

## Modelamiento mediante la dinámica de fluidos computacional de un chorro plano libre

Ing. Miguel Alfonso Ruiz Méndez  
Ing. Santiago Vanegas Pinzón

Departamento de Ingeniería Mecánica- Universidad Nacional de Colombia  
SENA – Centro Colombo Italiano- Grupo CAD/CAM/CAE  
MEF Simulación & Análisis Ltda.  
Bogotá, Colombia

[miguelruiz@mefsimulacion.com](mailto:miguelruiz@mefsimulacion.com)  
[santiago@mefsimulacion.com](mailto:santiago@mefsimulacion.com)

### Palabras Clave

Chorro, CFD, flujo laminar, flujo turbulento, Algor.

### RESUMEN

Un chorro plano se forma por la salida de un flujo a alta velocidad por una ranura dentro de un ambiente en reposo o en movimiento lento. Mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), utilizando el módulo de fluidos del paquete comercial de elementos finitos ALGOR se realizan una serie de modelos bidimensionales para entender su dinámica.

Los resultados obtenidos son comparados con los datos teóricos y experimentales disponibles en la literatura como son presiones, velocidades y zonas que lo definen.

### NOMENCLATURA

Los símbolos utilizados en este artículo son:

$b$	espesor del chorro
$b_0$	espesor de la boca de descarga del chorro
$b_{0,5}$	valor de la coordenada $z$ en donde $v$ es $0.5V$
$l$	longitud de mezcla
$L_{NP}$	longitud del núcleo potencial
$k_b, k_v$	constantes experimentales para el espesor y la velocidad que dependen del tipo de chorro libre
$p$	presión
$Re$	número de Reynolds
$V$	velocidad en la línea central en la dirección $y$
$\vec{V}$	velocidad en representación vectorial
$v, w$	velocidades en las dirección longitudinal y transversal

$y, z$	coordenadas longitudinales y transversales con origen en la descarga del chorro
$\rho$	densidad del fluido
$\mu$	viscosidad dinámica del fluido
$\tau$	esfuerzo cortante del rozamiento turbulento

### INTRODUCCIÓN

Los chorros de alta velocidad se utilizan como mecanismo para portar y dispersar materiales y materias contaminantes, y transferir momento de un fluido a un sólido. Su estudio tiene interés pedagógico ya que su estructura turbulenta es sencilla si se le compara con los flujos turbulentos influenciados por la presencia de paredes cercanas. En la industria permite el desarrollo de boquillas e inyectores que se utilizan en diversos procesos.

La CFD se constituye en este caso en una herramienta valiosa para el análisis y estudio de los chorros planos, pues presenta varias ventajas sobre la experimentación real. Los fenómenos se pueden visualizar con claridad y detallar fácilmente, la variación de las condiciones de experimentación es sencilla y los costos computacionales resultan ser menores que los costos de instrumentación en un laboratorio que brinde la misma precisión.

En este artículo, los resultados del modelamiento en el modulo de fluidos de Algor de un chorro plano bidimensional turbulento se comparan con los datos teóricos y experimentales existentes en la literatura, de tal forma que es posible verificar para esta condición el funcionamiento del paquete.

## CHORRO PLANO LIBRE

Un chorro plano libre, clasificado dentro de la categoría de los flujos libres o flujos que no circulan entre paredes rígidas, se forma por un flujo que sale de un orificio dentro de un ambiente en reposo o en movimiento lento.

Los flujos libres se pueden trabajar bajo las ecuaciones de capa límite, ya que presentan un pequeño desplazamiento en la dirección transversal a medida que se avanza en la dirección longitudinal y un gran gradiente de velocidad en la dirección transversal. Las ecuaciones diferenciales para el movimiento en el plano son:

- Ecuación de momento:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial z} \quad (1)$$

- Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

- Esfuerzo cortante inducido por intercambio de momento en la turbulencia:

$$t = r l^2 \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3)$$

Schlichting (1972) define las leyes de potencias para el aumento de la zona de mezcla o espesor del flujo y la disminución de la velocidad con la distancia en el caso de un chorro plano libre, con las cuales es posible solucionar el grupo de Ec. (1) a (3), como se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Leyes de potencias para la expansión y la disminución de la velocidad con la distancia en "y" en los problemas de chorro libre plano**

Laminar		Turbulento	
Espesor Del Chorro (b)	Velocidad Central (V)	Espesor del chorro (b)	Velocidad Central (V)
$y^{2/3}$	$y^{-1/3}$	y	$y^{-1/2}$

### Chorro plano laminar

Por efecto del rozamiento, el chorro arrastra consigo una parte del fluido que lo rodea, de tal forma que se

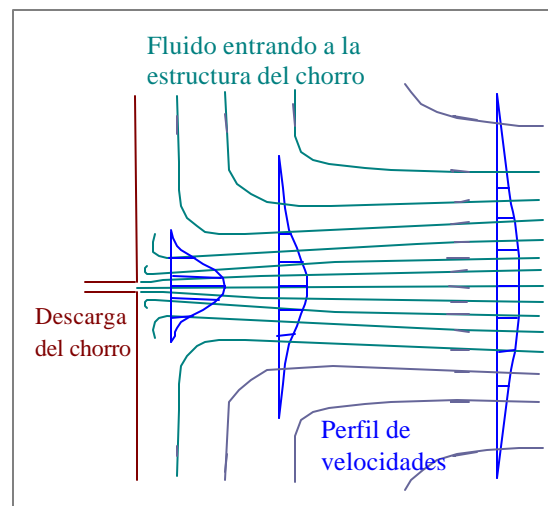
produce una configuración de líneas de corriente como se ilustra en la Fig. 1. El crecimiento del espesor en chorro plano corriente abajo se puede definir como:

$$b = k_b \sqrt[3]{y^2} \quad (4)$$

Y su reducción de velocidad como:

$$V = k_v \frac{1}{\sqrt[3]{y}} \quad (5)$$

**Figura 1. Configuración de las líneas de corriente en un chorro laminar .**



### Chorro plano turbulento

El flujo de un chorro plano turbulento se puede dividir en tres grandes regiones, como se ve en la Fig.2:

1. La zona de establecimiento, formada por un núcleo potencial en donde el gradiente de velocidad no es grande.
2. La región de mezcla o flujo establecido en donde el fenómeno de intercambio o difusión es predominante, se tiene una distribución de velocidades gaussianas y ausencia de núcleo potencial.
3. Zona Self-similar o de distribución de velocidad propia.

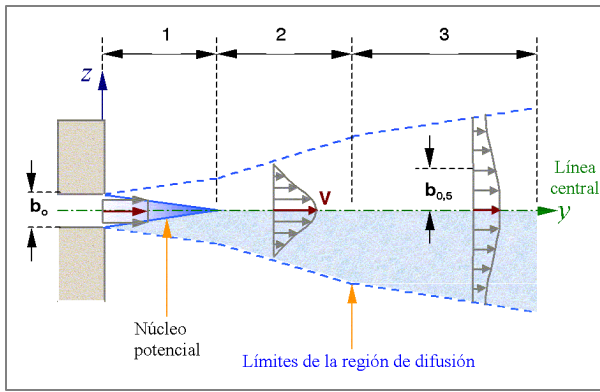


Figura 2. Partes del chorro plano turbulento.

Desde el inicio de la descarga del flujo, los vórtices o remolinos se presentan en las zonas de alta fricción donde se comienza a dar un proceso de mezcla que se efectúa hacia dentro y hacia fuera de los límites del chorro. La mezcla en los límites laterales produce la aceleración del fluido en reposo en el cual se descarga el chorro y una desaceleración del flujo del chorro. Como resultado de éste intercambio la zona del núcleo potencial decrece en su espesor mientras que el espesor total del chorro aumenta respecto al ancho de la descarga. El final de la zona de establecimiento ocurre cuando la región de mezcla lateral ha penetrado la línea central del chorro, eliminando la zona del núcleo potencial. Hughes y Brighton (1970) referencian que esto ocurre aproximadamente entre cuatro y seis veces el ancho de la boquilla de descarga corriente abajo ( $L_{NP}$  de 4 a 6).

El incremento del espesor del chorro se puede considerar como:

$$b = k_b y \quad (6)$$

Para el chorro plano turbulento se tiene que la velocidad central  $V$  es:

$$V = k_v \frac{1}{\sqrt{y}} \quad (7)$$

La Fig. 3 muestra un perfil de velocidades típico al variar la distancia a la descarga que Foerthman (1934) desarrollo con datos de observaciones experimentales en donde  $y$  es la distancia desde la descarga del chorro.

Los perfiles realizados con los datos de las cinco últimas secciones del chorro presentan una forma propia (self-similar) y es posible realizar una gráfica adimensional como la de Fig. 4, del valor  $v/V_{max}$  contra  $Z/b_{0,5}$  que permite visualizar los perfiles de velocidad después del núcleo potencial. Foerthman (1934) la compara adicionalmente con la curva teórica propuesta por Tollmien (1926).

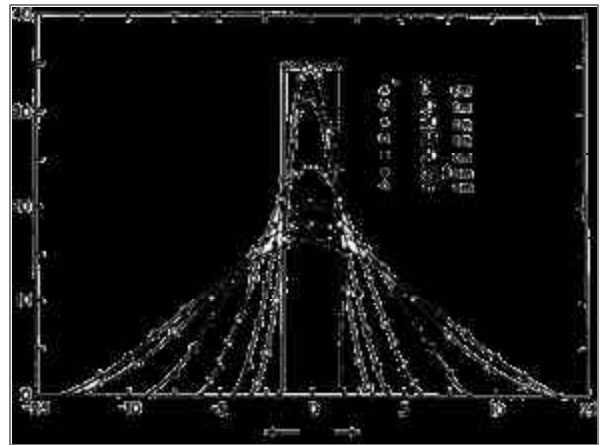


Figura 3. Perfil de velocidades en un chorro plano libre para diferentes distancias de la ranura según datos de Foerthman (1934)

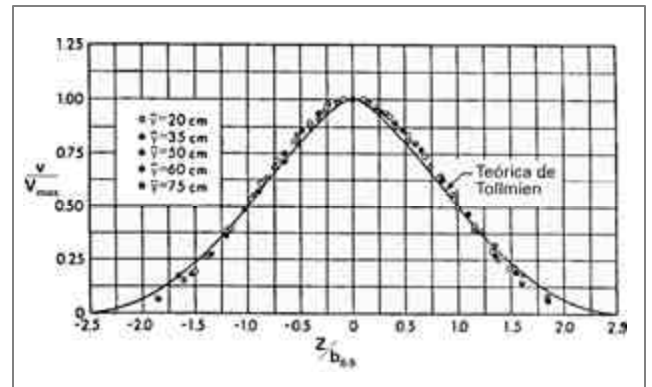


Figura 4. Distribución adimensional de velocidades en un chorro plano libre bidimensional según datos experimentales de Foerthman (1934) y teóricos de Tollmien (1926)

## MODELAMIENTO EN LA CFD DEL CHORRO PLANO TURBULENTO

Por medio de la CFD es posible llegar a la solución de las ecuaciones que se aplican a la dinámica de un chorro tanto para flujo estable como transitorio. Al obtener el perfil de velocidades y la distribución de la presión del chorro, se pueden especificar claramente las zonas que conforman su estructura.

Las ecuaciones para modelar el comportamiento del flujo del chorro en su forma vectorial son:

- Ecuación de momento:

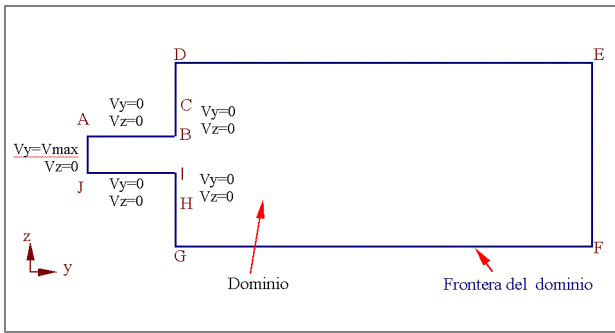
$$\mathbf{r} \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla p + \mathbf{m} \nabla^2 \vec{V} \quad (8)$$

- Ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (9)$$

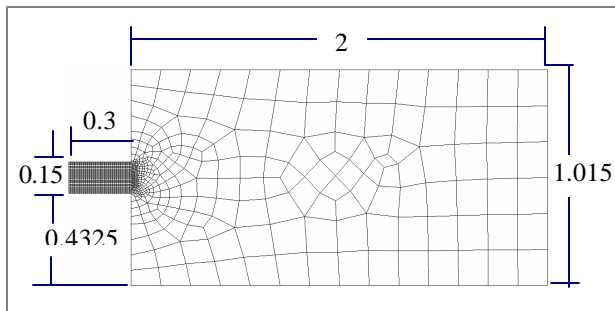
Como en cualquier análisis de CFD es necesario definir un dominio computacional en el cual interactúe el fluido. En dicho dominio se realiza el enmallado que permitirá que las ecuaciones sean solucionables mediante los métodos computacionales y los algoritmos de solución implementados en el programa.

En el dominio se colocan las condiciones iniciales del análisis como lo son las restricciones de las paredes del chorro, y las condiciones de velocidad de entrada en la descarga. Para este modelo, tal como se observa en la Fig. 5, se restringen los nodos de las líneas AB, BC, HI y IJ con valor de cero para simular las paredes que dirigen el chorro. La línea AJ modela la sección transversal del chorro y por lo tanto en sus nodos se coloca el valor de la velocidad del túnel de viento. En las líneas restantes no se aplican valores de velocidad ya que se desea que el flujo se desarrolle libremente.



**Figura 5. Dominio computacional para el modelamiento del chorro en la CFD**

El enmallado es construido automáticamente por el programa de enmallado de Algor, refinando en las zonas de mayor interés como lo son la descarga del chorro y la zona de establecimiento. De él se definen 1389 nodos, 1318 elementos y 2588 ecuaciones a resolver. En la Fig. 6 se observa el dominio discretizado.



**Figura 6. Enmallado del dominio computacional. Medidas en m.**

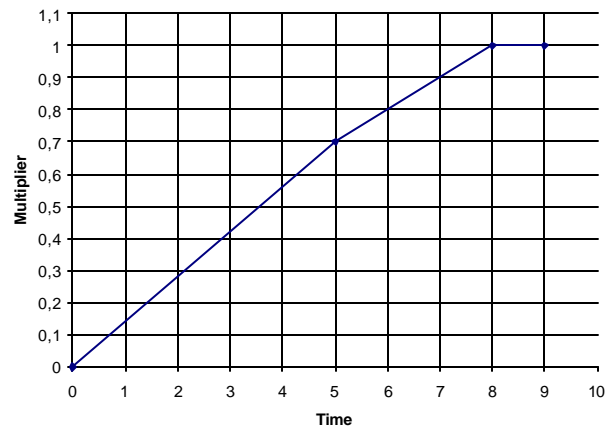
Las condiciones del análisis son las siguientes:

**Tabla 2. Condiciones definidas para el modelo del chorro**

Tipo de análisis	Inestable
Tipo de elemento	2D
Tipo de geometría	Planar
Forma del elemento	Quadrilateral
Número de elementos	1318
Longitud característica (Espesor del chorro)	0.15 m
Densidad (aire en Bogotá)	0.9375 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad dinámica (aire en Bogotá)	0.000017034 Ns/m <sup>2</sup>
Velocidad de entrada del chorro	12.7 m/seg
Número de Reynolds	104845

El sistema de unidades escogido es el internacional. Ya que el modelo representa un fluido a un número de Reynolds elevado ( $Re > 5000$ ), que demora en alcanzar el estado estable y por lo tanto está variando sus resultados en el tiempo, se utiliza en el paquete el procesador de flujo no estable (unsteady fluid flow).

Para que el código pueda llegar gradualmente a la solución es posible definir una curva de carga, la cual describirá como función del tiempo el perfil de velocidades en los nodos que tengan definidas condiciones de frontera. Sus valores inciden notablemente en la convergencia y estabilidad del análisis. Ya que el análisis de CFD es un proceso no lineal e iterativo las cargas necesitan generalmente comenzar con multiplicadores muy bajos y subir progresivamente al valor final. La Fig. 7 muestra la curva que se define para este análisis, con tiempo de análisis de 9 segundos y un total de 450 pasos.

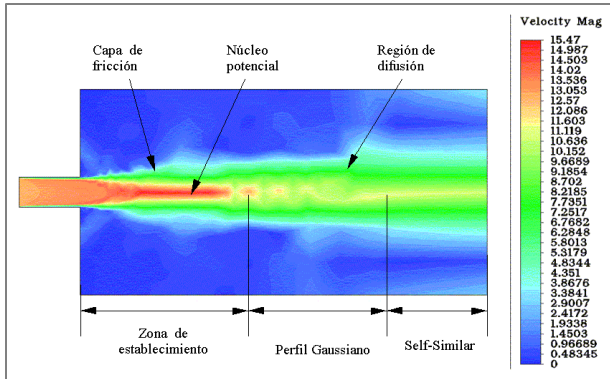


**Figura 7. Curva de carga definida para el análisis del chorro plano libre**

Algor utiliza el modelo de turbulencia de viscosidad basada en remolinos algebraicos (algebraic eddy viscosity) para facilitar la solución de las ecuaciones de Navier Stokes. Para este análisis se activa la opción que permite la utilización de este modelo en la solución de las matrices.

El paquete funcionando en un equipo Pentium III de 900 Mhz, y utilizando 130 MB de memoria RAM, demora 334 minutos en llegar a la solución final.

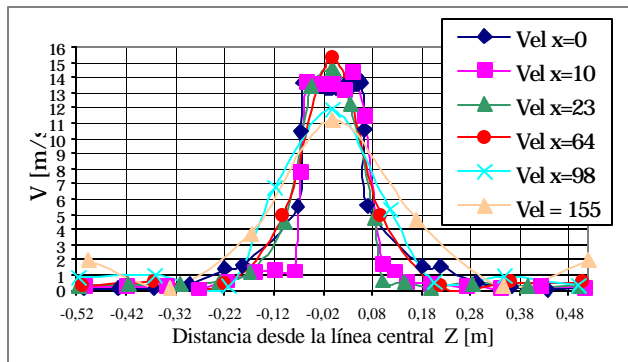
Los resultados obtenidos permiten inferir una estructura del chorro similar a la que define teóricamente. En la Fig. 8 se pueden observar claramente las zonas del chorro. Las zonas en color rojo corresponden a las velocidades más altas y las azules a las zonas más bajas.



**Figura 8. Identificación de las zonas en el chorro modelado por CFD**

Como se observa el valor de la velocidad central en la zona de establecimiento es casi constante (color rojo), con un valor máximo de velocidad de 15.47 m/s y un valor mínimo de 13.34 m/s. Midiendo sobre la respuesta final la zona de establecimiento resulta ser de 0.7477 m, por lo que el valor  $L_{NP}$  resulta ser de 4.9 veces el espesor del chorro.

Se obtiene como valor promedio para el ángulo que delimita la región de difusión entre el fluido en reposo y la zona del chorro  $7.4^\circ$ .



**Figura 9. Perfiles de velocidades en el chorro plano modelado por CFD**

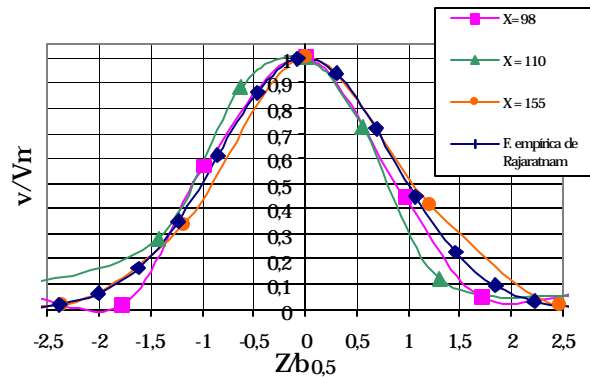
Por medio de la interfase de post-proceso del paquete de CFD, se obtienen los valores de velocidad en cada nodo a diferentes secciones transversales del chorro, y a

través de una hoja de cálculo se grafican para obtener los perfiles de velocidades a medida en que se aleja de la descarga del chorro.

En la Fig. 9 se observan las curvas a una distancia de 0, 10, 23, 64, 98, 155 cm de la descarga del chorro, graficándose de tal forma que la velocidad de la línea central se encuentre en el punto cero, en la mitad del eje horizontal de la gráfica.

Se observa la semejanza con las curvas obtenidas por Foerthman (1934), ya que se presenta un perfil muy simétrico justo en la descarga del chorro y las curvas que se encuentran dentro de la zona de establecimiento son más esbeltas que las que se encuentran en la región del flujo establecido.

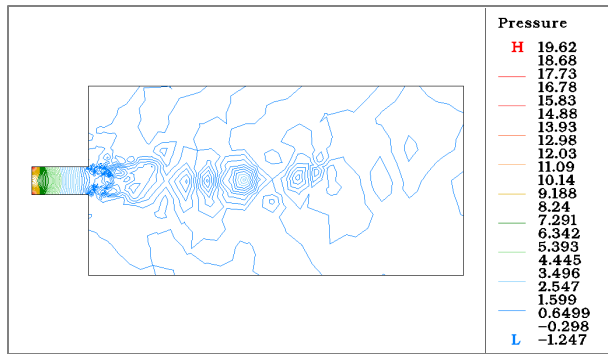
Ya que las curvas de la región de flujo establecido ( $y=98$ ,  $y=110$ ,  $y=155$ ) presentan una forma similar, se puede decir que a partir de una distancia horizontal medida desde la descarga del chorro igual a 7 veces el espesor del mismo se presenta la región en donde el perfil de velocidades es muy similar (Fig. 10).



**Figura 10. Distribución adimensional de velocidades en un chorro plano libre bidimensional modelado en CFD y comparación con la curva teórica de Rajaratnam (1986).**

En las Figs. 9 y 10 se observa como el valor de la velocidad disminuye en la medida que se aleja de la línea central. El perfil de una sección transversal lejana a la descarga es más achatado, indicando que la velocidad central ha disminuido. Según la Fig. 9 la curva de la fórmula empírica de Rajaratnam (1986) muestra una forma similar a la de la curva que se realizó a partir de los datos obtenidos mediante CFD.

La visualización por contornos de colores de los resultados de presiones demuestra que en las zonas características del chorro está se mantiene relativamente constante en valores cercanos a 0, representados en la escala de colores en azul (Fig. 11).



**Figura 11. Visualización por contornos de presiones de los resultados de presión del modelo del chorro plano libre bidimensional**

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al modelar en el paquete de elementos finitos Algor la estructura de un chorro plano bidimensional turbulento, a pesar de la baja cantidad de elementos utilizados, están muy cerca de la estructura y resultados que se referencian teóricamente.

## REFERENCIAS

Albertson, M. L. et. Al., 1950, "Difusion of Sumerged Jets", American Society of Civil Engineers, New York, pp. 639-697.

Algor, 2000, "Fluid Flow Reference Division", p. 40..

Chandrupatla, T. R., and Belegundu, A. D., 1997, "Introduction to Finite Elements in Engineering", Prentice Hall, New Jersey, p. 497.

Chung, T. J., 1978, "Finite element analysis in fluid dynamics.", McGraw Hill, New York, p. 378.

Foerthman, E., 1934, "Turbulent Jet Expansion", Washington, NACA TM-789, p. 18.

Fukurawa, T., and Nakamura, Y. , 2000, "Numerical Simulation of Sound Emission from Supersonic Jet", <http://fluid.nuae.nagoya-u.ac.jp/research/jet3Dcal/index.html>

González, U, and Holtz, J. 1999, "Simulation of Fluid-Solid Interaction Using the Mesh Adaptive Subgrid Scale Turbulence Model", [http://algor.com/news\\_pub/teach\\_white\\_papers/fluid\\_interation](http://algor.com/news_pub/teach_white_papers/fluid_interation)

Hughes, W. F., and Brighton, J. A., 1970, "Teoría y Problemas de Dinámica de Fluidos", Panamá, McGraw-Hill, p. 259.

Kenneth, H., 1995, "The Finite Element Method for Engineers", John Wiley and Sons, 550 p.

Liburdy, J. A., 1986, "Turbulent Jets", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol. 8, Cap. 8, Gulf Publishing Company, Houston.

Marcatos, N. C., 1986, "Computer simulation techniques for turbulent flows", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol. 6, Cap. 31, Gulf Publishing Company, Houston.

Pai, S., 1954, "Fluid Dynamics of Jets", Van Nostrand Company, Toronto, p. 227.

Rajaratman, N., 1986, Turbulent Mixing and Difusion Jets", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol. 2, Cap. 15, Gulf Publishing Company, Houston.

Reynolds, A. J., 1974, "Turbulent Flows in Engineering", London, John Wiley & Sons, p. 462.

Schlichting, H., 1972, "Teoría de Capa Límite", Bilbao, Editorial Urmo, p. 774.

Slater, J. W, 1998., "Supersonic Axisymmetric Jet Flow: Study #1", <http://www.asm-usa.com/pab3d/validation/axinoz/axinoz01/axinoz01.html>

Vanegas, S., Ruiz , M., and , Meluk, G., 2001, "Aplicación de los Principios Aerodinámicos y Mecánica de Fluidos a una Geometría Toroidal para Vuelo Vertical", Bogotá, Tesis Universidad Nacional de Colombia, p. 300.

Zienkiewicz, O. C., 1995, "El Método de los Elementos Finitos", McGraw Hill, p. 865.