2)$$

Para realizar la simulación numérica de las toberas con placa de orificio se utilizan variables y datos que corresponden a las características de flujo dentro del ducto que pasa por la reducción de sección transversal. La relación de diámetros permitirá estudiar la variación del diámetro y longitud de garganta respecto del diámetro de entrada, y el efecto que tiene dicha relación en la forma en que el flujo se comporta dentro del ducto y las pérdidas o ganancias de energía que se pueden tener a la salida de la inyección.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la simulación se presentan en forma de una secuencia de imágenes comparativas que permiten conocer los campos de velocidad y los patrones de flujo que corresponden a cada relación de diámetros y longitudes de garganta para cada tamaño de geometría modelada. Los problemas de flujo de fluidos se entienden mejor en términos de velocidades (campo de velocidad) ya que son una descripción de cómo varía la velocidad de un fluido de punto a punto en el espacio y de instante a instante en el tiempo.

Haciendo uso de las toberas con placa de orificio se muestra la evolución del jet desde su nucleación hasta el desarrollo total del flujo para diferentes tiempos que van de los 0.5 segundos hasta los 4 segundos de tiempo real, para la variación de longitudes de $X_f=0.001 \text{ m}$ a $X_f=0.008 \text{ m}$.

A continuación se muestra la evolución de un jet para diferentes longitudes de garganta manteniendo el mismo diámetro de garganta. En la simulación de la **Figura 6** que corresponde a una longitud de diámetro de $X_f=0.001 \text{ m}$ y una amplitud de garganta $d=0.001 \text{ m}$ se tiene que, la mayor velocidad alcanzada se encuentra en la garganta, teniendo una zona de máxima velocidad justo en el medio de la misma. Existen dos posibilidades cuando se tiene una restricción o cambio súbito de sección transversal en un ducto por donde pasa el flujo de un fluido. La primera es que se presente una estrangulación del flujo, y la segunda es que el movimiento del fluido llegue a alcanzar velocidades máximas al centro de la garganta.

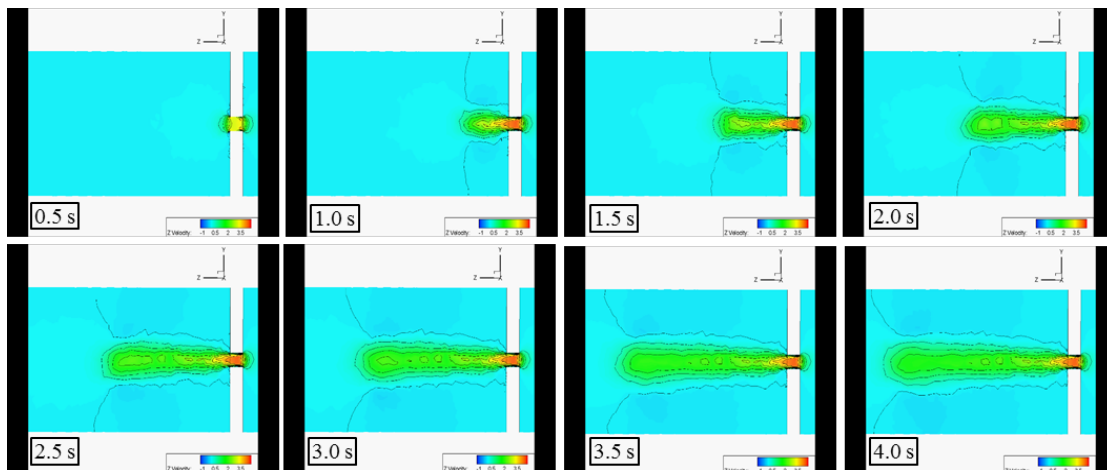


Figura 6. Evolución de un jet en tobera con diámetros $d_0=0.01$, $d_i=0.001$ y longitud de la garganta $X_i=0.001$ de 0.5 a 4 segundos

En la evolución del jet en esta geometría propuesta en la **Figura 6 y como** se muestra en los mapas de velocidad la máxima velocidad se distribuye a lo largo de la longitud de garganta que corresponde a la condición más corta. Una vez que se obtienen los mapas o campos de velocidad de la evolución de jet para la primera condición, se comparan con los que tienen una longitud mayor a la condición inicial. Para la segunda tobera se propuso un $d_i=0.001m$, $d_0=0.01m$ y una $X_i=0.004m$, se espera que en el mapa de velocidades se mantenga la máxima velocidad al centro de la garganta como se muestra en la **Figura 7**.

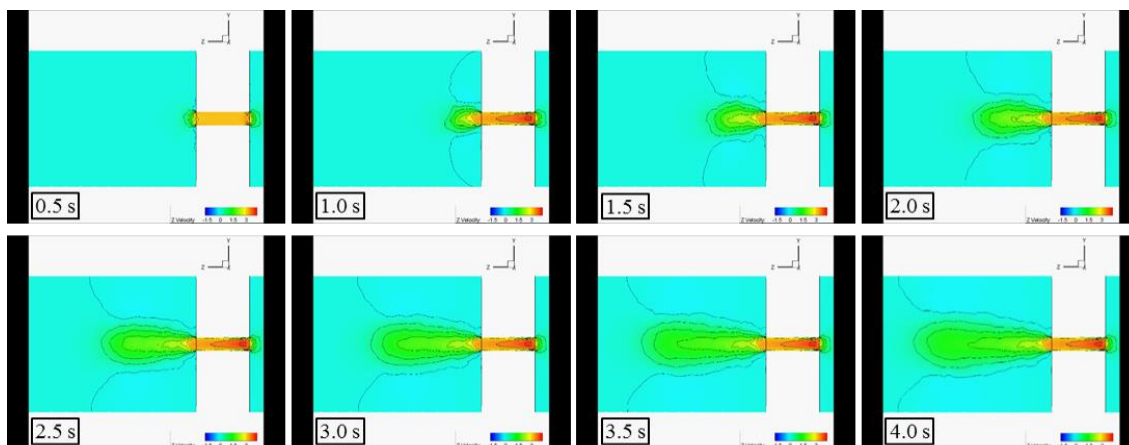


Figura 7. Evolución de un jet en tobera con diámetros $d_0=0.01$, $d_i=0.001$ y longitud de la garganta $X_i=0.004$ de 0.5 a 4 segundos

Es posible determinar la longitud de garganta si tiene un efecto en la distribución de las velocidades dentro de la misma, es decir, mientras más distancia tenga el aire de camino dentro de la restricción más posibilidades tiene el mismo fluido de perder la energía ganada debido a la restricción del área.

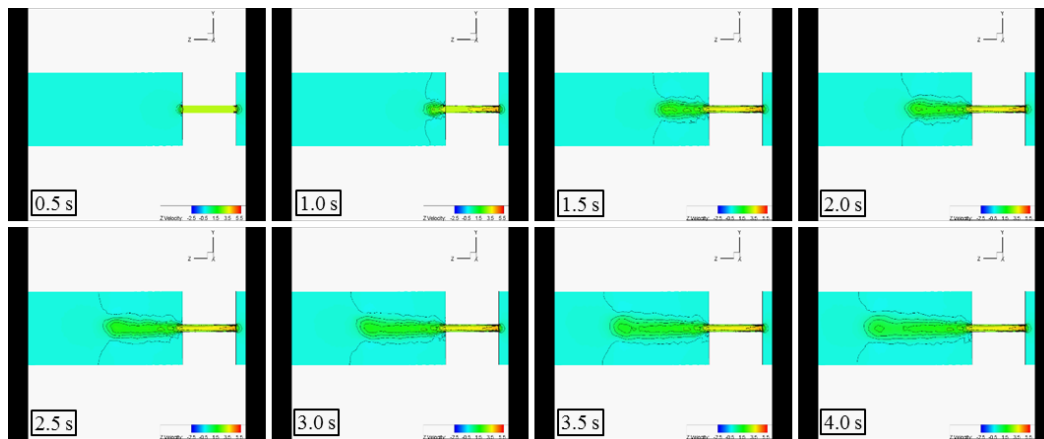


Figura 8. Evolución de un jet en tobera con diámetros $d_0=0.01$, $d_i=0.001$ y longitud de la garganta $X_i=0.008$ de 0.5 a 4 segundos

Finalmente en la última condición de simulación en cuanto a la longitud de garganta para el mismo diámetro es la mostrada en la **Figura 8**, donde se presenta un reacomodo del fluido, mientras el flujo se distribuye y recorre la garganta, se comporta como una tobera cilíndrica común y se pierde cierta cantidad de energía en forma de Momentum que sería necesaria para el posterior proceso de inyección sumergida.

CONCLUSIONES

De las simulaciones realizadas para las toberas con placa de orificio se puede establecer que el cambio geométrico de la placa de orificio influye en la cantidad de energía turbulenta que se tiene a la salida de la garganta, esto se ve reflejado en la magnitud de los remolinos y zonas de recirculación circundantes al jet. La morfología de los jets característicos de cada configuración geométrica depende entonces de la relación de diámetros, así como de la longitud de la garganta. Finalmente que se puede afirmar que la longitud del jet está íntimamente relacionada con la longitud de la garganta, sin embargo, esto no quiere decir que una longitud más grande del jet se vea reflejada en una mejor transferencia de Momentum.

REFERENCIAS

- Alexander J. Smits (2003). Mecánica de Fluidos, una Introducción Física. 1^{ra} Ed. Alfaomega,
- Arellano I. (2012). Estudio de la dinámica jet-mata con toberas convergentes-divergentes en convertidores de Cobre. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional.
- Erwin Stein (2004). Encyclopedia of Computational Mechanics, Vol. 3. 1st Ed. Wiley, p.
- F. Kreith & S. A. Berger (1999). Fluid Mechanics, Mechanical Engineering Handbook CRC Press LLC.
- Frank M. White (2012). Fluid Mechanics. 4th Ed. McGraw-Hill.
- Irving H. Shames (1995). Mecánica de fluidos. 3rd Ed. McGraw-Hill, p.3-9
- Randald V. Giles (1962). Fluid Mechanics and Hydraulics. 2nd Ed. McGraw-Hill, p.1
- Y. A. Cengel & John M. Cimbala. (2006). Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones. 8^{va} Ed. Mc Graw-Hill.