

Cálculo de coeficientes aerodinámicos de perfiles de aerogeneradores mediante OpenFOAM

Jesús David Herrera Beltrán ¹, Rafael Campos Amezcuea ^{1*}, Vladimir Zagoya Juárez ², Eder Gibrain Ricoy Zárate¹ y Erik Rosado Tamariz¹

¹ TecNM, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México.

² Academia de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: rafael.ca@cenidet.tecnm.mx; Tel.: +52 777 327 3517.

Energías Renovables (Energía Eólica). **Ponencia Presencial.**

Recibido: 23 de agosto de 2023

Aceptado: 5 de octubre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: En este trabajo se presenta una metodología para la obtención de los coeficientes aerodinámicos de un perfil usando el software de acceso libre OpenFOAM. Se utilizaron diversos módulos para la obtención de las geometrías, discretización y cálculos. Los resultados fueron comparados con referencias experimentales y numéricas proporcionados por bases de datos en línea que permitieron la verificación de los modelos generados. Los resultados obtenidos presentan una aceptable variación en comparativa con los valores ideales o esperados a conseguir para tales aplicaciones.

Palabras clave: Aerodinámica; Simulación numérica; Aerogeneradores; CFD; OpenFOAM

Calculation of aerodynamic lift and drag coefficients in wind turbine airfoils using OpenFOAM

Abstract: This paper presents a methodology for obtaining the aerodynamic coefficients of an airfoil using the OpenFOAM open access software. Several modules were used to obtain the geometries, discretization and calculations. The results were compared with experimental and numerical references provided by online databases that allowed the verification of the generated models. The results obtained show an acceptable variation in comparison with the ideal or expected values to be achieved for such applications.

Keywords: Aerodynamics; Numerical simulation; Wind turbines; CFD; OpenFOAM

Introducción

A nivel nacional, se han realizado algunos avances en el diseño y construcción de aerogeneradores por iniciativa de algunas empresas, ciertos centros de investigación y algunas escuelas de nivel superior. A pesar de esto, se enfrenta la presencia de dificultades técnicas y no técnicas que han limitado el crecimiento de esta área en nuestro país. Ejemplo de esto es lo realizado en el Centro Regional de Tecnología Eólica del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), donde se han probado aerogeneradores de baja potencia enfatizando sus estudios en el análisis de fallas de control, operación y del tipo estructural. Hoy en día existe una gran tendencia hacia el estudio de este tipo dispositivos empleados para la generación de energía eléctrica, esto como resultado de las actuales políticas energéticas.

Debido a esto, la realización de pruebas en los mismos, son situaciones indispensables para poder comprobar que los diseños y/o modelos generados sean los adecuados a los requerimientos para los cuales están elaborados. Sin embargo, para poder llevar a cabo dichas tareas de prueba es necesario contar con equipos especializados cuyos costos son demasiado elevados; hablamos, por ejemplo, de túneles de viento y balanzas aerodinámicas. De igual manera, esto requiere de una inversión para la manufacturación de los modelos o prototipos que han de ser estudiados. Ante estas adversidades ha surgido una alternativa que resulta económicamente más viable, hablamos claro está, del uso de herramientas digitales basadas en las técnicas CFD. Estas herramientas permiten resolver todos aquellos problemas físicos que están relacionados con el movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados como la transferencia de calor, las reacciones químicas, el arrastre de sólidos, etc. El CFD se ha convertido en una parte indispensable en el proceso del diseño aerodinámico e hidrodinámico para aviones, trenes, automóviles, cohetes, barcos, submarinos y de cualquier otro medio de locomoción o proceso productivo de nuestros días.

En lo respectivo al área de la energía eólica es importante mencionar que los álabes de un aerogenerador se diseñan tomando en cuenta el comportamiento de los perfiles aerodinámicos de forma que se busca obtener el mayor porcentaje de extracción de la energía cinética del viento. El análisis clásico de la turbina eólica fue desarrollado originalmente por Betz y Glauer, (1935) en la década de 1930. Posteriormente, la teoría fue expandida y adaptada para la solución por computadoras digitales. En todos estos métodos, la teoría del momento y la teoría del elemento del aspa se combinan en una teoría que permite el cálculo de las características de rendimiento de una sección anular del rotor. Las características para todo el rotor se obtienen luego integrando o sumando los valores obtenidos para cada una de las secciones anulares (Perfiles aerodinámicos). El flujo de aire sobre un perfil aerodinámico produce una distribución de fuerzas sobre la superficie del perfil aerodinámico. La velocidad del flujo sobre los perfiles aerodinámicos aumenta sobre la superficie convexa, lo que resulta en una presión promedio más baja en el lado de

succión del perfil aerodinámico en comparación con el lado cóncavo o de presión del perfil aerodinámico. Mientras tanto, la fricción viscosa entre el aire y la superficie aerodinámica ralentiza el flujo de aire hasta cierto punto junto a la superficie. Como se muestra en la Figura 1 la resultante de todas estas fuerzas de presión y fricción se suele descomponer en dos fuerzas y un momento que actúan a lo largo de la cuerda a una distancia de $\frac{c}{4}$ desde el borde de ataque (en el “cuarto de cuerda”):

- Fuerza de sustentación (Lift force): Definida como perpendicular a la dirección del flujo de aire que se aproxima. La fuerza de sustentación es una consecuencia de la presión desigual sobre las superficies aerodinámicas superior e inferior.
- Fuerza de arrastre (Drag force): Definida como paralela a la dirección del flujo de aire que se aproxima. La fuerza de arrastre es debido tanto a las fuerzas de fricción viscosa en la superficie aerodinámica como a la presión desigual orientada hacia y lejos del flujo que se aproxima.
- Momento de cabeceo (Pitching moment): Definido como un eje perpendicular a la sección transversal de la superficie aerodinámica.

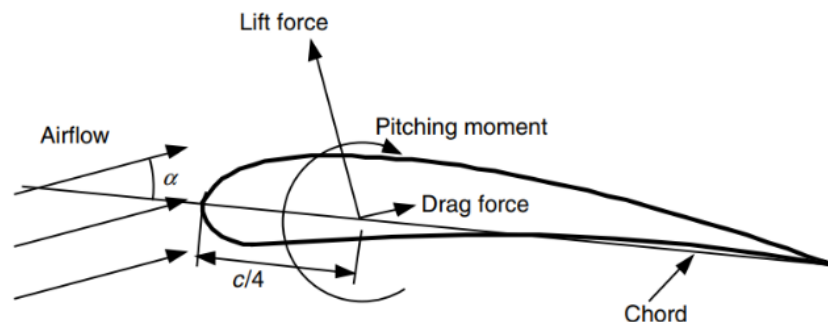


Figura 1. Fuerzas y momentos en una sección aerodinámica, ángulo de ataque (α); c , cuerda. La dirección de las fuerzas y momentos positivos está indicada por la dirección de la flecha.

Para tomar la decisión de cuál es el diseño óptimo del aspa de un aerogenerador se toman en consideración determinados parámetros que describen el comportamiento de éste mismo ante la incidencia de un flujo de aire. Dichos parámetros son los coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D). Si bien, es bien sabido que también se pueden conocer otros factores tales como los valores de las fuerzas de sustentación (L) y arrastre (D); resulta importante mencionar que estos dos parámetros se utilizan para describir en valores reales a un modelo determinado, en base a su diseño y dimensionamiento. Debido a que por lo general las pruebas experimentales en túneles de viento se llevan a cabo con modelos a escala de aerogeneradores reales, se opta siempre por trabajar en términos de coeficientes, los cuales de acuerdo con las Ecuaciones 1 y 2 tendrán una relación proporcional al tamaño del modelo que se esté analizando. La ventaja que se presenta al hacer uso de valores en términos de coeficientes es que se tiene la posibilidad de generar extrapolaciones a modelos con el mismo diseño geométrico, pero con una distinta proporción en tamaño, permitiendo así el estudio de aerogeneradores tanto de alta como de baja potencia.

$$C_L = \frac{\frac{L}{l}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\frac{\text{Fuerza de sustentación}}{\text{Unidad de longitud}}}{\frac{\text{Fuerza dinámica}}{\text{Unidad de longitud}}} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{\frac{D}{l}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\frac{\text{Fuerza de arrastre}}{\text{Unidad de longitud}}}{\frac{\text{Fuerza dinámica}}{\text{Unidad de longitud}}} \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del aire, U es la velocidad del flujo de aire, c la longitud de cuerda del perfil aerodinámico y l es el tramo (envergadura) del perfil aerodinámico analizado.

Hoy en día se presentan dos vertientes principales en cuanto a las metodologías para la obtención de los coeficientes aerodinámicos. Dichas opciones se muestran a continuación:

- Pruebas experimentales: Con el uso de dispositivos de instrumentación tales como balanzas de fuerzas aerodinámicas.
- Análisis numérico (Simulaciones numéricas): Aplicando métodos iterativos pertenecientes a las técnicas de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con softwares afines a dicho propósito (OpenFOAM para este caso particular).

Cálculo de los coeficientes aerodinámicos mediante pruebas experimentales

Post, (2010), realizó el diseño de una balanza de fuerzas para túneles de viento educativos como se puede ver en la Figura 2 El diseño de la balanza únicamente mide fuerzas de sustentación y arrastre, además, controla el ángulo de ataque. La balanza consta de dos celdas de carga, instrumentos encargados de medir tanto la fuerza vertical como la horizontal, es decir, sustentación y arrastre respectivamente. El ángulo de ataque se controla mediante un actuador lineal, el cual utiliza un varillaje paralelo de cuatro barras con el fin de posicionarse linealmente. Los datos obtenidos fueron procesados para una mejor interpretación gráfica. Es importante mencionar que, el costo de fabricación de la balanza es relativamente bajo y brinda una buena precisión. Sin embargo, una forma de optimizar recursos económicos es utilizando celdas de carga de menor costo, ya que este componente es el más costoso del prototipo.

Aguirre et al. (2016) se centraron en la creación e implementación de una balanza externa utilizada en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos en la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, para poder calcular las cargas aerodinámicas. Cabe destacar que durante el desarrollo se muestra el diseño, la elaboración y la manera de calibrar la balanza para posteriormente implementarla en el túnel de viento. Dentro del desarrollo de la balanza destaca la etapa de la calibración, pues es la parte más crítica donde a partir de este proceso se obtiene la matriz que relaciona las cargas aplicadas en la balanza con las cargas medidas, de no estar bien calibrada la balanza, no se podrán obtener valores reales, aunque los demás factores que involucran la balanza estén correctos. Los autores mencionan que es un ensayo simple, sin embargo, es importante decir que este tipo de balanzas aerodinámicas implican un diseño sumamente elaborado, no obstante, se concluye que la balanza funcionó idóneamente a pesar de las limitantes con lo que se tuvo una buena adquisición de datos experimentales.

Razo (2017) en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla instrumentó un túnel de viento subsónico. Hoy en día la tendencia es la automatización, por lo que lo que se buscó obtener mediciones de forma automatizada dentro del mismo túnel de viento, todo esto gracias a sensores de fuerza, es decir, con ayuda de una balanza de fuerzas o balanza aerodinámica, con la que se podrán calcular parámetros tales como fuerzas y coeficientes aerodinámicos, además de propiedades del aire. Es importante mencionar que para su implementación hicieron uso de la tarjeta microcontroladora Arduino para realizar las lecturas de los sensores utilizados, para posteriormente visualizar los datos obtenidos mediante el software LabVIEW donde a su vez utilizaron esos valores para calcular los coeficientes y fuerzas de interés, aunado a esto con ayuda de una tarjeta NI-USB-6008 realizaron el control de la velocidad del viento en el túnel.

Por otro lado, Gómez et al. (2018) en el Centro de Estudios Aeronáuticos (CEA) en la ciudad de Bogotá, Colombia, presentan la implementación de un sistema para la medición de fuerzas aerodinámicas en un túnel de viento subsónico. El enfoque principal que tuvo la investigación fue en la instrumentación para la adquisición de datos en tiempo real, es decir, crearon un sistema que les permite obtener las señales que los sensores de una balanza aerodinámica envían, para procesarlos y obtener los valores de las fuerzas aerodinámicas, coeficientes aerodinámicos y velocidad relativa del aire. Es importante mencionar que toda la instrumentación se llevó a cabo con ayuda del software LabVIEW, en donde se creó una interfaz que permitió la visualización de la lectura de los sensores y a su vez las fuerzas obtenidas, todo en tiempo real.

La metodología utilizada se basa en tres fases, la primera consta de conocer las variables aerodinámicas de interés; en segunda instancia, se implementó un sensor de transformación diferencial de variación lineal (LVDT), el cual captará los resultantes de las fuerzas aerodinámicas, posteriormente se realiza la adquisición de datos para poder ser procesados por el software y la última instancia consistió en elaborar la interfaz de usuario. Los autores concluyen que el uso de un software es una buena iniciativa para la representación gráfica de todos los parámetros obtenidos.

Cálculo de los coeficientes aerodinámicos mediante simulaciones numéricas

Suárez (2005), en la Universidad del Bío-Bío (UBB), Chile, realizó un análisis de dinámica de fluidos en el perfil aerodinámico NACA 0021, donde modificó el ángulo de ataque en un rango de 0 a 90 grados para observar cómo se comportaban las fuerzas que actúan sobre dicho perfil; para ello, utilizó el software comercial Ansys Fluent 6.0 y a su vez validó mediante datos experimentales. Además, dentro del trabajo prioriza el registro de la frecuencia de desprendimiento de vórtices. Para la generación de malla el autor utilizó el pre-procesador Gambit, donde construyó una malla del tipo C, ideal para analizar perfiles aerodinámicos en 2D, utilizando parámetros de mallado de acuerdo con lo que la literatura maneja para posteriormente utilizar el modelo de flujo potencial y el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ en la simulación. No obstante, el autor muestra la metodología para el análisis de simulación en pequeños y grandes ángulos de ataque. Mediante el postprocesamiento se pudo observar que los resultados obtenidos con los modelos ya mencionados son muy similares a la experimentación como se puede ver en la Figura 3.

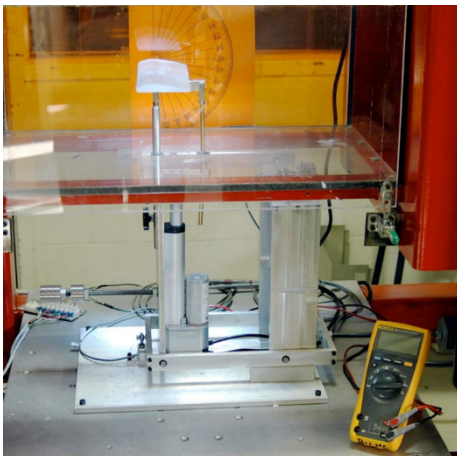


Figura 2. Diseño de balanza aerodinámica para pruebas experimentales en túneles de viento. (Post, 2010)

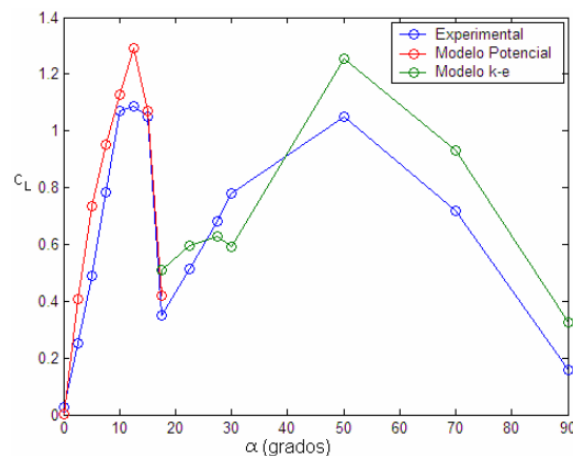


Figura 3. Gráfica polar del coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque utilizando el modelo de flujo potencial para pequeños ángulos de ataque y con el modelo de turbulencia del tipo RAS $k - \epsilon$ para grandes ángulos de ataque. (Suárez, 2005)

Boffadossi y Savorgnan (2016), en su trabajo elaborado en el Politécnico di Milano, Italia, realizaron un análisis experimental y numérico de las características aerodinámicas de un perfil aéreo de parapente; que, aunque es un contexto diferente a un aerogenerador, el estudio de los perfiles aerodinámicos sigue siendo el mismo. El análisis experimental fue realizado con ayuda de un túnel del viento, y numéricamente fue analizado con ayuda del software de acceso libre OpenFOAM. Dentro del desarrollo de la simulación, realizaron una malla estructurada tipo C, con ayuda

de la herramienta BlockMesh, mallador que por defecto utiliza OpenFOAM. En cuanto al modelo de turbulencia, consideraron el modelo Spalart-Allmaras, apto para cuestiones aerodinámicas.

Como resultado, obtuvieron que es importante comprender el comportamiento de la presión interior, así como verificar que los resultados obtenidos experimentalmente son muy similares a los obtenidos de manera numérica.

Zhang et al. (2016) desarrollaron una investigación experimental y numérica de cargas aerodinámicas y flujo en un entorno tridimensional sobre los álabes de la turbina MÉXICO no giratoria. Para su estudio tanto experimental como numérico, se dividió el álabes en tres secciones transversales, es decir, obteniendo tres perfiles aerodinámicos, en los cuales se varía la velocidad de entrada y el ángulo de ataque para su análisis. Experimentalmente hicieron uso de transductores de presión Kulite para medir la distribución de la presión en las respectivas secciones del perfil aerodinámico utilizado, es importante destacar que para usar los transductores estos deben ser previamente calibrados. En cuanto al rastrillo de estela, éste se utilizó para medir el déficit de velocidad al reverso de los álabes para posteriormente determinar el arrastre total de la sección. Numéricamente hicieron uso de simulaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) en el software OpenFOAM donde utilizaron un dominio computacional con mismas configuraciones experimentales para poder obtener resultados similares. Para el mallado, utilizaron una estrategia de malla híbrida y por simplificación el flujo fue considerado completamente turbulento sobre los álabes desde un inicio. Finalmente, pudieron concluir que las distribuciones de presión de los cálculos CFD en tres secciones diferentes se comparan bien con las mediciones experimentales.

Bait et al. (2016) desarrollaron el diseño y análisis aerodinámico de un aerogenerador de eje horizontal de 10 kW para Tainan, Taiwán. Por lo tanto, todas las condiciones y parámetros de diseño están en función de las condiciones de viento locales. Inicialmente partieron del análisis del recurso eólico mediante la distribución de Weibull y posteriormente con ayuda de la Teoría del momento y del elemento del aspa (por sus siglas en inglés BEM), diseñaron la forma de las palas de la turbina. Igualmente, con ayuda del método BEM calcularon los coeficientes de sustentación y arrastre. Para corroborar datos, hicieron uso del software comercial CFD FLUENT donde aplicaron una discretización espacial con el viento de segundo orden y el modelo de turbulencia $k - \epsilon$. Para el dominio computacional utilizaron el sistema cartesiano, donde x representa la dirección de la corriente y el eje y la dirección contra el viento. Finalmente, pudieron concluir que los valores obtenidos por el método BEM tanto para coeficientes aerodinámicos como para el par mecánico, la fuerza de empuje, la potencia mecánica y el coeficiente de potencia concuerdan con la simulación CFD.

Materiales y Métodos

Requerimientos de hardware

Al tratarse de un trabajo que implica la realización de simulaciones numéricas basadas en las técnicas de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es indispensable contar con equipos de cómputo con especificaciones óptimas en cuanto a la capacidad de procesamiento y almacenamiento se refiere, ya que de este modo se podrán efectuar simulaciones que impliquen el uso de modelos con diseños de mallas adecuadamente refinados, mismos que al ser simulados generan una mayor cantidad de datos que son almacenados en el equipo que estese utilizando. Una vez dicho esto, se enlistan en la Tabla 1 las especificaciones técnicas más relevantes del equipo computacional que fue empleado para la realización de todas y cada una de las simulaciones numéricas realizadas.

Requerimientos de software

Además de esto, se requiere contar un software adecuado al tipo de simulaciones realizadas. Como se menciona en el título del presente documento, en este trabajo se optó por hacer uso de un software que tiene la característica de ser de código abierto, es decir, se trata de un software desarrollado y mantenido mediante una colaboración abierta, y que está disponible (generalmente sin costo alguno) para que cualquiera lo use, examine, altere y redistribuya como quiera. Para este particular caso el software empleado fue OpenFOAM, desarrollado principalmente por OpenCFD Ltd desde 2004. Cuenta con una amplia base de usuarios en la mayoría de los campos de la ingeniería y la ciencia, tanto en organizaciones comerciales como académicas. OpenFOAM cuenta con una amplia gama de funciones que permiten

resolver desde complejos flujos de fluidos con reacciones químicas, turbulencias y transferencia de calor, hasta problemas de acústica, mecánica de sólidos y electromagnetismo.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del equipo de cómputo empleado.

Característica	Descripción
Procesador	AMD Ryzen 3 3300 U
ROM	HDD 1 TB y SSD 128 GB
Sistema operativo	Windows 10 a 64 bits
RAM	12 GB
GPU	AMD Radeon (TM) Vega 6 Graphics

Por esencia, OpenFOAM opera en forma predilecta con el sistema operativo Linux, pero puede instalarse en otros sistemas operativos, tales como Mac Os y Windows mediante procedimientos distintos, como por ejemplo la creación de máquinas virtuales, la generación de particiones en discos duros o el uso de emuladores. Existen diversas formas de utilizar OpenFOAM en el sistema operativo Windows. Actualmente las formas de utilizar OpenFOAM en este sistema operativo se basa en programas de terceros que integran en su interfaz el motor de cálculo, y visualizadores de OpenFOAM. Uno de ellos es BlueCFD-Core, el cual es un proyecto de código abierto proporcionado por FSD blueCAPE Lda. Este proyecto proporciona código fuente y compilaciones de alta calidad de la tecnología OpenFOAM y proyectos de código abierto relacionados, como puertos no oficiales para Windows 10 y 11 de 64 bits actualizados (las versiones anteriores de BlueCFD-Core funcionarán en versiones anteriores de Windows). También se proporcionan ajustes, ejecutables y secuencias de comandos adicionales para mantener la facilidad de uso cuando se trabaja con los sistemas operativos Microsoft Windows. El código fuente de las versiones parcheadas se rastrea en el proyecto BlueCFD en Github. En la página oficial de BlueCFD-Core se pueden descargar distintas versiones de este software, el cual incluye una determinada versión de OpenFOAM y su respectivo visualizador. Al día de hoy, la versión más reciente lanzada es la 2020-1. La cual cuenta con las siguientes especificaciones:

- CMake 3.17.3.
- CCG 10.2.0.
- GBD 9.2.
- Git 2.27.0.
- Meld 3.21.0.
- Python 3.8.4.
- Gnuplot 5.2.8.
- OpenFOAM 8, confirmación 218f49416d, 20 de octubre de 2020.
- ThirdParty 8, confirmación 686040d3c0, 21 de julio de 2020.
- ParaView 5.6.2, 64 bits, construido con las opciones: Qt5, OpenGL2.
- MS-MPI 7.1 es la versión predeterminada de MPI.
- Notepad2 4.2.25.

Simulación numérica

El objetivo principal del estudio es analizar el comportamiento del campo de flujo de aire alrededor de un perfil aerodinámico en varios ángulos de ataque para un número de Reynolds de 1×10^6 , valor que es comúnmente utilizado en pruebas aerodinámicas afines al análisis de aerogeneradores. Se presenta una metodología desarrollada la cual permite la generación de modelos de simulación numérica óptimos que permite la obtención de resultados cuantificables de los coeficientes de sustentación y arrastre que pueden ser verificados y/o validados con trabajos previamente desarrollados. Los perfiles aerodinámicos están diseñados para operar en condiciones óptimas en un rango de ángulos de ataque de 0° a 15° , ya que más allá de estos valores se produce pérdida de sustentación e incluso vibraciones de gran intensidad. El arrastre se produce principalmente por la acción de esfuerzos viscosos en la superficie del ala y en menor escala por la presión inducida por los pequeños vórtices en el borde de salida (Suárez, 2005).

En grandes ángulos de ataque el perfil es considerado como un cuerpo robusto y se caracteriza, en términos de pérdidas, por un gran arrastre debido a la región separada. La causa del fenómeno de separación está relacionada con el concepto de capa límite. A continuación, se describen los tópicos mencionados.

- Capa límite atmosférica: Para flujos con alto número de Reynolds puede considerarse fehacientemente, que el efecto de la fricción interna es apreciable únicamente en una pequeña región que rodea las fronteras de los cuerpos sometidos a una corriente libre.
- Separación: La separación de las líneas de corriente de la frontera curva de un perfil aerodinámico para un ángulo de ataque se muestra en la Figura 4. La teoría de flujo potencial y los experimentos indican que la velocidad inmediatamente afuera de la capa límite alcanza un máximo en algún punto B en la superficie superior del perfil. Por otra parte, en algún punto A, en la vecindad del borde de ataque, la velocidad tiene a cero y se denomina punto de estancamiento.

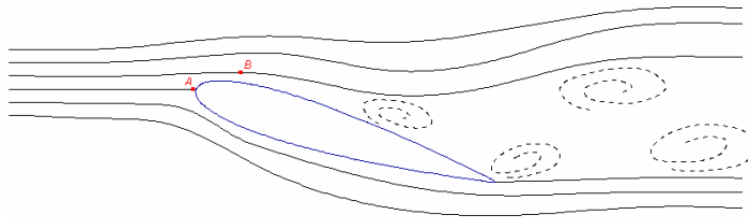


Figura 4. Comportamiento de un perfil aerodinámico posicionado a un ángulo de ataque grande. (Suárez, 2005).

Estrategia de solución

Para resolver el problema planteado de manera general se usan métodos de análisis numérico, donde el dominio continuo es reemplazado por un dominio discreto utilizando una malla, por lo tanto, la solución obtenida no es una solución exacta, sino una aproximación. Para este análisis numérico se usará el software de acceso libre OpenFOAM, el cual utiliza el método de volumen finito para discretizar las ecuaciones diferenciales. Este método se formula a partir del producto interno de las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes con una función unitaria. Este proceso da como resultado la integración espacial de las ecuaciones gobernantes. Los términos integrados se aproximan por diferencias o elementos finitos, discretamente sumados en todo el dominio. (Fernández Oro, 2012). La metodología propuesta es apta para cualquier perfil aerodinámico que se desee analizar, sin embargo, para el presente estudio se van a utilizar dos perfiles aerodinámicos simétricos y dos asimétricos los cuales a continuación se enlistan:

- Perfiles simétricos:
 - NACA 0012.
 - NACA 0021.
- Perfiles asimétricos:
 - NACA 2412.
 - NACA 64(3)618.

Las coordenadas para el dibujado de cada perfil aerodinámico se obtienen de Airfoil Tools, un sitio web que contiene datos descriptivos de perfiles aerodinámicos disponibles en la web o en bases de datos en línea. Esta herramienta online permite descargar los datos de la geometría de cualquier perfil en un archivo tipo *dat*. Adicionalmente permite la visualización de detalles aerodinámicos con diagramas polares de los coeficientes aerodinámicos para un amplio rango de números de Reynolds y diferentes ángulos de ataque. En la Figura 5 se pueden visualizar las características geométricas de los perfiles analizados.

Como se nota en la Figura anterior, los perfiles aerodinámicos asimétricos poseen ciertas características geométricas que hacen que sean más difíciles de analizar. El principal factor es que su geometría posee una notable irregularidad en la zona correspondiente al borde de salida de dicho perfil. Este tipo de irregularidades geométricas generan dificultades cuando se están trabajando con simulaciones numéricas, ya que las tareas de generación de mallas resultan

mucho más complejas de realizar en comparación a los perfiles aerodinámicos simétricos. Aunado a esto, los procesos de cálculo y alcance de la convergencia resultan más tardíos y difíciles de alcanzar en este tipo de perfiles (Asimétricos).

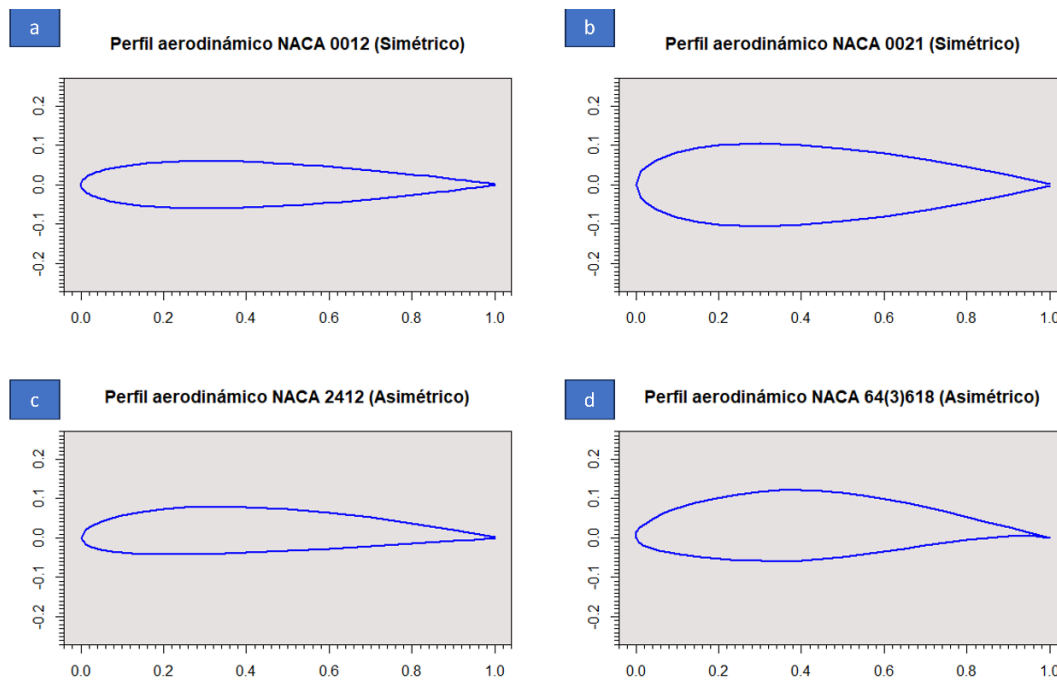


Figura 5. Perfiles aerodinámicos utilizados en las simulaciones numéricas: (a) NACA 0012 (Simétrico), (b) NACA 0021 (Simétrico), (c) NACA 2412 (Asimétrico) y (d) NACA 64(3)618 (Asimétrico).

Generación de malla

La generación de las mallas a utilizar para los distintos casos de las simulaciones numéricas (Perfiles y ángulos de ataque diferentes) se llevó a cabo haciendo uso de un software que funge como complemento al motor de cálculo de OpenFOAM. Este software es llamado SimFlow, el cual cuenta con opciones para poder generar en forma más amigable mallas del tipo C, las cuales como se sabe son el tipo de malla idóneo para los análisis de perfiles aerodinámicos. La gran ventaja de este software es que, para poder analizar un perfil aerodinámico, basta con ingresar un archivo del tipo *dat* con las coordenadas de éste, el cual como se mencionó en líneas anteriores se obtienen directamente en las bases de datos en línea del sitio web Airfoil Tools. Así mismo, este software da la pauta a poder hacer directamente modificaciones de los parámetros de la malla, para después generar el volumen de control y la discretización del mismo.

Se probaron distintas configuraciones de malla, modificando parámetros tales como los tamaños máximos y mínimos permisibles para la malla generada y las dimensiones del volumen de control delimitado por la malla tipo C. Después de varias pruebas con determinadas características del mado, se obtuvieron dos configuraciones de malla idóneas para las simulaciones desarrolladas, una para el caso de perfiles simétricos y otra para el caso de los perfiles asimétricos. En las Tablas que se muestran a continuación se indican las condiciones utilizadas para la generación de las mallas de todas y cada una de las simulaciones realizadas.

Tabla 2. Parámetros geométricos del dimensionamiento de la malla generada.

Variable	Valor
Radio	20 metros
Relación de longitud de la cola en base al radio de la malla	1.5

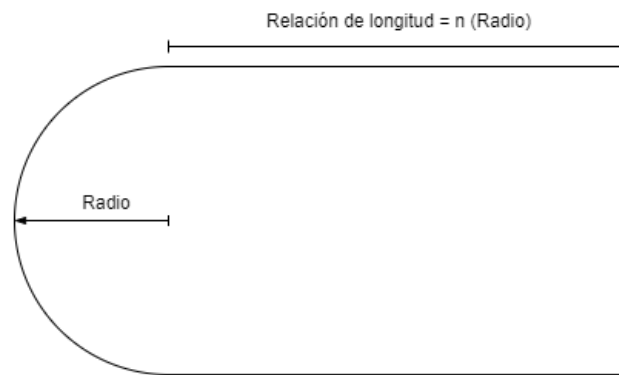


Figura 6. Parámetros geométricos para la malla tipo C.

Tabla 3. Parámetros de discretización de malla para perfiles simétricos.

Variable	Valor
Espesor de la celda superficial al perfil	$1 \times 10^{-3} \text{ m}$
Longitud mínima de celda de superficie	$1 \times 10^{-3} \text{ m}$
Longitud máxima de celda de superficie	$5 \times 10^{-2} \text{ m}$
Razón de incremento de la celda de superficie	1.1

Tabla 4. Parámetros de discretización de malla para perfiles asimétricos.

Variable	Valor
Espesor de la celda superficial al perfil	$1 \times 10^{-3} \text{ m}$
Longitud mínima de celda de superficie	$2 \times 10^{-4} \text{ m}$
Longitud máxima de celda de superficie	$5 \times 10^{-2} \text{ m}$
Razón de incremento de la celda de superficie	1.1

Además de esto, para evaluar la calidad de la malla se evaluó el parámetro y_+ , el cual para todos los casos se mantuvo en valores por debajo de 5, es decir, que en la capa viscosa el fluido está dominado por el efecto viscoso, por lo que se puede suponer que el esfuerzo cortante de Reynolds es insignificante y para el modelo de turbulencia utilizado, este valor es aceptable. Por lo tanto, el refinamiento de la malla cumple con los requerimientos.

Modelos de turbulencia

Indiscutible la presencia de desprendimiento de flujo en elevados ángulos de ataque va seguida de una alta turbulencia en la estela. Una manera de dar solución a esta problemática en estas circunstancias es mediante el uso de las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds, más conocidas como RAS, las cuales son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido viscoso.

Generalmente los diferentes modelos turbulentos se diferencian esencialmente en como modelan la viscosidad turbulenta, para efectos de la simulación propuesta, el modelo turbulento que se utilizará es el modelo $k - \Omega$ ya que fue el modelo turbulento que arrojó los mejores resultados.

El modelo de turbulencia ya mencionado pretende pronosticar la turbulencia haciendo uso de dos ecuaciones diferenciales parciales de las variables que su mismo nombre menciona, es decir, k y Ω , donde k representa la energía cinética de turbulencia y Ω , la razón específica de disipación.

En este modelo la viscosidad turbulenta se calcula mediante la expresión:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)k = P_k - \rho\beta^*k\omega + \nabla \cdot [(\mu + \mu_T\sigma^*)\nabla k] \quad (4)$$

La ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta es:

Condiciones de frontera

Ya que se trata de simulaciones de régimen estacionario, esto debido a que no interesa ver el comportamiento de un perfil aerodinámico a lo largo de un periodo de tiempo, es esencial establecer condiciones límite, o condiciones de frontera, es decir, para todas las situaciones analizadas, en $t = 0$ todas las variables tendrán un valor igual al impuesto en la entrada. Para el caso de la presión se considera atmosférica, en el caso de la velocidad, anteriormente se mencionó que el flujo esta caracterizado por un número de Reynolds de 1×10^6 . Se considera también una viscosidad cinemática y la densidad correspondiente a las propiedades del aire a presión atmosférica a una temperatura de 20°C , la cual puede considerarse como temperatura ambiente promedio. Además de esto, y tomando como base las características de los archivos de coordenadas de los perfiles aerodinámicos se trabaja con una cuerda igual a 1 metro. Utilizando los datos anteriormente citados y haciendo uso de la fórmula del número de Reynolds para análisis aerodinámicos se tendrá que la velocidad necesaria del flujo de aire es igual a:

$$Re = \frac{c \cdot U}{\nu} \quad (4)$$

$$U = \frac{\mu Re}{c} = \frac{1.516 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 1 \times 10^6}{1 \text{ m}} = 15.165 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4)$$

Para los valores que se involucran en el modelo de turbulencia, es decir, los valores de k y Ω , se utilizaron los valores que vienen incluidos por defecto en la programación del software OpenFOAM.

Método de solución

El solver a utilizar es el SimpleFoam, el cual es un solucionador de OpenFOAM para flujo incompresible laminar o turbulento en estado estable, el cual resuelve la forma diferencial de las ecuaciones de conservación de momento lineal y de conservación de masa utilizando el algoritmo SIMPLE. Este algoritmo permite calcular los campos de presión y velocidad en un volumen de control con flujo en estado estable mediante la introducción de un factor de corrección con el cual se asegura que el campo de velocidades obtenido de la ecuación de conservación de momento cumpla con la ecuación de conservación de masa o de continuidad. (Open CFD, 2004)

Factores de relajación

Dentro de la simulación se utilizaron parámetros de relajación para ayudar a que la convergencia de la misma se diera en un tiempo menor al que se hubiese obtenido sin la consideración de ellos. Además de esto, los parámetros de relajación ayudan a que los métodos de solución empleados para el análisis de los puntos del volumen de control tengan un comportamiento estable y ayudan a que la simulación no genere errores de cálculo. Los factores utilizados se muestran en la Tabla 5.

Estos valores se seleccionaron a partir del desarrollo matemático de modelos similares en los cuales se observó que factores de relación menores a uno permiten obtener en forma correcta la convergencia sin comprometer a la simulación a una respuesta forzada.

Criterios de convergencia

El método iterativo se basa en un criterio de convergencia relacionado con la precisión requerida de la solución, por lo tanto, es de importancia una selección adecuada de estos valores. En la Tabla 6 se muestran los valores utilizados para los parámetros calculados.

Tabla 5. Factores de relajación empleados para las simulaciones.

Variable	Factor de relajación
Presión	0.75
Velocidad	0.75
k	0.75
Ω	0.75

Tabla 6. Criterios de convergencia empleados para las simulaciones.

Variable	Criterio de convergencia
Presión	1×10^{-5}
Velocidad	1×10^{-5}
k	1×10^{-5}
Ω	1×10^{-5}

Resultados y Discusión

Se realizaron un total de 164 simulaciones, correspondientes a los 4 perfiles aerodinámicos indicados en líneas anteriores a la presente sección. Cada perfil aerodinámico se simuló con ángulos de ataque que van desde los -20 a los 20 grados, esto para observar en mejor manera el comportamiento de los coeficientes de sustentación y arrastre ante diferentes posiciones del perfil aerodinámico estudiado. Además de esto, al estudiar un amplio rango de ángulos de ataque se da la pauta para determinar si las configuraciones y parámetros empelados para la realización de las simulaciones son o no los adecuados. Para determinar lo anterior se tomaron como valores de referencia los indicados en el sitio web Airfoil Tools para cada uno de los perfiles empleados, y con el respectivo número de Reynolds utilizado.

Todos los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas fueron sintetizados en gráficas polares, para poder apreciar en mejor manera si los resultados obtenidos podían ser aceptados como válidos, en las Figuras 7 a 14 se muestra las gráficas polares obtenidas para el coeficiente de sustentación y arrastre en el rango de ángulos de ataques descrito para cada uno de los perfiles analizados. Además de esto, se incluyen los valores proporcionados por las bases de datos de Airfoil Tools para casos de pruebas experimentales y simulaciones numéricas basadas en la aplicación directa de las fórmulas de la teoría del elemento del asa.

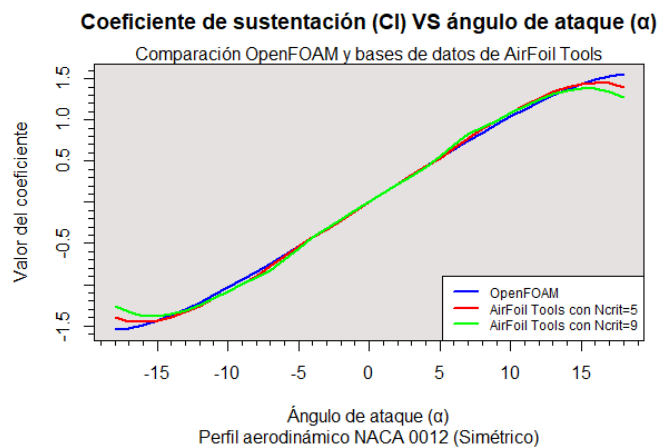


Figura 7. Gráfica polar del coeficiente de sustentación del perfil aerodinámico NACA 0012 (perfil simétrico).

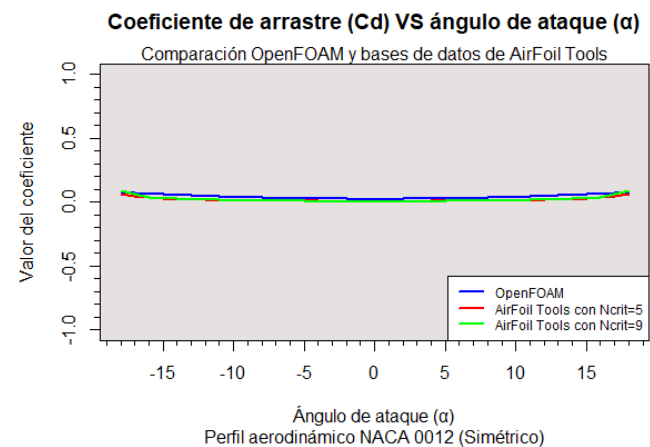


Figura 8. Gráfica polar del coeficiente de arrastre del perfil aerodinámico NACA 0012 (perfil simétrico).

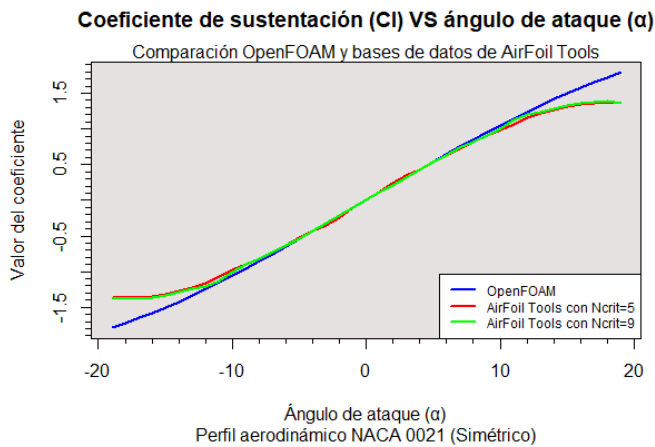


Figura 9. Gráfica polar del coeficiente de sustentación del perfil aerodinámico NACA 0021 (perfil simétrico).

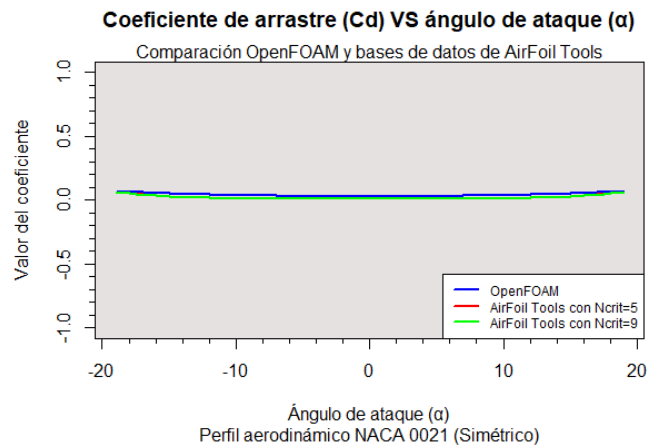


Figura 10. Gráfica polar del coeficiente de arrastre del perfil aerodinámico NACA 0021 (perfil simétrico).

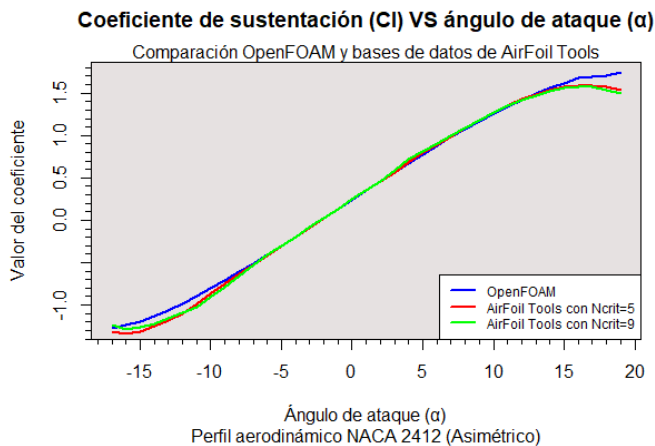


Figura 11. Gráfica polar del coeficiente de sustentación del perfil aerodinámico NACA 2412 (perfil asimétrico).

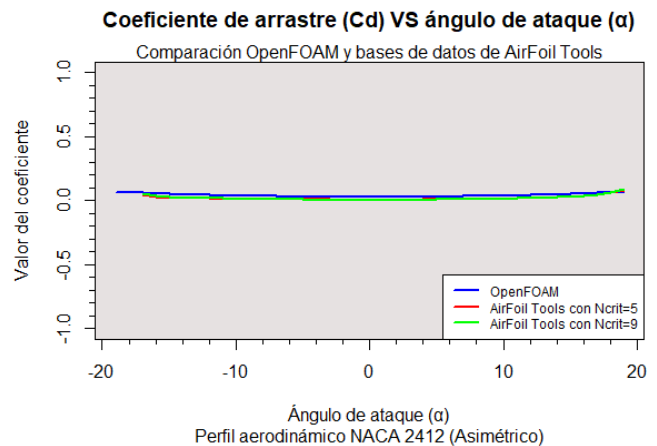


Figura 12. Gráfica polar del coeficiente de arrastre del perfil aerodinámico NACA 2412 (perfil asimétrico).

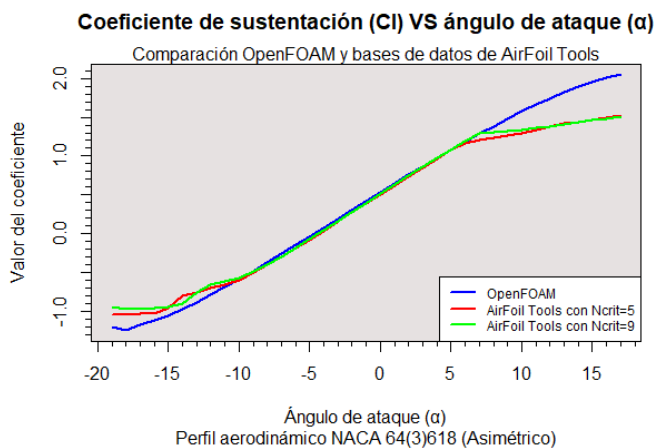


Figura 13. Gráfica polar del coeficiente de sustentación del perfil aerodinámico NACA 64(3)618 (perfil asimétrico).

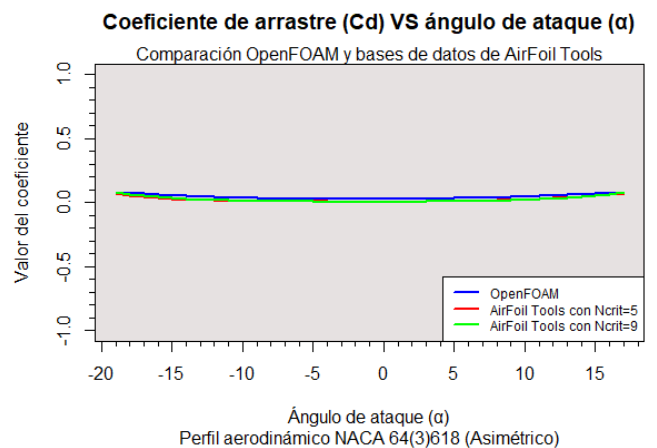


Figura 14. Gráfica polar del coeficiente de arrastre del perfil aerodinámico NACA 64(3)618 (perfil asimétrico).

Con base a las gráficas obtenidas y mostradas anteriormente, podemos darnos cuenta de que en la mayoría de los ángulos de ataque las simulaciones realizadas han arrojado como resultados valores de los coeficientes que se asemejan a los valores proporcionados por las bases de datos. Se observa que en los ángulos de ataque más grandes (más graves) es en dónde se presenta una mayor variación en cuanto a los resultados obtenidos. La situación anterior se debe a que los valores indicados por las bases de datos de Airfoil Tools se basan en la aplicación de la teoría del elemento del aspa, teoría en la cual no se consideran los efectos viscosos sobre la superficie de un perfil aerodinámico. Por otro lado, al emplear técnicas de dinámica de fluidos computacional se hace uso de más parámetros descriptivos del fluido empleado (aire) como lo son viscosidades cinemáticas, y efectos de la capa límite atmosférica. Visto desde un punto intermedio se puede observar que el uso de simulaciones numéricas CFD con software de acceso libre representan una alternativa ideal al uso de software comerciales como Ansys Fluent. La interfaz del software de acceso libre OpenFoam tiene la posibilidad de efectuar análisis que involucran la interacción del aire sobre un perfil aerodinámico de un aerogenerador para obtener las fuerzas que se generan en dicha interacción.

Con este tipo de trabajos se da inicio a un nuevo camino de análisis computacional de fluidos con softwares de acceso libre que eliminan la necesidad de hacer gastos en licencias anuales con precios que en ocasiones no son posibles de cubrir por ciertas empresas y/o personas.

Conclusiones

Se ha representado el comportamiento del flujo de aire en torno de cuatro perfiles aerodinámicos (NACA 0012, NACA 0021, NACA 2412 y NACA 64(3)618), expuestos a corriente libre para diversos ángulos de ataque mediante el software de acceso libre OpenFOAM. Los resultados de la modelación muestran, de manera general, una buena aproximación en los parámetros de estudio, es decir, en cuanto al coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre, pero también en grandes ángulos de ataque la modelación no es del todo satisfactoria.

Las limitaciones de no modificar los parámetros del modelo de turbulencia pueden ser la causa de la variación de los coeficientes para grandes ángulos de ataque. A pesar de ello, la simulación del flujo en un amplio espectro de ángulos de ataque permite entender el concepto de circulación en un perfil aerodinámico, se pudo ver que, en grandes ángulos, existe desprendimiento, es decir, no hay buena circulación sobre el perfil lo que lo vuelve menos eficiente.

A través de las simulaciones que fueron realizadas, y cuyos valores fueron mostrados en capítulos anteriores, se logra comprobar que la metodología planteada en el presente trabajo permite obtener resultados que, al ser verificados con bases de datos existentes y disponibles a acceso público, poseen entre si una mínima variación. Con lo anterior, se establece entonces que la metodología formulada para el estudio aerodinámico de diversos perfiles es aceptable con base en los análisis comparativos que se llevaron a cabo.

Con base en lo anterior se concluye que si es posible simular de manera correcta la interacción del fluido con un perfil aerodinámico ya sea simétrico o asimétrico en el software de acceso libre OpenFOAM, aunque la curva de aprendizaje es más complicada, el mismo software hace necesario conocimientos base para poder realizar la misma simulación, lo que garantiza obtener un buen resultado. En definitiva, una vez que se domina el software, es más fácil realizar el estudio de este tipo de fenómenos.

En última instancia, se estima el presente trabajo como un buen primer esfuerzo para simular y caracterizar el comportamiento de flujos de fluidos en torno de perfiles aerodinámicos para diversos ángulos de ataque mediante OpenFOAM, indiscutiblemente puede ser mejorado con una mayor capacidad computacional, rigurosidad de análisis, así como modificando los parámetros del modelo de turbulencia a utilizar.

Bibliografía

- Aguirre, M. A., Astiz, V., Helios, M., Ferrandez, M., and Meroniuc, M. (2016). Desarrollo de balanza externa para túnel de viento. Revista de Tecnología y Ciencia UTN.
- Alonso, A. A. and Beltrán, Y. G. (2021). Diagnóstico y riesgos de la energía eólica en México. Revista de Geografía Agrícola, (67):27-45.

- Bai, C.-J., Chen, P.-W., and Wang, W.-C. (2016). Aerodynamic design and analysis of a 10 kW horizontal-axis wind turbine for tainan, taiwan. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(4):1151-1166. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1109-z>
- Boffadossi, M. and Savorgnan, F. (2016). Analysis on aerodynamic characteristics of a paraglider airfoil. *Aerotecnica Missili Spazio*, 95(4):211-218. <https://doi.org/10.1007/BF03404729>
- Burton, T. (2001). *WIND ENERGY HANDBOOK*. JOHN WILEY & SONS, LTD, 1 edition.
- Fernández Oro, J. M. (2012). Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos., volume 1. 1 edition.
- FSD blueCAPE Lda. (2023). blueCFD-Core Project . <http://bluecfd.github.io/Core/>. <http://bluecfd.github.io/Core/>
- Gómez, E. L. G., Villamarin, J. E. P., Caballero, D. A. R., Galindo, J., and Zuluaga, E. (2018). Implementación de sistema para la medición de fuerzas aerodinámicas en un túnel de viento subsónico. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(1):106. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.590>
- Manwell, J. F. (2009). *WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application*. Wiley, 2 edition.
- Morris, M., & Post, S. (2010). Force balance design for educational wind tunnels. 2010 Annual Conference & Exposition Proceedings. <https://doi.org/10.18260/1-2--15891>
- Razo, M. (2017). Instrumentación túnel de viento. *Revista Electrónica En Ingeniería Mecánica*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15113.13920>
- Suárez, C. A. O. (2005). Análisis de dinámica de fluidos en un perfil aerodinámico. Universidad del Bío Bío.
- UIUC Airfoil Data Site . (n.d.). NACA 0012 AIRFOILS (n0012-il). Airfoil Tools. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>
- UIUC Airfoil Data Site . (n.d.). NACA 0021 (naca0021-il). Airfoil Tools. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il>
- UIUC Airfoil Data Site . (n.d.). NACA 2412 (naca2412-il). Airfoil Tools. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca2412-il>
- UIUC Airfoil Data Site . (n.d.). NACA 64(3)-618 (naca643618-il). Airfoil Tools. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca643618-il>
- Villarrubia, M. (2012). *Ingeniería de la energía eólica*, volume 1. MARCOMBO, S.A., 1 edition.
- Zhang, Y., Gillebaart, T., van Zuijlen, A., van Bussel, G., and Bijl, H. (2016). Experimental and numerical investigations of aerodynamic loads and 3d ow over non-rotating MEXICO blades. *Wind Energy*, 20(4):585-600. <https://doi.org/10.1002/we.2025>