

“ANÁLISIS CUANTITATIVO DE COEFICIENTES DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN USANDO EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS”

Autor: **Rosso Santiago**. Legajo UTN 7684.

Contacto: sanr_22@hotmail.com - UTN FRVM – Av. Universidad 450 Villa María. Cba.
Tutor: Ing. Huber G. Fernández – Depto. Ing. Mecánica. Laboratorio mecánica de fluidos.

Palabras claves

Coeficiente de arrastre; sustentación; elementos finitos; aerodinámica.

Resumen

Las características aerodinámicas de los cuerpos como así también el comportamiento de un determinado fluido alrededor de aquellos, pueden estudiarse ya sea por vía experimental con el uso de un túnel de viento de laboratorio adaptado a las condiciones que se necesitan imponer, como hace años se viene realizando, también existe una alternativa que es el uso de herramientas informáticas que permiten modelar objetos y simular un flujo fluido bajo determinadas condiciones, o con ambas herramientas de manera conjunta. El uso integrado de estas permite realizar estudios más taxativos y complejos reduciendo tiempos y economizando los costos de los proyectos.

El presente trabajo tiene como cometido centrar el estudio en los coeficientes de arrastre y de sustentación) que manifiestan diferentes objetos (perfiles alares, cilindro, esfera, etc.), con el uso de una herramienta informática, “Solid Works Flow Simulation 2010”, que posibilita la generación de modelos y la simulación del flujo fluido que se produce en sus alrededores para determinadas condiciones impuestas. Dicho software cimienta su funcionamiento en el método de los elementos finitos “MEF” y posibilita conocer diferentes variables aerodinámicas útiles.

Una vez determinadas las características aerodinámicas de los cuerpos (se propone generar datos con el propósito de contrastar los valores obtenidos por tales vías informáticas con aquellos extraídos de la bibliografía y de publicaciones existentes, originadas en sendos trabajos de laboratorio u obtenidos con el uso de herramientas empíricas, intentando de este modo demostrar las aptitudes del método informático utilizado.

Introducción

Conocer y comprender el comportamiento aerodinámico de diferentes objetos es de suma importancia, ya que la interacción que se manifiesta entre el aire, u otro fluido en cuestión y los objetos o cuerpos, genera fuerzas que se materializan en estos últimos, y eventualmente pueden producir efectos dinámicos diversos, como lo es la resistencia aerodinámica al avance que es la causa principal del consumo de combustible en distinto tipo de vehículos, o como el que se manifiesta en el vuelo de los aviones que se debe a una fuerza, denominada fuerza de sustentación, que en sucintas palabras, es la resultante de una diferencia de presión aplicada sobre un área definida, entre las superficies superior (extradós) e inferior (intradós) del ala de un aeroplano.

Como se explicó con anterioridad, la importancia de este tipo de trabajos radica en utilizar un software de cálculo que permite generar modelos y simular las características de flujo que se generan en sus alrededores; taxativamente los objetivos de este en particular son: determinar la variación del coeficiente aerodinámico de arrastre de un cilindro en función del número de Reynolds; analizar un perfil de ala NACA 0012 (NACA - National Advisory Committee of Aeronautics), con el objeto de conocer, para un determinado número de Reynolds, la variación tanto del coeficiente aerodinámico de arrastre como el de sustentación en función del ángulo de

incidencia del perfil alar. En todos los casos, se analizan las fuerzas creadas solo por los gradientes de presión y se hace caso omiso de las fuerzas de fricción.

Desarrollo

Con el objeto de explicar de manera ordenada la secuencia que se necesita para generar cada una de las simulaciones, se proponen los siguientes pasos: Definición del modelo a estudiar; Tipo de flujo y fluido; Imposición de las condiciones iniciales; Mallado del dominio; Análisis de resultados de la simulación.

Definición del modelo a estudiar

En esta etapa se definen cada uno de los modelos que luego se utilizan en etapas posteriores para la simulación. Las figura N°1 y N°2, muestran las dimensiones características de cada uno de ellos. Como se puede observar, todos ellos son modelos tridimensionales. El perfil de ala NACA 0012, se trazó bajo las coordenadas que se explicitan en bibliografía específica [1].

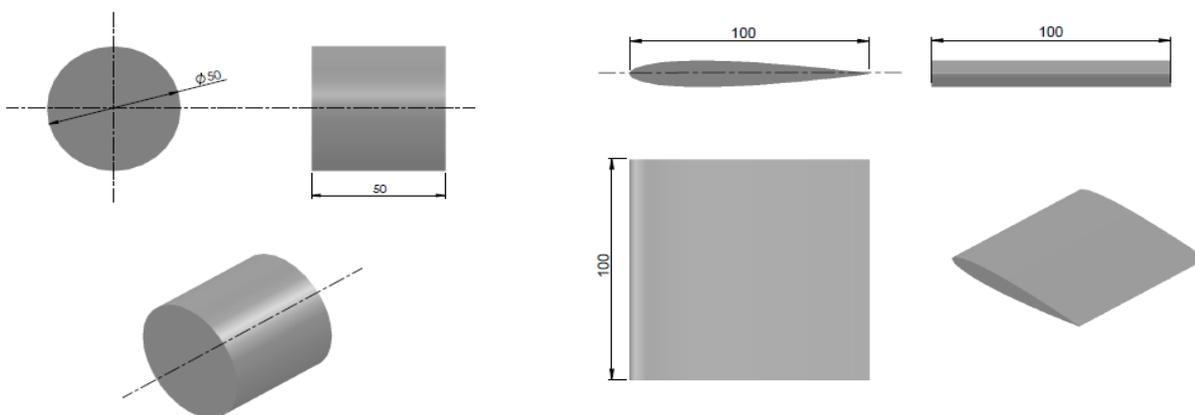


Figura N°1–Modelo cilíndrico para simulación

Figura N°2–Modelo NACA 0012 para simulación

Tipo de flujo y de fluido

En lo pertinente al tipo de flujo fluido que se desarrolla en los alrededores de los modelos es necesario aclarar que, para todos los casos, se supone que el fluido que interactúa con los objetos es aire y sus características (densidad ρ y viscosidad dinámica μ), se toman a presión atmosférica y temperatura ambiente como condiciones iniciales (laboratorio), luego el software autoajusta el rango para las condiciones geométricas y de velocidad impuestas para los perfiles. El análisis se realiza en régimen estacionario para todas las simulaciones. Se considera flujo subsónico e incompresible. La hipotética incompresibilidad del aire, que se adopta con el objeto de evitar considerar la variación de la densidad con la presión, es justificable ya que, se puede considerar un flujo incompresible hasta diferencias de presión que no excedan valores próximos al metro de columna de agua, esto es 0.1 atmósferas [2],[3],[4]. Las propiedades iniciales del aire (laboratorio) adoptadas para el cálculo son: $\rho=1.204 \text{ Kg/m}^3$; $\mu=1.825 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.s}$.

Imposición de condiciones iniciales

Para cada una de las simulaciones se supone que el fluido ingresa al dominio computacional con una velocidad, denominada velocidad de flujo no perturbado, que depende del número de Reynolds para cada simulación y de la forma del objeto que se desea modelar. Como se expresó en la parte introductoria del trabajo, una de las finalidades que se persigue es generar datos cuyos valores puedan ser reproducidos con el equipamiento del cual se dispone en el laboratorio de la Universidad Tecnológica Nacional FRVM; por tal propósito, las velocidades de flujo no perturbado deben corresponder a valores exequibles y para este caso, con fines didácticos.

Por definición, el número de Reynolds es [2],[5],[6]:

$$Re = \frac{\rho * V * L}{\mu} \quad (1)$$

Donde los términos representan: μ = Viscosidad dinámica del fluido, ρ = Densidad del fluido, V = Velocidad de flujo y L = Dimensión característica del modelo.

Como condición para cada simulación, el software exige una expresión de la velocidad de entrada al dominio computacional. Para el caso particular del modelo cilíndrico, dicha velocidad es variable en cada simulación ya que, es variable el número de Reynolds. Por lo tanto, la ecuación (1) para el modelo cilíndrico es [2],[5],[6]:

$$V = \frac{\mu * Re}{\rho * D} \quad (2)$$

En la ecuación (2), D es el diámetro del cilindro, que es su dimensión característica; es menester aclarar que para grandes valores del número de Reynolds, se hace necesario incrementar el diámetro del cilindro ya que, de no hacerlo, la velocidad alcanza valores que desvirtúan la suposición de flujo incompresible. Para el perfil alar, la ecuación es análoga a la anterior, la diferencia radica en sustituir el diámetro por la longitud de la cuerda de cada perfil.

Como la finalidad del presente trabajo es evaluar coeficientes aerodinámicos, tanto de arrastre como de sustentación, se hace uso de las aptitudes del software para encontrar de manera directa dichos valores sin la necesidad de realizar cálculos manuales. En otras palabras, el software permite cargar relaciones matemáticas entre variables y una vez ejecutada la simulación, encuentra valores numéricos para dichas variables. En este caso, las ecuaciones que se necesitan cargar son el coeficiente de arrastre C_d y el coeficiente de sustentación C_L , o sea [2],[5],[6]:

$$C_d = \frac{F_a}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A_d} ; C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A_L}$$

Donde los términos representan: F_a = Fuerza de arrastre, F_L = Fuerza de sustentación, ρ = Densidad del fluido involucrado, V = Velocidad de flujo no perturbado, A_d = Área expuesta a la fuerza de arrastre, A_L = Área expuesta a la fuerza de sustentación.

Mallado del dominio computacional.

Para ejecutar cada una de las simulaciones, es menester generar el mallado del dominio computacional. Con el objeto de reducir tiempos de simulación, solo se analizan modelos bidimensionales es decir, se hace caso omiso de efectos tridimensionales que puedan manifestarse en los extremos de cada modelo. Para todas las simulaciones, las dimensiones del dominio computacional, se adoptan en función de las dimensiones del modelo a estudiar [7], [8], [9], [10].

La malla se generó utilizando un tipo de elementos finitos bidimensionales cuadriláteros (rectángulos) con sesgo cero, la interpolación fue de segundo orden, resultando finalmente 2624 elementos de malla. La densidad del mallado se aumentó en las regiones próximas a la periferia de los modelos de estudio (con el objeto de lograr valores más precisos) y se redujo en las regiones alejadas de los mismos, donde el flujo no es demasiado perturbado por el modelo de estudio.

Análisis de los resultados obtenidos por simulación para el modelo cilíndrico.

Para el modelo cilíndrico se obtiene la variación del coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds. Con el objeto de contar con una buena cantidad de valores y así confeccionar una curva, se han realizado diez simulaciones con variaciones del valor del número de Reynolds desde 1, que supone un flujo enteramente laminar, a 1.000.000, lo que manifiesta un flujo turbulento enteramente desarrollado.

La tabla N°1 muestra los valores del coeficiente de arrastre del modelo cilíndrico, como así también la fuerza de arrastre, para diferentes valores del número de Reynolds, extraídos desde la fuente informática.

Tabla N°1 – Coeficientes y fuerzas de arrastre para cilindro ϕ 50 mm

CILINDRO ϕ 50 mm			CILINDRO ϕ 50 mm		
Re	Cd	Fa [N]	Re	Cd	Fa [N]
1	12,312384	3,41E-10	50000	1,041570312	0,072032394
500	1,191112461	8,23744E-06	100000	0,720434633	0,199293821
1000	1,037913518	2,87E-05	250000	0,592774404	1,024869835
5000	0,789658054	0,000546108	500000	0,261423861	1,807941958
10000	1,228418859	0,003398175	1000000	0,269502392	1,97228683

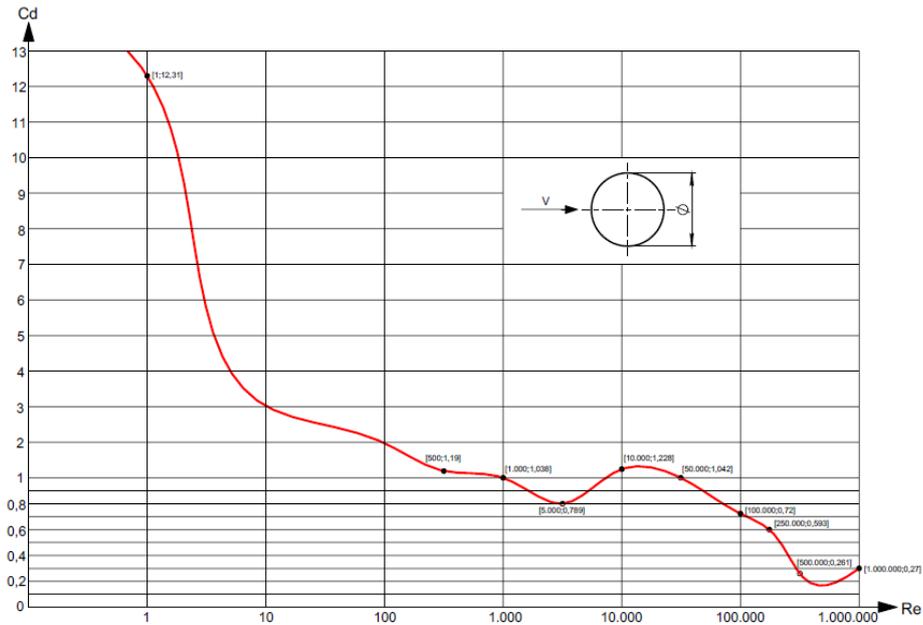


Figura N°3 – Variación del coeficiente aerodinámico de arrastre **Cd** vs. **Re** para cilindro $\phi 50$

Los valores del coeficiente de arrastre de la tabla N°1 se han graficado en la figura N°3, en la cual se manifiesta claramente la variación de este último con el número de Reynolds. Como se observa, el coeficiente de arrastre toma valores importantes para flujos laminares, luego decae y entre 500 y 50.000 de Re permanece prácticamente constante con un coeficiente de aproximadamente $C_d=1$; Luego decrece nuevamente y se manifiesta un codo característico aproximadamente para $Re = 750.000$. Si se comparan estos valores con los expuestos por bibliografías especializadas [2], [5], [11], se encuentran resultados muy compatibles. Las eventuales diferencias que pudieran existir entre estos valores y los obtenidos de manera empírica en túneles de viento, radican en efectos de borde que se producen en los extremos de los modelos y no se consideran en las simulaciones computarizadas en dos dimensiones como la que se ha ejecutado aquí.

A continuación se pueden visualizar un par de gráficos. El primero de ellos (figura 4) muestra resultados obtenidos experimentalmente, extraídos de la fuente citada. Luego se puede observar una gráfica (figura 5) en la cual se han incluido una familia de valores obtenidas aplicando el software mencionado además de la muestra equivalente extraída de la figura cinco con el objetivo de validar los resultados obtenidos mediante MEF respecto de aquellos que proporciona la bibliografía utilizada.

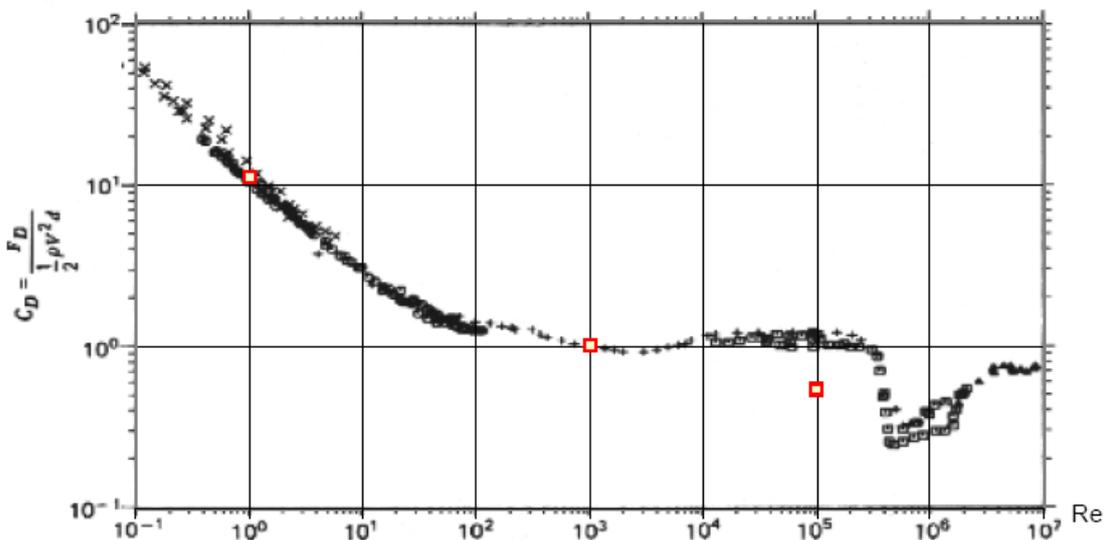


Figura N°4 [11] – Variación del coef. aerodinámico de arrastre **Cd** vs. **Re** para cilindro $\phi 50$.

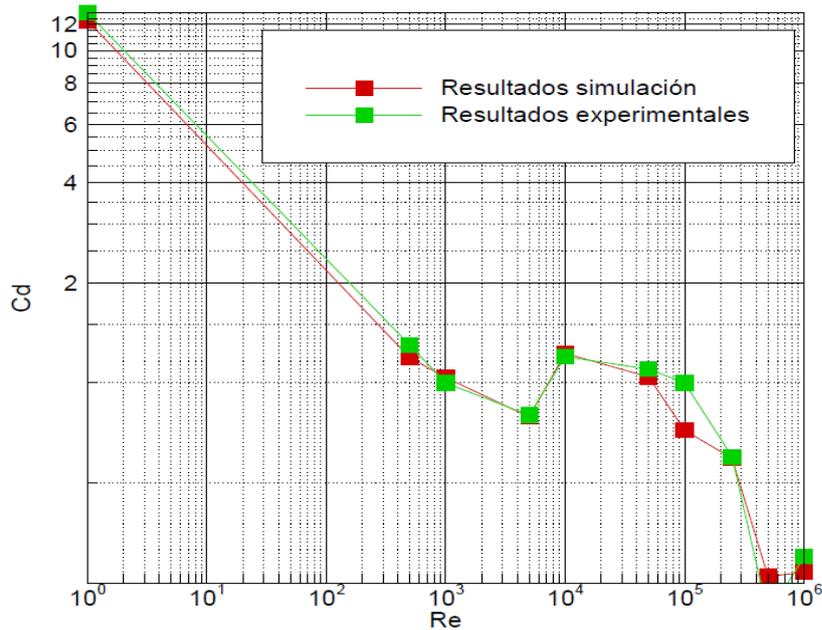


Figura N°5 – Variación del coeficiente de aerodinámico de arrastre **Cd** vs número de Reynolds **Re** para cilindro $\phi 50$, para valores obtenidos por simulación frente a los experimentales

Análisis de los resultados obtenidos por simulación para el perfil de ala NACA 0012.

Este perfil alar se caracteriza por ser simétrico, lo que implica que no existe sustentación cuando el ángulo de ataque del perfil es nulo. Como objeto de cada simulación se pretende encontrar como varían tanto el coeficiente de arrastre como el de sustentación para diferentes grados del ángulo de ataque del perfil. Para tal cometido, se ejecutan 10 simulaciones, todas ellas a un Reynolds de 50.000, con variaciones del ángulo de ataque del perfil alar de 0° a 22.5°. La tabla N°2, muestra los valores obtenidos de cada una de las simulaciones ejecutadas. La figura N°6, detalla de manera gráfica los valores tabulados. Como se ve, se manifiesta un crecimiento continuo del coeficiente de arrastre para valores crecientes del ángulo de ataque del perfil. Este crecimiento es totalmente racional, ya que al incrementarse el ángulo de ataque, aumenta el área proyectada expuesta a la fuerza de arrastre y por lo tanto, se incrementa el coeficiente de arrastre. En lo pertinente al coeficiente de sustentación, existe un crecimiento continuo hasta un ángulo de ataque que estriba los 17.5°; Más allá de este punto, comienza a decrecer y se manifiesta un fenómeno conocido como pérdida de sustentación.

Tabla N°2 – Resultados de simulaciones para perfil de ala NACA 0012

ANGULO	COEFICIENTE DE ARRASTRE	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN	FUERZA DE ARRASTRE [N]	FUERZA DE SUSTENTACIÓN [N]
0°	0,1922	0,0011	0,0016	0,0001
2.5°	0,2000	0,0481	0,0017	0,0033
5°	0,2075	0,1812	0,0020	0,0125
7.5°	0,3790	0,4493	0,0043	0,0308
10°	0,5103	0,4853	0,0072	0,0331
12.5°	0,6017	0,5300	0,0111	0,0349
15°	0,7100	0,5994	0,0149	0,0401
17.5°	0,7594	0,6204	0,0168	0,0410
20°	0,7378	0,6029	0,0183	0,0393

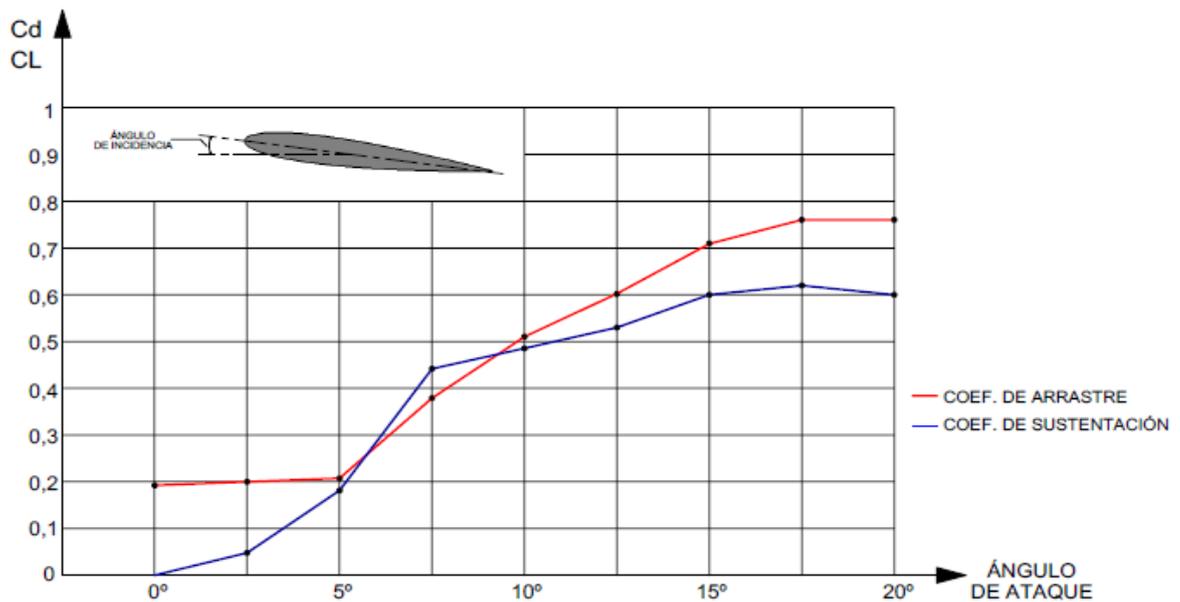


Figura N°6 – Variación del coeficiente de aerodinámico de arrastre y de sustentación vs. el ángulo de ataque del perfil de ala NACA 0012.

Conclusiones

Los resultados obtenidos del proceso de simulación para el cuerpo cilíndrico, guardan correspondencia con los valores que se obtienen por vías empíricas en túneles viento y que fueron extraídos de la bibliografía existente. En lo pertinente a los perfiles alares, las variaciones tanto del coeficiente de arrastre como el de sustentación son realistas y en el caso particular de la sustentación, se manifiesta el fenómeno de pérdida de sustentación característico.

La utilización de un software de las características que posee Solid Works Flow simulation, permite realizar una gran cantidad de simulaciones en tiempos aceptables. Además, es posible realizar un análisis exhaustivo (para este caso, concentrando la atención en los coeficientes de arrastre y sustentación) de las características del flujo fluido que se desarrolla en los alrededores de cada modelo analizado.

Referencias bibliográficas

- [1] Joe F. Thompson, Frank C. Thames and C. Wayne Mastin. Automatic Numerical Generation of Body-Fitted Curvilinear Coordinate System for field Containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies. *Journal of Computational Physics* 15, 299-319, (1974)
- [2] Cengel Y. A., Cimbala J. M., *Mecánica de fluidos*, Mc Graw Hill, 2da edición, (2007)
- [3] White F. M., *Mecánica de fluidos*, Mc Graw Hill, Sexta edición, (2008)
- [4] Mataix, C., *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Harla, Octava edición (1988).
- [5] Potter M., Wiggert D., *Mecánica de fluidos*, Prentice Hall, 2da. edición (2007)
- [6] Irving H. Shames. *Mecánica de Fluidos*. Tercera edición, Mc Graw-Hill (1995)
- [7] Solid Works, *Flow simulations user's guide* (2008)
- [8] Acheson, D. J. *Elementary Fluid Dynamics*. Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series (1990)
- [9] Lomax, H., Pullian T., Zingg D., *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*, Nasa Ames Research Center (1999)
- [10] Anderson, John David. *Computational fluid dynamics: the basic applications*. Mc Graw-Hill (1995)
- [11] Panton Roland L. "Incompressible flow" 2ª edición. JohnWiley & Sons Inc. (1995)