



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLOAPAN

Ingeniería en Energías Renovables

Selección y evaluación de Perfiles aerodinámicos a utilizar en el diseño de palas de aerogeneradores de baja potencia.

Tesis profesional

Para obtener el Grado de

Ingeniería en Energías Renovables

P R E S E N T A

Gerardo Diego Martínez Valdivia

Directora: Mtra. Brenda Beatriz Hernández

Codirector: Dr. José Rafael Dorrego Portela



Chicoloapan de Juárez, Estado de México septiembre de 2024



Presentación y directorio de los asesores

El presente trabajo realizado bajo de la modalidad de Tesis profesional, titulado “Selección y evaluación de Perfiles aerodinámicos a utilizar en el diseño de palas de aerogeneradores de baja potencia.” y que ha sido realizado por el alumno Gerardo Diego Martínez Valdivia con matrícula 18020045 ha sido aprobado al igual que aceptado como requisito para obtener el grado de Licenciatura en:

Ingeniería en Energías Renovables

Directora:

Mtra. Brenda Beatriz Hernández

Codirector:

Dr. José Rafael Dorrego Portela

Revisor:

Dr. Michael Jossué Rojas García

Revisor:

Dr. Daniel Rivera Hernandez



I. Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y la inspiración de muchas personas a lo largo de este arduo pero gratificante camino. Quisiera dedicar unas palabras de agradecimiento a aquellos que han sido pilares fundamentales en mi vida y en la culminación de este proyecto.

A mi padre, mi más profundo agradecimiento. Tu amor incondicional, tu sabiduría y tu ejemplo de perseverancia me han guiado en cada paso de mi vida. Has sido mi mayor inspiración y mi fuente de fuerza en los momentos más difíciles. Este logro es tanto tuyo como mío.

A mis hermanos, quienes han sido mis compañeros de vida y mis amigos más cercanos. Gracias por vuestro constante apoyo, por creer en mí y por brindarme siempre una palabra de aliento. Compartir este éxito con ustedes lo hace aún más especial.

A mis amigos, por su paciencia, comprensión y por estar siempre a mi lado. Su amistad ha sido un refugio y un motor que me ha impulsado a seguir adelante. Gracias por los momentos de risas, por escucharme y por hacer de esta experiencia algo inolvidable.

Asimismo, quiero agradecer a mis profesores y mentores, quienes me han proporcionado el conocimiento y las herramientas necesarias para llevar a cabo esta investigación. Su dedicación y compromiso con mi formación académica han sido invaluable.

A todos aquellos que, de una forma u otra, han contribuido a mi desarrollo personal y profesional, les expreso mi más sincero agradecimiento. Este logro no es solo mío, sino de todos ustedes que han caminado a mi lado en esta travesía.



II. Resumen

El desarrollo del diseño aerodinámico en la producción de palas ha tenido un impacto significativo en el aprovechamiento del potencial eólico. La eficiencia de los aerogeneradores, en gran medida, depende del diseño de las palas, que deben estar optimizadas para captar la máxima cantidad de energía del viento. En el contexto actual, los aerogeneradores de baja potencia se han convertido en un mercado prometedor, donde el diseño y la manufactura de las palas juegan un papel crucial en el rendimiento y la viabilidad de estos dispositivos.

Las palas de los aerogeneradores son elementos fundamentales que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. Un diseño aerodinámico eficiente permite maximizar la captura de energía, reducir las pérdidas y mejorar la estabilidad y durabilidad del aerogenerador. La forma, el perfil y el material de las palas influyen directamente en su rendimiento aerodinámico.

Los aerogeneradores de baja potencia son particularmente relevantes para aplicaciones residenciales, agrícolas y en zonas rurales donde la infraestructura eléctrica puede ser limitada. Estos dispositivos, aunque más pequeños que sus contrapartes de alta potencia, requieren un diseño igual de meticuloso para asegurar que operen eficientemente en una variedad de condiciones de viento.

En este trabajo, se presenta un estudio detallado de los perfiles aerodinámicos con el objetivo de determinar el perfil óptimo basado en la eficiencia aerodinámica y el comportamiento de sus coeficientes aerodinámicos. Los perfiles aerodinámicos son formas específicas del contorno de las palas que influyen en cómo el viento interactúa con ellas. La selección del perfil adecuado es crucial para optimizar el rendimiento del aerogenerador.

Para llevar a cabo este estudio, se desarrolla un modelo de análisis de fluido computacional (CFD, por sus siglas en inglés). El CFD es una herramienta poderosa que permite simular el comportamiento de los fluidos, en este caso, el viento, al



interactuar con las palas del aerogenerador. Utilizando CFD, se pueden analizar diferentes perfiles aerodinámicos bajo diversas condiciones de viento de diseño, lo que facilita la identificación del perfil más eficiente.

La selección de los perfiles aerodinámicos se basa en una combinación de criterios aerodinámicos y de funcionamiento. Estos criterios incluyen la eficiencia en la conversión de energía, la estabilidad en diferentes condiciones de viento y la durabilidad del material. La metodología implica la simulación de diferentes perfiles utilizando el modelo CFD, seguido de un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

La simulación realizada con CFD permite observar cómo distintos perfiles aerodinámicos responden a diversas velocidades de viento. Los resultados de estas simulaciones ofrecen información valiosa sobre los coeficientes aerodinámicos, como el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre, que son cruciales para evaluar la eficiencia de cada perfil. Con base en estos resultados, se puede identificar el perfil óptimo que maximiza la eficiencia aerodinámica del aerogenerador de baja potencia.

En resumen, el diseño aerodinámico de las palas es esencial para el aprovechamiento del potencial eólico, especialmente en aerogeneradores de baja potencia. A través del uso de herramientas avanzadas como el CFD, es posible optimizar el diseño de las palas para mejorar su rendimiento y contribuir al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el ámbito de la energía eólica.



III. Abstract

The development of aerodynamic design in blade production has had a significant impact on harnessing wind potential. The efficiency of wind turbines largely depends on the design of the blades, which must be optimized to capture the maximum amount of energy from the wind. In the current context, low-power wind turbines have become a promising market, where the design and manufacturing of the blades play a crucial role in the performance and feasibility of these devices.

The blades of wind turbines are fundamental elements that convert the kinetic energy of the wind into mechanical energy. An efficient aerodynamic design allows for maximizing energy capture, reducing losses, and improving the stability and durability of the wind turbine. The shape, profile, and material of the blades directly influence their aerodynamic performance.

Low-power wind turbines are particularly relevant for residential, agricultural, and rural applications where electrical infrastructure may be limited. These devices, although smaller than their high-power counterparts, require equally meticulous design to ensure they operate efficiently under a variety of wind conditions.

This work presents a detailed study of aerodynamic profiles with the goal of determining the optimal profile based on aerodynamic efficiency and the behavior of their aerodynamic coefficients. Aerodynamic profiles are specific shapes of the blade contour that influence how the wind interacts with them. Selecting the appropriate profile is crucial to optimizing the wind turbine's performance.

To carry out this study, a computational fluid dynamics (CFD) model is developed. CFD is a powerful tool that allows for simulating fluid behavior, in this case, wind, as it interacts with the wind turbine blades. By using CFD, different aerodynamic profiles can be analyzed under various design wind conditions, facilitating the identification of the most efficient profile.



The selection of aerodynamic profiles is based on a combination of aerodynamic and operational criteria. These criteria include efficiency in energy conversion, stability under different wind conditions, and material durability. The methodology involves simulating different profiles using the CFD model, followed by a comparative analysis of the obtained results.

The simulation conducted with CFD allows for observing how different aerodynamic profiles respond to various wind speeds. The results of these simulations provide valuable information about aerodynamic coefficients, such as the lift coefficient and the drag coefficient, which are crucial for evaluating the efficiency of each profile. Based on these results, the optimal profile that maximizes the aerodynamic efficiency of the low-power wind turbine can be identified.

In summary, the aerodynamic design of the blades is essential for harnessing wind potential, especially in low-power wind turbines. By using advanced tools like CFD, it is possible to optimize blade design to improve performance and contribute to the development of more efficient and sustainable technologies in the field of wind energy



Contenido

| | |
|--|-----------|
| I. Agradecimientos | 2 |
| II. Resumen | 3 |
| III. Abstract | 5 |
| 1. Introducción | 9 |
| 2. Antecedentes | 11 |
| 3. Marco teórico | 14 |
| 3.1. Aerogenerador..... | 14 |
| 3.2. Dinámica de los fluidos..... | 17 |
| 3.3. Fuerzas sobre el perfil aerodinámico..... | 18 |
| 3.3.1. Distribución de presiones y velocidades en un perfil aerodinámico..... | 18 |
| 3.3.2. Sustentación y arrastre..... | 20 |
| 3.3.2.1. Sustentación..... | 21 |
| 3.3.2.2. Arrastre..... | 22 |
| 3.3.2.3. Coeficiente de sustentación..... | 22 |
| 3.3.2.4. Coeficiente de arrastre..... | 22 |
| 3.4. Eficiencia..... | 23 |
| 3.5. Ángulo de ataque..... | 23 |
| 3.6. Numero de Reynolds..... | 23 |
| 3.7. Comportamiento del flujo en un perfil aerodinámico..... | 24 |
| 3.8. Dinámica de fluidos computacional (CFD)..... | 25 |
| 3.9. Procedimiento..... | 27 |
| 3.9.1. Clases de aerogeneradores de baja potencia..... | 27 |
| 3.9.2. Clasificación según la potencia suministrada | 28 |
| 3.10. Aplicación del método de análisis computacional..... | 30 |
| 4. Planteamiento del problema | 32 |
| 5. Hipótesis | 33 |
| 6. Objetivos | 33 |
| 6.1. General..... | 33 |
| 6.2. Específicos..... | 33 |
| 7. Metodología | 34 |
| 7.1. Análisis aerodinámico..... | 34 |
| 7.1.1. Selección del perfil..... | 34 |
| 7.1.1.1. Descenso del coeficiente de sustentación..... | 34 |
| 7.1.1.2. Ángulo de ataque (α) después del desprendimiento de flujo..... | 35 |
| 7.1.1.3. Relación (CL/CD)..... | 36 |



| | |
|---|------------|
| 7.1.1.4. Geometría simplificada..... | 36 |
| 7.2. Perfiles propuestos analizados por método Xfoil..... | 38 |
| 7.2.2. Aplicación del método Xfoil..... | 39 |
| 7.3. Perfiles propuestos analizados por método CFD..... | 44 |
| 7.3.1. Aplicación del método de análisis CFD..... | 46 |
| 8. Resultados y discusión..... | 77 |
| 8.1. Perfiles propuestos analizados por método Xfoil..... | 77 |
| 8.2. Perfiles propuestos analizados por método CFD..... | 88 |
| 8.3. Sobre la discusión..... | 101 |
| 9. Conclusiones..... | 103 |
| 10. Referencias..... | 105 |



1. Introducción

Segun "The Impact of Population Growth on Energy Consumption and Economic Growth in Developing Countries"[1], en las últimas décadas, la demanda de energía eléctrica se ha incrementado debido principalmente al aumento poblacional y los consecuentes niveles crecientes en el consumo. Sin embargo, la red eléctrica tradicional muestra signos de envejecimiento, por lo que resulta necesaria la aplicación de desarrollos tecnológicos orientados a la mejora de las condiciones de la red. Actualmente, la mayoría de los procesos utilizados para la generación de energía, en particular la eléctrica, no son sustentables, ya que su huella de carbono radica en las constantes emisiones de dióxido de carbono hacia la atmósfera, produciendo efectos indeseables en el calentamiento global. En México, la situación es preocupante debido a la alta dependencia del país en combustibles fósiles, como el petróleo y el gas natural, para la generación de electricidad. Según datos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Agencia Internacional de Energía (AIE), alrededor del 85% de la electricidad en México proviene de fuentes no renovables, lo que contribuye significativamente a las emisiones de CO₂ [2].

El país ha tomado algunas medidas para mejorar la sustentabilidad de su matriz energética, como la implementación de la Ley de Transición Energética, que establece metas para aumentar la participación de energías limpias en la generación eléctrica [3]. Sin embargo, la transición hacia un sistema energético más sustentable enfrenta desafíos significativos, incluyendo la necesidad de inversiones en infraestructura y la resistencia de los sectores vinculados a los combustibles fósiles.

La red eléctrica tradicional enfrenta grandes retos, como los picos de demanda, la incorporación de energías renovables, la reducción de pérdidas de energía, la mejora en la calidad del servicio y la eficiencia energética, entre otros. En México, desde que se introdujo la electricidad en 1879, la incorporación de nuevas tecnologías para la optimización de la generación y consumo de energía eléctrica ha sido muy limitada. Sin



embargo, con los cambios al artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el marco de la reforma energética de 2014, se abre la oportunidad de implementar mejores tecnologías en la red tradicional, por ello, se considera que este país está obligado a una renovación del sector eléctrico y su conversión a una energía renovable de bajo impacto y sustentable.[4]



2. Antecedentes

En México, el desarrollo de la energía eólica ha sido más reciente pero significativo. El país cuenta con un gran potencial eólico, especialmente en regiones como Oaxaca, donde se encuentra el Istmo de Tehuantepec, una de las áreas con mayor recurso eólico del mundo [5]. A partir de la reforma energética de 2014, que promovió la inversión privada en el sector energético, se han establecido numerosos parques eólicos en el país [6]. Para 2020, México tenía una capacidad instalada de aproximadamente 6.9 GW de energía eólica, con planes de expansión continua [7].

Un desafío clave en el diseño de aerogeneradores es la selección de los perfiles aerodinámicos de las palas. Los perfiles aerodinámicos determinan la eficiencia con la que el aerogenerador puede convertir la energía cinética del viento en energía mecánica y, posteriormente, en electricidad [8]. La elección del perfil adecuado depende de diversos factores, como la velocidad del viento, la turbulencia y las características específicas del sitio de instalación. Investigaciones recientes se han centrado en optimizar el diseño de los perfiles aerodinámicos para maximizar la eficiencia y reducir los costos de operación y mantenimiento [9].

Varios estudios han explorado diferentes enfoques para mejorar el rendimiento de los aerogeneradores. Por ejemplo, Burton et al. (2001) y Manwell et al. (2009) han realizado análisis exhaustivos sobre la aerodinámica de los aerogeneradores, proporcionando bases teóricas y prácticas para el diseño de palas eficientes [10], [11]. Otros estudios, como los de Hansen et al. (2006), han empleado simulaciones computacionales avanzadas para evaluar el rendimiento de diferentes perfiles bajo diversas condiciones operativas [12].

A continuación, se mencionan trabajos anteriores que han desarrollado diseños y estudios, utilizando CFD.

Hasham et al. [13] en el 2023, realizaron una comparación del perfil NACA 0012 y NACA 4412 y su aplicación en turbinas eólicas de eje vertical de baja potencia, esta



investigación tuvo como propósito el análisis del efecto en la eficiencia aerodinámica en el coeficiente máximo de energía del rotor utilizando dos parámetros del desempeño: el ángulos de ataque con valores de 0° , 5° , 10° , 15° y velocidades de 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8 m/s, con el software ANSYS Fluent, determinándose la mayor eficiencia aerodinámica en los ángulos de de ataque de 5° y 10° a una velocidad de 8 m/s.

Bhavsar et al. [14] en el 2023, propusieron un diseño en el cual se realizó ranuras a la zona de succión (extradós) a la probeta del perfil aerodinámico DU-99-W-405, realizándose una simulación numérica, consideraron cinco posiciones diferentes para las ranuras a lo largo de la cuerda del perfil (ranuras 1, 2, 3, 4 y 5) sobre el borde de entrada y el borde de salida, los valores C_l y C_d se calcularon para cada ranura, con respecto al ángulo de ataque, obteniéndose los valores óptimos de C_l , C_d y C_l/C_d en la ranura de la segunda posición con valores de 68,8%, 36,9% y 116% respectivamente

Chegini et al. [15] en el 2023, presentaron un estudio que combina una turbinas Savonius y Darrieus para conocer los efectos sobre la capacidad de arranque automático de la turbina Darrieus proponiendo un diseño con un par de arranque superior, llevaron a cabo simulaciones numéricas utilizando un enfoque de CFD bidimensional para simular el campo de flujo; se empleó el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST para cerrar las ecuaciones inestables de ReynoldsAverged Navier-Stokes (URANS), posteriormente validaron y verificaron el modelado mediante el estudio de independencia de malla. Los resultados indicaron que acoplar las turbinas Darrieus y Savonius mejoró la capacidad de arranque automático de la turbina híbrida, con un aumento del 26.91% en el coeficiente de potencia C_p y con una relación de velocidad punta (TSR) más baja de 1.45

Ye et al. [16] en el 2023, analizaron el rendimiento del aerogenerador NTNU Blind Test 1 con simulación CFD, realizándose un estudio exhaustivo de verificación y validación para las predicciones numéricas del perfil aerodinámico NREL S826 a bajo número de Reynolds ($1.0e 5$), en tres ángulos de ataque diferentes. Los resultados de la simulación se compararon directamente con datos experimentales obteniendo una



buena convergencia entre la predicción y la medición, para diferentes valores de velocidades específicas de diseño (TSR).

Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten ciertas lagunas en la investigación, especialmente en lo que respecta a los aerogeneradores de baja potencia. La mayoría de los estudios se han centrado en aerogeneradores de gran escala, dejando un vacío en la optimización de perfiles aerodinámicos para dispositivos de menor capacidad [27]. Este segmento es crucial para aplicaciones rurales y descentralizadas, donde la implementación de aerogeneradores de baja potencia puede tener un impacto significativo en la sostenibilidad y la accesibilidad energética.

Por lo tanto, este trabajo se inscribe en este contexto de innovación y mejora continua en el diseño de aerogeneradores, buscando identificar los perfiles aerodinámicos más adecuados para aerogeneradores de baja potencia. La selección y evaluación de estos perfiles es crucial para asegurar un rendimiento óptimo, reducir el impacto ambiental y fomentar el uso de energías renovables en regiones con recursos eólicos moderados. La investigación propuesta busca llenar las lagunas existentes en la literatura, proporcionando datos empíricos y análisis detallados que contribuyan al desarrollo de soluciones eficientes y sostenibles para la generación de energía eólica a pequeña escala.



3. Marco teórico

3.1. Aerogenerador.

Actualmente, la energía eólica ha tenido gran auge dentro de las energías renovables; las turbinas que se emplean y sus palas han sido modificadas para aumentar la eficiencia a la hora de extraer energía del viento. Los aerogeneradores son aquellos dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica y eventualmente en electricidad. En su forma general, son sistemas complejos y están conformados por subsistemas aerodinámicos, mecánicos, eléctricos y electrónicos. Los componentes claves de los aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia son el rotor, la estructura interna (ejes y tren de potencia), el generador, la góndola, el sistema de orientación, la torre y los sistemas eléctricos (Figura 1.1).

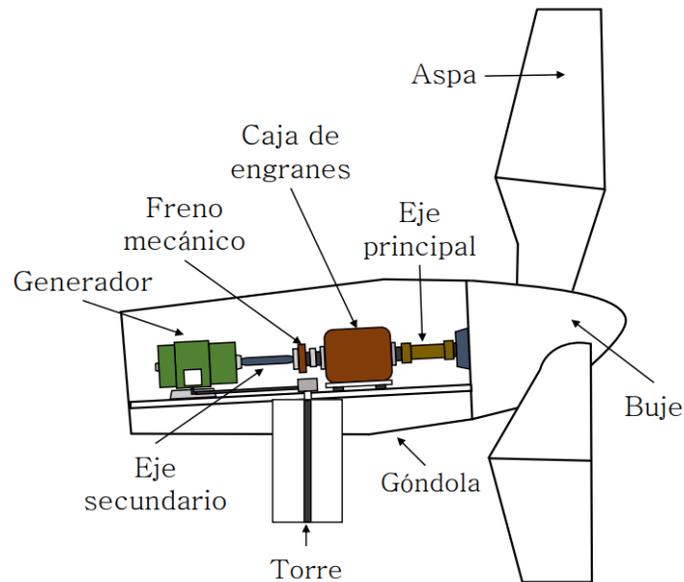


Figura 1.1. Componentes principales de un aerogenerador [18].



Las palas de los aerogeneradores están compuestas por perfiles aerodinámicos, los cuales se pueden definir como cualquier sección de ala cortada perpendicular al eje de la misma. Estos se clasifican en dos grandes grupos: simétricos y asimétricos. Los perfiles simétricos se caracterizan porque la curvatura media, la cual divide al perfil aerodinámico en dos partes iguales, coincide con la línea de cuerda del perfil; por lo tanto, el intradós y el extradós tienen la misma geometría. En el caso de los perfiles asimétricos, la línea de curvatura presenta un valor en porcentaje de la cuerda superior al 0 %. Los parámetros que conforman un perfil se pueden observar en la (Figura 1.2).

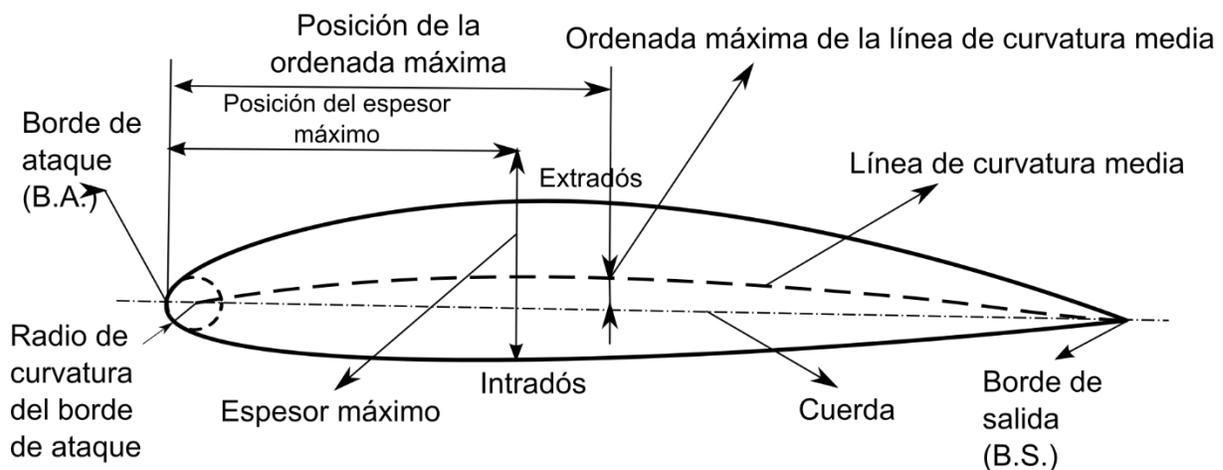


Figura 1.2. Nomenclatura del perfil aerodinámico [19].

- **Cuerda:** Línea que une el borde de ataque con el borde de salida.
- **Borde de ataque:** Es la parte delantera del perfil, en esta parte el aire impacta al perfil aerodinámico. El fluido se distribuye en el extradós e intradós.
- **Borde de salida:** Es la parte trasera del perfil aerodinámico. En esta parte el flujo de aire proveniente del extradós e intradós abandonan el perfil.



- Intradós: Superficie inferior del perfil o también llamada zona de presión
- Extradós: Superficie superior del perfil o también llamada zona de succión.
- Línea de curvatura media: Línea equidistante entre el extradós e intradós. Sus condiciones para definir la curvatura del perfil son las siguientes: Si se encuentra por encima de la cuerda su curvatura es positiva, debajo de la cuerda es negativa y si cae en ambas condiciones se dice que el perfil posee doble curvatura.
- Espesor: Es la distancia entre la superficie superior e inferior del perfil.
- Espesor máximo: Es la distancia máxima entre el intradós y el extradós.
- Radio del borde de ataque: Define el borde de ataque e influye en la pérdida de sustentación del perfil.

Antes de iniciar el diseño, es conveniente conocer a detalle algunos parámetros de una sección de la pala como es el ángulo de ataque (α), de flujo (φ) y de torsión (β). Así como la velocidad relativa del viento (W), la velocidad del viento ($U_{\infty}(1 - a)$) y la velocidad tangencial ($\Omega r(1 + a)$). (figura 1.3)

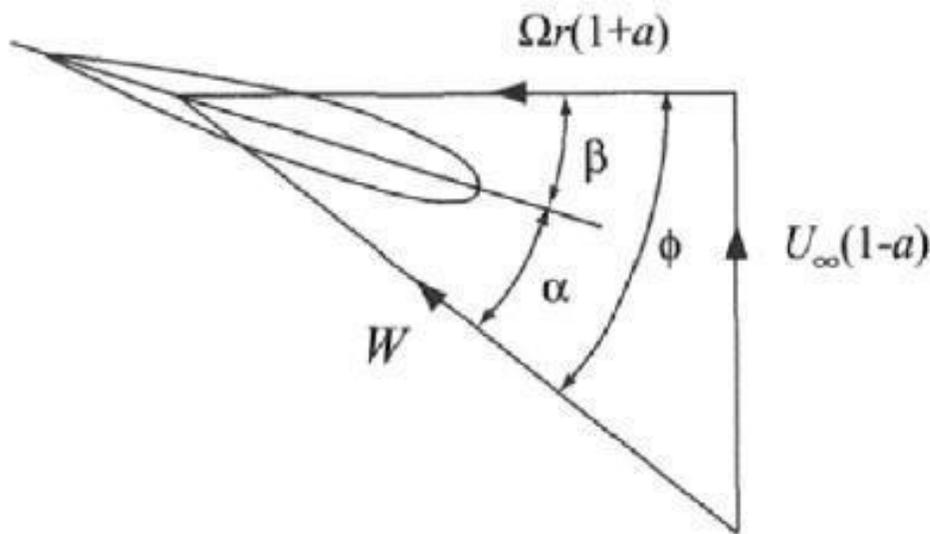


Figura 1.3 Nomenclatura del perfil aerodinámico [20].

Dada la importancia de optimizar el diseño de las palas para maximizar la eficiencia energética, este trabajo se centra en la selección y evaluación de perfiles aerodinámicos adecuados para su utilización en el diseño de palas de aerogeneradores de baja potencia. El objetivo principal es identificar los perfiles que mejor se adapten a las condiciones específicas del viento en las regiones donde se planea implementar estos aerogeneradores, asegurando así un rendimiento óptimo y una mayor viabilidad económica y ambiental.

3.2. Dinámica de los fluidos.

El movimiento de un fluido está completamente descrito por las leyes de conservación de tres magnitudes fundamentales: masa, cantidad de movimiento y energía. La importancia de este hecho radica en que estas tres leyes determinan, completamente, el comportamiento del sistema sin información dinámica adicional [21]. La única información adicional necesaria está relacionada con la naturaleza del fluido: si es un fluido incompresible, si es un gas ideal, si es un fluido condensable, si es una sustancia viscoelástica, etc.



Así las cosas, un flujo se considera completamente conocido si, en cualquier instante y en cada punto del dominio, se conocen el campo de velocidades y un número mínimo de propiedades estáticas. El número de estas propiedades depende de la naturaleza del fluido; una propiedad, si el fluido es incompresible (la presión, por ejemplo) o dos, si es un fluido compresible (para un gas ideal, por ejemplo, presión y densidad) en equilibrio termodinámico. En todos los casos en los que sea necesario, se considerará disponible la información de aquellas propiedades que definen la naturaleza del fluido (por ejemplo, viscosidad o densidad) así como la información necesaria para identificar las fuerzas externas (además de las internas) que inducen movimiento.

3.3. Fuerzas sobre el perfil aerodinámico.

Distribución de presiones y velocidades en un perfil aerodinámico; para explicar la relación entre el campo de velocidades y el de presiones hay que recurrir al teorema de Bernoulli. El teorema establece, que un fluido es ideal, cuando una corriente se acelera, baja la presión, y por el contrario, cuando se frena aumenta la presión.

3.3.1. Distribución de presiones y velocidades en un perfil aerodinámico.

El comportamiento de las líneas de corriente en un perfil aerodinámico con cierto ángulo de ataque es desviado por el borde de ataque del perfil, creándose un punto de estancamiento que divide las líneas de corriente en dos direcciones, una corriente se dirige por el intradós y por el extradós. Ambas son aceleradas sobre la superficie del perfil, sin embargo, las velocidades sobre el lado de succión son mayores que las velocidades sobre la presión. Esta diferencia entre ellas da origen a las fuerzas aerodinámicas. En la Figura 3.1 se ilustra la distribución de las corrientes de velocidades en el perfil aerodinámico.

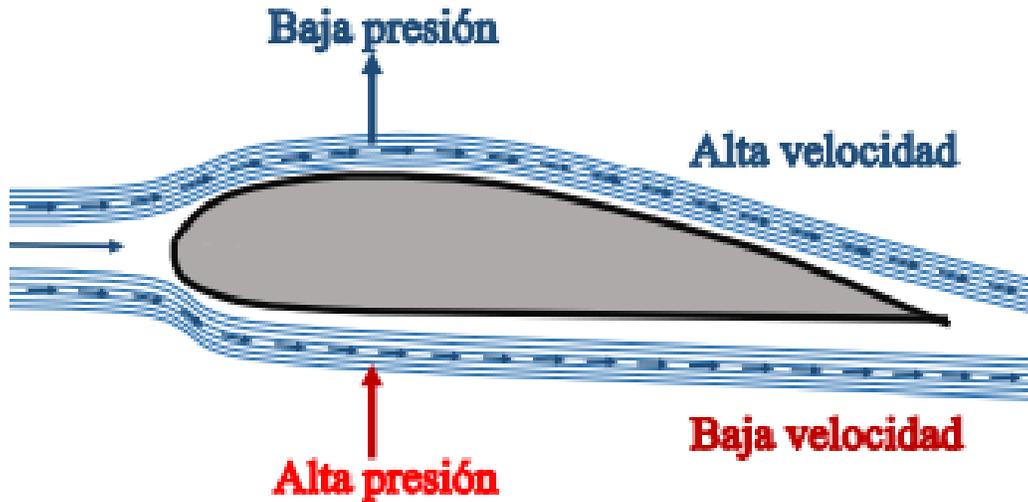


Figura 3.1. Distribución de velocidades [22].

El fluido rodea completamente el perfil aerodinámico, esto crea una diferencia de presiones en ambas superficies. A medida que el flujo de aire acelera alrededor del borde de ataque, la presión disminuye, lo que resulta un gradiente de presión negativo. Mientras que el flujo de aire se acerca al borde de salida, se desacelera y la presión de la superficie aumenta, lo que da como resultado un gradiente de presión positivo. Al integrar todas las contribuciones de las fuerzas en cada elemento diferencial de área, se obtiene una resultante de fuerzas.

El resultado de la distribución de presiones es una fuerza resultante dirigida hacia la normal; la componente de esta fuerza perpendicular a la corriente de aire es la fuerza de sustentación. En la Figura 3.2 se muestra las distribuciones de presiones en el perfil aerodinámico [20].

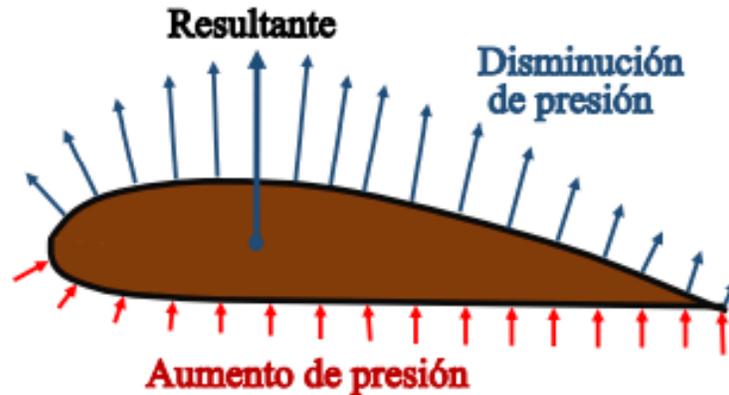


Figura 3.2. Distribución de presiones.[22]

3.3.2. Sustentación y arrastre.

Para flujos bidimensionales, la resultante de la presión y las fuerzas de corte se pueden dividir en dos componentes: la dirección normal al flujo, que es la sustentación, y el otro en la dirección del flujo, que es la fuerza de arrastre.

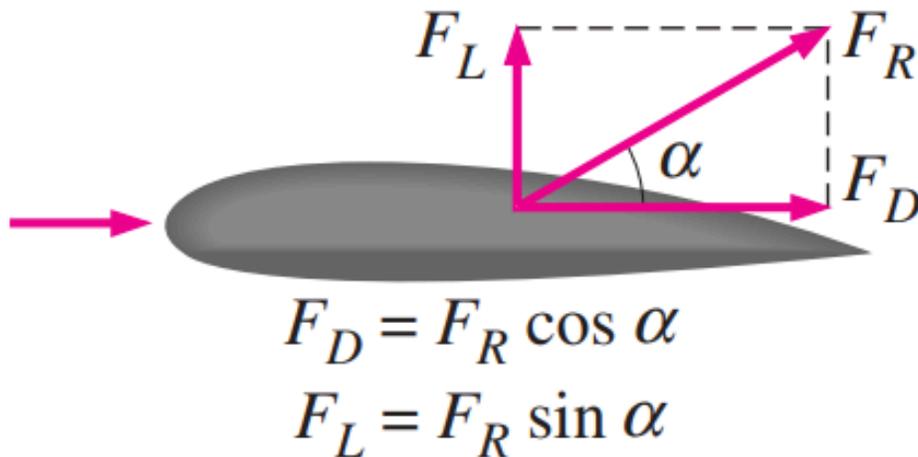


Figura 3.3. Sustentación y arrastre[22]



Cuando un cuerpo se sumerge en una corriente fluida, el fluido ejercerá sobre las fuerzas aerodinámicas que dependen de la geometría introducida [21]. En la Figura 3.4, se pueden observar las fuerzas que se ejercen sobre los perfiles aerodinámicos, las cuales son: la fuerza de sustentación o levantamiento, fuerza de resistencia o arrastre, peso y fuerza de empuje. Estas son generadas principalmente por una diferencia de presiones en el intradós y extradós.

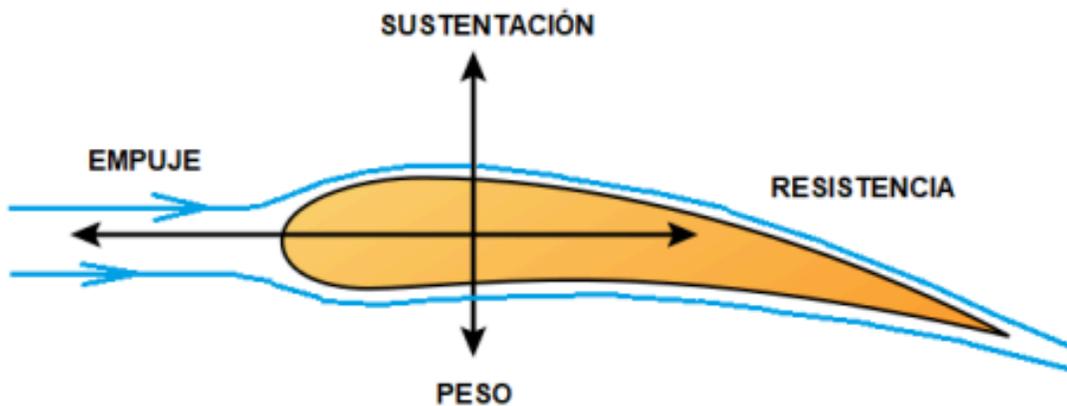


Figura 3.4. Fuerzas sobre el perfil aerodinámico [22].

3.3.2.1. Sustentación

La sustentación es la fuerza que actúa en dirección perpendicular a la del flujo cuando un fluido se mueve sobre un cuerpo sólido [23]. A continuación, se presenta el modelo matemático para la fuerza de sustentación:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

Ecuación 1. Fuerza de sustentación.

Donde:

L es la fuerza de sustentación (N).

ρ es la densidad. (kg/m³)

V es la velocidad relativa del viento (m/s)

S es el área del perfil aerodinámico (m²).

C_L es el coeficiente de sustentación.



3.3.2.2. Arrastre

El arrastre es la fuerza que un fluido ejerce sobre un cuerpo en la dirección del flujo [8].

A continuación, se presenta el modelo matemático para la fuerza de arrastre:

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

Ecuación 2. Fuerza de arrastre.

Donde:

D es la fuerza de arrastre (N)

C_D es el coeficiente de arrastre.

Las fuerzas de sustentación y arrastre dependen de la densidad del fluido ρ , la velocidad V y el tamaño, forma y orientación del cuerpo [24]. Estas fuerzas se pueden expresar en términos adimensionales que representan de igual manera el arrastre y sustentación de un cuerpo.

3.3.2.3. Coeficiente de sustentación

El coeficiente de sustentación (C_L) se puede expresar en términos adimensionales mediante el siguiente modelo matemático:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

Ecuación 3. Coeficiente de sustentación.

3.3.2.4. Coeficiente de arrastre

Para el caso del coeficiente de arrastre (C_D) se puede expresar de la siguiente manera:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

Ecuación 4. Coeficiente de arrastre.



3.4. Eficiencia

La eficiencia aerodinámica (ε) es la relación entre el coeficiente de sustentación y arrastre.

$$\varepsilon = \frac{C_L}{C_D}$$

Ecuación 5. Eficiencia.

Para comprobar estos coeficientes normalmente se utilizan ciertos parámetros adimensionales los cuales son parámetros importantes para definir las características de las condiciones del fluido.

3.5. Ángulo de ataque.

El ángulo de ataque (α), se puede definir como el ángulo existente entre la cuerda del perfil y la dirección de la velocidad relativa del viento que incidente sobre el mismo.

3.6. Numero de Reynolds

El número de Reynolds (R_e) es uno de los parámetros más importantes para definir las características del fluido, este se determina por [25]:

$$R_e = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho v c}{\mu} = \frac{v c}{V}$$

Ecuación 6. Número de Reynolds.

donde μ es la viscosidad del fluido, $V = \frac{\mu}{\rho}$ es la viscosidad cinemática, v es la velocidad y c la longitud de cuerda. En resumen, el número de Reynolds depende de la velocidad



del fluido y longitud (cuerda del perfil) y se define como el cociente entre las fuerzas inerciales, y las fuerzas viscosas. No obstante, dependerá del tipo de superficie del perfil, donde ocurre la transición de la capa límite laminar a turbulenta.

3.7. Comportamiento del flujo en un perfil aerodinámico.

Conocer la variación del coeficiente de sustentación en relación con el ángulo de ataque se hace fundamental en el análisis del comportamiento del flujo, en la siguiente figura se observa como la sustentación es mayor cuando aumenta el ángulo de ataque. Sin embargo, a partir del ángulo crítico (α_c), el perfil pierde la capacidad de sostentar. Este fenómeno es conocido como entrada en pérdida de sustentación (stall), el cual está relacionado al desprendimiento de la capa límite.

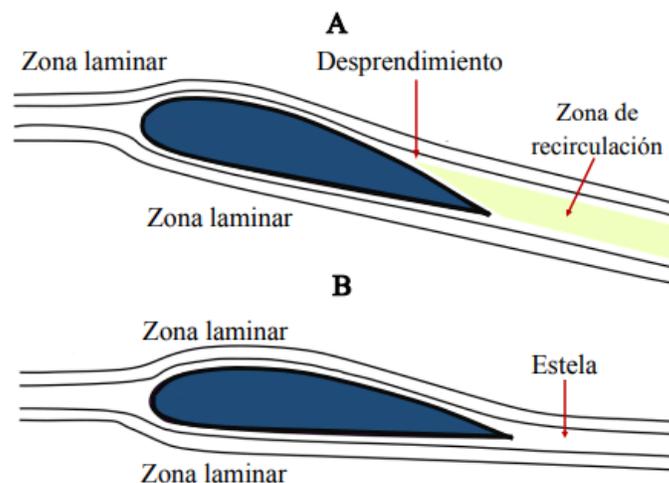


Figura 3.5. Desprendimiento del flujo [26].

La relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de ataque se puede observar en la siguiente figura, como el perfil aerodinámico se enfrenta a la corriente de flujo con ángulos de ataque menores que unos 15 o (valor depende de la forma del perfil), la corriente de flujo rodea suavemente describiendo un flujo laminar, donde la capa



límite permanece adherida al perfil. Sin embargo, los efectos viscosos son dominantes y puede formar turbulencias. En esta condición el coeficiente C_l su comportamiento es lineal hasta alcanzar un ángulo de ataque crítico (α_c).

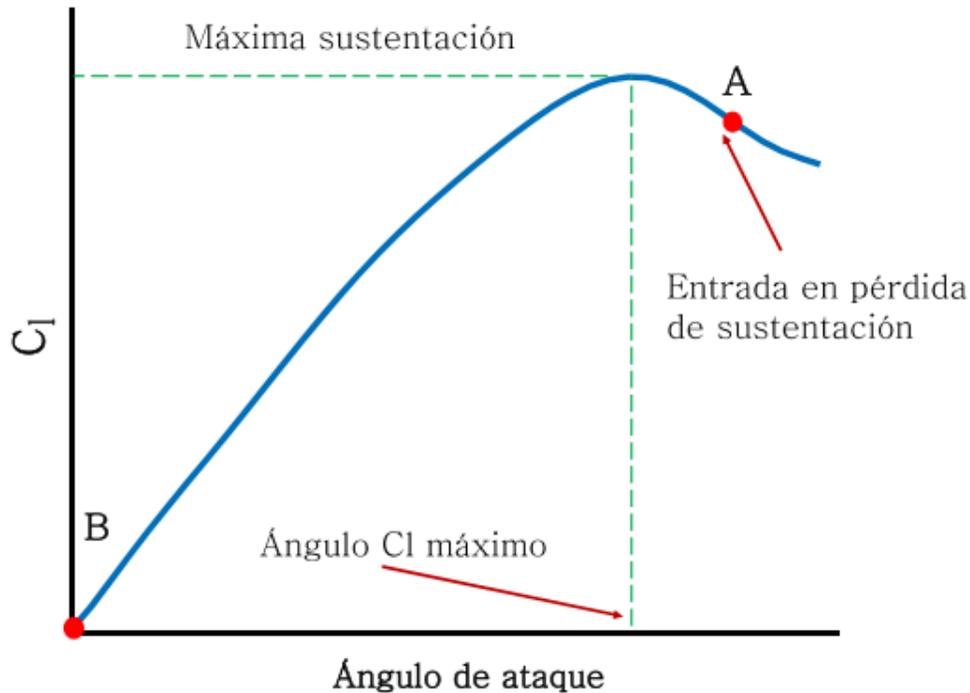


Figura 3.6. Coeficiente de sustentación [26].

3.8. Dinámica de fluidos computacional (CFD).

El objetivo que persiguen las disciplinas científicas es la obtención de leyes generales que permitan explicar, y así entender, los fenómenos naturales. La descripción de dichos fenómenos se plasma en ecuaciones matemáticas cuya resolución, congruente con ciertas condiciones de contorno e iniciales, permite estudiar casos particulares e incorporar dicho conocimiento a nivel tecnológico.

Sin embargo, muchas de esas ecuaciones no admiten soluciones analíticas y las ecuaciones de la mecánica de fluidos son un ejemplo de ellas. Su estudio se ha



abordado desde diferentes frentes: mediante simplificaciones que permiten la obtención de soluciones analíticas, mediante técnicas de análisis dimensional que permiten la identificación de las variables de influencia (así como la combinación entre ellas) y mediante la experimentación.

Las simplificaciones, sin dejar de ser importantes, no permiten la obtención de soluciones para muchas situaciones de interés en ingeniería. El estudio de flujos complejos, debidos a la turbulencia, por ejemplo, así como dominios de solución y geometrías complejas exigen niveles de detalle que obligan a dejar de lado las simplificaciones.

El análisis dimensional es una extraordinaria herramienta de análisis de la física en general y de la mecánica de fluidos en particular. La identificación de las variables de influencia, su agrupación en grupos adimensionales, la metodología idónea para optimizar los recursos experimentales, así como compactar los resultados de los ensayos, son algunas de sus características más remarcables. Del análisis dimensional se establecen las relaciones de semejanza (geométrica, cinemática y dinámica) que permiten la extrapolación de los resultados obtenidos sobre modelos a escala, a prototipos a escala real aun cuando es imposible, en la práctica, asegurar las condiciones de semejanza total.

La opción de estudiar los flujos a partir de experimentos. Es que la validez de los resultados (siendo estos un conjunto limitado de observaciones) está limitado por la resolución y exactitud de los medios instrumentales disponibles y, naturalmente, de la disponibilidad de estos últimos. En cualquier caso, la programación, el diseño y la ejecución de los ensayos exigen grandes recursos de tiempo, infraestructura humana, material y de dinero.

Complementariamente, la evolución de los ordenadores ha permitido desde hace ya tiempo poner a disposición de la comunidad interesada de nuevas técnicas de análisis:



el estudio computacional de los flujos o lo que en la actualidad se conoce como dinámica de fluidos computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics). Este método tiene por objetivo la resolución de las ecuaciones del flujo haciendo uso de herramientas numéricas discretizando el dominio de solución espacial y temporalmente [27].

3.9. Procedimiento

La norma IEC 61400-2 [28] presenta la filosofía de seguridad, la garantía de calidad, donde especifica los requisitos para la seguridad de aerogeneradores de baja potencia (SWT por sus siglas en inglés). Su objetivo es proporcionar un nivel adecuado de protección durante su vida útil planificada. Permite un modelo de carga simplificado para aerogeneradores con área de barrido del rotor inferior a 200 m^2 (8 m de radio).

3.9.1. Clases de aerogeneradores de baja potencia

Los parámetros a considerar en el diseño de un aerogenerador en su normalidad dependen de condiciones externas que se darán dependiendo del lugar de emplazamiento o sitio previsto para la instalación. Las clases de los aerogeneradores se definen en función de los parámetros de la velocidad del viento y de turbulencia, estos valores presentan diferencias con valores característicos al sitio de emplazamiento. La finalidad de tener una clasificación de aerogeneradores es tener una referencia del recurso, que será una variable regulada por el viento.

En la tabla 3.1 se definen los parámetros básicos que definen la clasificación de aerogeneradores de baja potencia.[28]

Tabla 3.1 Parámetros básicos para la clasificación de aerogeneradores.

| Clases de aerogeneradores | I | II | III | IV | S |
|----------------------------------|----------|-----------|------------|-----------|-----------------------|
| Vref (m/s) | 50 | 42.5 | 37.5 | 30 | valores especificados |
| Vm (m/s) | 10 | 8.5 | 7.5 | 6 | |



| | | | | | |
|---|------|------|------|------|---------------------|
| 115 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | por el diseñador |
| a | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| <p>donde: Los valores de los parámetros se aplican a la altura del buje 115 es el valor de la característica adimensional de la intensidad de la turbulencia a 15 m/s a es el parámetro adimensional.</p> | | | | | |

3.9.2. Clasificación según la potencia suministrada

Según la potencia que generan se obtienen tres categorías:

- Aerogeneradores de baja potencia: son aquellos que entregan una potencia de hasta 100 kW. Se utilizan principalmente para abastecer viviendas, así como establecimientos de pequeño tamaño, reservándose casi exclusivamente al ámbito privado.
- Aerogeneradores de media potencia: poseen una potencia de salida entre 100 kW y 30 MW, su aplicación se da generalmente en pequeños desarrollos comunitarios.
- Aerogeneradores de alta potencia: son aquellos capaces de generar más de 30 MW. Son utilizados para proveer electricidad a la red nacional, por ello se encuentran comúnmente en zonas con gran potencial eólico. En general, se instalan varios generadores juntos, formando un parque eólico.

En México, la regulación de los aerogeneradores y los parques eólicos está contemplada en varias normativas y leyes relacionadas con la energía y el medio ambiente. Aquí te indico algunos parámetros y regulaciones relevantes:

Ley de Transición Energética (LTE): Esta ley establece los objetivos y lineamientos para la promoción de energías limpias, incluyendo la energía eólica. Aunque no especifica parámetros exactos para cada tipo de aerogenerador, define metas de participación de



energías limpias en la matriz energética nacional y establece incentivos para el desarrollo de proyectos eólicos [29].

Reglamento de la Ley de Energía Eléctrica: Este reglamento complementa la LTE y proporciona detalles sobre la operación y conexión de plantas generadoras de electricidad, incluyendo los aerogeneradores. Establece requisitos para la interconexión a la red eléctrica y normas de operación y mantenimiento para los proyectos eólicos [30].

Normas Oficiales Mexicanas (NOM): Existen varias NOMs que regulan aspectos específicos de la instalación y operación de aerogeneradores, como la NOM-001-SEDE-2012, que establece los requisitos de seguridad eléctrica en instalaciones de baja tensión, y la NOM-002-SEDE-2014, que cubre aspectos relacionados con la seguridad y eficiencia de equipos de generación [31].

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA): Esta ley regula el impacto ambiental de las instalaciones, incluyendo los parques eólicos. Establece que cualquier proyecto de gran envergadura, como los aerogeneradores de alta potencia, debe someterse a una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para asegurar que se minimicen los efectos adversos sobre el medio ambiente [32].

Comisión Reguladora de Energía (CRE): La CRE emite regulaciones y directrices específicas para la operación de instalaciones de generación de energía, incluyendo aerogeneradores. La CRE supervisa y regula la operación de los proyectos eólicos, asegurando el cumplimiento de las normativas vigentes [33].

En el caso concreto de los aerogeneradores de baja potencia, la EOI (2011) observa las siguientes ventajas:

- Proximidad desde el punto de generación al punto de consumo, lo que minimiza ampliamente las pérdidas de energía.



- Versatilidad de las aplicaciones.
- Accesibilidad para pequeñas economías domésticas.
- Desahogo para las redes de distribución sin producir sobrecargas.
- Menor impacto visual que los aerogeneradores de energía eólica tradicional.
- Permite el bombeo de agua directo.
- No requiere complejos estudios de viabilidad.
- Requiere menos espacio.
- Requiere un bajo mantenimiento.

3.10. Aplicación del método de análisis computacional.

En este proceso se determina el problema a resolver mediante la herramienta de dinámica de fluidos computacional, este consta de distintas etapas.

Estas etapas son: preanálisis, preprocesamiento, geometría, mallado, configuración de set up, solución y resultados.

- Preanálisis: en este proceso se hace la búsqueda de las coordenadas del perfil, para esto se consulta un sitio web “Airfoil Tools”, es una base de datos donde se tiene información de la mayoría de los perfiles.
- Preprocesamiento: es la elaboración de una tabla en Excel partiendo de las coordenadas obtenidas en el paso anterior, este nos ayudará a introducir por medio de coordenadas el trazo del perfil, al software de análisis de fluidos computacional.
- Geometría: Este será el primer paso dentro del software, en él se exporta el perfil por medio de coordenadas y se elabora el área de control.
- Mallado: Es uno de los pasos más importantes, ya que aquí se establece el parámetro de análisis que es donde se va a centrar el estudio computacional. El mallado nos servirá para reconocer el perfil y la interacción del fluido.



- Configuración de set up: En este paso se establecen las ecuaciones que se van a realizar, el material, sus condiciones, la dirección del fluido, el número de interacciones y se obtiene un cálculo.
- Solución: Una vez terminado el cálculo el programa tiene un sistema de solución donde se establecen en este caso los coeficientes de interés del estudio.
- Resultado: El software hace por medio de representación gráfica el comportamiento de las características del fluido, como la velocidad, la presión y la temperatura, también en una de las ventanas se muestra el resultado de fuerzas y sus coeficientes.



4. Planteamiento del problema

Las fuentes de energía renovable poseen la ventaja de estar disponibles localmente, son sostenibles a largo plazo y las tecnologías no contaminan durante su operación, sin embargo, presentan algunos inconvenientes, según el tipo de fuente considerada. Esta problemática señala la importancia de investigar los criterios que pueden contribuir a fomentar el desarrollo sostenible, impulsado por proyectos de energía eólica. Entre los factores que se deben tomar en cuenta para los proyectos de energía eólica se encuentra el comportamiento de las palas y su impacto en la eficiencia del aerogenerador.

El diseño y la evaluación de perfiles aerodinámicos busca contribuir con nuevas ideas para obtener aerogeneradores que tengan un mínimo de mantenimiento, un bajo costo y una alta producción energética. Un componente básico de un aerogenerador es el rotor, y tiene como propósito captar la energía cinética del viento. Sin embargo, se deben considerar ciertas características y especificaciones para obtener una geometría de la pala. Un elemento importante en el diseño es el tipo de perfil aerodinámico y tiene como función desplazarse a través del aire y crear una distribución de presiones con el fin de que el flujo del viento sea el más eficiente, mencionado lo anterior, en esta investigación se examina los comportamientos de distintos perfiles aerodinámicos para adecuarlos a aerogeneradores de baja potencia.



5. Hipótesis

La selección y optimización de perfiles aerodinámicos específicos para palas de aerogeneradores de baja potencia, utilizando análisis computacional avanzado y basándose en las características del viento en regiones específicas de México, resultará en un aumento significativo de la eficiencia energética y una reducción en los costos operativos en comparación con los perfiles aerodinámicos estándar utilizados en la actualidad.

6. Objetivos

6.1. General.

Analizar el comportamiento de perfiles aerodinámicos con base a sus coeficientes y criterios aerodinámicos, así como su eficiencia, implementando un software de simulación para la evaluación del comportamiento en distintos perfiles aerodinámicos, para el diseño de una pala de un aerogenerador de baja potencia.

6.2. Específicos

- Seleccionar los perfiles aerodinámicos que se utilizan en el diseño de aerogeneradores de baja potencia
- Obtener los criterios de selección de perfiles aerodinámicos
- Evaluar los perfiles aerodinámicos seleccionados según criterios de selección
- Obtener los coeficientes de sustentación (C_l), arrastre (C_d) y momento (C_m) para cada perfil aerodinámico.



7. Metodología

7.1. Análisis aerodinámico.

El análisis aerodinámico consta de dos etapas esenciales: la selección del perfil y la aplicación del método de análisis computacional.

7.1.1. Selección del perfil.

Se elaboró una metodología para la selección del perfil con el objetivo de conocer cuál es el más óptimo, partiendo de ciertas características aerodinámicas y que pueda ser utilizado en el diseño de la pala. Los criterios de selección se ordenan de acuerdo a prioridades de diseño.

- Descenso del coeficiente de sustentación.
- Ángulo de ataque (α) estable, después del desprendimiento de flujo.
- Relación (C_L/C_D).
- Geometría simplificada.

7.1.1.1. Descenso del coeficiente de sustentación.

El comportamiento de la sustentación del perfil en comparación al coeficiente de potencia del rotor, suelen tener la misma tendencia, y se refleja en la curva de potencia del aerogenerador. Por ello, este criterio se basa en el comportamiento del descenso del coeficiente de sustentación (C_L), que a su vez está en relación a la sustentación máxima ($C_{Lmáx}$).

La literatura menciona que la caída brusca de sustentación 3° antes del α_{stall} y un descenso de sustentación mayor al 55 % provoca fuertes vibraciones en las aspas. Asimismo, indica que la caída de sustentación debe ser de forma gradual (descenso < 25 %) [32]. Por estas razones, se recomienda que el descenso debe mantenerse en un



rango de 25 % a 55 % para que el sistema al entrar en pérdida aerodinámica pueda evitar las vibraciones y el embalamiento del rotor. Gráficamente la variación de caída de sustentación se ilustra en la región 2 de la siguiente figura.

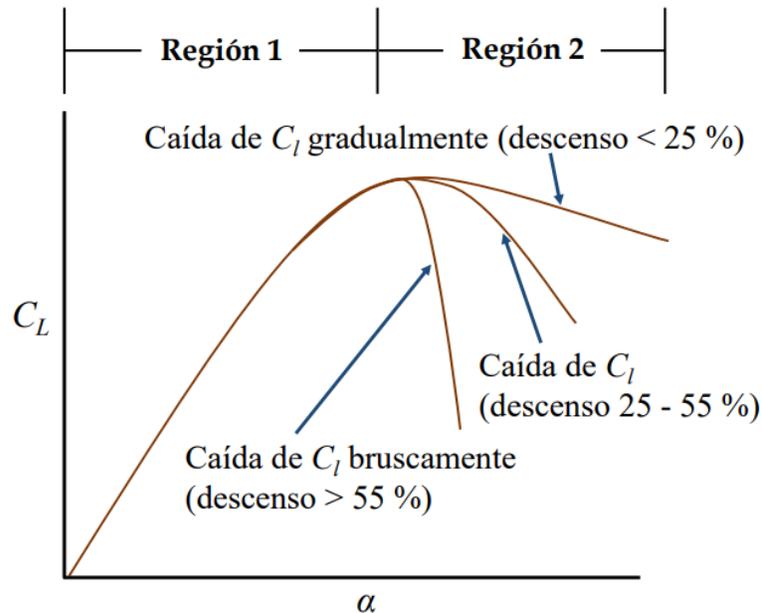


Figura 7.1 Formas de caída del coeficiente de sustentación.[26]

7.1.1.2. Ángulo de ataque (α) después del desprendimiento de flujo.

Como se indicó anteriormente, el coeficiente de sustentación depende del ángulo de ataque, mientras el ángulo de ataque aumenta la sustentación incrementa. Sin embargo, cuando entra en la zona de pérdida aerodinámica (región 2 de la figura 7.1), la sustentación disminuye. En este sentido, cuando el perfil entra en la zona de pérdida aerodinámica, debe mantener la caída de sustentación en un rango de ángulos de ataque.



7.1.1.3. Relación (C_L/C_D).

Un alto valor de la relación (C_L/C_D), permite evaluar el rendimiento del perfil aerodinámico. Además, influye que el coeficiente de potencia aumente y a su vez el radio del aerogenerador disminuya, lo cual permite ahorro en el material y en el proceso de construcción de la pala.

7.1.1.4. Geometría simplificada.

El criterio de geometría simple sirve para la futura construcción del perfil y que pueda soportar los esfuerzos. Para evaluar estas condiciones se indica lo siguiente.

- a) Perfil robusto: Para evaluar esta característica se toma en cuenta el grosor del perfil, por lo tanto, se considera el porcentaje de espesor máximo.
- b) Geometría simple: Se busca que la forma geométrica del perfil sea simple, sobre todo el tamaño del borde de salida. Porque, una característica que complica la manufactura del perfil es un borde de salida muy delgado. Por ello, esta consideración está en relación al porcentaje de la curvatura.

Con base a la manufactura de la pala, se plantea perfiles con una modificación de tres capas en el borde de salida, a estos perfiles se le marcó con una X, En la figura 7.2, se puede observar la geometría de los perfiles utilizados en el diseño y en la 7.3, la modificación realizada en el borde de salida (escalado en el eje y) con el objetivo de facilitar la manufactura.

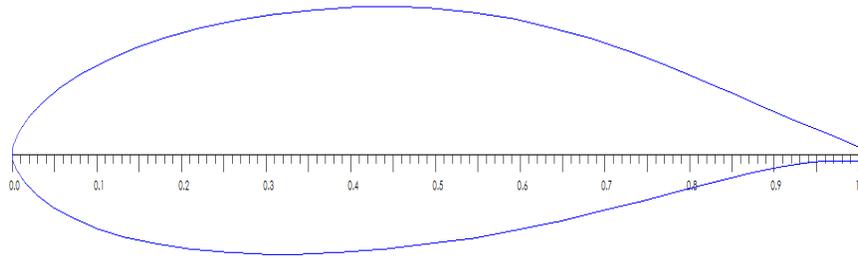


Figura 7.2 perfil escalado

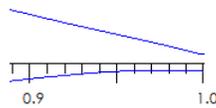


Figura 7.3 Borde de salida escalado

La evaluación de los esfuerzos en el perfil está en relación al comportamiento lineal del C_L . A medida que la corriente de flujo rodea al perfil antes del ángulo crítico, se describe un flujo laminar, donde la capa límite permanece adherida al perfil. Sin embargo, los efectos viscosos son dominantes y puede formar turbulencias y por ende variar C_L . Para evaluar esta propiedad es observar la variación del comportamiento lineal hasta alcanzar el ángulo de ataque crítico, es decir, que las turbulencias sean mínimas en la zona lineal.



7.2. Perfiles propuestos analizados por método Xfoil.

Preparación y Configuración

- Software: Xfoil
- Perfiles a Analizar:
 - NACA 4412
 - NACA 4415X
 - NACA 4416
 - NACA 2414
 - S822X
 - SGXX
 - SG6050
- Condiciones de Simulación:
 - Rango de ángulos de ataque
 - Número de Reynolds

Ejecución del Análisis

- Paso 1: Definir los perfiles en Xfoil
 - Ingresar los perfiles NACA directamente en Xfoil.
 - Para los perfiles no estándar (como S822X, SGXX, SG6050), ingresar los puntos de coordenadas del perfil.
- Paso 2: Configurar el entorno de simulación
 - Ajustar el número de Reynolds y el rango de ángulos de ataque.
 - Configurar las iteraciones para asegurar la convergencia de los resultados.
- Paso 3: Ejecutar las simulaciones
 - Ejecutar las simulaciones para cada perfil en el rango de ángulos de ataque.
 - Registrar los valores de (C_l) , (C_d) y $(C_l)/(C_d)$ para cada perfil.



7.2.2. Aplicación del método Xfoil

Se proponen la selección de perfiles de geometría simple, donde se lleva a cabo el estudio Xfoil, mediante el software QBlade. A continuación, se describe el procedimiento para el análisis del perfil aerodinámico.

1. El primer paso es abrir el software QBlade.

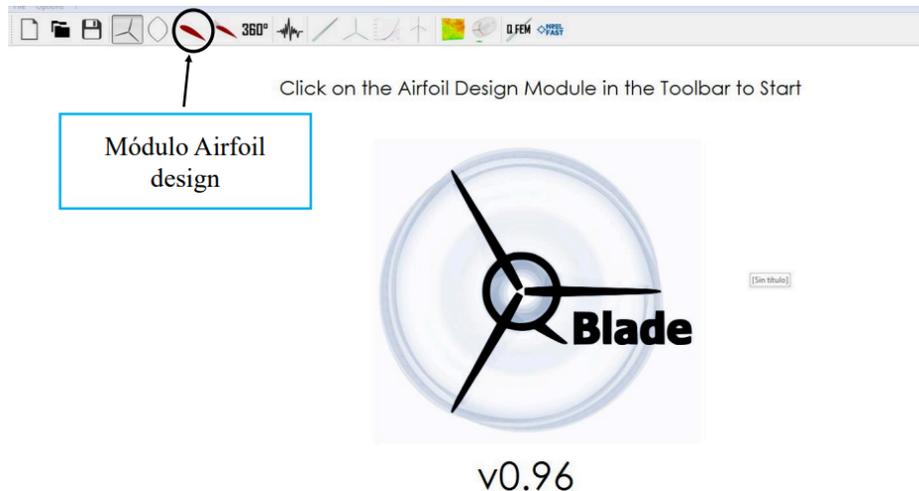


Figura 7.4. Espacio de trabajo del software QBlade.

2. El siguiente paso consiste en seleccionar el perfil aerodinámico, para ello se selecciona el botón Airfoil Design.
3. El siguiente paso es dar click en Foil > Import Foil

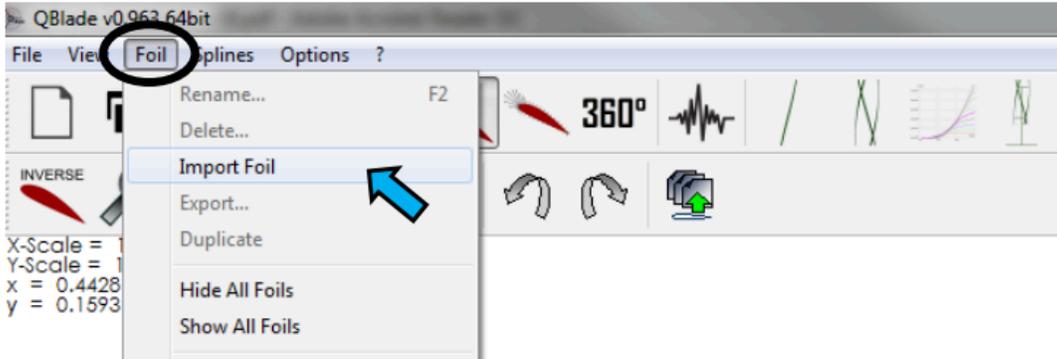


Figura 7.5. Opción Foil- import Foil.

4. Posteriormente, se selecciona el perfil aerodinámico (perfil.dat) > Abrir

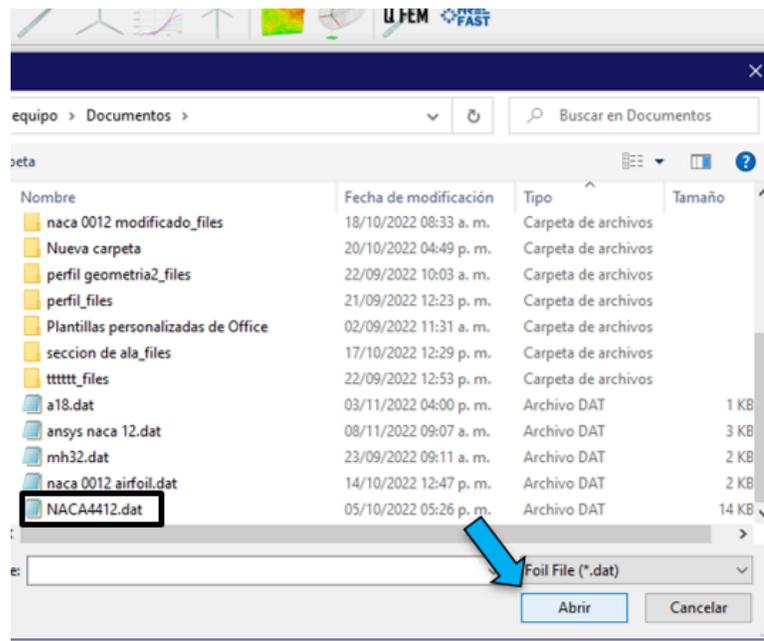


Figura 7.6. Selección del perfil aerodinámico.

5. Una vez elegido el tipo de perfil, se mostrará en el espacio de trabajo el perfil seleccionado.

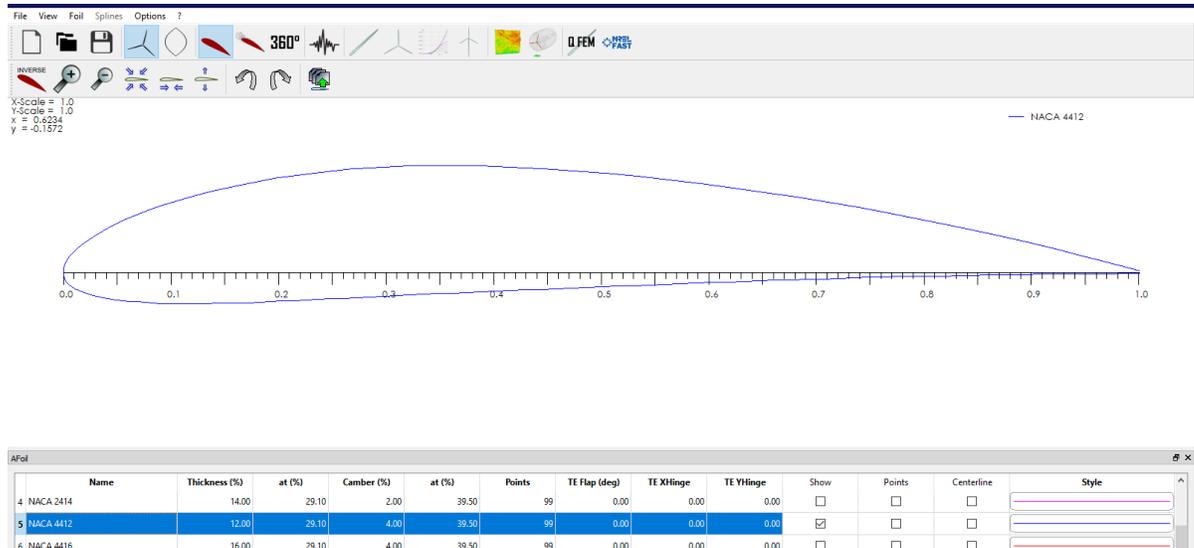


Figura 7.7. Módulo de diseño de perfiles aerodinámicos.

6. El siguiente paso se selecciona en el botón XFOIL Direct Analysis

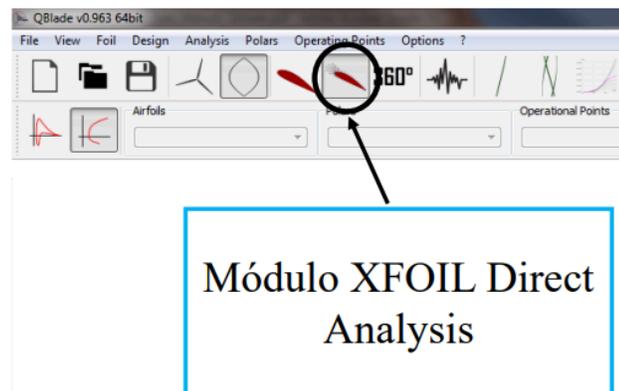


Figura 7.8. Módulo XFOIL Direct Analysis.

7. El siguiente paso es dar click en Analysis > Batch Analysis

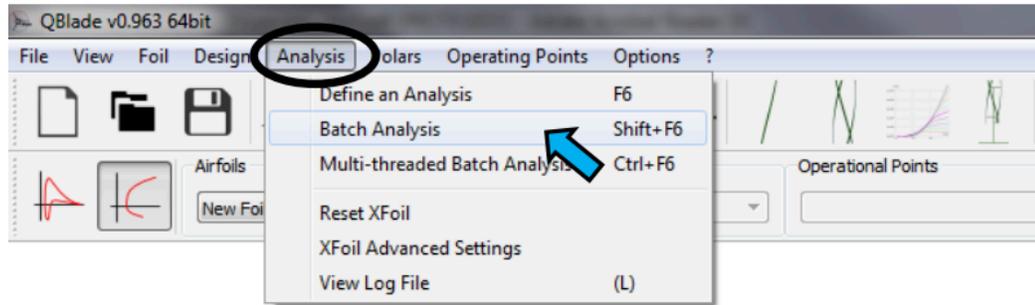


Figura 7.9. Opción Analysis- Batch Analysis.

- Una vez realizado el paso anterior se mostrará el submódulo Batch Foil Analysis. Posteriormente, se define los parámetros de Reynolds > seguidamente el rango del ángulo (α) en Analysis Range > Finalmente, completados los datos se da click en Analyze y el programa realiza el análisis.

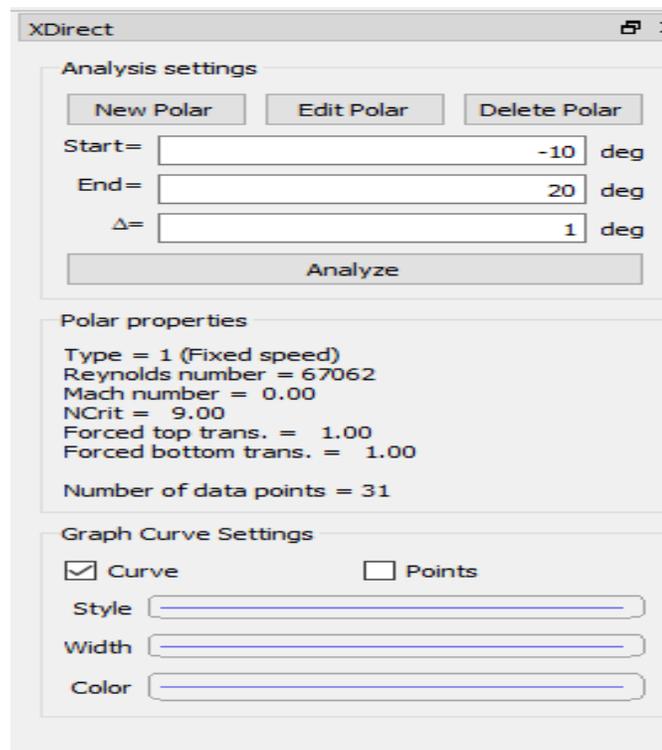


Figura 7.10. Submódulo Batch Foil Analysis

- Finalmente, el programa muestra los resultados de los coeficientes aerodinámicos (C_l , C_d , C_l/C_d , etc.) del perfil aerodinámico.

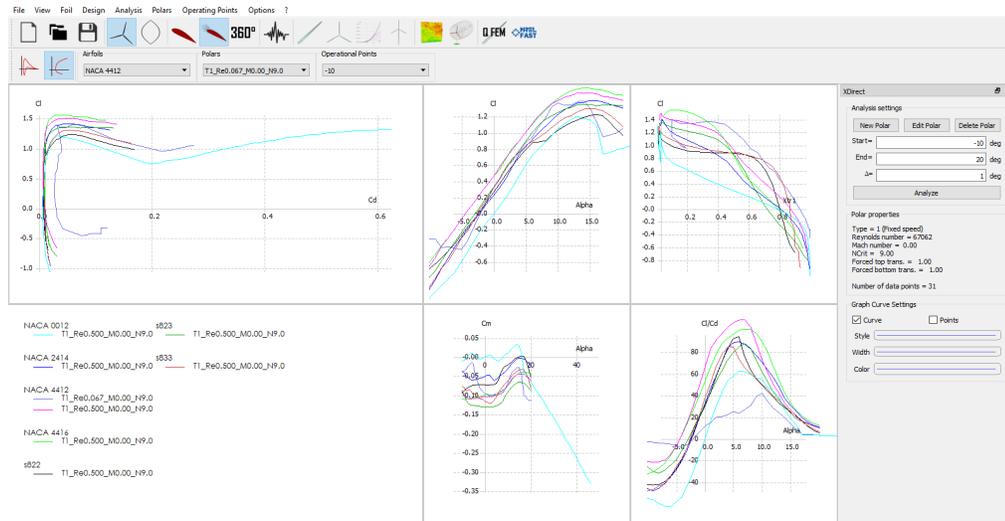


Figura 7.11. Resultados del análisis aerodinámico del perfil.

10. Es necesario exportar los datos de los coeficientes. Por ello, se da click en la opción Polars > Export all Polars to Xfoil format.

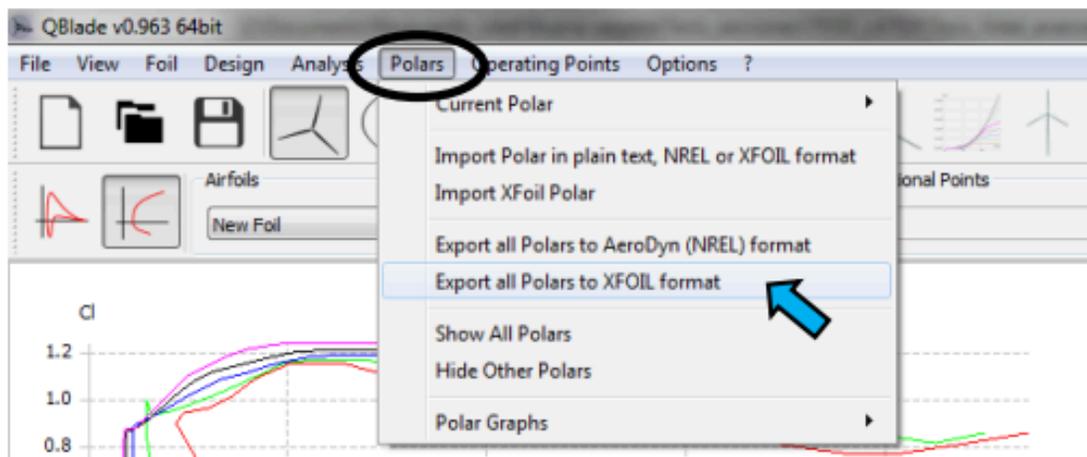


Figura 7.12. Método de exportación del documento.

11. Por último, se selecciona la carpeta donde se desea guardar el archivo y el programa y guarda como (archivo.txt).



7.3. Perfiles propuestos analizados por método CFD

Preparación y Configuración

- Software: ANSYS Fluent.
- Perfiles a Analizar:
 - NACA 4412
 - NACA 4415X
 - NACA 4416
 - NACA 2414
 - S822X
 - SGXX
 - SG6050
- Condiciones de Simulación:
 - Número de Reynolds
 - Rango de ángulos de ataque
 - Modelo de turbulencia: k-epsilon para el flujo alrededor de los perfiles.
 - Condiciones de frontera:
 - Entrada de velocidad uniforme.
 - Presión de salida fija.
 - Condición de no deslizamiento en la superficie del perfil.
 - Paredes laterales con condiciones de simetría o dominio extendido para minimizar efectos de pared.

Generación de la Malla

- Paso 1: Definición del Dominio
 - Definir un dominio alrededor del perfil que capture adecuadamente el flujo.
 - Extender el dominio en la dirección de la corriente y hacia abajo para evitar efectos no deseados de frontera.
- Paso 2: Generación de la Malla



- Crear una malla estructurada o no estructurada alrededor del perfil.
- Refinar la malla cerca de la superficie del perfil para capturar la capa límite y las regiones de alto gradiente.
- Realizar un estudio de independencia de la malla para asegurar que los resultados no dependan del tamaño de la malla.

Configuración y Ejecución de la Simulación

- Paso 1: Selección del Modelo de Flujo
 - Elegir entre flujo laminar, turbulento o una transición entre ambos, dependiendo del perfil y condiciones.
 - Configurar el modelo de turbulencia apropiado según las características del flujo.
- Paso 2: Condiciones Iniciales y de Borde
 - Establecer las condiciones de velocidad en la entrada del dominio, presión en la salida, y las condiciones en las paredes del dominio.
 - Configurar las iteraciones y criterios de convergencia para la simulación.
- Paso 3: Ejecución de la Simulación
 - Ejecutar la simulación en paralelo, si es posible, para reducir el tiempo de cómputo.
 - Monitorear la convergencia de los resultados y ajustar parámetros si es necesario.

Análisis de Resultados

- Resultados Numéricos:
 - Extraer (C_l) , (C_d) y $(C_l)/(C_d)$ para cada perfil a diferentes ángulos de ataque.
 - Comparar los resultados con los obtenidos por otros métodos (como Xfoil) para validación.
- Visualización Gráfica:



- Generar contornos de presión, velocidad, y vorticidad alrededor de los perfiles.
- Crear líneas de corriente y visualización de separaciones de flujo.
- Análisis Comparativo:
 - Comparar la distribución de presión en la superficie del perfil entre los diferentes perfiles.

7.3.1. Aplicación del método de análisis CFD.

Se proponen la selección de perfiles de geometría simple, donde se lleva el estudio CFD, mediante el software ANSYS.

A continuación, se describe el procedimiento para el análisis del perfil aerodinámico.

1.El primer paso es localizar las coordenadas del perfil para exportaras al software, para esto se entra a una base de datos llamada “Airfoil tools”.

Herramientas de perfil aerodinámico Tienes 0 perfiles aerodinámicos cargados. Su rango de números de Reynold es de 50,000 a 1,000,000.

Buscar 1638 perfiles aerodinámicos G+ Tweet Me gusta 1.4k ENHANCED BY Google

Aplicaciones

- Búsqueda en la base de datos Airfoil
- Mis perfiles aerodinámicos
- Plotter aerodinámico
- Comparación de perfiles aerodinámicos
- Número de Reynolds calc
- Generador NACA de 4 dígitos
- Generador NACA de 5 dígitos

Información

- Datos del perfil aerodinámico
- Elevar/arrastrar polares
- Formas de perfil aerodinámico generadas

Búsquedas

- Perfiles aerodinámicos simétricos
- Perfiles aerodinámicos NACA de 4 dígitos
- Perfiles aerodinámicos NACA de 5 dígitos
- Perfiles aerodinámicos de la serie NACA 6

Perfiles aerodinámicos de la A a la Z

Búsqueda en la base de datos Airfoil

Busque los perfiles aerodinámicos 1638 disponibles en las bases de datos filtrando por nombre, grosor y curva. Haga clic en una imagen de perfil aerodinámico para mostrar una imagen de vista previa más grande. Hay enlaces a la fuente original del perfil aerodinámico y al archivo dat y la página de detalles con diagramas polares para un rango de números de Reynolds.

| | | |
|---------------------------------------|---|---|
| Búsqueda de texto | <input type="text"/> | Opcional |
| Espesor máximo(%) | <input type="text"/> | Opcional |
| Espesor mínimo(%) | <input type="text"/> | Opcional |
| Curva máxima(%) | <input type="text"/> | Opcional. Perfiles aerodinámicos simétricos = 0 |
| Curva mínima(%) | <input type="text"/> | Opcional |
| Grupo | <input type="text" value="Todo"/> | |
| Ordenar | <input type="text" value="Clave (de la a a la z)"/> | |
| <input type="button" value="Buscar"/> | | |

Figura 7.13 Página principal de la base de datos Airfoil Tools.



2. Una vez que se tienen las coordenadas se preparan en un archivo de Excel, que debe de tener la siguiente estructura para que el software sea capaz de registrarlo.

| #naca0012 | | | | |
|-----------|--------|---------|---------|---------|
| #group | #point | #x_cord | #y_cord | #z_cord |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 0.002 | 0.00778 | 0 |
| 1 | 3 | 0.004 | 0.01091 | 0 |
| 1 | 4 | 0.006 | 0.01328 | 0 |
| 1 | 5 | 0.008 | 0.01524 | 0 |
| 1 | 6 | 0.01 | 0.01696 | 0 |
| 1 | 7 | 0.012 | 0.01849 | 0 |
| 1 | 8 | 0.014 | 0.01988 | 0 |
| 1 | 9 | 0.016 | 0.02117 | 0 |
| 1 | 10 | 0.018 | 0.02237 | 0 |
| 1 | 11 | 0.02 | 0.02349 | 0 |
| 1 | 12 | 0.022 | 0.02454 | 0 |
| 1 | 13 | 0.024 | 0.02554 | 0 |
| 1 | 14 | 0.026 | 0.02649 | 0 |
| 1 | 15 | 0.028 | 0.0274 | 0 |
| 1 | 16 | 0.03 | 0.02826 | 0 |
| 1 | 17 | 0.032 | 0.02909 | 0 |
| 1 | 18 | 0.034 | 0.02989 | 0 |
| 1 | 19 | 0.036 | 0.03066 | 0 |
| 1 | 20 | 0.038 | 0.0314 | 0 |
| 1 | 21 | 0.04 | 0.03212 | 0 |
| 1 | 22 | 0.042 | 0.03281 | 0 |
| 1 | 23 | 0.044 | 0.03348 | 0 |
| 1 | 24 | 0.046 | 0.03413 | 0 |

Figura 7.14 Estructura del registro de coordenadas en Excel.

3. Una vez que se tienen las coordenadas listas, se abre ANSYS Workbench yendo a Iniciar > ANSYS > Workbench. Esto abrirá la pantalla de inicio como se observa en la figura 9.19.

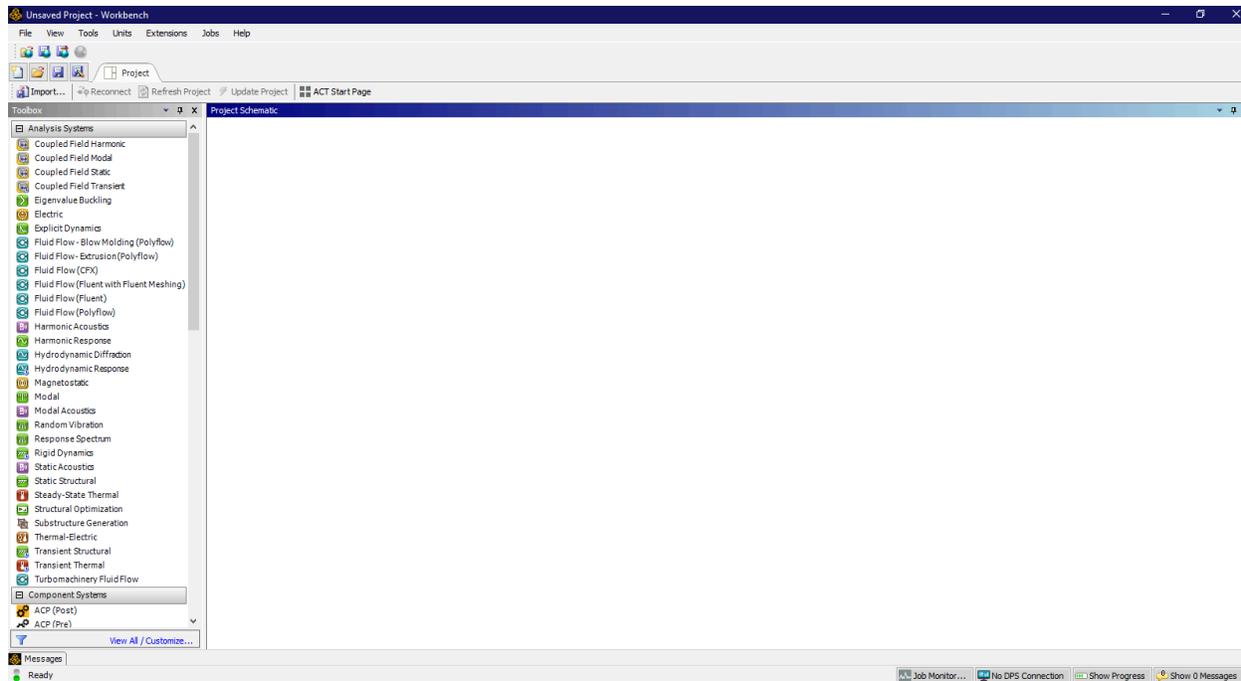


Figura 7.15 Ventana principal de ANSYS

4. Para empezar, se tiene que indicar en ANSYS qué tipo de simulación se está haciendo. Se observa a la izquierda de la ventana de inicio, la ventana de la caja de herramientas. Esta muestra las diferentes selecciones. Utilizaremos FLUENT para completar la simulación. Se carga el cuadro Flujo de fluido (FLUENT) arrastrándolo y soltándolo en el esquema del proyecto.

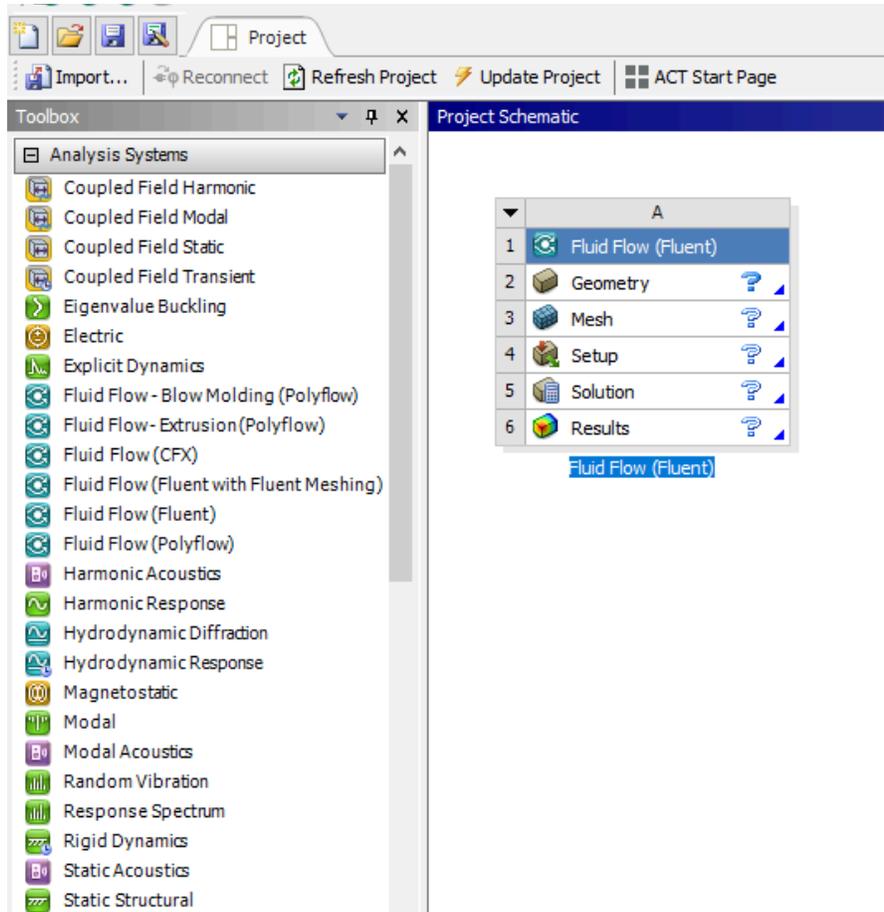


Figura 7.16 Selección de la herramienta Fluent.

5. Una vez que haya cargado FLUENT en el esquema del proyecto, estará listo para crear la geometría para la simulación.

6. Primero, se crea la geometría del perfil aerodinámico. En la barra de menús, ir a Concepto > Curva 3D. En la ventana Vista de detalles, hacer clic en Archivo de coordenadas y seleccionar los puntos suspensivos para buscar un archivo. Buscar y seleccionar el archivo de geometría en Excel. Una vez que se haya seleccionado el archivo de geometría deseado, hacer clic en generar para crear la curva.

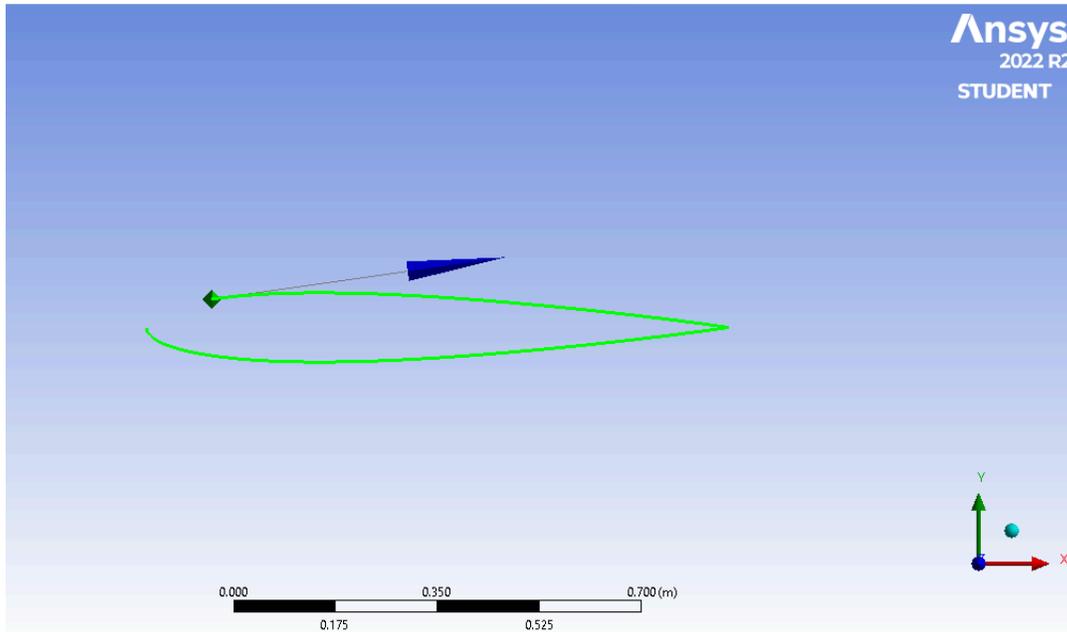


Figura 7.17 Importación de la geometría.

7. A continuación, se crea una superficie a partir de la curva que se acaba de generar. Dirigirse a Conceptos > superficies de bordes. Hacer clic en cualquier parte de la curva que se acaba de crear y seleccionar Aristas > Aplicar en la ventana Vista de detalles. Hacer clic en generar para crear la superficie.

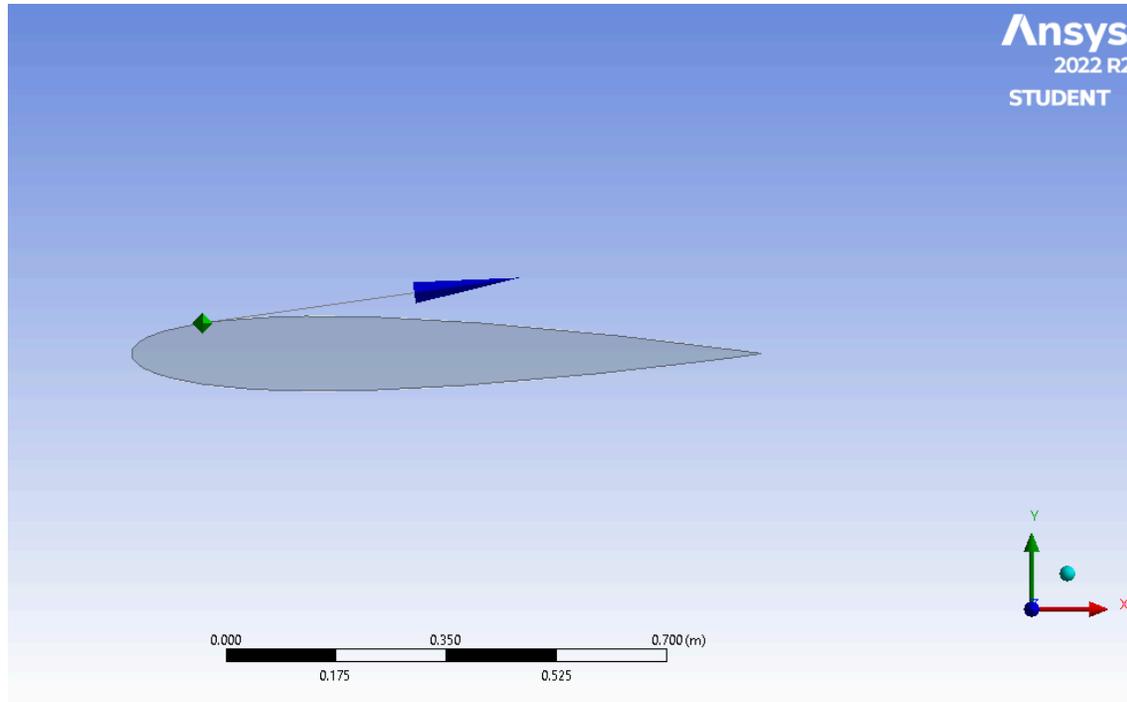


Figura 7.18 Superficie del perfil.

8. Ahora que se ha generado el perfil aerodinámico, es necesario crear la superficie de control que se desea una vez que se comienza a especificar las condiciones de contorno. Primeramente, se crea un sistema de coordenadas en la cola del perfil aerodinámico, esto nos ayudará a crear la geometría para el dominio de malla C. Hacer clic en nuevo plano para crear un nuevo sistema de coordenadas. En la ventana Vista de detalles, seleccionar Tipo > a partir de coordenadas. Para FD11, punto X, escribir 1.

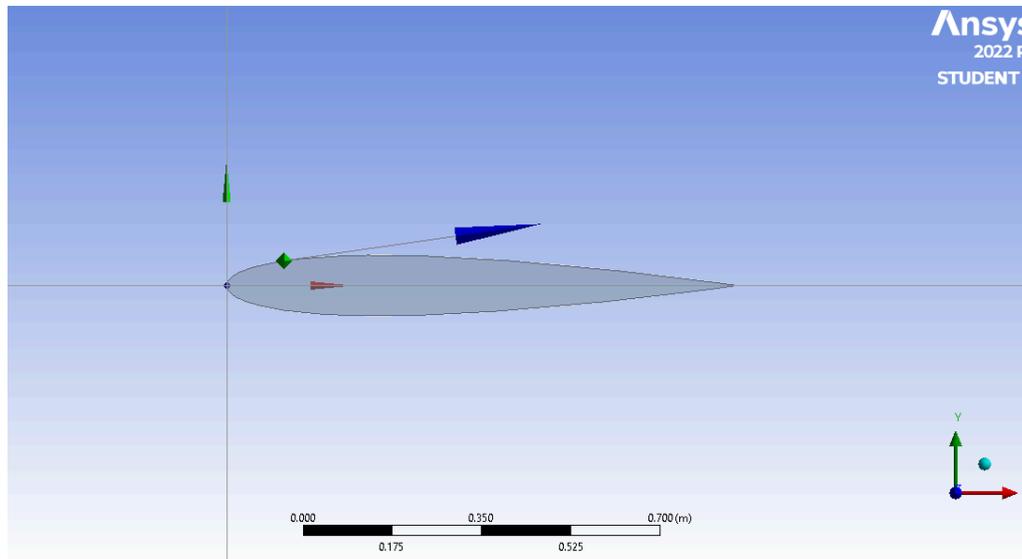


Figura 7.19 Plano XY en la coordenada (0,0).

9. Hacer clic en generar, para generar el nuevo sistema de coordenadas. En la ventana Contorno de árbol, seleccione el nuevo sistema de coordenadas que ha creado (por defecto en Plano 4) y, a continuación, hacer clic en nuevo sketch para crear un nuevo boceto. Esto creará un plano de boceto en el plano XY con la cola del perfil aerodinámico como origen. En la parte inferior de la ventana Contorno de árbol, hacer clic en la ficha sketch para abrir la ventana de sketching.

10. La primera acción que se tomara es crear el arco del dominio C-Mesh. Clic en arc by center. El primer clic selecciona el centro del arco, y los dos clics siguientes determinan los puntos finales del arco. Es conveniente que el centro del arco esté en la cola del perfil aerodinámico. Hacer clic en el origen del boceto, asegurándose de que se muestra el símbolo P.

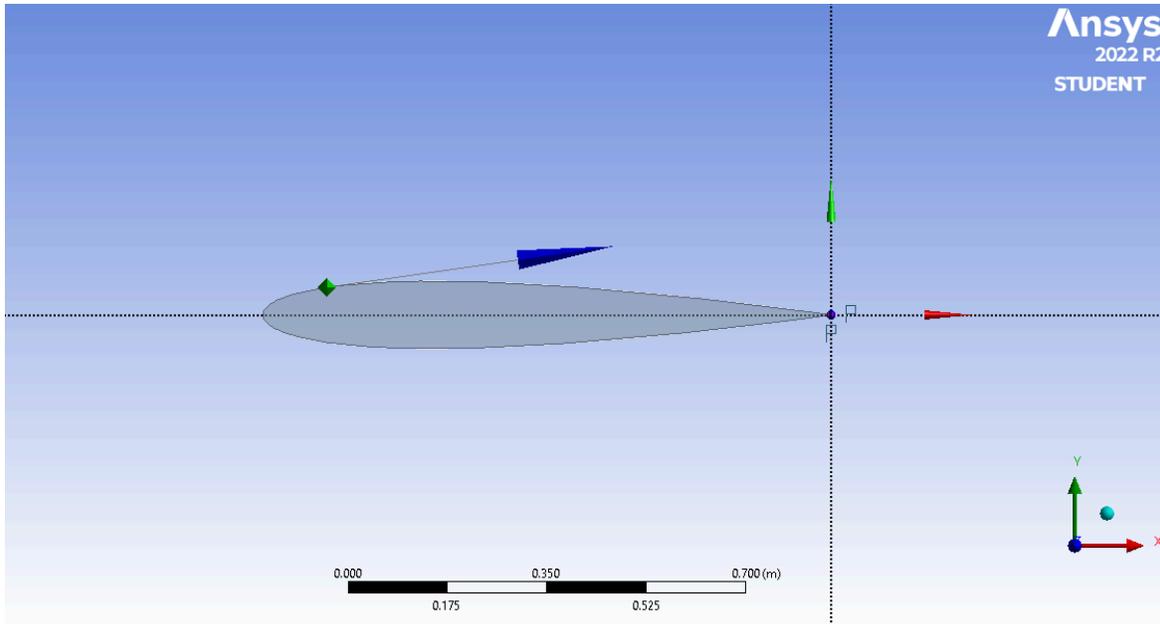


Figura 7.20 Plano XY reubicado en la coordenada (1,0).

11. Para los puntos finales del arco, primero seleccionar un punto en el eje vertical sobre el origen (se muestra un símbolo C), luego seleccionar un punto en el eje vertical debajo del origen. De tal forma se consigue lo siguiente:

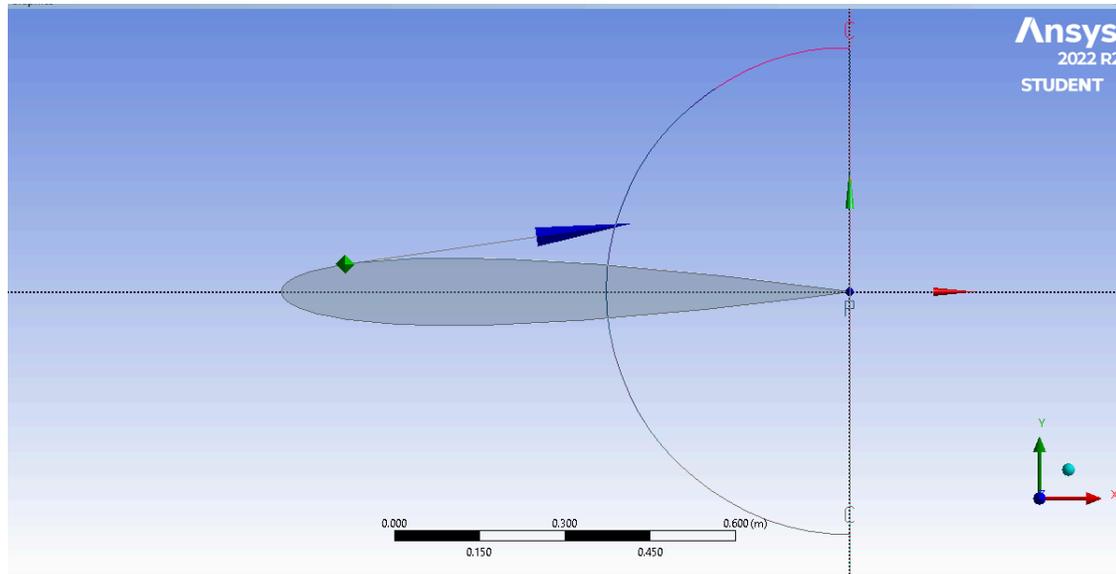


Figura 7.21 Trazo del arco del área de control.

12. Para crear el lado derecho de la donain C-Mesh, hacer clic rectangle by 3 points. Hacer clic en los siguientes puntos para crear el rectángulo en este orden: donde el arco se encuentra con el eje vertical positivo, donde el arco se encuentra con el eje vertical negativo, luego en cualquier lugar del semiplano derecho. El resultado final debe observarse de la siguiente forma:

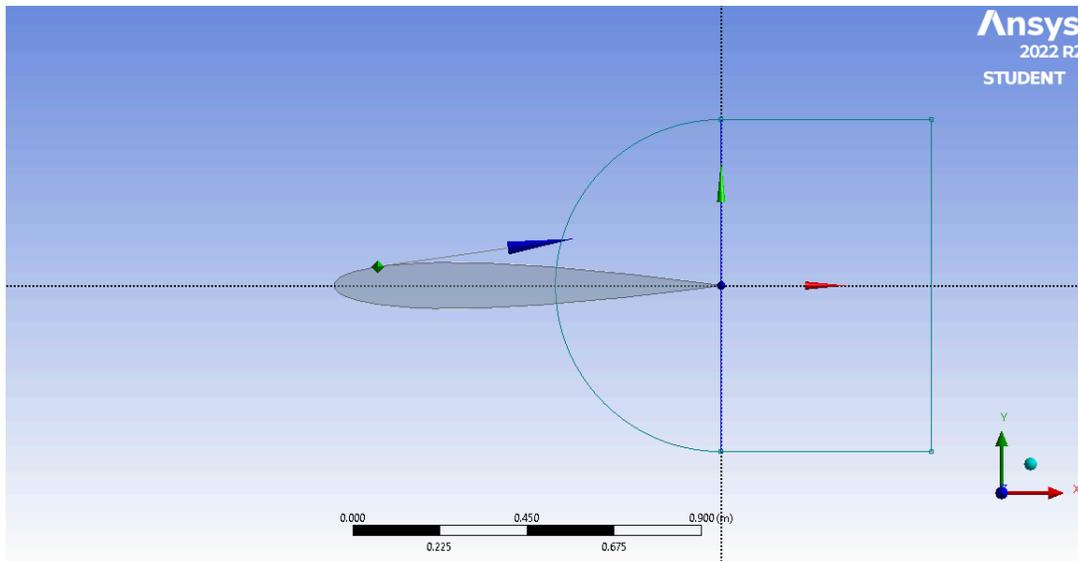


Figura 7.22 Trazado del área de control.

13. Ahora, se necesita deshacer de las líneas necesarias creadas por el rectángulo. Seleccionar Modificar en la ventana Cajas de herramientas de sketching, a continuación, seleccione trim. Hacer clic en las líneas del rectángulo que son colineales con los ejes verticales positivo y negativo. Ahora, seleccionar la caja de herramientas >Dimensiones para dimensionar el dominio C-Mesh. Hacer clic en radius, seguido del arco para dimensionar el arco. Asigne al arco un valor de 12.5. A continuación, seleccionar horizontal. Hacer clic en el eje vertical y en la parte vertical del rectángulo en el semiplano derecho. Se asigna también a la dimensión horizontal un valor de 12.5.

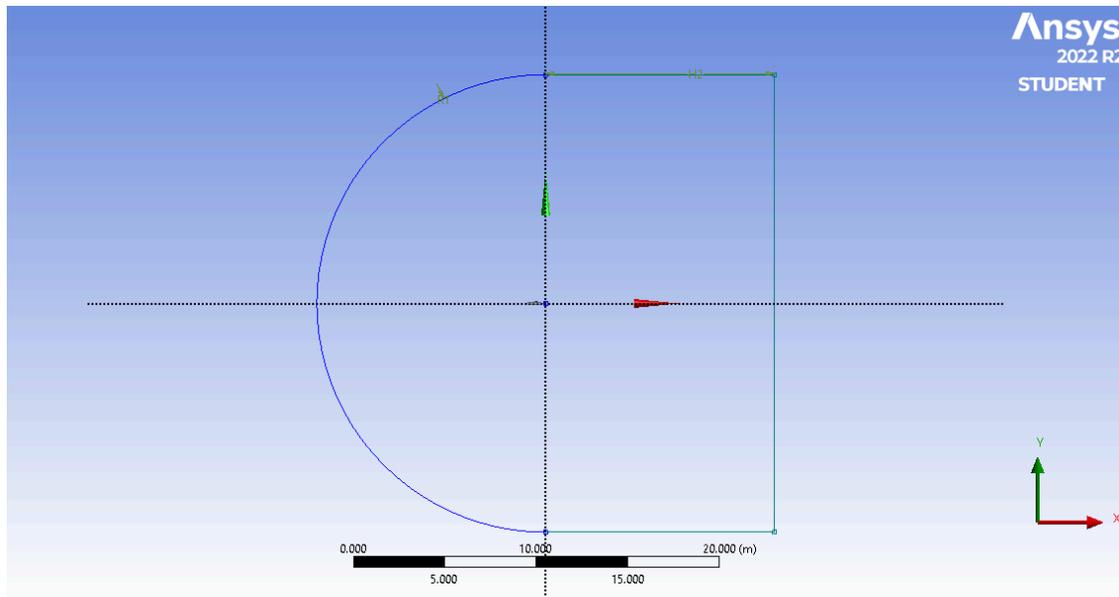


Figura 7.23. Área de control terminada.

14. A continuación, es necesario crear una superficie a partir de este boceto. Para lograr esto, ir a Concepto > superficie a partir de bocetos. Hacer clic en cualquier parte del boceto y seleccionar Objetos base > Aplicar en la ventana Vista de detalles. Además, seleccionar Operación > Agregar frozen. Una vez que se tenga la configuración correcta, hacer clic en generar. El paso final para crear la malla es crear una superficie entre el límite y el perfil aerodinámico. Para ello, seleccionar Crear > booleano. En la ventana Vista de detalles, seleccionar Operación > Restar. A continuación, seleccionar Cuerpos de destino > No seleccionado, seleccionar la gran superficie de dominio C-Mesh y, a continuación, hacer clic en Aplicar. Repetir el mismo proceso para seleccionar el perfil aerodinámico que el cuerpo de la herramienta. Cuando se haya seleccionado los cuerpos, hacer clic en generar.

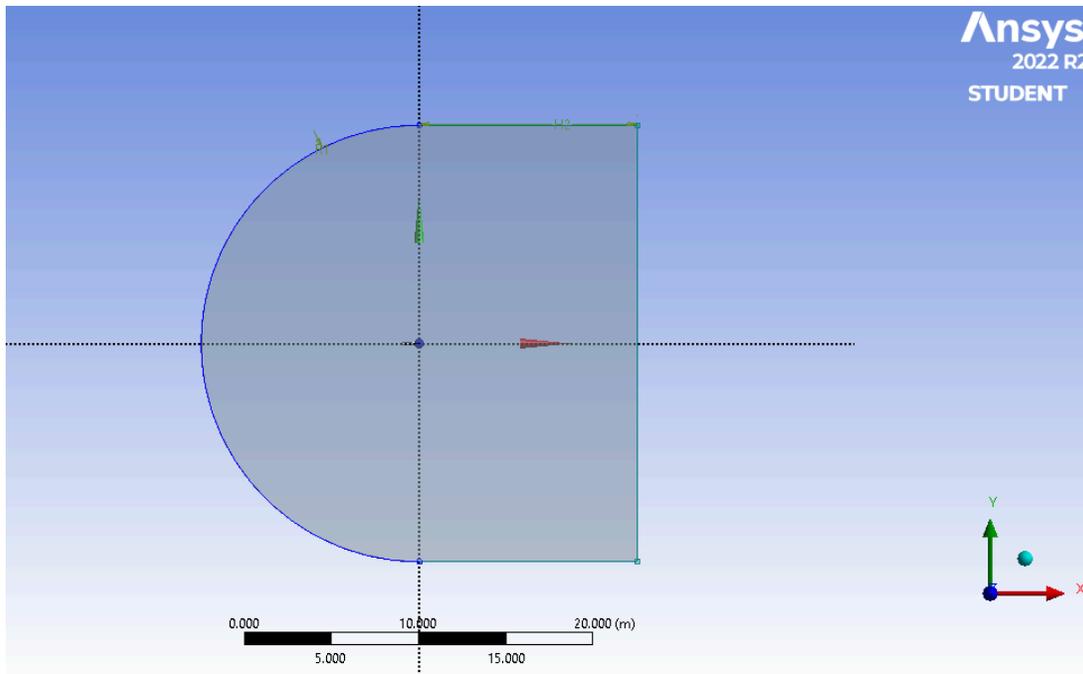


Figura 7.24 Área de control terminada.

15. En el paso final de crear la geometría, se divide la nueva superficie en 4 cuadrantes; Esto es útil cuando se busca mallar la geometría. Para comenzar, seleccionar Plano 4 en la ventana Contorno de árbol y hacer clic en nuevo sketch. Abrir el menú de sketching y se seleccionar line. Dibujar una línea en el eje vertical que interseca toda la malla C. Recortar las líneas que están más allá de la malla C, y se obtiene lo siguiente:

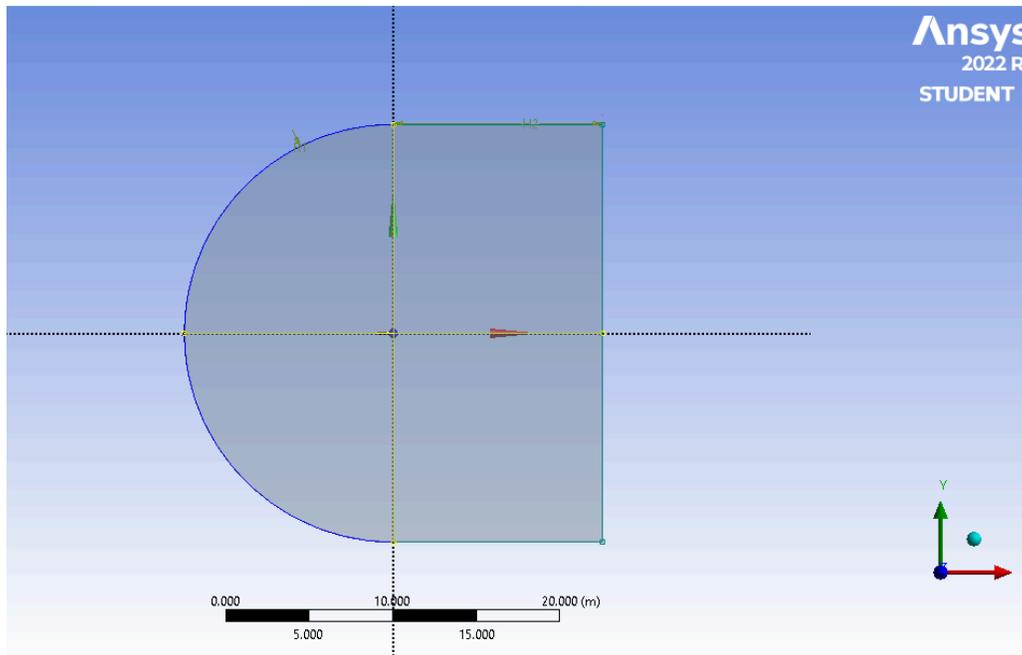


Figura 7.25 Trazado del sketch 2

16. A continuación, ir a Conceptos > líneas de Bocetos. Seleccionar la línea que se acaba de dibujar y hacer clic en Objetos base > Aplicar, seguido de generar. Ahora que se ha creado una línea vertical, se crea un nuevo boceto y se repite el proceso para una línea horizontal que sea colineal al eje horizontal y divida la geometría.

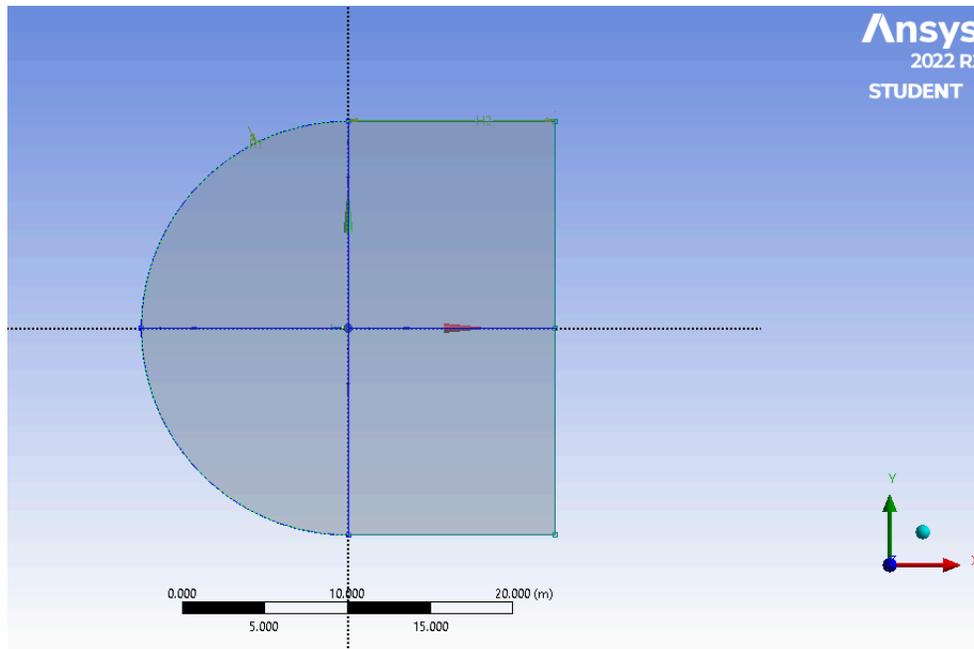


Figura 7.26 Proyección de sketch 2.

17. Ahora, se necesita proyectar las líneas que se acaban de crear en la superficie. Ir a Herramientas > proyección. Seleccionar Aristas, presionar Ctrl y seleccionar en la línea vertical del dibujo (se seleccionan ambas partes de ella), luego presionar Aplicar. A continuación, seleccionar Destino, seleccionar la superficie C-Mesh y, a continuación, hacer clic en Aplicar.

Una vez que se dio clic, se puede notar que la geometría ahora se compone de dos superficies divididas por la línea que seleccionamos. Repetir este proceso para crear 2 proyecciones más: una proyección de la línea izquierda del origen sobre la superficie izquierda y otra que proyecta la línea derecha sobre la superficie derecha. Cuando se concluye el proceso, la geometría debe dividirse en 4 partes.

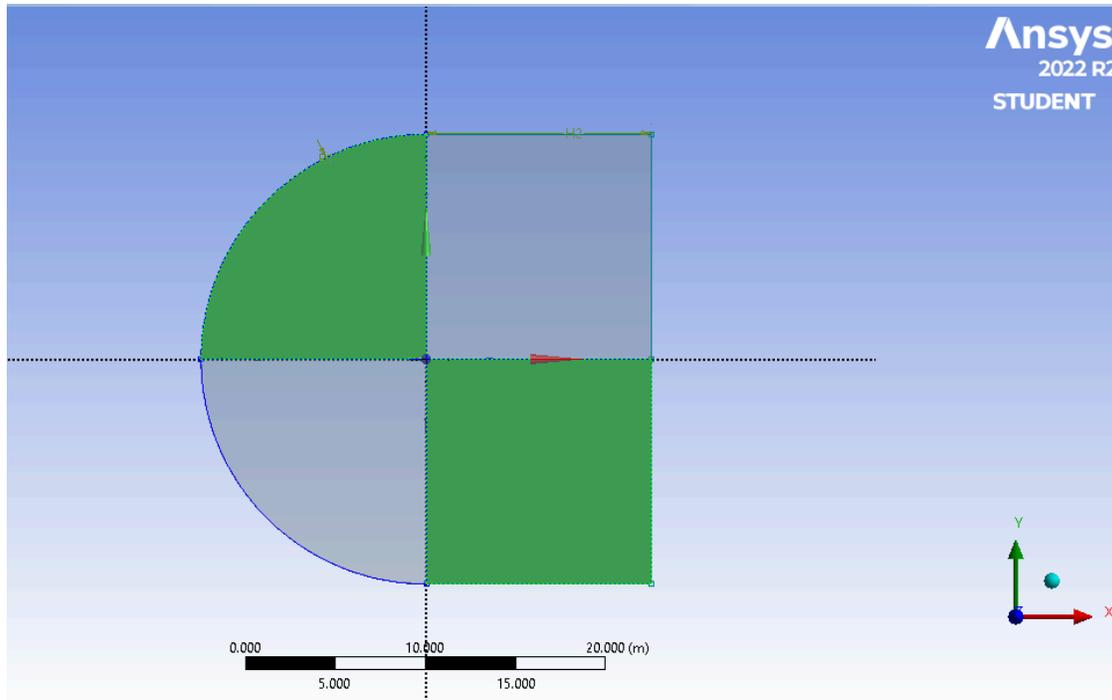


Figura 7.27 Área de control dividida.

18. Suprimir los cuerpos de línea haciendo clic con el botón derecho en el árbol. Solo se necesita que el cuerpo de la superficie se transfiera al mallado.

La geometría está terminada. Guardar el proyecto y cerrar el modelador de diseño, como se está ahora, esta lista para crear la malla para la simulación.

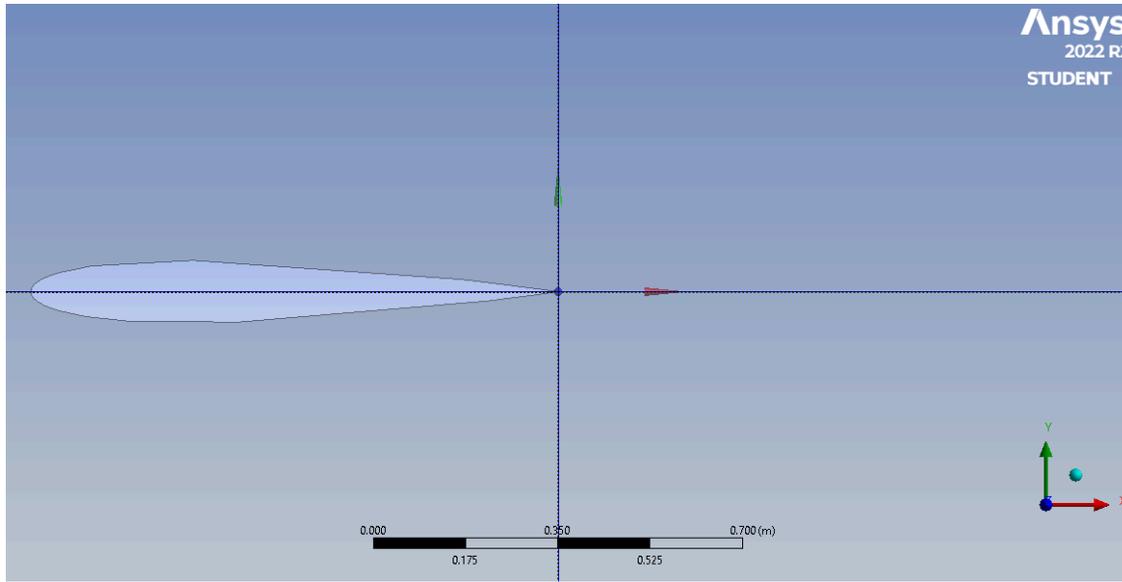


Figura 7.28 Geometría terminada.

19. Primero, se aplicará un control de mallado de caras mapeado a la geometría. En la ventana Contorno, haga clic en Malla para abrir la barra de herramientas de malla. En la barra de herramientas Malla, seleccionar Control de malla > Malla de cara asignada. Asegurando que el filtro de selección de rostros esta seleccionado, seleccionar las cuatro caras manteniendo pulsado el botón derecho del ratón y arrastrando el ratón de todos los cuadrantes de la geometría. Cuando todas las caras estén resaltadas en verde, en la ventana Vista de detalles seleccionar Geometría > Aplicar.

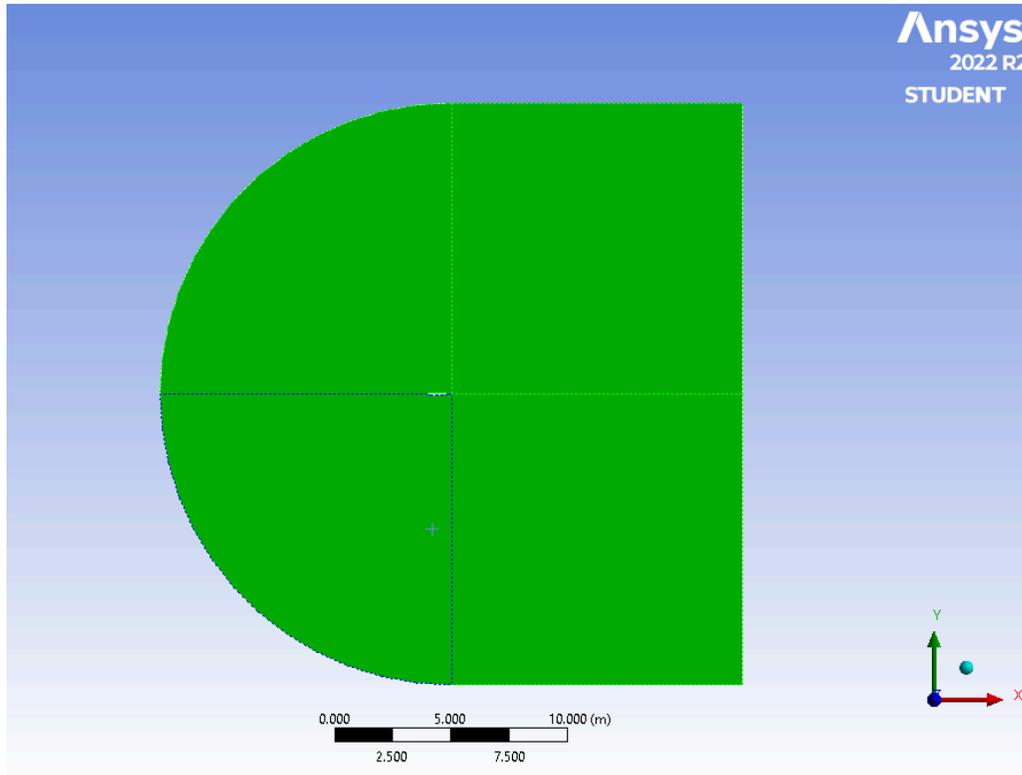


Figura 7.29 Aplicación de fase meching.

20. A continuación, se aplican controles de tamaño de bordes a todos los bordes de la malla. Para comenzar, seleccionar Control de malla > tamaño. A continuación, hacer clic en el filtro de selección de bordes. Seleccionar los siguientes 4 bordes de compra manteniendo presionada la tecla Ctrl y usando el botón izquierdo del ratón:

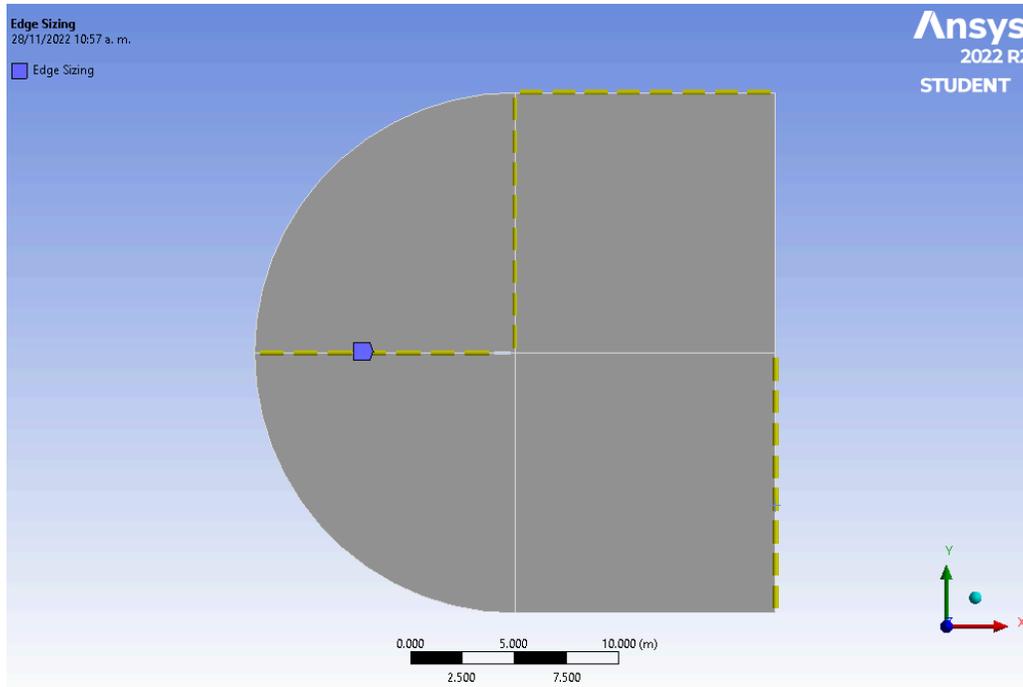


Figura 7.30 Selección de edges de sizing 1

21. Una vez seleccionadas las aristas, en la ventana Vista de detalles, seleccionar Geometría > Aplicar. A continuación, seleccionar Tipo > Número de divisiones. Cambiar el número de divisiones a 50. Seleccionar Comportamiento > difícil. También es conveniente que la malla tenga un sesgo, así que se selecciona el primer tipo de sesgo: Bias > ----- — - -, y asignar al tamaño del borde un factor de sesgo de 150. El tamaño de Edge ahora debería verse así:

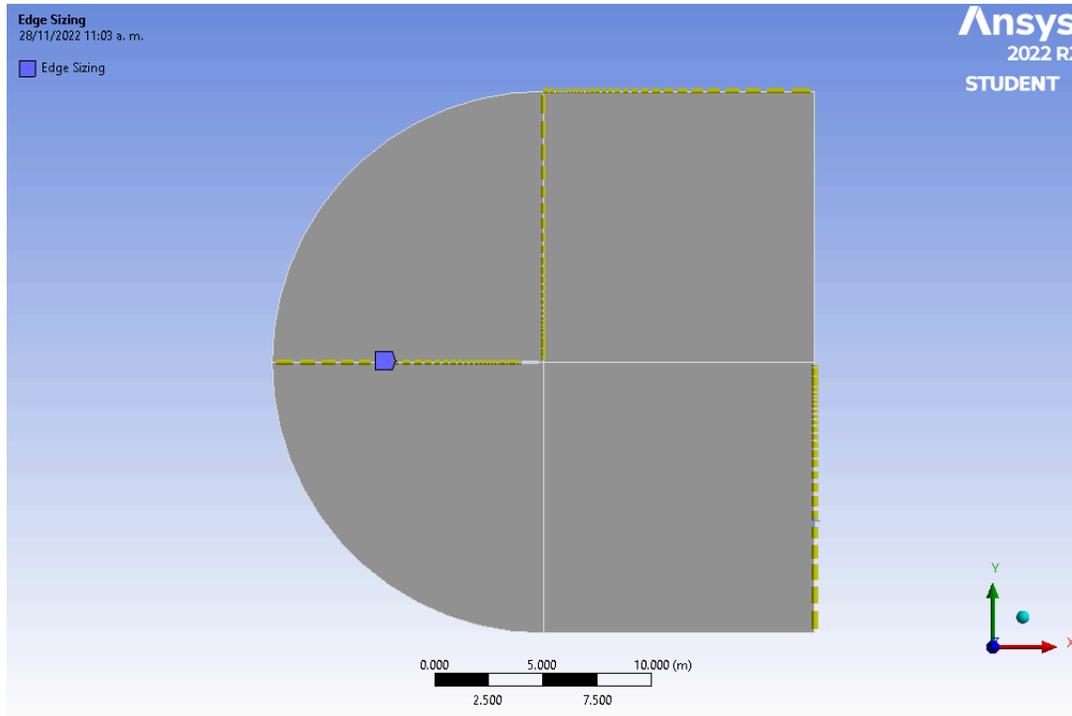


Figura 7.31 Selección de edges de sizing 1 con factor de vías.

22. Observar que los tamaños de los elementos se reducen hacia el perfil aerodinámico. Esto arroja una mejor resolución alrededor del perfil aerodinámico donde el flujo se vuelve más complicado. Para crear un nuevo tamaño de borde con los mismos parámetros, debe elegirse los 4 bordes rectos restantes (consultar la figura 7.31). El número de divisiones sigue siendo 50, pero ahora se seleccionará un tipo de sesgo diferente seleccionando la segunda opción de sesgo: Sesgo > - - — ----- . De nuevo, establecer el factor de sesgo en 150.

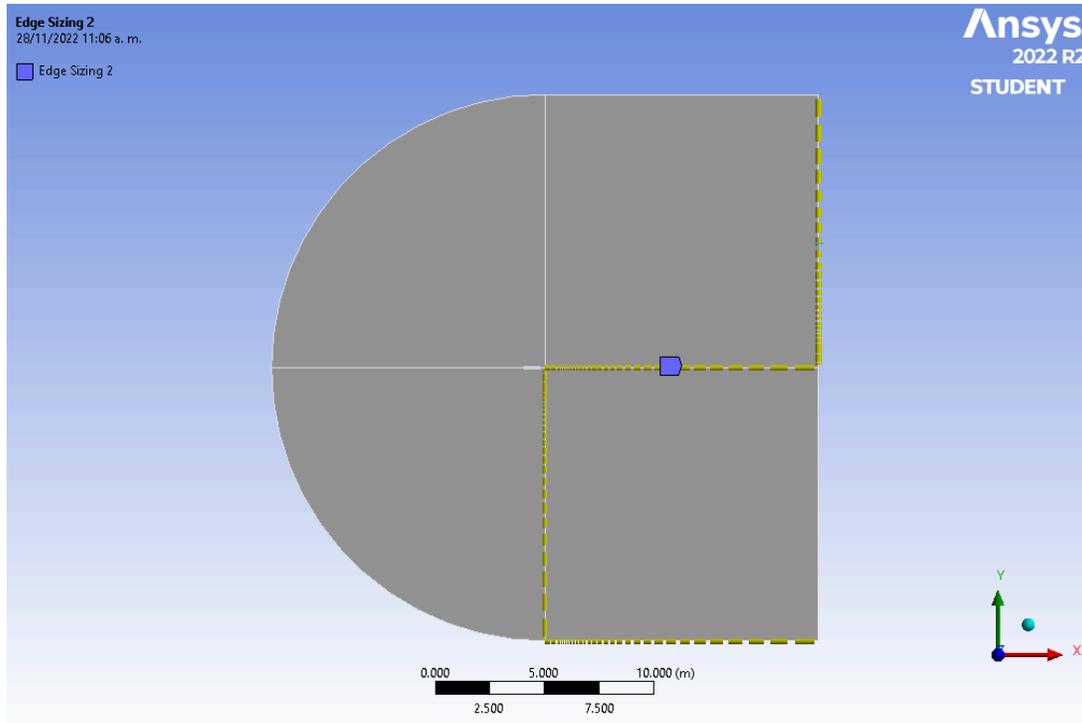


Figura 7.32 Selección de edges de sizing 2 con factor de vías.

23. Finalmente, se crea un tercer tamaño de borde y se seleccionan los bordes redondeados como geometría. De nuevo, seleccionar Tipo > Número de divisiones y cambiar Número de divisiones a 100. Seleccionar Comportamiento > difícil. Esta vez, no sesgaremos los bordes.

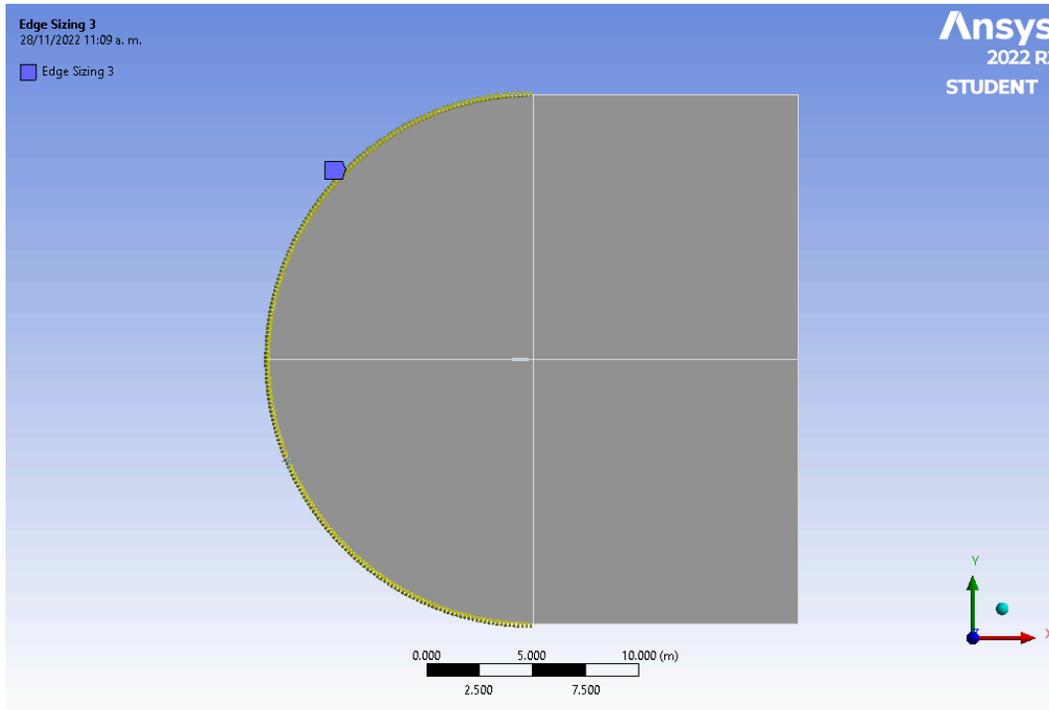


Figura 7.33 Selección de edges de sizing 3

24. Ahora, seleccionar Malla > Generar para generar la malla. Debería verse así.

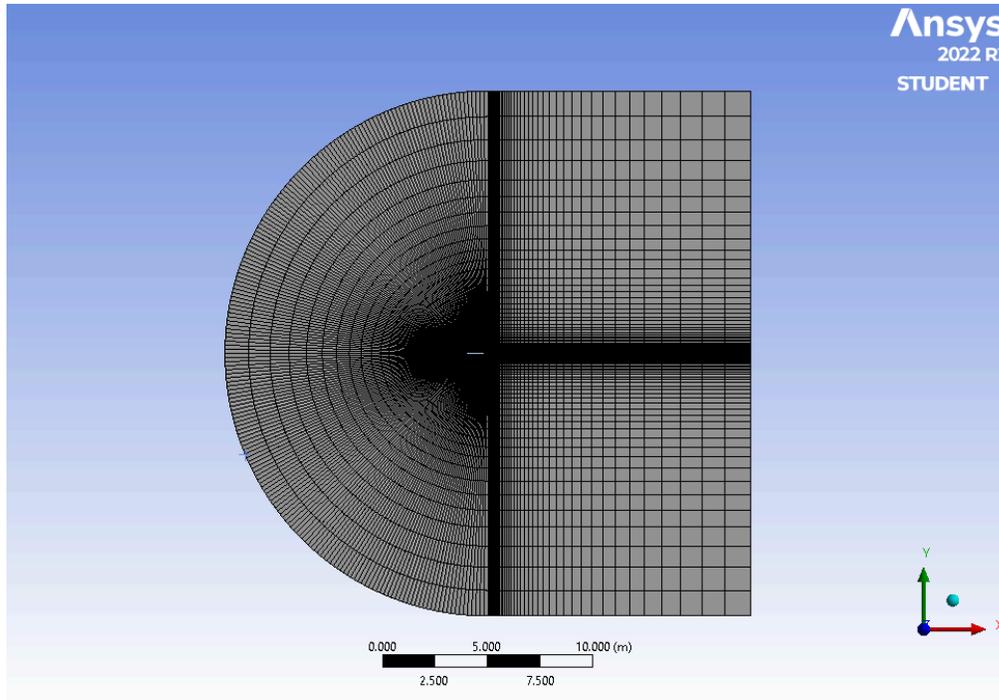


Figura 7.34 Malla generada

25. Ahora se asignan nombres a algunos de los bordes para facilitar la creación de condiciones de límite para la malla. Recordemos las condiciones de contorno que planeamos en el paso previo al análisis:

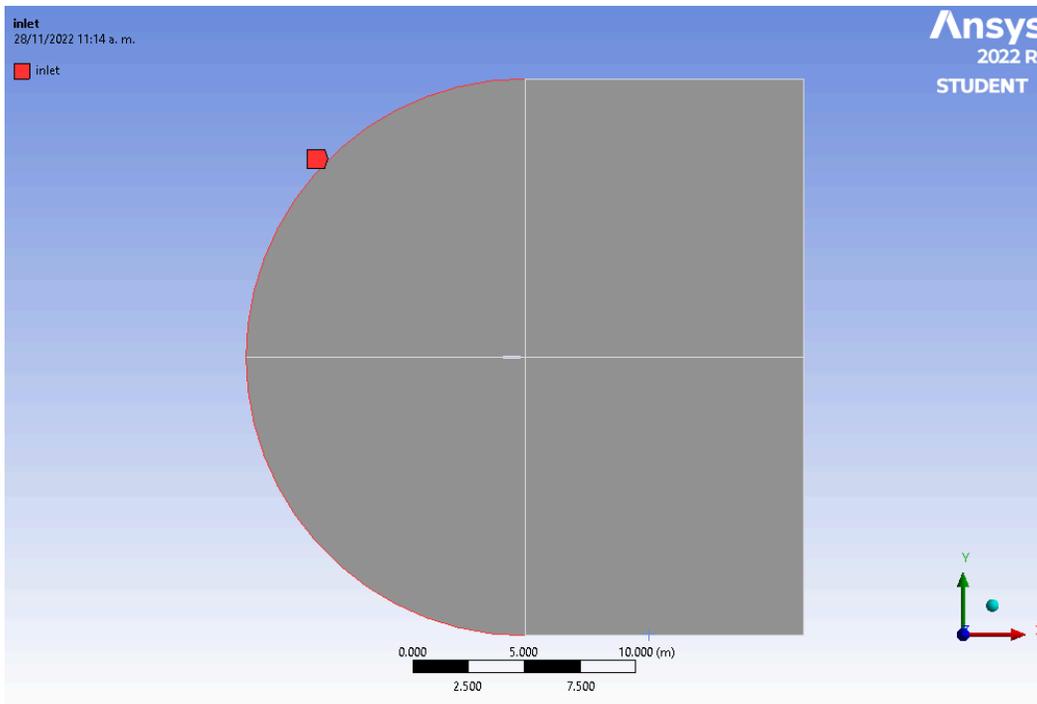


Figura 7.35 Creación del nombre de selección.

26. Los bordes resaltados en el arco son la entrada, los bordes resaltados en la orilla derecha son la salida y el perfil aerodinámico se resalta en el medio. Ahora está listo para nombrar las secciones. En la ventana Contorno, seleccionar geometría, esto hará que ver los bordes sean un poco más fácil. De nuevo, confirmar que la herramienta de selección de aristas esté seleccionada. Ahora, seleccionar los dos bordes verticales en el extremo derecho de la malla. Hacer clic con el botón derecho y seleccionar Crear selecciones con nombre. Asignar un nombre a los bordes. A continuación, se seleccionan los bordes que corresponden a la entrada del flujo según lo definido en la imagen 9.39. Nuevamente, se hace clic con el botón derecho y se selecciona Crear selecciones con nombre y esta vez se asigna un nombre a la selección. Finalmente, se seleccionan los dos bordes que componen el perfil aerodinámico y se asigna un nombre a la selección.



27. En este paso, se abre fluidez y se definen las condiciones de contorno del problema. Si aún no se ha hecho, cierre la ventana de mallado para volver a la ventana Esquema del proyecto. Ahora, hacer clic en update project. Esto cargará la malla en FLUENT. Ahora, haz doble clic en Configuración. Se abre la ventana de Fluent Launcher. seleccionar la casilla marcada Doble precisión. Para que el solucionador funcione un poco más rápido, en Opciones de procesamiento seleccionaremos Paralelo y se cambia el Número de procesos a 2. Esto permite a los usuarios con un procesador de doble núcleo utilizar ambos.

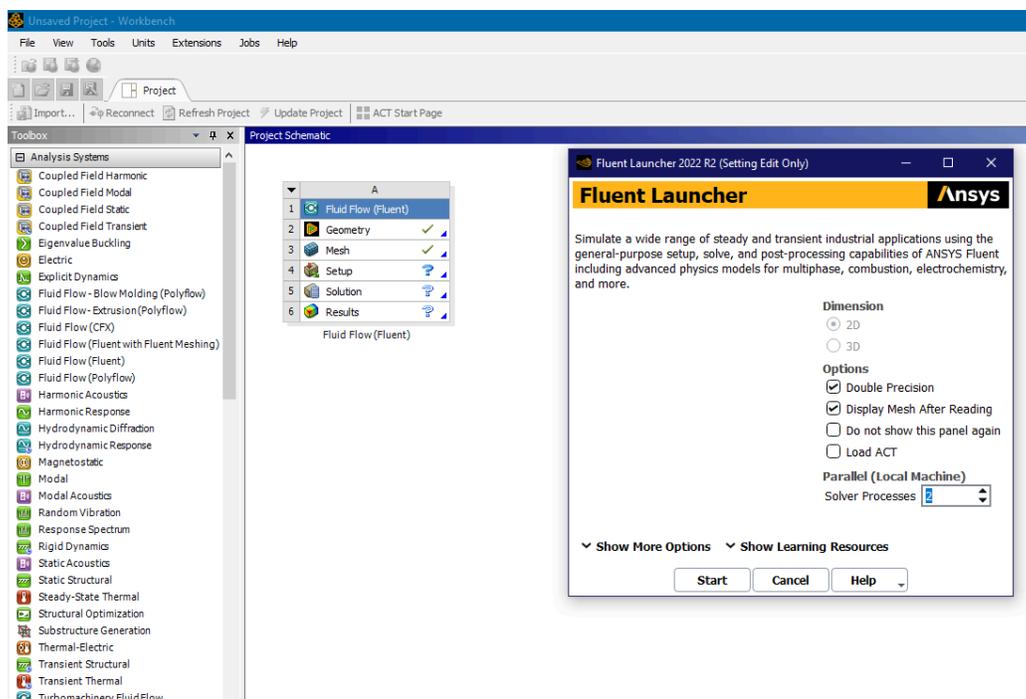


Figura 7.36 Inicio del estudio.

28. Hacer clic en Aceptar para iniciar Fluent. Lo primero que haremos una vez lanzado Fluent será definir el solucionador a utilizar. Seleccione Configuración del problema > General. En Solver, seleccione Basado en densidad.



29. A continuación, se define el modelo que vamos a utilizar. Se realizará esto yendo a Configuración de problemas > Modelos > Viscoso-Laminar. A continuación, pulsar Editar... Esto abre la ventana del menú Modelo viscoso. Seleccionar Inviscid y pulsar OK. Ahora, especificaremos las características del fluido. Debido a que especificamos el fluido como inviscid, solo se tiene que definir la densidad del fluido. Para simplificar aún más las cosas, solo se buscan valores no dimensionalizados como el coeficiente de presión, por lo que se define la densidad del fluido como $1 \frac{kg}{m^3}$. Para definir la densidad, hacer clic en Configuración del problema > Materiales > (doble clic) Aire. Esto abre la ventana Crear/Editar materiales.

En Propiedades, asegúrese de que la densidad esté establecida en Constante e introduzca la densidad a $1 \frac{kg}{m^3}$. Hacer clic en Cambiar/Crear para establecer la densidad.

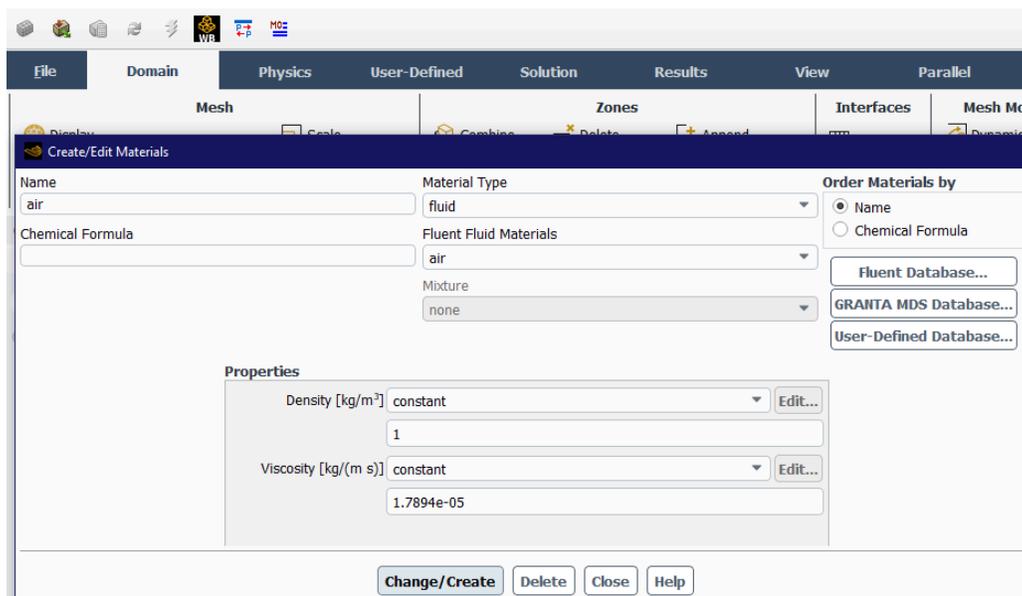


Figura 7.37 Ajuste de la densidad.

30. Ahora que el fluido ha sido descrito, estamos listos para establecer las condiciones de contorno de la simulación. Abrir el menú de condiciones de límite seleccionando



Configuración de problemas > Condiciones de límite. En la ventana Condiciones de contorno, buscar en Zonas. Primero, se establecen las condiciones límite para la entrada. Seleccionar Entrada para observar los detalles de la condición de límite. El tipo de condición de límite debería haber sido predeterminado velocidad-entrada: Si no se debe seleccionar. Ahora, hacer clic en Editar para abrir la ventana Velocity-Inlet. Se necesita especificar la magnitud y la dirección de la velocidad. Seleccione Velocity Specification Method > Components. Recordar que se desea que el flujo ingrese a la entrada en un ángulo de 0 grados ya que el ángulo de ataque del perfil aerodinámico es de 0 grados; Por lo tanto, la velocidad “x” es $\cos\alpha$, y la velocidad “y” es $\sin\alpha$. Especificar X-Velocity a 1 y Y-Velocity como 0. Cuando haya terminado de especificar la velocidad como entrando en la entrada a 0 grados (lo mismo que tener un ángulo de ataque de 0 grados), pulse OK.

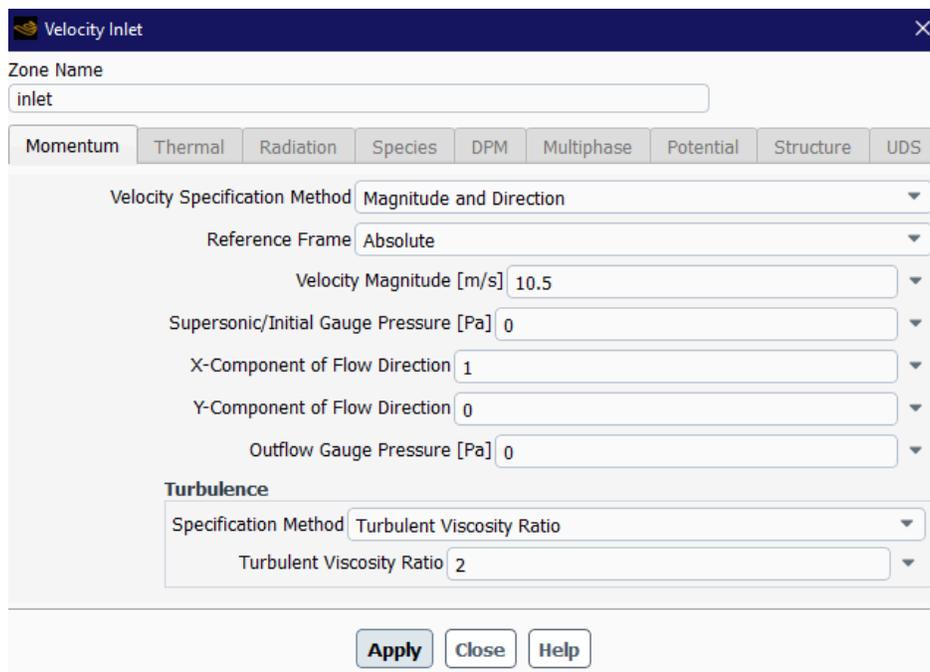


Figura 7.38 Ajuste de la velocidad, magnitud y dirección de la entrada del fluido.



31. En la ventana Condiciones de contorno, buscar en Zonas. Seleccionar Salida para ver los detalles de la condición de límite. El tipo de condición de límite debería haber sido predeterminado presión-salida: si no lo hizo, selecciónelo. Hacer clic en Editar y asegurar que la presión manométrica esté predeterminada. Si es así, se puede cerrar esta ventana.

32. En la ventana Condiciones de contorno, buscar en Zonas y seleccionar perfil aerodinámico. Seleccione Tipo > muro si no se ha predeterminado.

33. Lo último que se debe hacer antes de pasar a la solución es reconocer los valores de referencia. Ir a Configuración del problema > Valores de referencia. En la ventana Valores de referencia, seleccionar Calcular desde > entrada. Comprobar los valores de referencia que aparecen para asegurarse de que están como ya los hemos establecido.

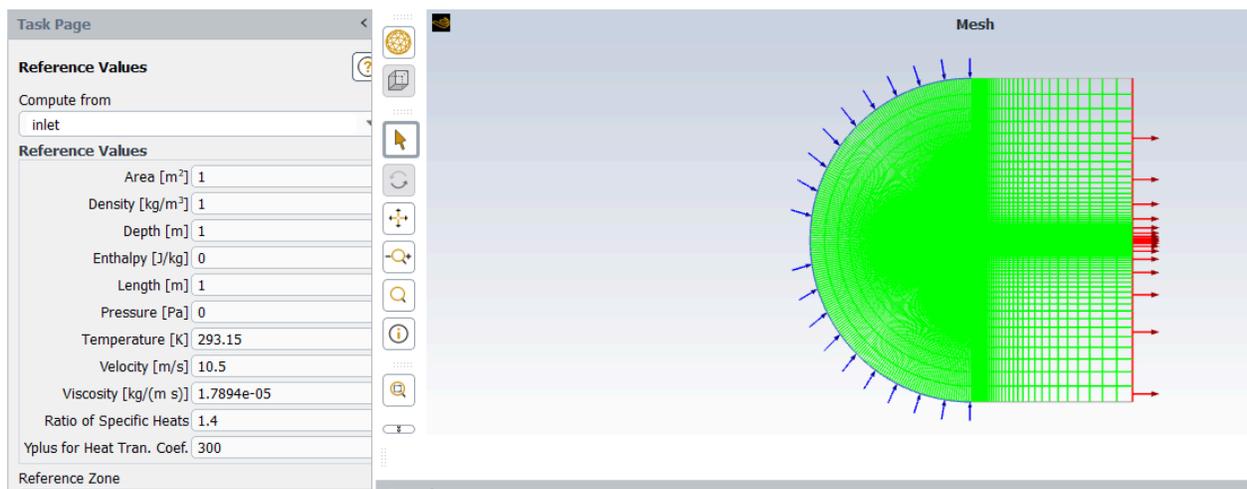


Figura 7.39 Introducción del reference values.

34. Primero, ir a Solución > Métodos de solución. Todo en esta sección debería haber predeterminado lo que queremos, pero asegurémonos de que en Flow la selección sea de segundo orden contra el viento. Si esta es la selección, podemos seguir adelante.



35. Ahora estamos listos para comenzar a resolver la simulación. Sin embargo, antes de presionar resolver, se debe configurar algunos parámetros sobre cómo Fluent resuelve la simulación.

Se comienza la solución en Solution > Monitors. En la ventana Monitores, busque en Monitores residuales, Estadísticas y Monitores de fuerza. Seleccionar Residuals - Print, Plot y pulse Editar. En la ventana Monitores residuales, se busca cambiar todos los criterios absolutos a $1e^{-6}$. Esto nos dará más confianza en nuestra solución.

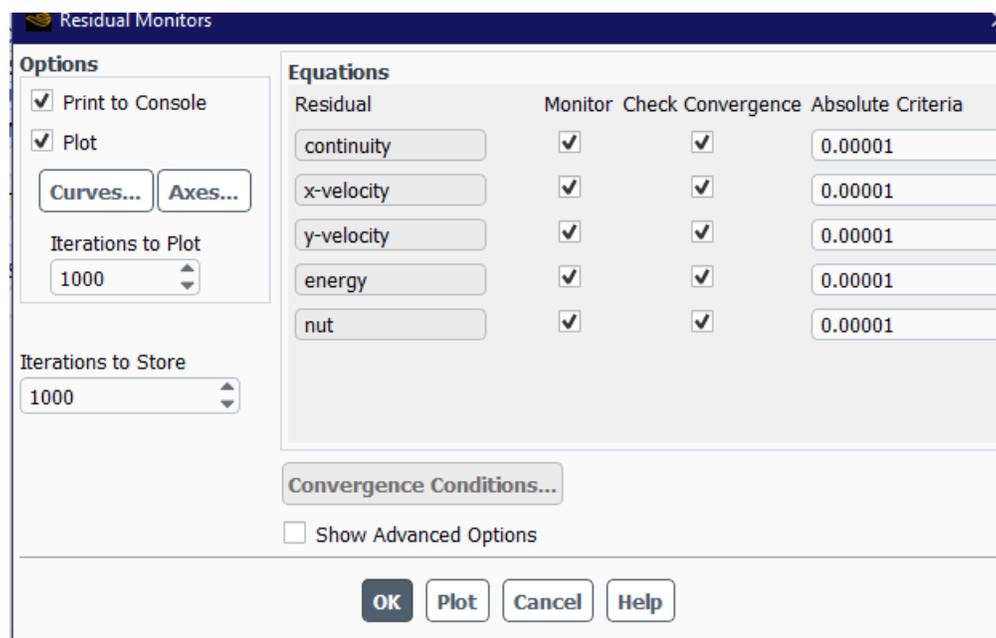


Figura 7.40 Ajuste del residual monitors.

36. Ahora, se necesita inicializar la solución. Seleccionar Solución > Inicialización de la solución. En la ventana Inicialización de la solución, seleccionar Calcular desde > entrada. Asegurar que los valores que aparecen son los mismos valores que ingresamos en el paso 32. Si son correctas, inicializar la solución haciendo clic en Inicializar.



37. Una vez inicializada la solución, está listo para resolver la simulación. seleccionar Solución > Ejecutar cálculo. Cambiar Número de iteraciones a 100 y, a continuación, hacer doble clic en Calcular.

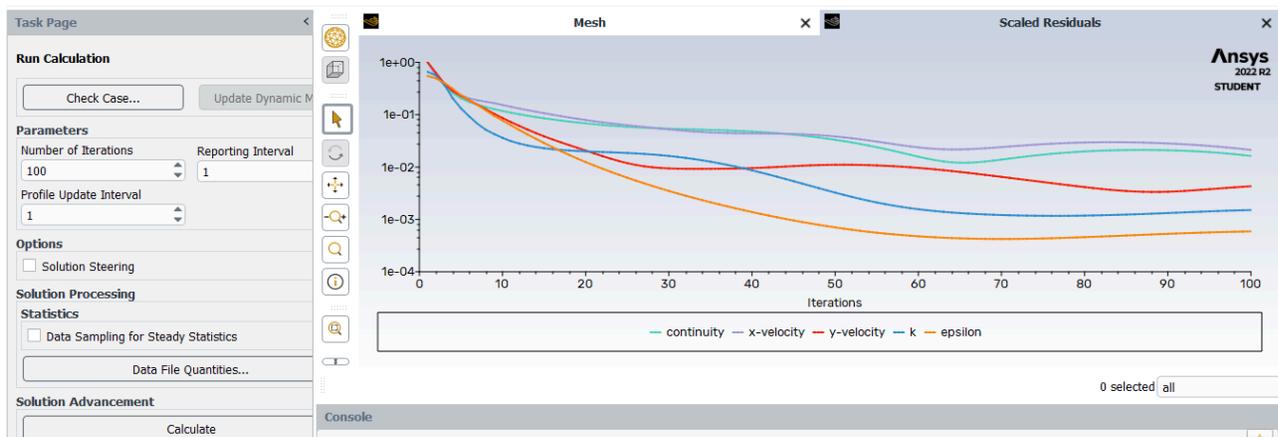


Figura 7.41 Iniciación del cálculo.

38. Primero, se observan los vectores de velocidad de la solución para ver si tienen sentido intuitivo. Para trazar los vectores de velocidad, seleccionar Resultados > Gráficos y animaciones. En la ventana Gráficos y animaciones, seleccionar Vectores y hacer clic en Configurar. Esto abre el menú Vectores.

Asegurar que la configuración del menú coincida con la figura anterior: a saber, Vectores de velocidad de >, Color por velocidad > y establezca el segundo cuadro como Magnitud de velocidad. Para ver los vectores de velocidad, pulsar Mostrar.

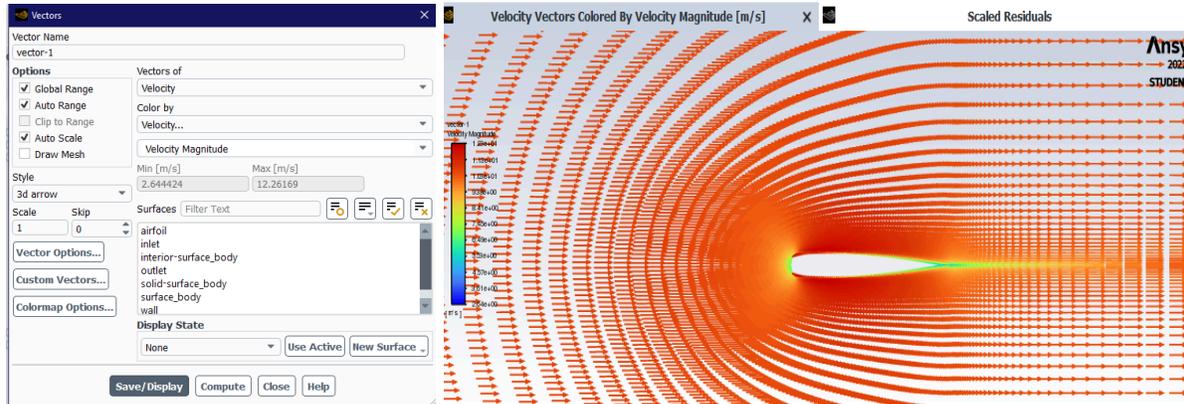


Figura 7.42 Resultados de velocidad.

39. Para ver los contornos de presión en toda la malla, seleccionar de nuevo a Resultados > Gráficos y animaciones y, en la ventana Gráficos y animaciones, seleccionar Contornos. Hacer clic en Configurar para abrir el menú Contours. Marca la casilla situada junto a Relleno. En Contornos de, asegurar de que las dos casillas seleccionadas sean Presión y Presión estática.

Una vez configurados estos parámetros, pulsar Display (Pantalla) para ver los contornos de presión.

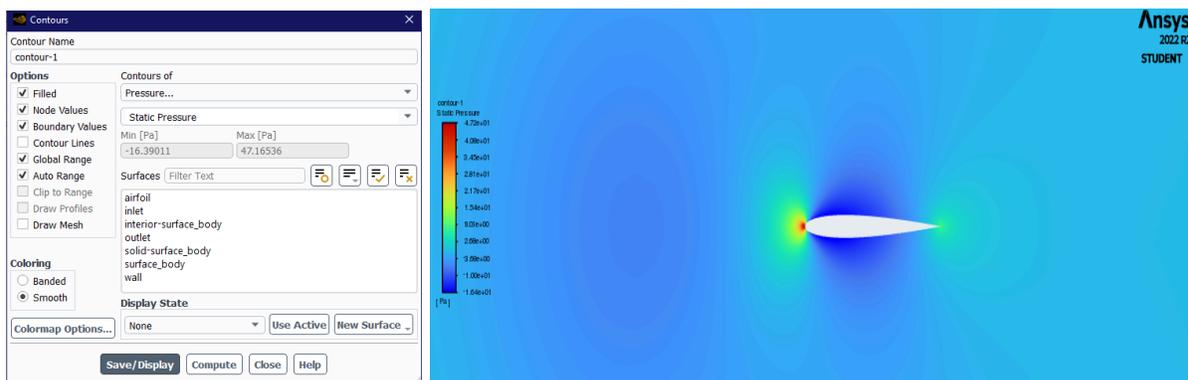


Figura 7.43 Resultados de presión.



40. Para buscar los coeficientes de elevación y arrastre, hacer clic en Resultados > Informes para abrir la ventana Informes. En la ventana Informes, seleccionar Fuerzas y hacer clic en Configurar. Esto abre el menú.

Se necesita establecer los parámetros para que se muestre el arrastre a través del perfil aerodinámico (tenga en cuenta que está en ángulo). En la ventana Informes de fuerza, cambiar el vector de dirección de tal manera que X ($\cos\alpha$) e Y ($\sin\alpha$). Hacer clic en Imprimir para imprimir el coeficiente de arrastre en la ventana de comandos. Para imprimir el coeficiente de sustentación, en la ventana Informes de fuerza cambie el vector de dirección de tal manera que X ($-\sin\alpha$) e Y ($\cos\alpha$). De nuevo, presione Imprimir.

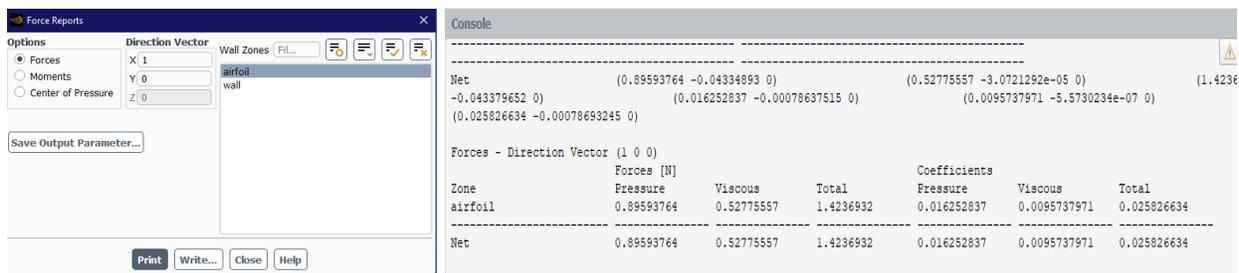


Figura 7.44 Resultados de reporte de fuerzas.



8. Resultados y discusión

En el desarrollo anterior, se pueden observar distintos resultados obtenidos bajo condiciones establecidas de manera uniforme para cada uno de los perfiles aerodinámicos analizados. Al comparar los estudios realizados con Xfoil y CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), se aprecia que los resultados varían en función del perfil, pero el comportamiento general de cada uno de los ángulos de ataque es similar en ambos métodos.

8.1. Perfiles propuestos analizados por método Xfoil.

Las condiciones se establecen con datos de diseño, para determinar las características y el rango en el que se procesa el estudio. Para este proceso se toma una velocidad media de 7.5 m/s, para obtener la velocidad de diseño se plantea un factor de conversión del valor de 1.4, esto da un resultado en la velocidad de diseño de 10.5 m/s. La cuerda de todos los perfiles es de 1 m, también se toma en consideración una temperatura de 20°C y con respecto a esta se estima que la viscosidad cinemática tiene un valor de 1.5×10^{-5} Pa, partiendo de este dato se obtiene un número de Reynolds de 700000. Por último, el estudio se determinará en un parámetro de ángulo de entre 0 a 20.

Estas condiciones serán las mismas en los siguientes perfiles.

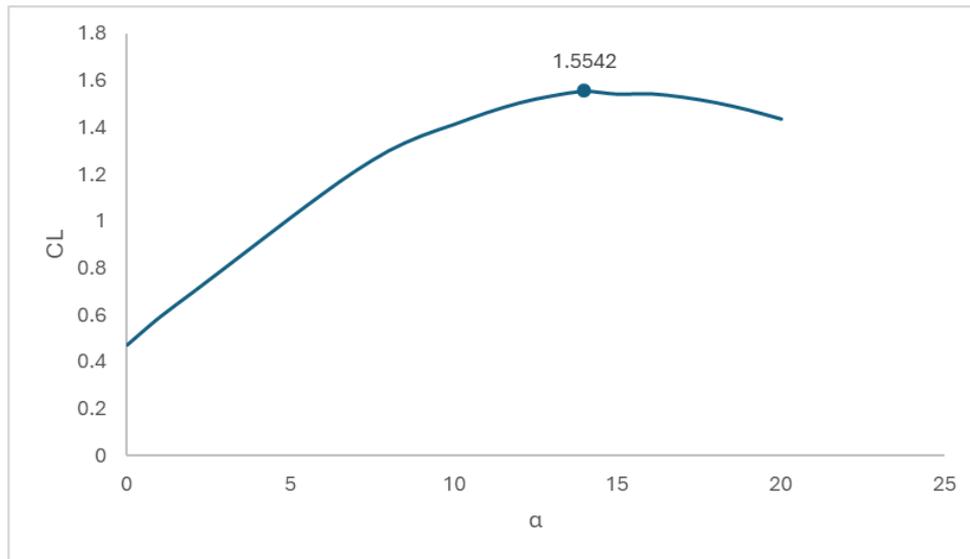
- NACA 4412
- NACA 4415X
- NACA 4416
- NACA 2414
- S822X
- SGXX
- SG6050



A continuación, se describen los datos obtenidos de la simulación realizada en el software QBlade, donde se evalúan los criterios de selección.

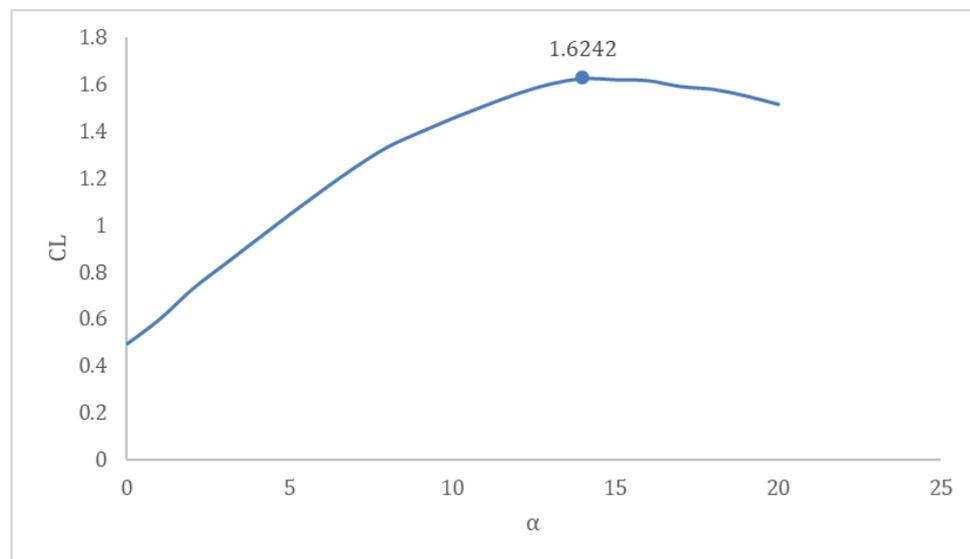
- Descenso del coeficiente de sustentación

NACA 4412



Gráfica 8.1 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.

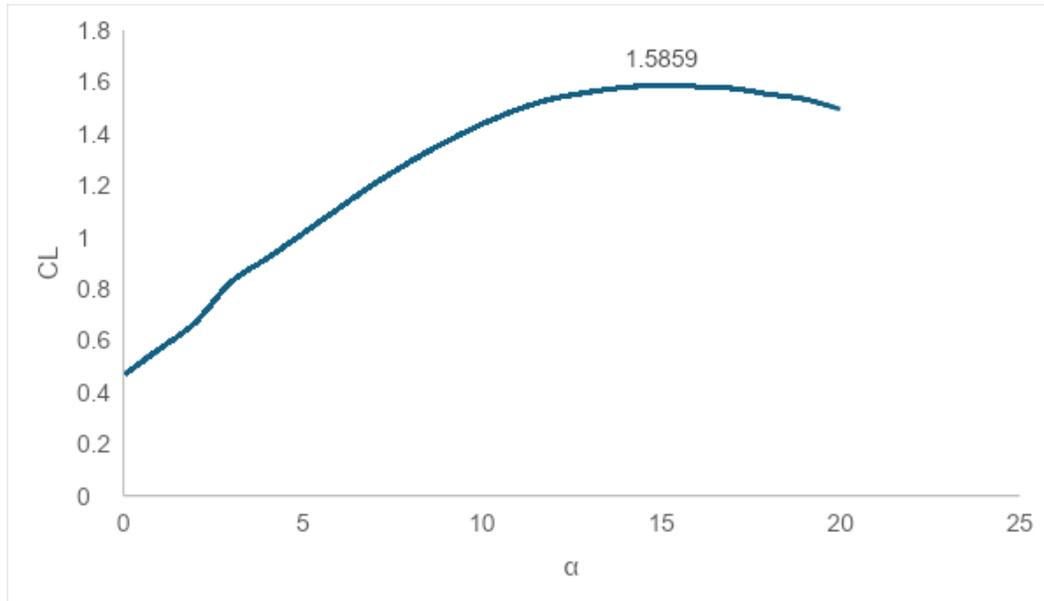
NACA 4415X



Gráfica 8.2 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.

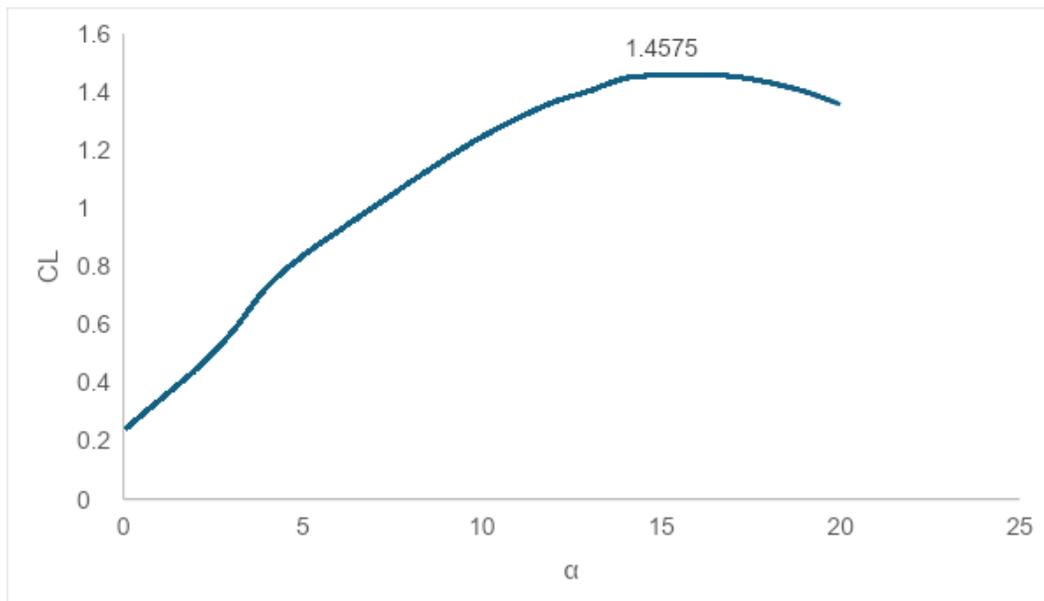


NACA 4416



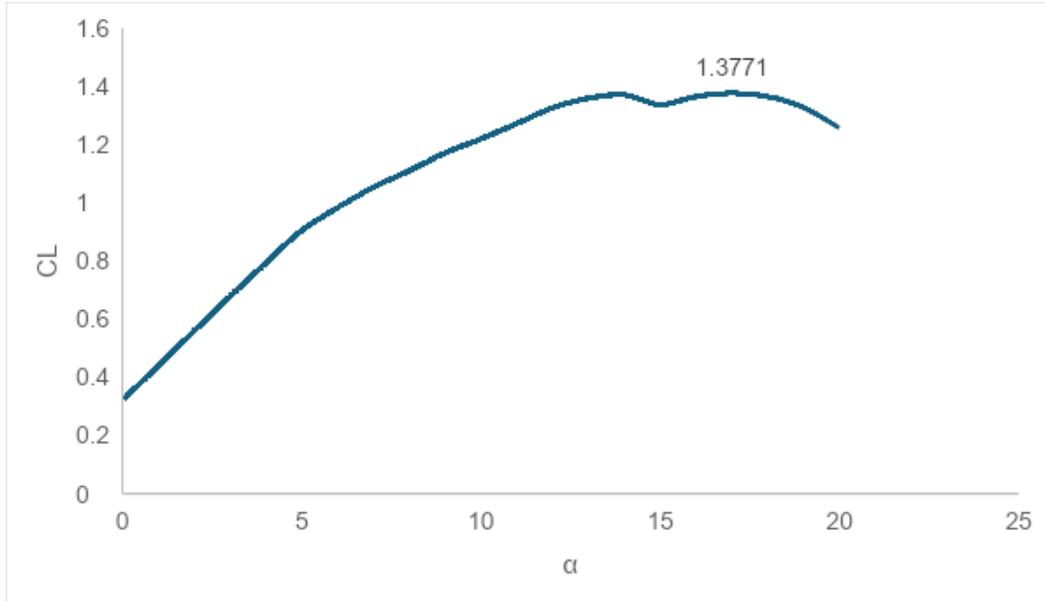
Gráfica 8.3 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.

NACA 2414



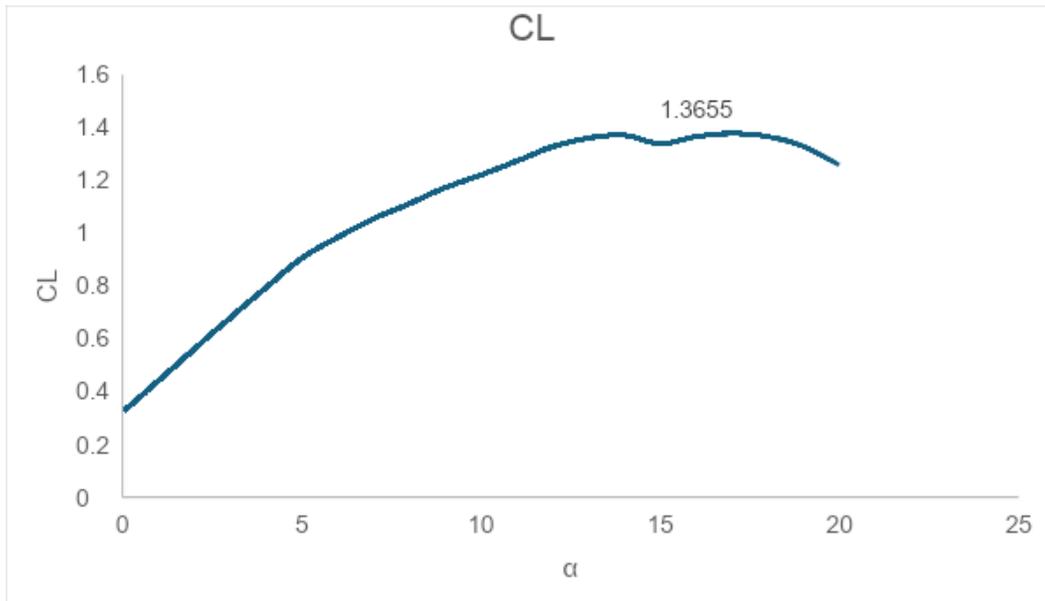
Gráfica 8.4 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.

S822X



Gráfica 8.5 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.

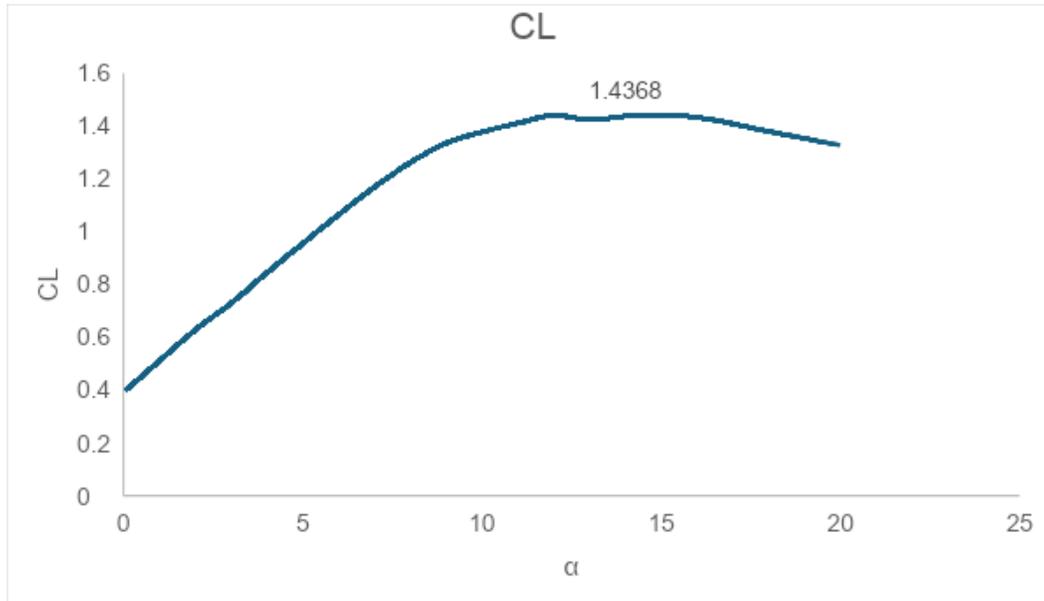
SGXX



Gráfica 8.6 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.



SG6050



Gráfica 8.7 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.

- Ángulo de ataque (α) estable, después del desprendimiento de flujo.

En este criterio se propone que el rango de ángulos estables esté entre 0° a 20° . Por esta razón, este criterio de selección depende del anterior.

Se muestra que el perfil con mayor desprendimiento del coeficiente de sustentación es el perfil NACA4415X elaborado con un estudio en Xfoil

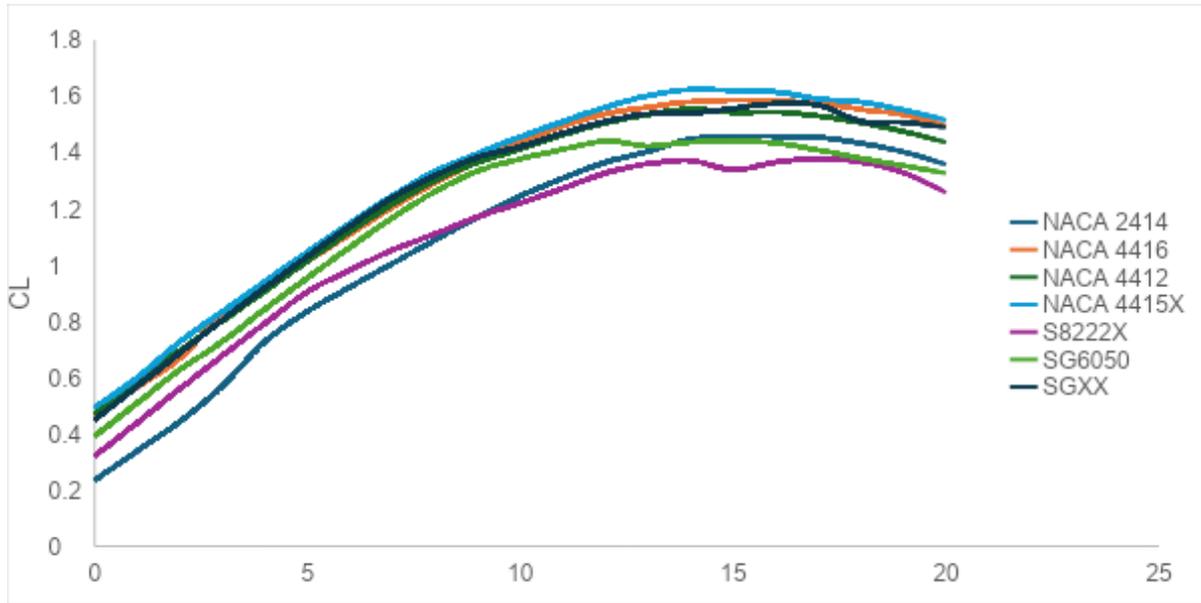
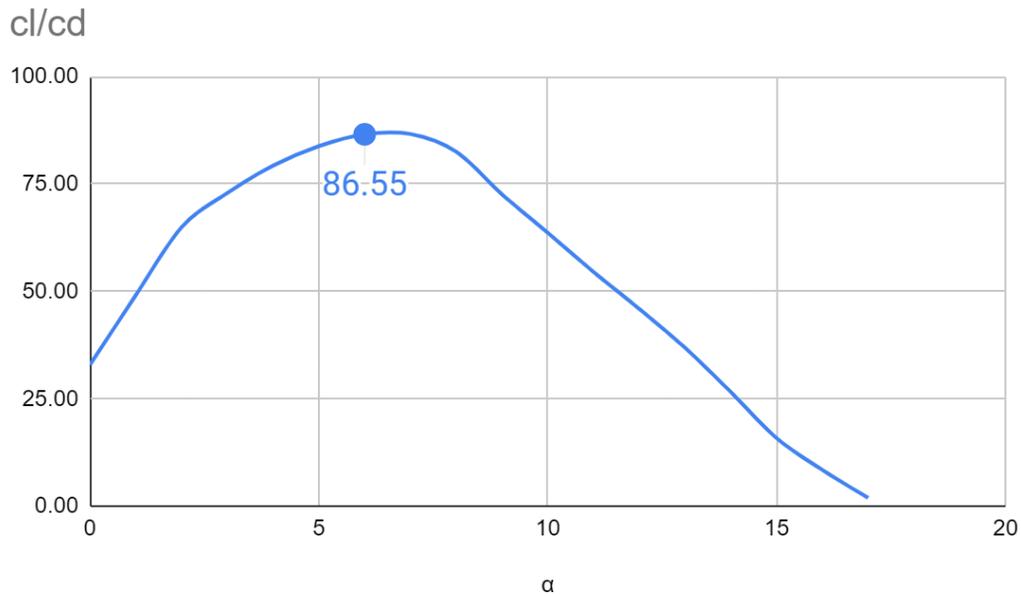


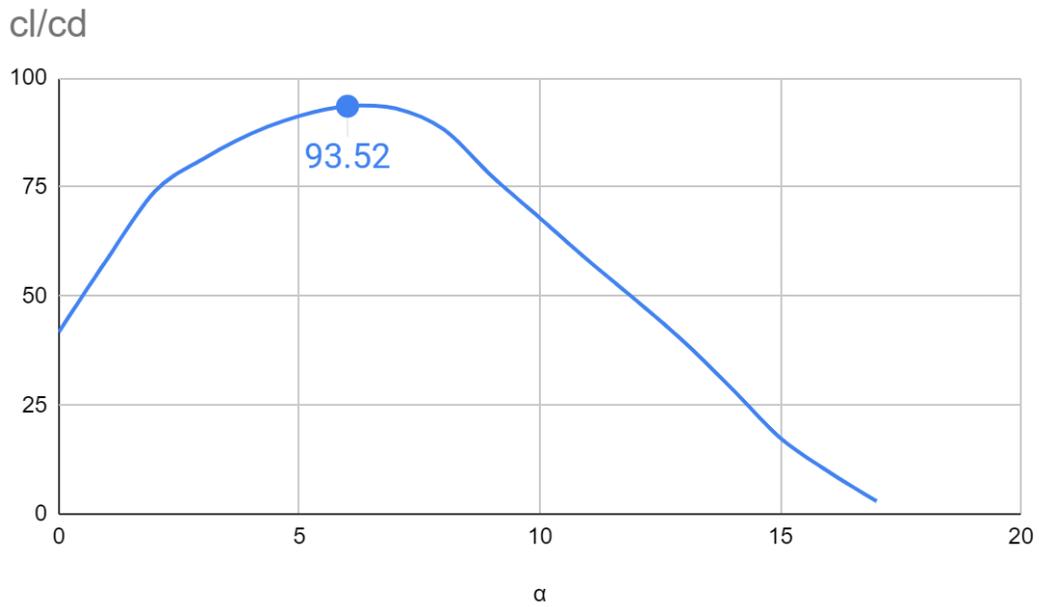
Tabla 8.1 Relación del desprendimiento del coeficiente de sustentación en los perfiles.

- Relación (C_L/C_D).

NACA 4412

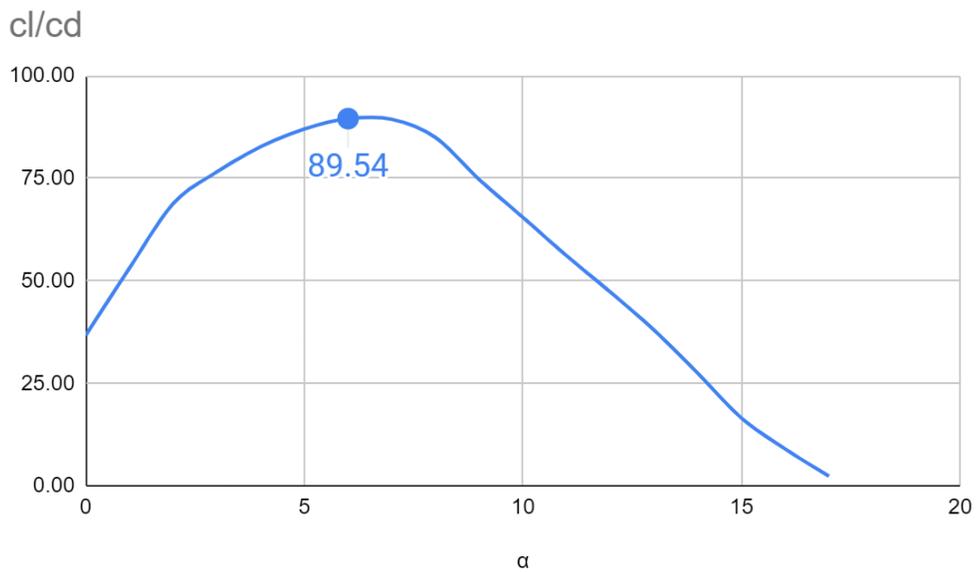


Gráfica 8.8 Relación de la eficiencia en diferentes ángulos de ataque.



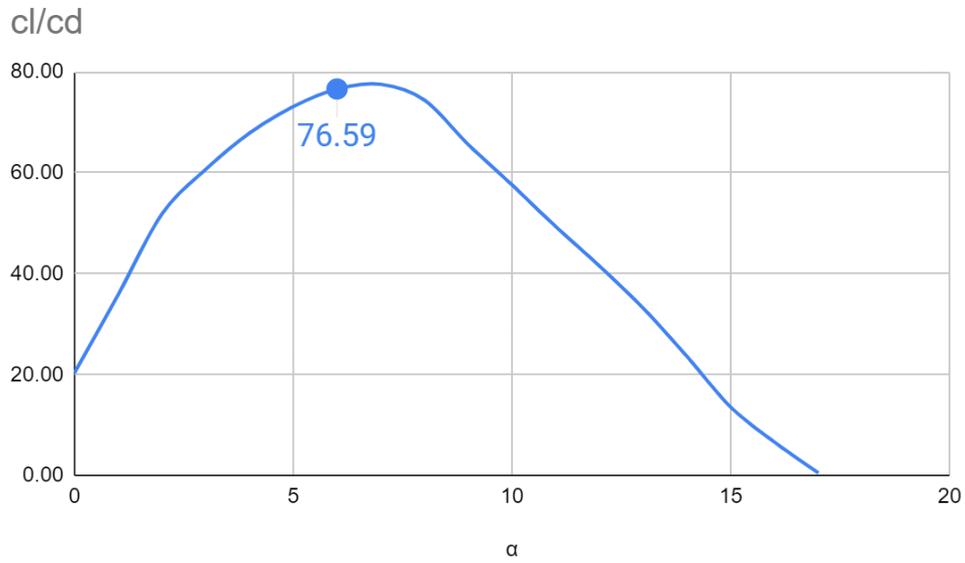
Gráfica 8.9 Relación de la eficiencia en diferentes ángulos de ataque.

NACA 4416



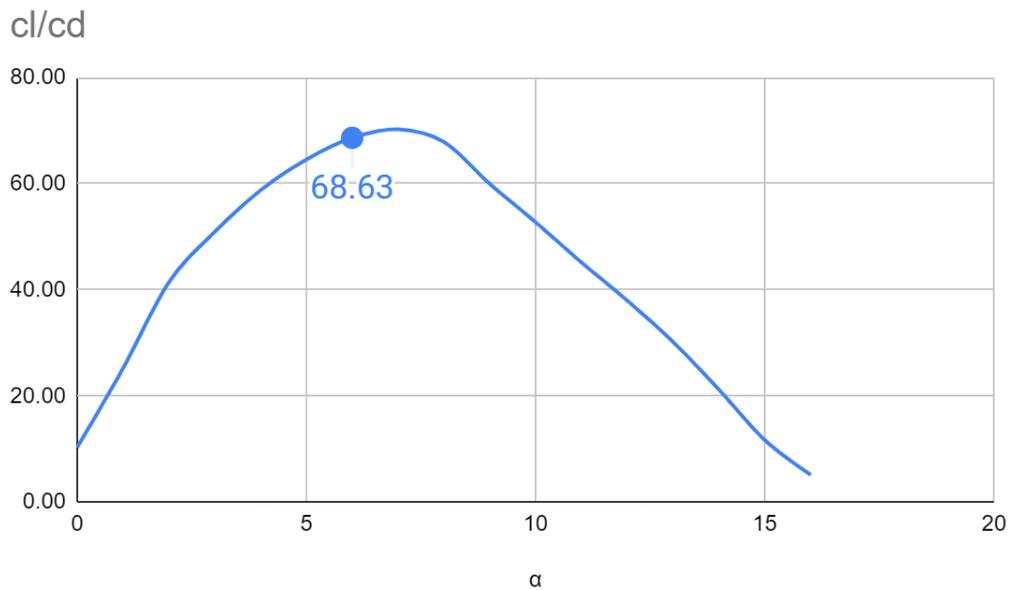
Gráfica 8.10 Relación de la eficiencia en diferentes ángulos de ataque.

NACA 2414

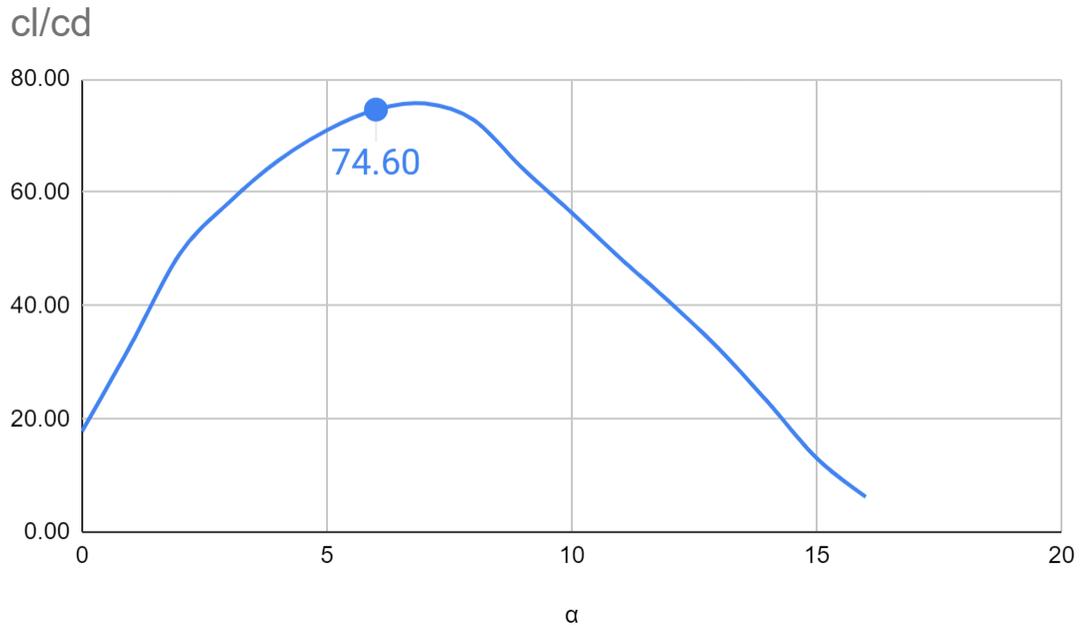


Gráfica 8.11 Relación de la eficiencia en diferentes ángulos de ataque.

SGXX

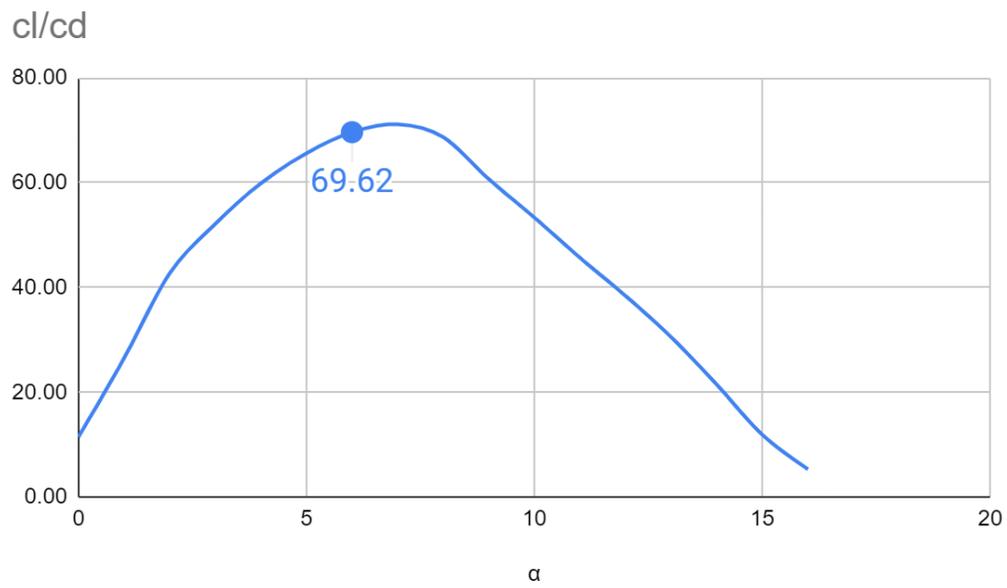


Gráfica 8.12 Relación de la eficiencia en diferentes ángulos de ataque.



Gráfica 8.13 Relación de la eficiencia en diferentes ángulos de ataque.

S822X



Gráfica 8.14 Relación de la eficiencia en diferentes ángulos de ataque.

- Geometría simplificada.

NACA 4412

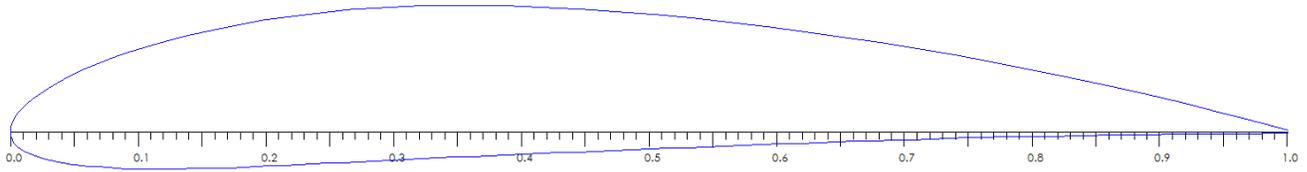


Figura 8.2. Perfil NACA 4412 importado en QBlade

NACA 4415X

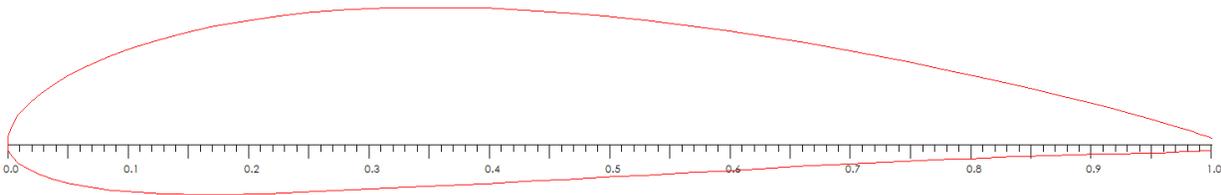


Figura 8.3 Perfil NACA 4415X importado en QBlade.

NACA 4416

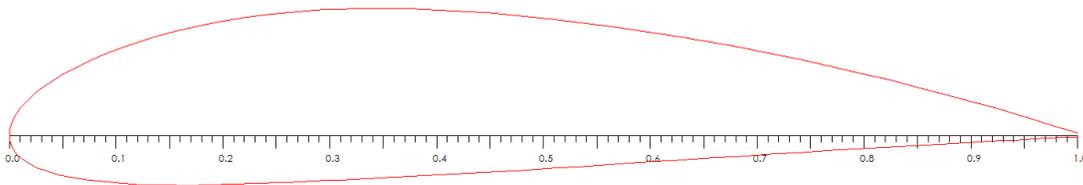


Figura 8.4 Perfil NACA 4416 importado en QBlade.

NACA 2414

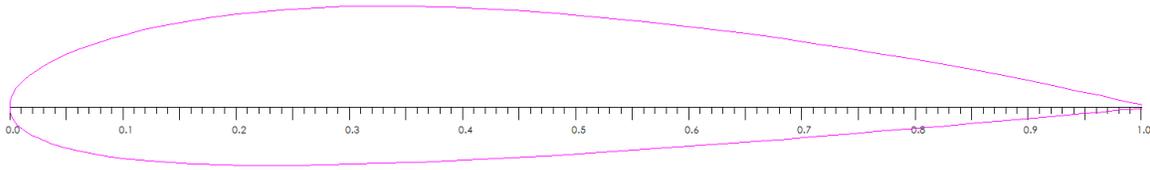


Figura 8.5 Perfil NACA 2414 importado en QBlade.

S822X

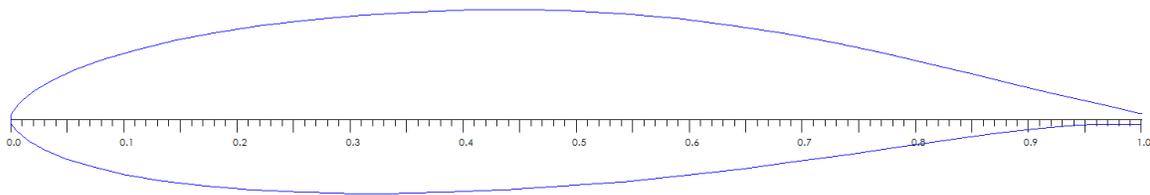


Figura 8.6 Perfil S822X importado en QBlade.

SGXX

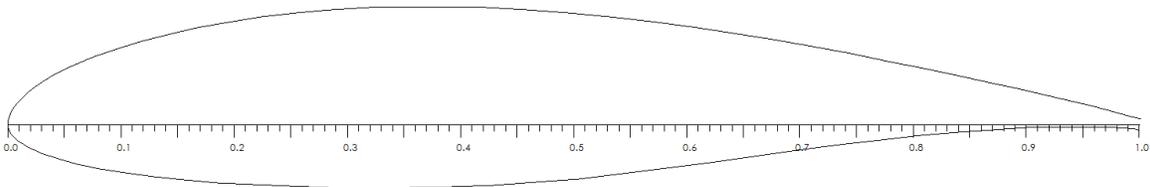


Figura 8.7 Perfil SGXX importado en QBlade.

SG6050

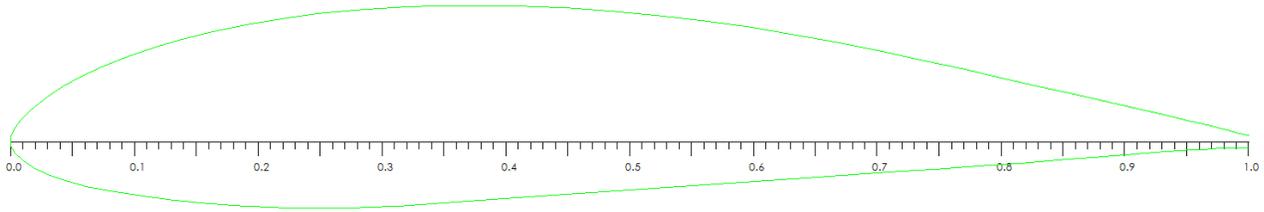


Figura 8.8 Perfil SG6050 importado en QBlade.

8.2. Perfiles propuestos analizados por método CFD.

Las condiciones en este análisis son las mismas que se establecen en el análisis por método Xfoil, con la finalidad de tener una comparación de resultados y que las condiciones sean las mismas en todos los perfiles.

Estas condiciones serán las mismas en los siguientes perfiles.

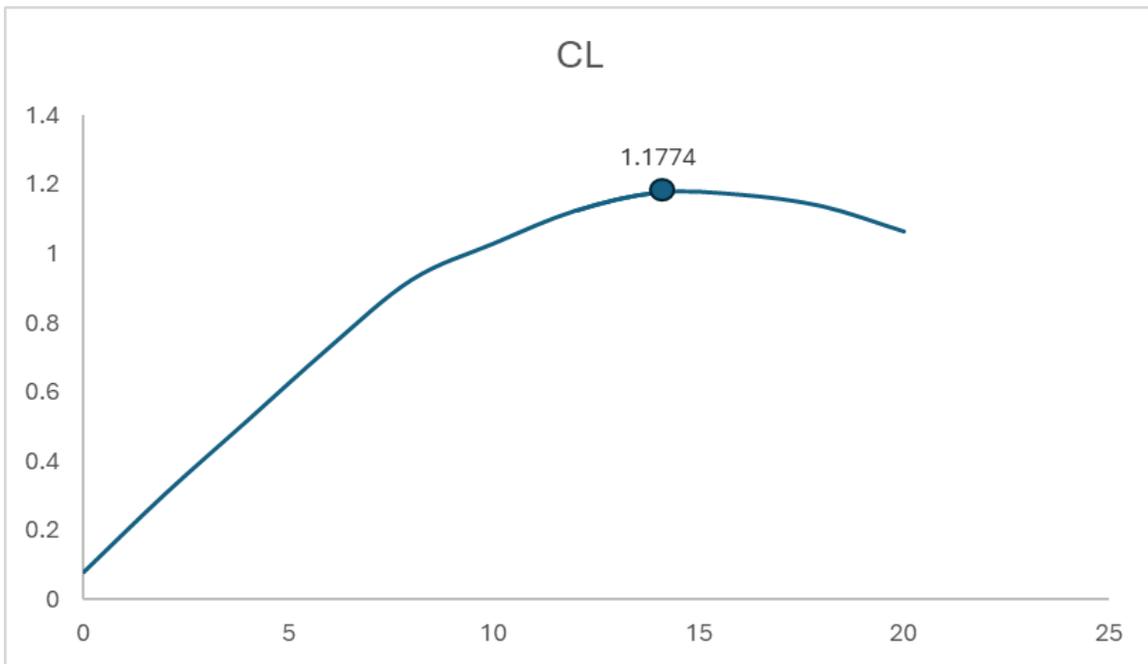
- NACA 4412
- NACA 4415X
- NACA 4416
- NACA 2414
- S822X
- SGXX
- SG6050

A continuación, los datos obtenidos de la simulación realizada en el software ANSYS.

- Descenso del coeficiente de sustentación

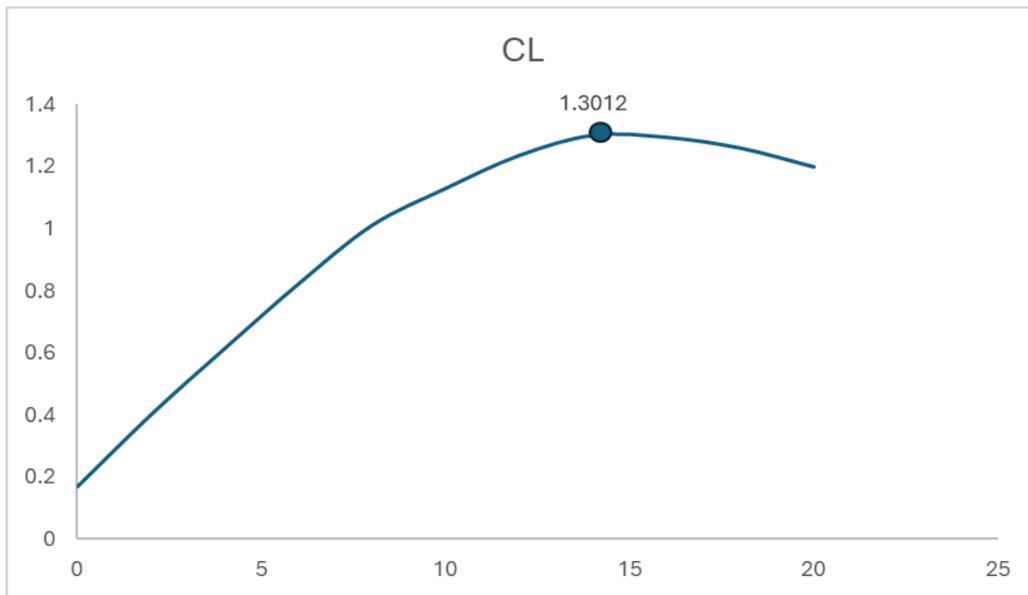


NACA 4412



Gráfica 8.15 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque

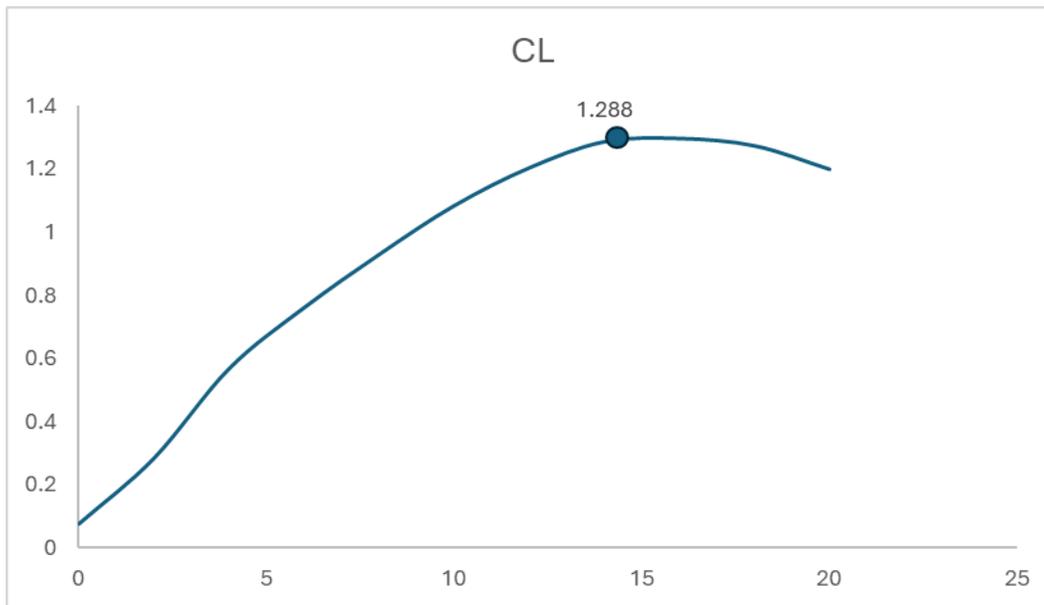
NACA 4416



Gráfica 8.16 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque

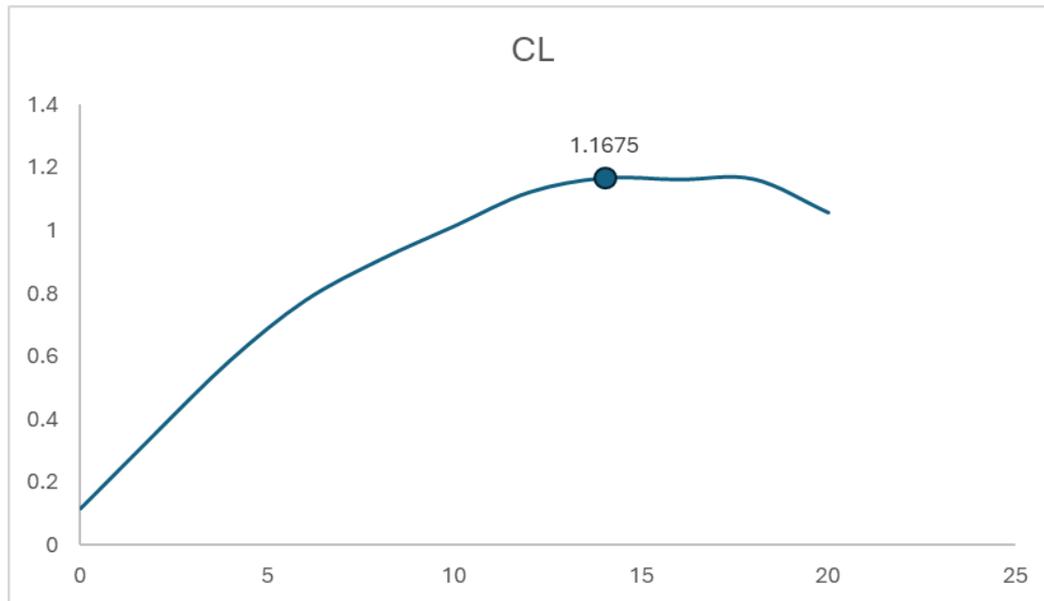


NACA 4415X



Gráfica 8.17 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque

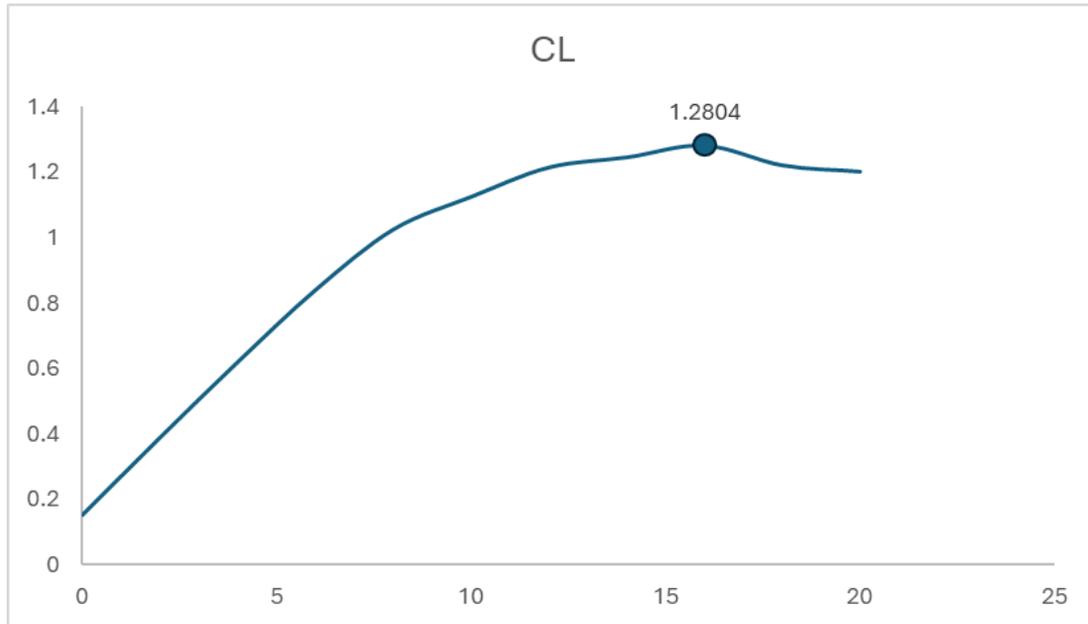
S822X



Gráfica 8.18 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.

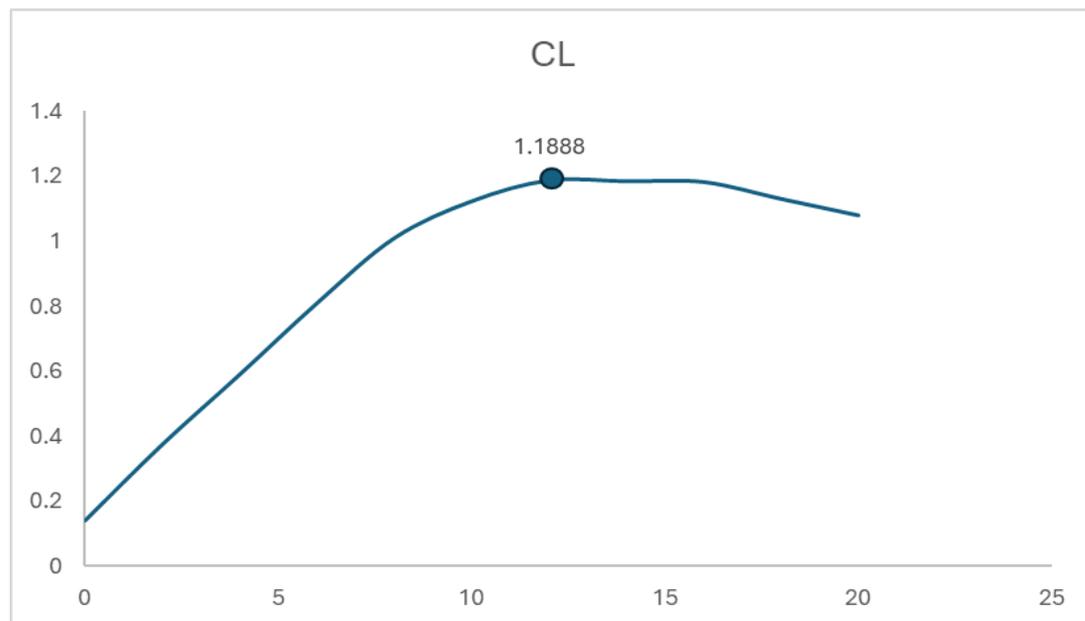


SGXX



Gráfica 8.19 Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque.

SG6050

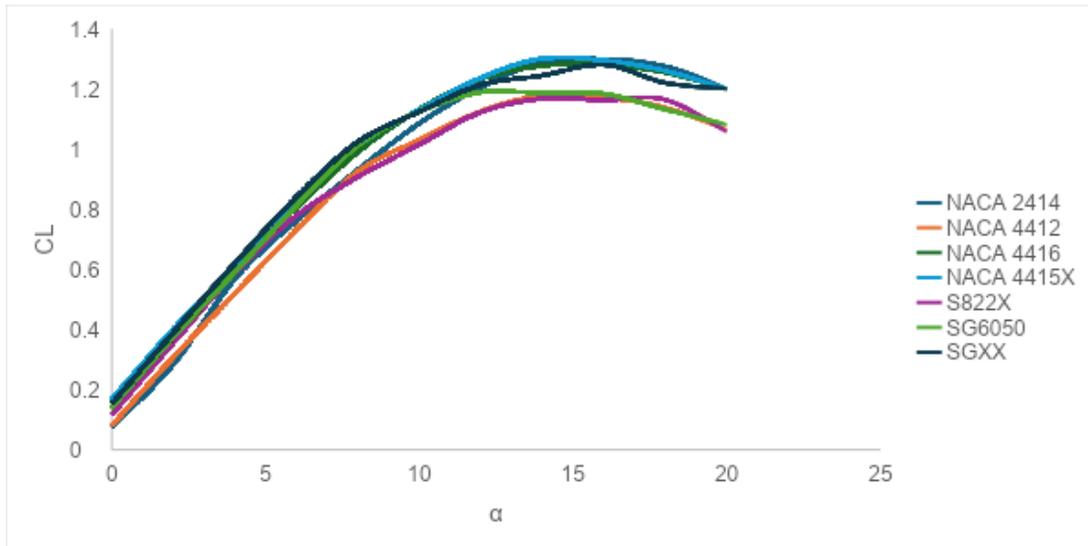


Gráfica 8.20. Relación del coeficiente de sustentación en diferentes ángulos de ataque



- Ángulo de ataque (α) estable, después del desprendimiento de flujo.

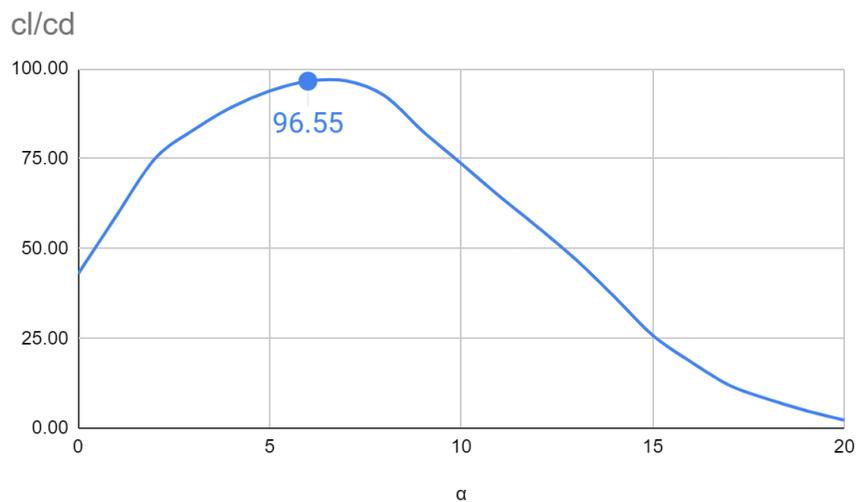
En este criterio se propone que el rango de ángulos estables este entre 0° a 20° . Por esta razón, este criterio de selección depende del anterior.



Gráfica 8.21 Relación del desprendimiento del coeficiente de sustentación en los perfiles.

- Relación (Cl/Cd)

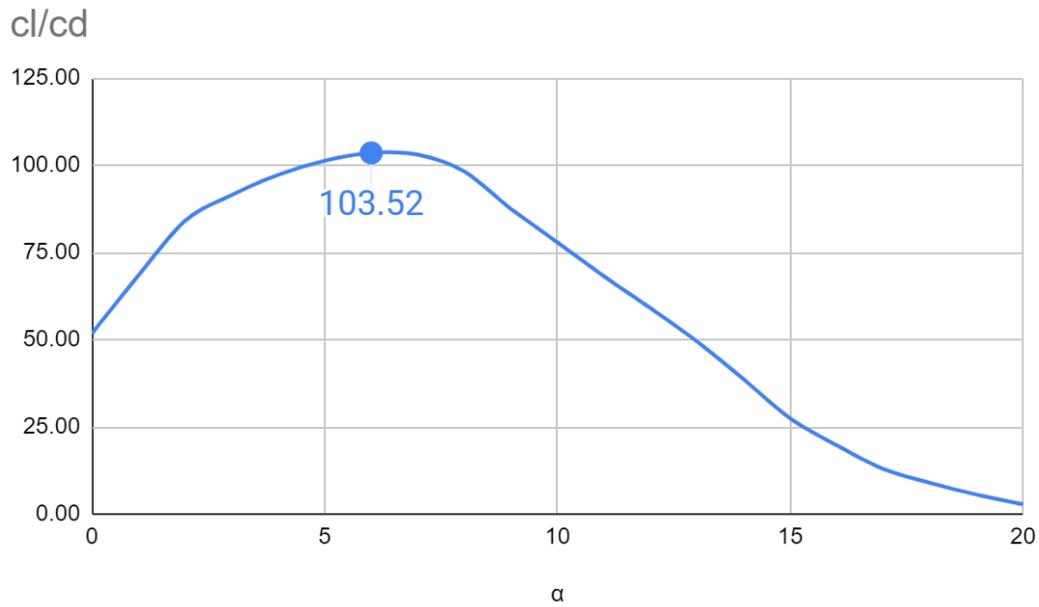
NACA 4412



Gráfica 8.22 Eficiencia del perfil en ángulos de ataque de 0 a 20.

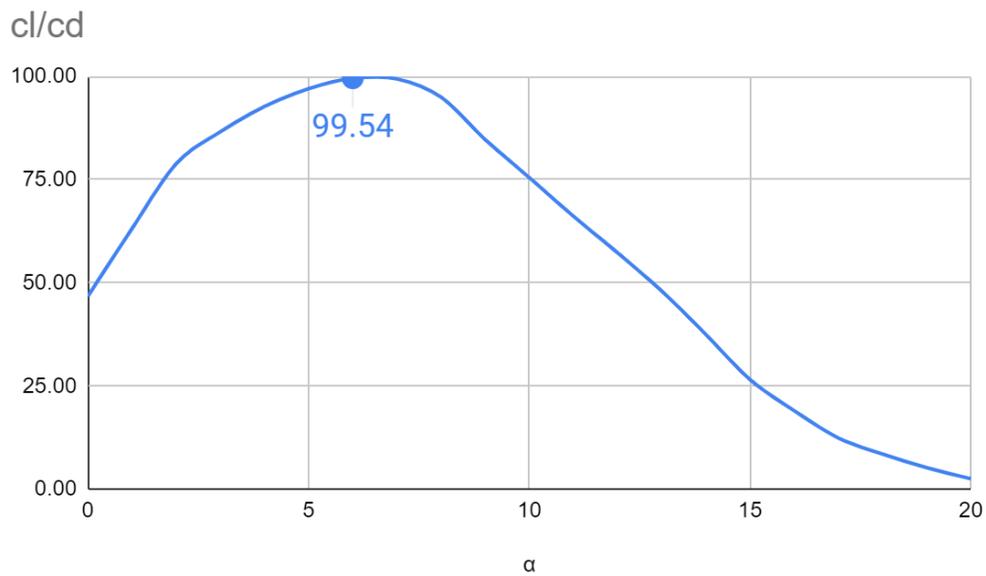


NACA 4415X

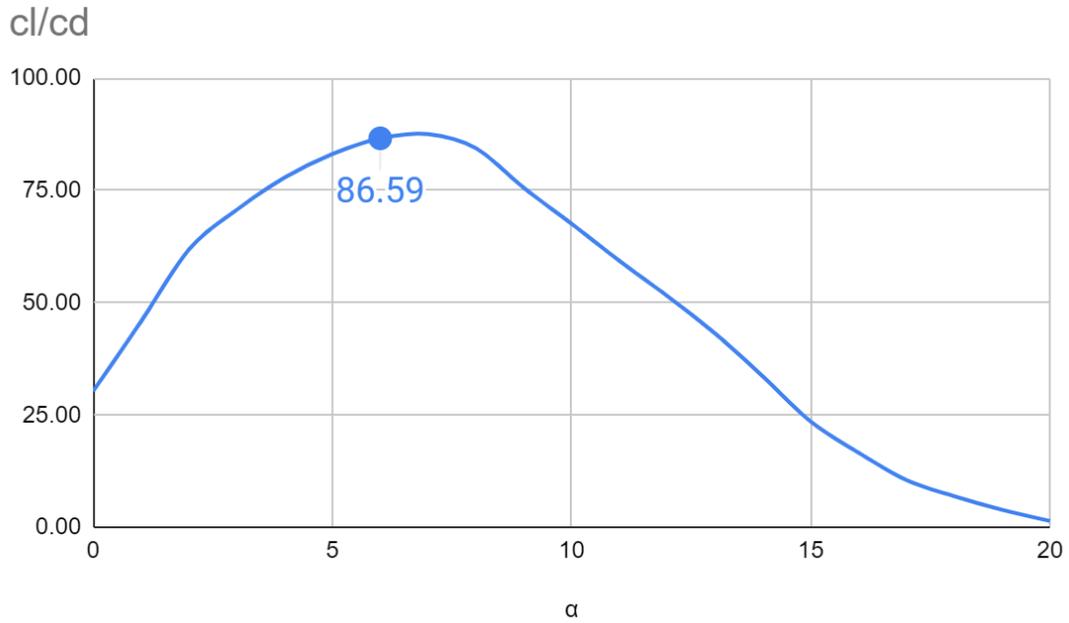


Gráfica 8.23 Eficiencia del perfil en ángulos de ataque de 0 a 20.

NACA 4416

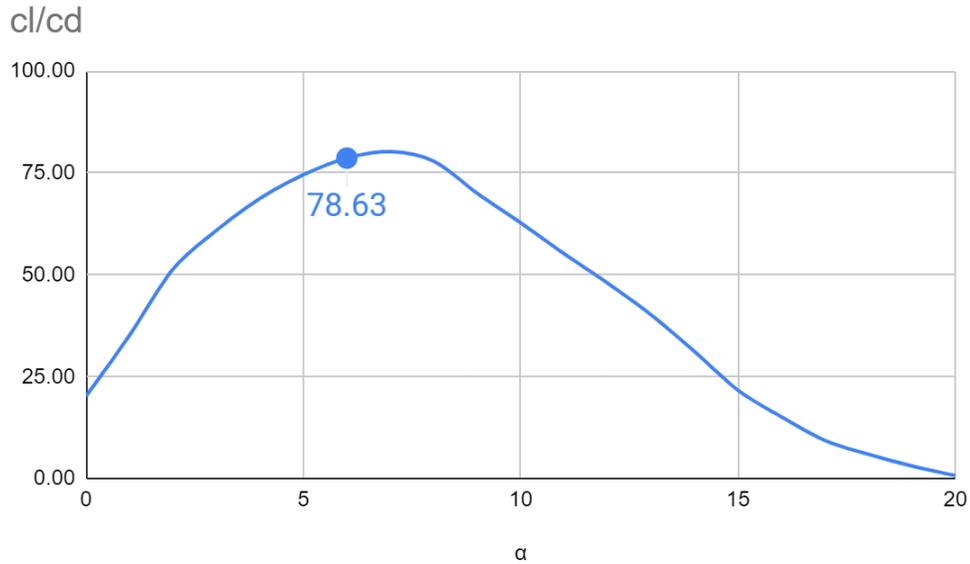


Gráfica 8.24 Eficiencia del perfil en ángulos de ataque de 0 a 20.

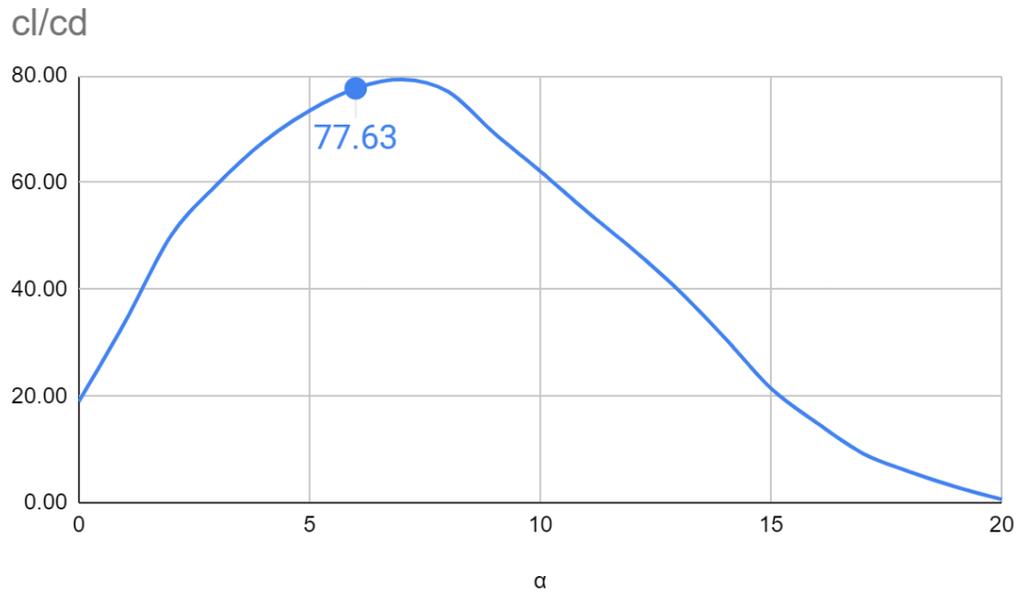


Gráfica 8.25 Eficiencia del perfil en ángulos de ataque de 0 a 20.

S822X

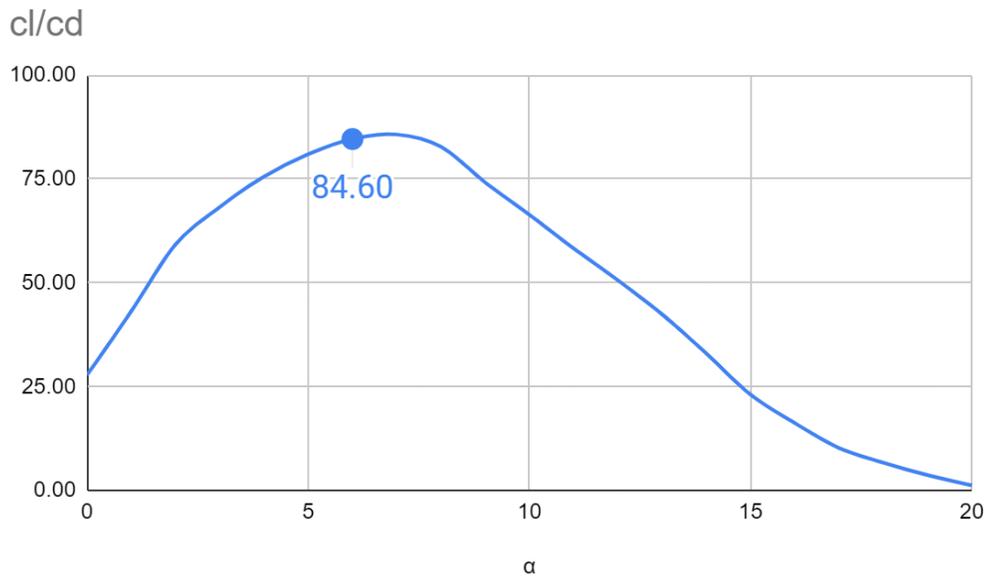


Gráfica 8.26 Eficiencia del perfil en ángulos de ataque de 0 a 20.



Gráfica 8.27 Eficiencia del perfil en ángulos de ataque de 0 a 20.

SG6050

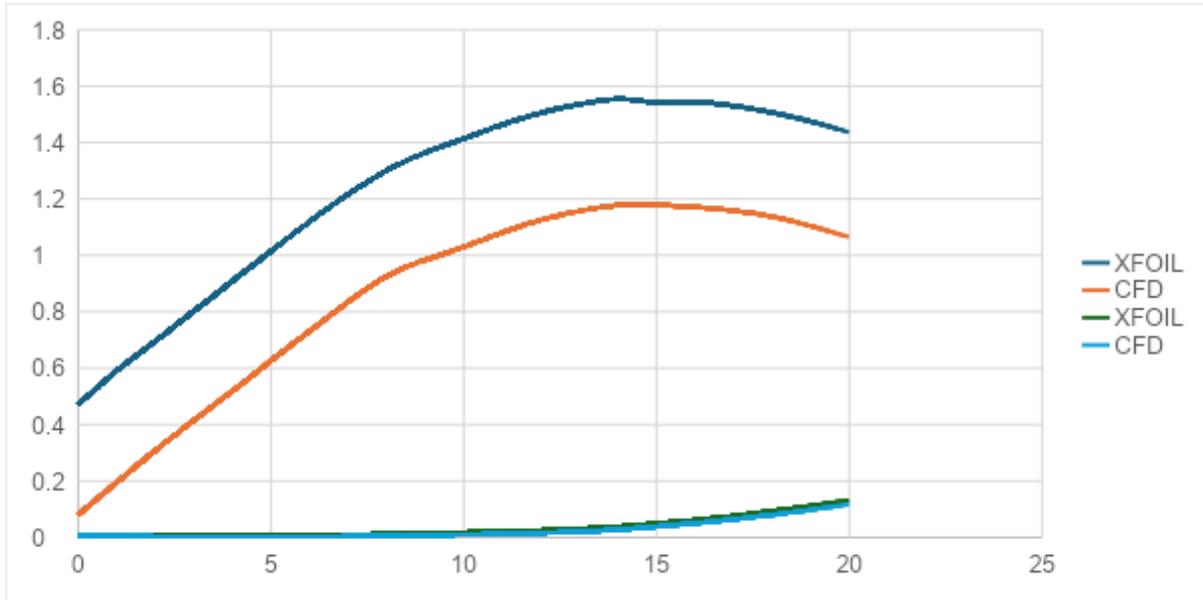


Gráfica 8.28 Eficiencia del perfil en ángulos de ataque de 0 a 20.



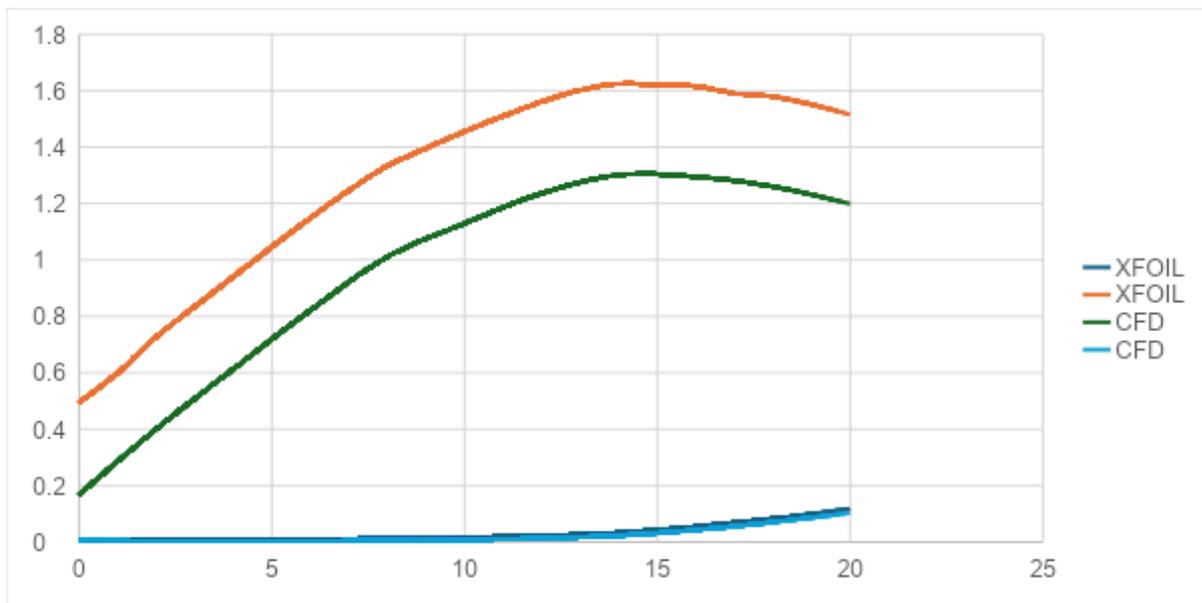
Comparación del comportamiento de los coeficientes en cada uno de los casos.

- NACA 4412



Gráfica 8.29 Resultados de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación en los distintos métodos.

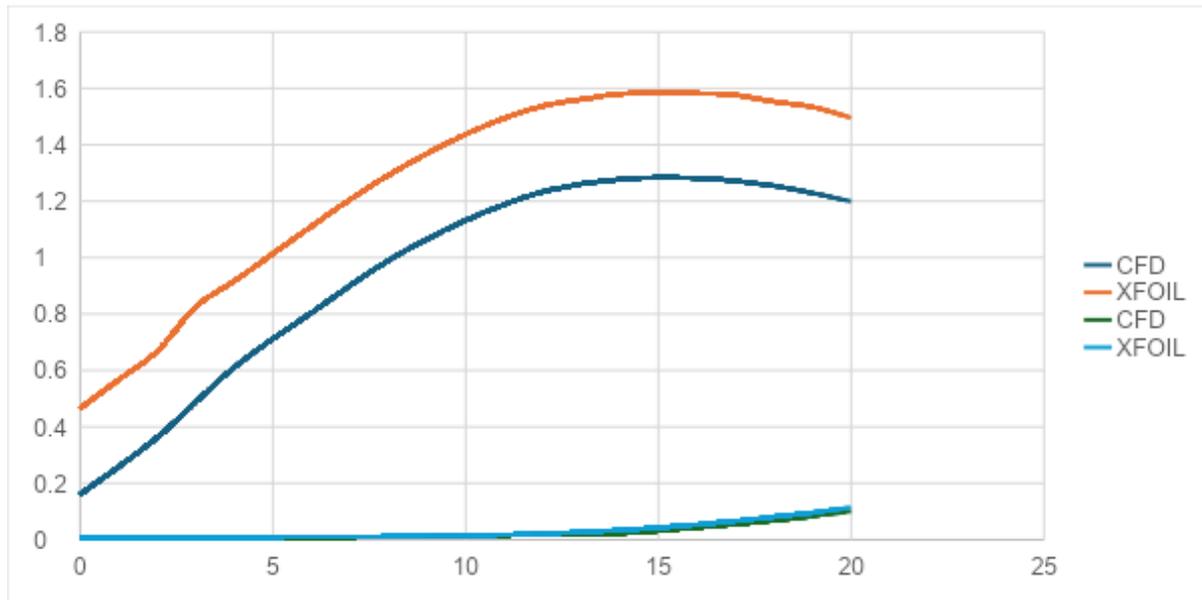
- NACA 4415X



Gráfica 8.30 Resultados de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación en los distintos métodos.

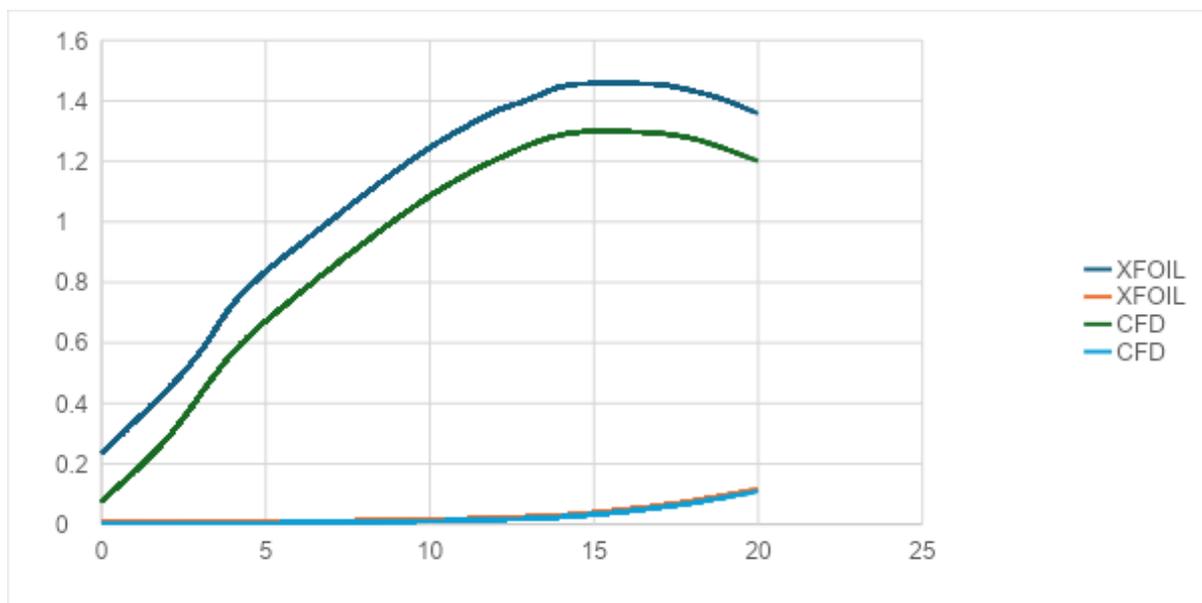


- NACA 4416



Gráfica 8.31 Resultados de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación en los distintos métodos.

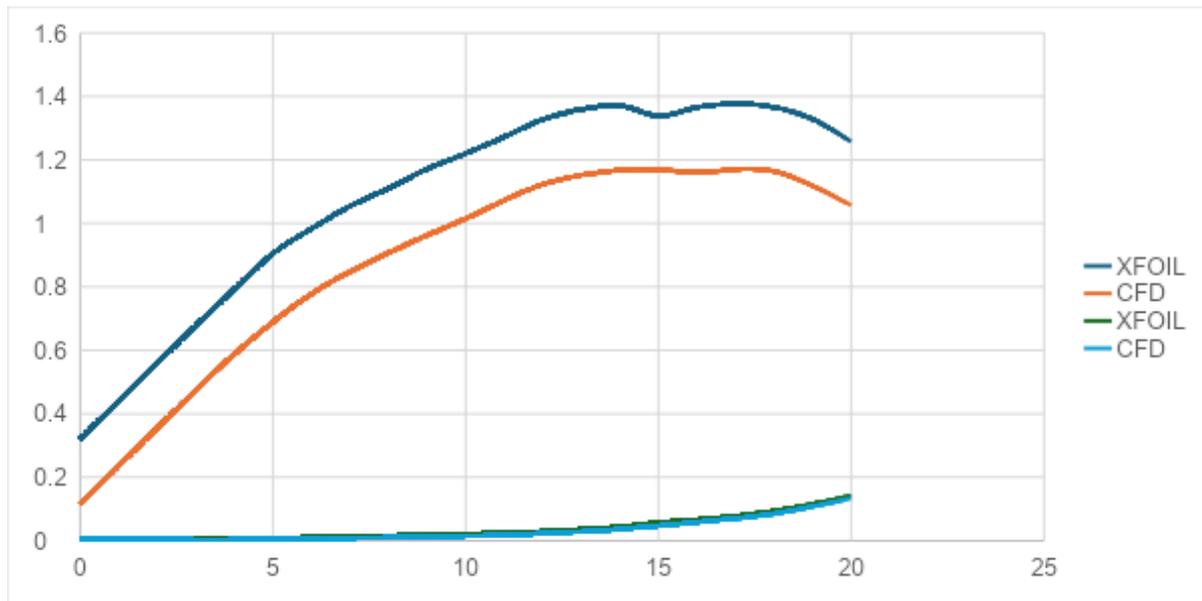
- NACA 2414



Gráfica 8.32 Resultados de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación en los distintos métodos.

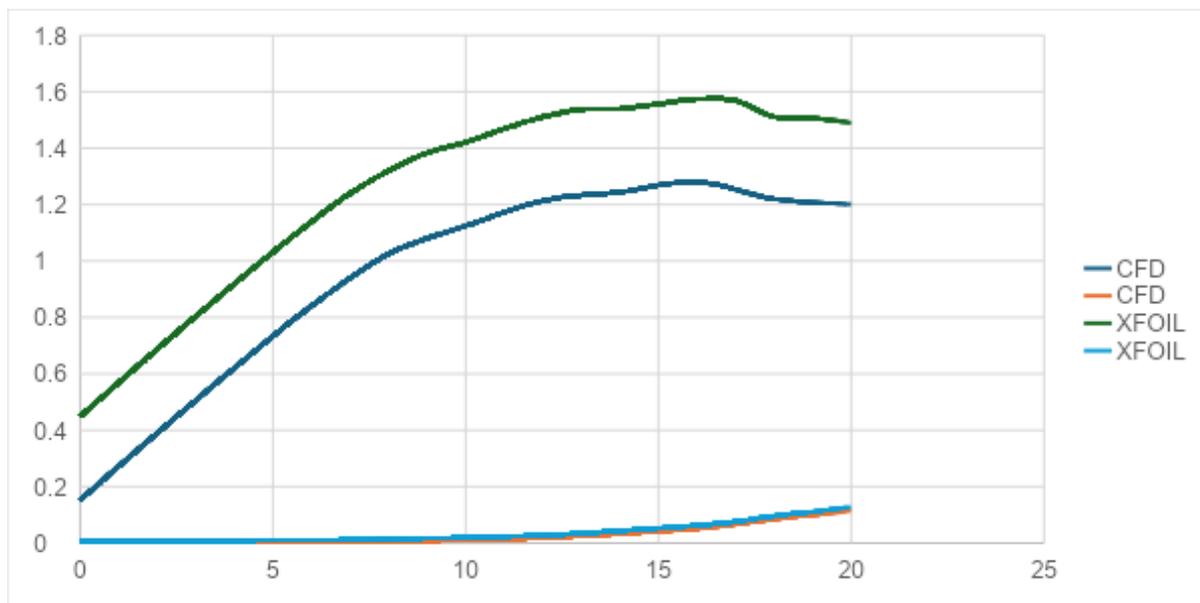


- S822X



Gráfica 8.33 Resultados de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación en los distintos métodos.

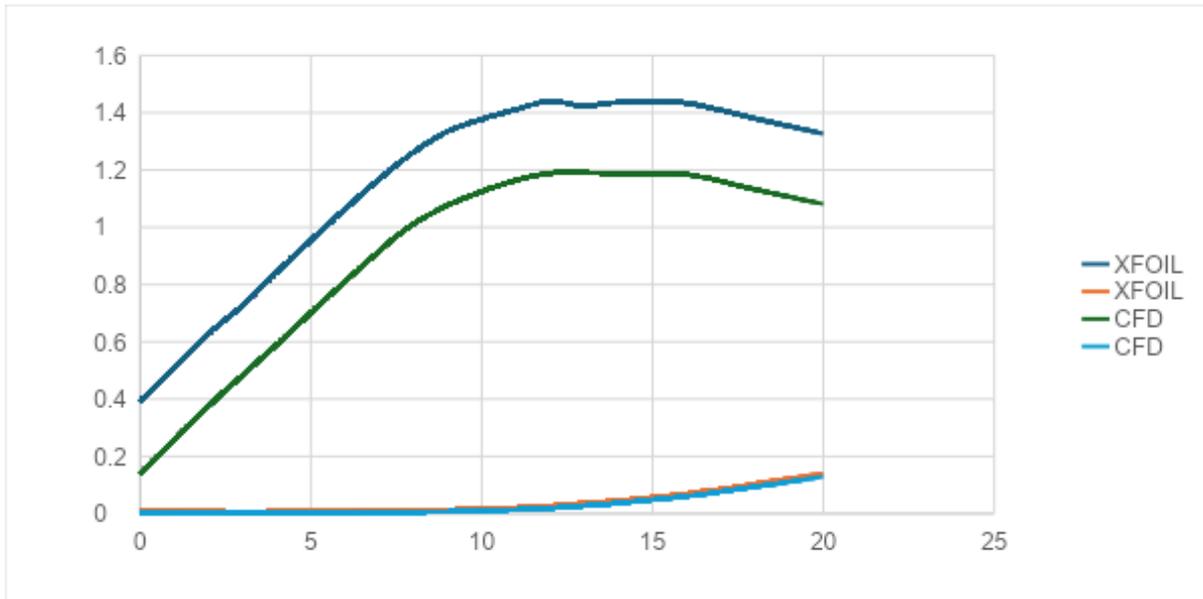
- SGXX



Gráfica 8.34 Resultados de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación en los distintos métodos.



- SG6050



Gráfica 8.35 Resultados de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación en los distintos método

Se observa un descenso del coeficiente de sustentación C_L después del desprendimiento de flujo en ambos métodos de análisis. Este fenómeno es crítico para determinar el rendimiento aerodinámico de los perfiles, ya que la pérdida de sustentación puede afectar la estabilidad y el control del perfil en condiciones reales de vuelo. Los resultados obtenidos indican que, aunque los valores específicos de C_L varían entre XFOIL y CFD, la tendencia general de disminución post-desprendimiento es consistente.

El ángulo de ataque (α) estable después del desprendimiento de flujo también se ha analizado. Ambos estudios muestran que una vez que ocurre el desprendimiento, el perfil alcanza un ángulo de ataque en el cual el flujo se vuelve significativamente inestable. Sin embargo, este ángulo se mantiene relativamente constante en las simulaciones de XFOIL y CFD, lo que sugiere una correspondencia en la predicción del comportamiento post-desprendimiento entre ambos métodos.



La relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre es crucial para evaluar la eficiencia aerodinámica de los perfiles. Ambos estudios muestran una relación similar, lo que permite hacer una comparación directa de la eficiencia. Aunque los valores individuales de C_L y C_D pueden diferir, la tendencia general y la relación entre ellos se mantienen consistentes. Esta relación es fundamental para determinar la eficiencia global del perfil, indicando cómo un perfil puede generar sustentación con el mínimo arrastre posible.

En este análisis se ha considerado una geometría simplificada de los perfiles aerodinámicos. La simplificación geométrica facilita el proceso de modelado y análisis tanto en XFOIL como en CFD, reduciendo la complejidad computacional sin comprometer significativamente la precisión de los resultados. Este enfoque permite obtener resultados comparables y coherentes, proporcionando una base sólida para evaluar el comportamiento aerodinámico bajo condiciones controladas.

La comparación de los resultados obtenidos mediante XFOIL y CFD muestra una coherencia significativa en términos de tendencias generales, aunque existen diferencias en los valores específicos debido a las particularidades de cada método de análisis. La consistencia en el comportamiento observado, especialmente en términos del descenso del coeficiente de sustentación, el ángulo de ataque estable post-desprendimiento y la relación (C_L/C_D) , sugiere que ambos métodos son válidos y complementarios para la evaluación aerodinámica de perfiles simplificados. Esta comparación nos permite concluir que la eficiencia aerodinámica de los perfiles puede ser evaluada de manera confiable utilizando ambos enfoques, proporcionando una base robusta para futuras investigaciones y optimizaciones.



8.3. Sobre la discusión

El presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de diferentes perfiles aerodinámicos con base en sus coeficientes y criterios aerodinámicos, así como su eficiencia, utilizando un software de simulación para evaluar su desempeño en el diseño de palas para aerogeneradores de baja potencia.

Investigaciones previas realizadas por Christian Vladimir Rodríguez Díaz, S. M. Muyeen, y J. A. Ghadir han abordado temas relacionados, utilizando análisis CFD y otros métodos para estudiar perfiles aerodinámicos y su eficiencia. Rodríguez Díaz, por ejemplo, ha utilizado CFD para analizar perfiles aerodinámicos de aerogeneradores, observando tendencias consistentes en el comportamiento post-desprendimiento y la relación C_l/C_d , a pesar de diferencias específicas entre métodos. Por su parte, Muyeen se ha enfocado en la integración y control de aerogeneradores, destacando la importancia de la estabilidad post-desprendimiento. Ghadir ha optimizado perfiles aerodinámicos centrando su atención en la relación C_l/C_d , resaltando la consistencia de las tendencias observadas, aunque con diferencias numéricas entre CFD y XFOIL.

En este contexto, los resultados de nuestro estudio corroboran las observaciones previas, demostrando que, aunque existen diferencias en los valores numéricos entre CFD y XFOIL, la tendencia general de disminución del coeficiente de sustentación después del desprendimiento es consistente. Esta tendencia respalda la validez del uso de ambos métodos para la evaluación aerodinámica de perfiles en el diseño de palas de aerogeneradores.

Específicamente, el perfil NACA 4415X, analizado en este estudio, mostró una notable consistencia en ángulos de ataque críticos, con variaciones que oscilan entre los 4° y 6° en ambos métodos, lo que evidencia la fiabilidad de los resultados obtenidos. Este perfil exhibe un comportamiento predecible en condiciones críticas y una eficiencia aerodinámica favorable, factores clave para mejorar el rendimiento de las palas en aerogeneradores de baja potencia.



Las conclusiones de este trabajo destacan que la metodología Xfoil es confiable y actúa de forma similar al análisis CFD, lo que valida su uso en la evaluación de perfiles aerodinámicos. Aunque se presentan variaciones significativas en los valores del coeficiente de sustentación, estas son coherentes con las tendencias generales, lo que sugiere que ambas metodologías son adecuadas para el diseño de aerogeneradores.

Finalmente, se concluye que la adopción del perfil NACA 4415X en el diseño de palas para aerogeneradores de baja potencia es una elección adecuada. Este perfil no solo mejora la eficiencia aerodinámica y el coeficiente de potencia, sino que también contribuye a la reducción del radio del aerogenerador, disminuyendo así los costos de fabricación y mantenimiento. La simplicidad de su geometría facilita su implementación, lo que lo convierte en una opción óptima tanto desde el punto de vista económico como de ingeniería.



9. Conclusiones

En primera instancia, se concluye que la aplicación de la metodología de estudio de XFOIL es confiable, ya que actúa de forma similar al estudio de análisis computacional (CFD). Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que la comparación numérica entre ambas metodologías es aceptable. No obstante, es importante señalar que durante el estudio se presentaron variaciones significativas en los valores del coeficiente de sustentación. Estas discrepancias son válidas dado que ambas metodologías siguen una tendencia numérica similar.

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que, en los ángulos de ataque críticos, las variaciones oscilan entre los 4° y 6° en ambos estudios, lo que demuestra una consistencia en la identificación de estos puntos críticos. En particular, en el perfil NACA 4415X se observó una notable disminución del coeficiente de sustentación a medida que se incrementa el ángulo de ataque, lo que indica un comportamiento predecible y manejable en condiciones críticas. Este perfil mostró un ángulo de ataque estable y una eficiencia aerodinámica favorable, lo cual es crucial para mejorar el rendimiento de las palas de los aerogeneradores de baja potencia.

La eficiencia favorable del perfil NACA 4415X permitirá aumentar el coeficiente de potencia, lo cual es fundamental para maximizar la generación de energía. Además, la utilización de este perfil aerodinámico contribuirá a la reducción del radio del aerogenerador, lo que implica una disminución en los costos de fabricación y mantenimiento. La geometría simple del perfil también facilita su implementación en el diseño de las palas, lo que es beneficioso tanto desde el punto de vista económico como de ingeniería.

En resumen, la selección y evaluación del perfil aerodinámico NACA 4415X para su uso en el diseño de palas de aerogeneradores de baja potencia resulta ser una elección adecuada. La confiabilidad de la metodología XFOIL en comparación con el análisis



CFD, junto con la observación de parámetros críticos como el ángulo de ataque y el coeficiente de sustentación, respaldan la validez y efectividad de este perfil en aplicaciones prácticas. Por lo tanto, se recomienda su adopción para mejorar el desempeño y la eficiencia de los aerogeneradores de baja potencia.

10. Referencias

1. M. Shahbaz, N. Loganathan, A. Muzaffar, K. Ahmed, y M. A. Jabran, "The Impact of Population Growth on Energy Consumption and Economic Growth in Developing Countries," *Energy*, vol. 96, pp. 110-120, Jan. 2016.
2. Comisión Federal de Electricidad (CFE), "Informe de Sostenibilidad 2022," [Online]. Disponible en: <https://www.cfe.mx>. [Accessed: Sep. 2, 2024].
3. "Ley de Transición Energética," Diario Oficial de la Federación, México, 2015. [Online]. Disponible en: <https://www.dof.gob.mx>. [Accessed: Sep. 2, 2024].
4. J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2009.
5. T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2011.
6. T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2011.
7. J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2009.
8. M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2nd ed. London, UK: Earthscan, 2008.
9. H. Polinder, F. F. A. Van Der Pijl, G. J. De Vilder, and P. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines", *Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 3, pp. 725-733, Sep. 2006.
10. Batchelor G.K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 1970.
11. White, F. M. *Mecánica de fluidos*, 2004. Mc Graw Hill.



12. Çengel Yunus, A., & Cimbala John, M. (2006). Mecánica de fluidos. McgrawHill.
13. M. H. Ali, S. N. Mehdi, and M. Naik, "Comparative analysis of low velocity vertical axis wind turbine NACA blades at different attacking angles in CFD," *Materials Today: Proceedings* pp. 2091–2100 (2023).
14. H. Bhavsar, S. Roy, and H. Niyas, "Aerodynamic performance enhancement of the DU99W405 airfoil for horizontal axis wind turbines using slotted airfoil configuration," *Energy* 263, 125,666 (2023).
15. S. Chegini, M. Asadbeigi, F. Ghafoorian, and M. Mehrpooya, "An investigation into the self-starting of darrieus-savonius hybrid wind turbine and performance enhancement through innovative deflectors: A CFD approach," *Ocean Engineering* 287, 115,910 (2023).
16. M. Ye, H.-C. Chen, and A. Koop, "Verification and validation of CFD simulations of the NTNU BT1 wind turbine," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 234, 105,336 (2023).
17. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics. Finite Volume Method, Essex, Longman Scientific & Technical.
18. C. F. Brush, "The first wind-powered electric generator," *Engineering*, vol. 46, no. 1184, pp. 1-3, 1888.
19. P. Gipe, *Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business*, White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing, 2004.
20. IRENA, "Renewable capacity statistics 2020," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020
21. M. V Del Carmen, "Medición de la capa límite en el perfil aerodinámico S830 para turbina eólica", Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2011.
22. J.F Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, "Wind energy explained: Theory, Design and Application", Second Edition, ISBN 978-0-470-01500-1



23. International Electrotechnical Commission, International Electrotechnical Commission 61400-2 second ediccion: 2006.
24. Contribución energética a la EUAT mediante sistemas de energías renovables, CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES - VIENTO DOMINANTE, obtenido de: <https://1library.co/article/clasificacion-de-los-aerogeneradores-viento-dominante>, 2022.
25. J.L.R. Amonedo, J.C.B. Díaz, S.A. Gómez, “Sistemas Eólicos de producción de energía eléctrica”, ISBN: 84-7207-139-1, Rueda, 2003.
26. A.R Corpa, “Diseño de perfiles aerodinámicos mediante metodología inversa”, Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Sevilla, 2015.
27. M.V. López, “Ingeniería de la Energía Eólica. Nuevas Energías, Primera edición, ISBN: 97884426715807, 2012
28. O.A.J. Carantona, “Análisis del comportamiento aerodinámico de Perfiles empleados en “Aerogeneradores de Baja Potencia”, Fuentes Alternas de Energía y Generación Distribuida, pp.41, 2009.
29. "Ley de Transición Energética," Diario Oficial de la Federación, México, 2015. [Online]. Available: <https://www.dof.gob.mx>. [Accessed: Sep. 2, 2024].
30. "Reglamento de la Ley de Energía Eléctrica," Diario Oficial de la Federación, México. [Online]. Available: <https://www.dof.gob.mx>. [Accessed: Sep. 2, 2024].
31. "Normas Oficiales Mexicanas," Secretaría de Economía, [Online]. Available: <https://www.economia.gob.mx>. [Accessed: Sep. 2, 2024].
32. "Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente," Diario Oficial de la Federación, México. [Online]. Available: <https://www.dof.gob.mx>. [Accessed: Sep. 2, 2024].



33. "Comisión Reguladora de Energía (CRE)," [Online]. Available:
<https://www.cre.gob.mx>. [Accessed: Sep. 2, 2024].