GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO

TESCH
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES
CHICOLOAPAN

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLOAPAN

INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE PERFILES NACA PARA APLICACIONES EN AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA MEDIANTE DATOS OBTENIDOS DE AIRFOILTOOLS

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

Ingeniera en Energías Renovables

Presenta:

NANCY LIZBETH GARRIDO CABRERA

Bajo la dirección de:

DR. CARLOS ALBERTO CORTÉS RODRÍGUEZ

IER

Chicoloapan, Estado de México, septiembre de 2026

Directorio

El presente trabajo por la opción de Tesis, titulado *"Análisis comparativo del comportamiento aerodinámico de perfiles NACA para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia mediante datos obtenidos de Airfoiltools"*, realizado por la alumna Nancy Lizbeth Garrido Cabrera, bajo la dirección de Dr. Carlos Alberto Cortés Rodríguez y la revisión de Dr. Daniel Hernández Rivera y Dr. Rodolfo Daniel Velázquez Sánchez .

Director:

Dr. Carlos Alberto Cortés Rodríguez

Revisor:

Dr. Daniel Hernández Rivera

Revisor:

Dr. Rodolfo Daniel Velázquez Sánchez

Agradecimientos

La culminación de esta tesis representa el cierre de una etapa muy importante de mi vida, en la cual no solo adquirí conocimientos y herramientas para mi formación profesional, sino que también enfrenté retos que me permitieron crecer tanto académica como personalmente. Llegar hasta este momento no habría sido posible sin el apoyo, la confianza y el acompañamiento de todas aquellas personas que estuvieron presentes a lo largo de este camino.

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme llegar hasta este momento, por darme fortaleza, paciencia y perseverancia para continuar durante los momentos difíciles y por permitirme alcanzar una de las metas más importantes de mi formación profesional.

Agradezco profundamente a mis padres, por todo el apoyo que me han brindado durante mi formación. Gracias por confiar en mí, por motivarme a seguir adelante y por enseñarme que con esfuerzo, responsabilidad y dedicación es posible alcanzar las metas que uno se propone. Este logro también es de ustedes, porque detrás de cada paso que di estuvo su apoyo y sus palabras de motivación.

A mi familia, gracias por acompañarme durante este proceso, por comprender mis momentos de estrés, cansancio y preocupación, y por estar presentes cuando más necesitaba una palabra de ánimo. Cada muestra de cariño y apoyo fue importante para continuar y no rendirme ante las dificultades que se presentaron durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco especialmente a mi asesor de tesis por su orientación, paciencia y disposición durante el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos, observaciones y recomendaciones fueron fundamentales para mejorar la investigación y comprender de una manera más profunda los diferentes aspectos relacionados con el análisis de los perfiles aerodinámicos y su aplicación en el diseño de palas para aerogeneradores de baja potencia.

También agradezco a los docentes que formaron parte de mi preparación académica, ya que cada uno aportó conocimientos y experiencias que contribuyeron a mi formación como profesional. Las enseñanzas adquiridas durante la carrera fueron fundamentales para poder desarrollar este proyecto y enfrentar los diferentes retos que surgieron durante su realización.

A mi mejor amiga, quiero agradecerte de una manera muy especial por haber creído en mí incluso en aquellos momentos en los que yo misma llegué a dudar de lo que era capaz de lograr. Gracias por escucharme, por estar presente en los momentos difíciles, por motivarme a seguir adelante, tu apoyo, tus palabras y tu confianza significaron mucho para mí durante este proceso. Gracias por celebrar mis logros, por acompañarme en mis momentos de estrés y por nunca hacerme sentir que estaba sola.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de este trabajo. Cada consejo, palabra de motivación, conocimiento compartido y muestra de apoyo tuvo un significado importante para mí.

Dedicatorias

Dedico este trabajo a mi familia, por ser mi principal fuente de motivación y por acompañarme durante cada etapa de este proceso. Por enseñarme, con su ejemplo, el valor de la responsabilidad, la perseverancia y el esfuerzo, y por brindarme el apoyo necesario para alcanzar esta meta.

Dedico especialmente este logro a mis padres, por confiar en mí y por estar presentes durante mi formación profesional. Este trabajo representa también una parte de todo lo que ustedes me han enseñado y del esfuerzo que hemos compartido para llegar hasta aquí.

A quienes estuvieron a mi lado durante este camino, gracias por formar parte de esta etapa de mi vida.

A todas aquellas personas que estuvieron presentes durante mi formación académica y que, de una u otra manera, contribuyeron a que pudiera llegar hasta este momento. Cada palabra de apoyo, cada consejo y cada muestra de confianza fueron importantes para continuar adelante, especialmente en aquellos momentos en los que el camino parecía más complicado

Finalmente, me dedico este trabajo a mí misma, por no rendirme ante las dificultades, por aprender de los errores y por continuar trabajando hasta alcanzar una meta que alguna vez parecía lejana. Esta tesis representa no solamente la culminación de una etapa académica, sino también el resultado de todo el crecimiento personal y profesional adquirido durante estos años.

RESUMEN GENERAL

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE PERFILES NACA PARA APLICACIONES EN AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA MEDIANTE DATOS OBTENIDOS DE AIRFOILTOOLS

La presente tesis evaluó el desempeño de cinco perfiles aerodinámicos (NACA 0012, 2412, 3412, 4412 y 23012) con el propósito de identificar la geometría más adecuada para el diseño de palas de aerogeneradores de baja potencia. La investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, descriptivo y comparativo, utilizando datos de AirfoilTools para analizar el comportamiento aerodinámico de los perfiles bajo números de Reynolds entre 200 000 y 600 000. El análisis se centró en la obtención y comparación de los coeficientes de sustentación (C_L), arrastre (C_D) y la relación sustentación-arrastre (C_L/C_D), considerados indicadores fundamentales del rendimiento aerodinámico. A partir de los datos obtenidos se construyeron polares aerodinámicas que permitieron evaluar la influencia del ángulo de ataque y de la curvatura del perfil sobre la eficiencia de operación. Los resultados evidencian que la curvatura del perfil influye significativamente en la generación de sustentación y en la eficiencia aerodinámica. El perfil NACA 4412 obtuvo el mejor desempeño global, alcanzando una relación C_L/C_D máxima de 98.5905, un coeficiente de sustentación máximo de 1.4634 y un coeficiente de arrastre mínimo de 0.0079. Los perfiles NACA 3412 y 2412 mostraron también resultados favorables, mientras que el NACA 0012 presentó la menor eficiencia debido a su geometría simétrica. Se concluye que los perfiles con mayor curvatura ofrecen mejores niveles de sustentación y eficiencia aerodinámica, siendo el NACA 4412 la alternativa más adecuada para futuras etapas de diseño y optimización de palas destinadas a aerogeneradores de baja potencia.

Palabras clave: aerodinámica, aerogeneradores, eficiencia aerodinámica, perfiles NACA, Airfoiltools.

GENERAL ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE AERODYNAMIC BEHAVIOR OF NACA AIRFOILS FOR LOW-POWER WIND TURBINE APPLICATIONS USING DATA OBTAINED FROM AIRFOILTOOLS

This thesis evaluated the performance of five airfoil profiles (NACA 0012, 2412, 3412, 4412, and 23012) to identify the most suitable geometry for the design of blades for low-power wind turbines. The research employed a quantitative, descriptive, and comparative approach, utilizing data from AirfoilTools to simulate the aerodynamic behavior of the profiles at Reynolds numbers ranging from 200,000 to 600,000. The analysis focused on obtaining and comparing lift coefficients (CL), drag coefficients (CD), and the lift-to-drag ratio (CL/CD), which are considered fundamental indicators of aerodynamic performance. Based on the data obtained, aerodynamic polar curves were constructed to evaluate the influence of the angle of attack and profile camber on operational efficiency. The results demonstrate that profile camber significantly influences lift generation and aerodynamic efficiency. The NACA 4412 profile achieved the best overall performance, reaching a maximum CL/CD ratio of 98.5905, a maximum lift coefficient of 1.4634, and a minimum drag coefficient of 0.0079. The NACA 3412 and 2412 profiles also showed favorable results, whereas the NACA 0012 exhibited the lowest efficiency due to its symmetric geometry. It is concluded that profiles with greater camber offer superior levels of lift and aerodynamic efficiency, making the NACA 4412 the most suitable choice for future stages of design and optimization of blades for low-power wind turbines.

Keywords: aerodynamics, wind turbines, aerodynamic efficiency, NACA profiles, Airfoiltools.

Índice

1. Introducción 6

2. Antecedentes 8

3. Marco teórico 10

3.1 Aerogeneradores de baja potencia 10

3.2 Fundamentos aerodinámicos 13

3.2.1 Sustentación 13

3.2.2 Arrastre 15

3.2.3 Relación C_L/C_D 16

3.3 Perfiles aerodinámicos 17

3.3.1 Definición de perfil aerodinámico 18

3.3.2 Geometría del perfil 19

3.3.3 Camber 20

3.3.4 Espesor 21

3.4 Series NACA 21

3.4.1 Serie NACA de cuatro dígitos 22

3.4.2 Serie NACA de cinco dígitos 23

3.5 Variables de estudio 24

3.5.1 Ángulo de ataque (α) 25

3.5.2 Coeficiente de sustentación (C_L) 26

3.5.3 Coeficiente de arrastre (C_D) 26

3.5.4 Relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) 27
3.5.5 Número de Reynolds (Re) 28
3.6 Software XFOIL 28
3.7 Polares aerodinámicas 29
3.7.1 Definición de polar aerodinámica 29
3.7.2 Polar de sustentación ($C_L-\alpha$) 30
3.7.3 Polar de arrastre ($C_D-\alpha$) 30
3.7.4 Polar de resistencia (C_D-C_L) 31
3.7.5 Polar de eficiencia aerodinámica ($C_L/C_D-\alpha$) 31
4. Planteamiento del problema 31
5. Hipótesis 33
5.1 Hipótesis de investigación (H_1) 33
5.2 Hipótesis nula (H_0) 34
6. Objetivos 34
6.1 General 34
6.2 Específicos 34
7. Metodología 35
7.1 Contexto institucional de la investigación 35
7.2 Enfoque de la investigación 36
7.3 Diseño metodológico 36
7.3.1 Selección de perfiles aerodinámicos 36

7.3.2 Obtención de datos aerodinámicos 37
7.3.3 Procesamiento de datos 37
7.3.4 Construcción de polares aerodinámicas 38
7.3.5 Análisis comparativo de perfiles 39
8. Resultados y discusión 39
8.1 Síntesis de resultados por número de Reynolds 39
8.2 Caracterización general de los perfiles analizados 41
8.3 Polar de sustentación ($C_L-\alpha$) 42
8.4 Polar de arrastre ($C_D-\alpha$) 46
8.5 Polar de resistencia (C_D-C_L) 50
8.6 Polar de eficiencia ($C_L/C_D-\alpha$) 54
8.7 Comparación global de perfiles 57
9. Conclusiones 60
10. Referencias 62
11. Anexos 67

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplo de un aerogenerador de baja potencia 11

Figura 2. Representación de la fuerza de sustentación y arrastre 14

Figura 3. Relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) y coeficiente de potencia 16

Figura 4. Perfiles aerodinámicos a través del tiempo 18

Figura 5. Flujo de aire alrededor del perfil aerodinámico 19

Figura 6. Geometría de un perfil aerodinámico 19

Figura 7. Representación del camber en el perfil aerodinámico 20

Figura 8. Familia de perfiles aerodinámicos NACA 22

Figura 9. Representación gráfica del perfil NACA 4412 23

Figura 10. Representación gráfica del perfil NACA 23012 24

Figura 11. Representación gráfica del ángulo de ataque (α) 25

Figura 12. Diseño metodológico de la investigación 36

Figura 13. C_L vs ángulo de ataque α 43

Figura 14. C_D vs ángulo de ataque α 47

Figura 15. C_D vs C_L 51

Figura 16. C_L/C_D vs ángulo de ataque α 55

Figura 17. Comparación del C_L/C_D máximo entre perfiles 58

Lista de Tablas

Tabla 1. Perfiles aerodinámicos seleccionados 37

Tabla 2. Parámetros aerodinámicos por perfil y número de Reynolds 39

Tabla 3. Características generales de los perfiles analizados 41

1. Introducción

La transición energética global ha consolidado a la energía eólica como una de las tecnologías renovables más importantes para la diversificación de la matriz energética y la reducción a la dependencia de los combustibles fósiles. Su aplicación resulta especialmente relevante en sistemas de generación distribuida, electrificación rural y autoconsumo, donde los aerogeneradores de baja potencia representan una alternativa viable para el suministro de energía eléctrica en comunidades aisladas y zonas con acceso limitado a la red eléctrica. En este contexto, el desempeño de un aerogenerador depende en gran medida de las características aerodinámicas de las palas, ya que estas son las encargadas de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Por ello, la selección adecuada del perfil aerodinámico constituye uno de los aspectos más importantes durante el proceso de diseño de un rotor eólico [1], [2].

Los aerogeneradores de baja potencia operan bajo condiciones aerodinámicas diferentes a las de los aerogeneradores de gran escala. Mientras las turbinas comerciales de varios megavatios trabajan con números de Reynolds elevados, los sistemas de pequeña potencia suelen funcionar en rangos cercanos a 10^5, donde fenómenos como la transición laminar-turbulenta, la separación de flujo y las pérdidas por arrastre tienen una influencia significativa sobre el rendimiento energético. Como consecuencia, perfiles aerodinámicos desarrollados originalmente para aplicaciones aeronáuticas o para turbinas de gran potencia pueden no presentar el mismo comportamiento cuando son utilizados en aerogeneradores de pequeña escala [2].

El perfil aerodinámico determina parámetros fundamentales como el coeficiente de sustentación (C_L), el coeficiente de arrastre (C_D), la relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) y, en consecuencia, la capacidad del rotor para aprovechar la energía disponible en el viento. Una selección inadecuada puede reducir la eficiencia del sistema, disminuir la capacidad de arranque a bajas velocidades de viento y afectar la producción energética esperada. Por esta razón, en los últimos años se han desarrollado numerosas investigaciones orientadas a identificar perfiles que permitan

maximizar la eficiencia aerodinámica y mejorar el rendimiento de los aerogeneradores de baja potencia [1], [2].

A pesar de los avances logrados en el diseño de perfiles aerodinámicos y en el desarrollo de herramientas de simulación, todavía existe incertidumbre respecto a cuáles perfiles ofrecen el mejor desempeño bajo las condiciones características de operación de los aerogeneradores de baja potencia. Además, la disponibilidad de información experimental en condiciones reales continúa siendo limitada, por lo que gran parte de las investigaciones recurren al empleo de simulaciones numéricas para evaluar el comportamiento aerodinámico de diferentes geometrías. Estas herramientas permiten analizar el desempeño de los perfiles de manera rápida y con un costo considerablemente menor al requerido por pruebas experimentales en túneles de viento.

El desarrollo de programas especializados como XFOIL, QBlade y OpenFOAM ha permitido estudiar con mayor precisión las características aerodinámicas de los perfiles utilizados en aplicaciones eólicas. Entre estas herramientas, Airfoiltools (XFOIL) destaca por su amplia utilización en el análisis de perfiles aerodinámicos a bajos números de Reynolds, facilitando la obtención de parámetros como los coeficientes de sustentación, arrastre y eficiencia aerodinámica para diferentes condiciones de operación.

En este contexto, la presente investigación analiza el comportamiento aerodinámico de los perfiles NACA 0012, NACA 2412, NACA 3412, NACA 4412 y NACA 23012 mediante datos aerodinámicos consultados en la plataforma AirfoilTools para distintos números de Reynolds y ángulos de ataque. Para ello se evaluaron los coeficientes de sustentación (C_L), arrastre (C_D) y la relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) en distintos ángulos de ataque y números de Reynolds representativos de aerogeneradores de baja potencia. A partir de los resultados obtenidos se realizó una comparación del desempeño aerodinámico de los perfiles estudiados, con el propósito de identificar la geometría que ofrece la mejor eficiencia y establecer la influencia de la curvatura del perfil sobre el aprovechamiento de la energía eólica. Los resultados de esta investigación buscan contribuir a la selección y optimización

de perfiles aerodinámicos para el diseño de palas más eficientes, favoreciendo el desarrollo de sistemas eólicos de baja potencia con mayor rendimiento energético y viabilidad técnica.

2. Antecedentes

La selección de perfiles aerodinámicos constituye uno de los aspectos más relevantes en el diseño de aerogeneradores, debido a su influencia directa sobre la sustentación, el arrastre y la eficiencia energética del rotor. Diversas investigaciones han analizado el comportamiento aerodinámico de diferentes perfiles con el propósito de identificar configuraciones que permitan mejorar el aprovechamiento de la energía eólica, particularmente en aerogeneradores de baja potencia que operan en condiciones de bajos números de Reynolds [3].

Díaz Canul et al. [1], en su investigación sobre el diseño de un rotor Darrieus tipo Phi para aerogeneradores de baja potencia, señalaron que la selección del perfil aerodinámico representa una de las etapas más importantes del proceso de diseño. Los autores destacan que el desempeño del rotor depende en gran medida de las características aerodinámicas del perfil utilizado y de su capacidad para generar sustentación con bajas pérdidas por arrastre. Asimismo, indican que los aerogeneradores de eje vertical presentan condiciones aerodinámicas complejas, por lo que la elección del perfil debe realizarse considerando las condiciones reales de operación.

Como apoyo al proceso de selección de perfiles, diversas investigaciones han recurrido al uso de herramientas computacionales como QBlade y XFOIL. Estas plataformas permiten analizar el comportamiento aerodinámico de diferentes geometrías mediante la obtención de polares aerodinámicas, coeficientes de sustentación, coeficientes de arrastre y relaciones de eficiencia aerodinámica. En particular, XFOIL ha sido ampliamente utilizado debido a su bajo costo computacional y a su capacidad para proporcionar resultados confiables en perfiles que operan a bajos números de Reynolds [4].

La investigación desarrollada por Murcia y Pinilla [5] analizó de manera computacional diversas modificaciones geométricas aplicadas a perfiles aerodinámicos con borde de salida romo. Mediante simulaciones CFD evaluaron la influencia del espesor, la curvatura y la geometría del borde de salida sobre parámetros como el coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre y la relación sustentación-arrastre. Los resultados mostraron que pequeñas modificaciones geométricas pueden producir cambios significativos en el desempeño aerodinámico del perfil, evidenciando la importancia de la geometría en la eficiencia final del sistema.

De manera similar, Zhang [6] realizó un análisis numérico del comportamiento aerodinámico de perfiles NACA, demostrando que las variaciones en la curvatura del perfil influyen directamente en los niveles de sustentación y eficiencia aerodinámica. Sus resultados indicaron que perfiles con mayor curvatura pueden generar mayores coeficientes de sustentación y mejores relaciones C_L/C_D bajo determinadas condiciones de operación.

Hasib et al. [7] desarrollaron un análisis CFD aplicado a perfiles NACA utilizados tanto en turbinas eólicas como en aplicaciones aeronáuticas. Los autores compararon diferentes configuraciones bajo condiciones de bajo número de Reynolds y observaron diferencias significativas en los coeficientes aerodinámicos obtenidos, destacando la necesidad de seleccionar cuidadosamente el perfil de acuerdo con la aplicación específica.

Por otra parte, López, Zappa y Wild Cañón [8] propusieron una metodología basada en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para determinar las características aerodinámicas de perfiles empleados en aerogeneradores de baja potencia. Utilizando OpenFOAM y diferentes modelos de turbulencia, evaluaron el perfil Wortmann FX63-137 y compararon los resultados con información experimental disponible en la literatura. Los autores concluyeron que las simulaciones CFD constituyen una herramienta confiable para caracterizar perfiles aerodinámicos y apoyar el diseño de sistemas eólicos de pequeña escala.

Los trabajos revisados concuerdan en que la geometría del perfil aerodinámico influye de manera significativa en el desempeño de los aerogeneradores, especialmente bajo condiciones de bajos números de Reynolds. Asimismo, evidencian la utilidad de herramientas numéricas como XFOIL, QBlade y OpenFOAM para la evaluación aerodinámica de perfiles empleados en sistemas eólicos. Sin embargo, existe la necesidad de continuar realizando estudios comparativos que permitan identificar cuáles perfiles ofrecen un mejor comportamiento en aplicaciones de baja potencia y establecer la influencia de características geométricas como la curvatura sobre la eficiencia aerodinámica. En este contexto se desarrolla la presente investigación, enfocada en la comparación de los perfiles NACA 0012, NACA 2412, NACA 3412, NACA 4412 y NACA 23012 mediante el análisis de datos aerodinámicos obtenidos de AirfoilTools.

3. Marco teórico

3.1 Aerogeneradores de baja potencia

Los aerogeneradores de baja potencia constituyen una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de la energía eólica en aplicaciones de pequeña escala, particularmente en viviendas aisladas, comunidades rurales, sistemas autónomos de generación, estaciones de monitoreo y otras instalaciones donde el acceso a la red eléctrica resulta limitado o económicamente inviable [8]. Su principal función es transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica mediante un proceso de conversión electromecánica realizado a través del rotor y el generador eléctrico.

Durante las últimas décadas, el interés por este tipo de sistemas ha aumentado debido a la necesidad de diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de combustibles contaminantes. La energía eólica representa una alternativa renovable y sostenible, capaz de suministrar electricidad sin generar emisiones contaminantes durante su operación. Asimismo, los aerogeneradores de baja potencia ofrecen ventajas relacionadas con la electrificación de zonas remotas, el autoconsumo energético y la integración en sistemas híbridos junto con otras fuentes renovables como la energía solar fotovoltaica.

Los aerogeneradores de baja potencia suelen presentar capacidades inferiores a 100 kW y, en aplicaciones residenciales o domésticas, comúnmente operan en rangos comprendidos entre algunos cientos de vatios y varios kilovatios. Estos sistemas trabajan generalmente bajo condiciones de viento menos favorables que las grandes centrales eólicas, por lo que el aprovechamiento eficiente de la energía disponible depende en gran medida de su diseño aerodinámico y de la correcta selección de sus componentes (Figura 1).



Figura 1. Ejemplo de un aerogenerador de baja potencia

Fuente: [9]

El principio de funcionamiento de un aerogenerador consiste en convertir la energía cinética contenida en las masas de aire en movimiento en energía mecánica de rotación. Cuando el viento incide sobre las palas, se generan fuerzas aerodinámicas que provocan el giro del rotor. Este movimiento es transmitido al generador eléctrico, donde la energía mecánica es transformada en electricidad. La cantidad de energía que puede extraerse depende principalmente de la densidad del aire, del área barrida por el rotor y de la velocidad del viento.

$$P_d = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

donde:

- P_d= potencia disponible en el viento (W)
- ρ= densidad del aire (kg/m³)
- A= área barrida por el rotor (m²)
- v= velocidad del viento (m/s)

Esta ecuación demuestra que la potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad, razón por la cual pequeñas variaciones en la velocidad del viento provocan cambios significativos en la energía disponible para la generación eléctrica.

Sin embargo, no es posible extraer la totalidad de la energía cinética contenida en el flujo de aire. De acuerdo con la Ley de Betz, el límite teórico máximo de aprovechamiento corresponde al 59.3% de la energía disponible, estableciendo una restricción física inherente a cualquier aerogenerador [8], [9]. Por esta razón se emplea el coeficiente de potencia (C_p), que expresa la relación entre la potencia mecánica obtenida y la potencia eólica disponible.

De acuerdo con la orientación de su eje de rotación, los aerogeneradores se clasifican en dos grandes categorías: aerogeneradores de eje horizontal (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine) y aerogeneradores de eje vertical (VAWT, Vertical Axis Wind Turbine). Los aerogeneradores de eje horizontal son los más utilizados para la generación de electricidad debido a sus elevados niveles de eficiencia aerodinámica. Por otro lado, los aerogeneradores de eje vertical presentan ventajas como la capacidad de operar independientemente de la dirección del viento, menores niveles de ruido y un mejor desempeño en entornos con alta turbulencia, características que los hacen atractivos para aplicaciones urbanas y de baja potencia [1].

En los aerogeneradores de eje horizontal, las palas funcionan bajo principios similares a los de las alas de un avión. Cuando el viento fluye alrededor del perfil aerodinámico se genera una diferencia de presión entre el extradós y el intradós de la pala, produciendo una fuerza de sustentación que induce el movimiento de rotación del rotor. Debido a ello, el diseño del perfil aerodinámico constituye uno de los factores más importantes en el rendimiento global del sistema.

En aplicaciones de baja potencia, la influencia de los perfiles aerodinámicos es aún más relevante debido a que estos sistemas suelen operar con bajos números de Reynolds, aproximadamente del orden de 10^5. En este régimen, fenómenos como la separación de flujo, la transición laminar-turbulenta y el incremento del arrastre adquieren una importancia significativa, afectando directamente la eficiencia energética del aerogenerador. Por esta razón, la selección adecuada del perfil aerodinámico representa una etapa fundamental durante el diseño de las palas.

Diversos estudios han demostrado que la eficiencia de un aerogenerador depende directamente de las características aerodinámicas del perfil utilizado, particularmente de parámetros como el coeficiente de sustentación (C_L), el coeficiente de arrastre (C_D) y la relación sustentación-arrastre (C_L/C_D). Estos parámetros permiten evaluar la capacidad de una geometría para generar fuerzas útiles con las menores pérdidas posibles y constituyen los principales indicadores utilizados para comparar perfiles aerodinámicos destinados a aplicaciones eólicas.

3.2 Fundamentos aerodinámicos

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia el movimiento del aire y las fuerzas generadas cuando este interactúa con cuerpos sólidos. En el caso de los aerogeneradores, el análisis aerodinámico resulta fundamental debido a que la energía extraída del viento depende directamente de la interacción entre el flujo de aire y las superficies de las palas. El desempeño de un perfil aerodinámico suele evaluarse mediante parámetros como la sustentación, el arrastre y la relación entre ambas fuerzas, los cuales permiten determinar su eficiencia bajo diferentes condiciones de operación [10].

3.2.1 Sustentación

La sustentación es la componente de la fuerza aerodinámica que actúa perpendicularmente a la dirección del flujo de aire incidente sobre un cuerpo. En perfiles aerodinámicos, esta fuerza se genera principalmente debido a la distribución de presiones alrededor de la superficie del perfil cuando existe un ángulo de ataque respecto a la corriente de aire [10].

Cuando el aire circula alrededor de un perfil aerodinámico, la velocidad del flujo sobre una superficie puede diferir de la velocidad sobre la superficie opuesta. Estas variaciones provocan diferencias de presión que generan una fuerza neta perpendicular a la corriente libre, conocida como fuerza de sustentación (Figura 2). En aplicaciones eólicas, esta fuerza es la principal responsable de producir el movimiento rotacional de las palas y, por consiguiente, la generación de energía eléctrica.

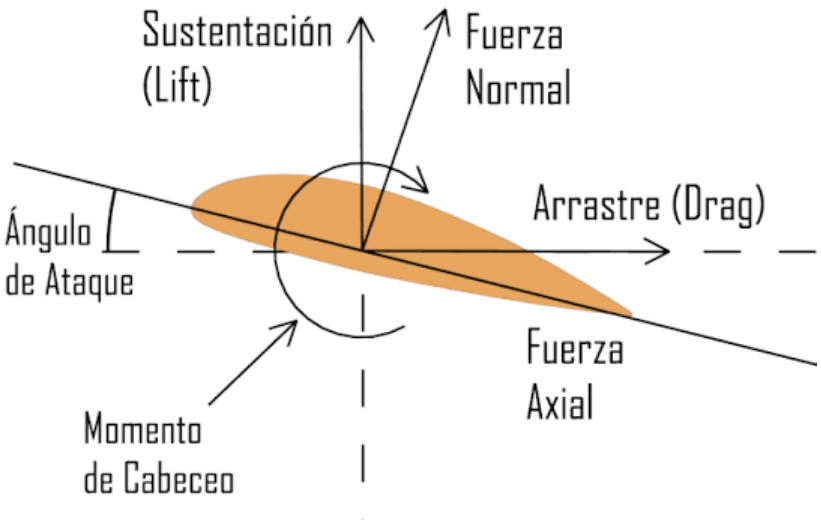


Figura 2. Representación de la fuerza de sustentación y arrastre

Fuente: Elaboración con base en Anderson [10].

La sustentación se expresa mediante la ecuación:

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

donde:

- L= fuerza de sustentación (N)
- ρ= densidad del aire (kg/m³)
- V= velocidad del flujo (m/s)
- A= área de referencia (m²)
- C_L= coeficiente de sustentación

El coeficiente de sustentación (C_L) es un parámetro adimensional que permite cuantificar la capacidad de un perfil para generar sustentación. Su valor depende principalmente de la geometría del perfil y del ángulo de ataque. En general, el coeficiente de sustentación aumenta con el incremento del ángulo de ataque hasta alcanzar un valor máximo, a partir del cual se presenta el fenómeno conocido como pérdida aerodinámica o *stall* [10].

3.2.2 Arrastre

El arrastre es la componente de la fuerza aerodinámica que actúa paralelamente a la dirección del flujo de aire y en sentido opuesto al movimiento relativo entre el fluido y el cuerpo (Figura 2). Esta fuerza representa la resistencia que el aire ejerce sobre una superficie expuesta al flujo y constituye una pérdida aerodinámica que debe minimizarse en el diseño de perfiles utilizados en aerogeneradores [10].

Desde el punto de vista físico, el arrastre se origina por dos mecanismos principales:

i. Arrastre por fricción, asociado a los esfuerzos cortantes generados por la viscosidad del aire sobre la superficie del perfil.
ii. Arrastre de presión o de forma, producido por las diferencias de presión entre la parte frontal y posterior del perfil debido a la separación del flujo.

La fuerza de arrastre puede calcularse mediante la siguiente expresión:

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

donde:

- D= fuerza de arrastre (N)
- ρ= densidad del aire (kg/m³)
- V= velocidad del flujo (m/s)
- A= área de referencia (m²)
- C_D= coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre (C_D) es un parámetro adimensional que indica la magnitud de las pérdidas aerodinámicas asociadas a un perfil. En aplicaciones de generación eólica resulta deseable que este coeficiente sea lo más reducido posible para maximizar el aprovechamiento energético del viento [10].

3.2.3 Relación C_L/C_D

La relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre (C_L/C_D) constituye uno de los indicadores más importantes para evaluar la eficiencia aerodinámica de un perfil. De acuerdo con la Figura 3, los valores elevados de esta relación permiten incrementar el coeficiente de potencia del rotor y, por tanto, mejorar el aprovechamiento energético del viento [11].

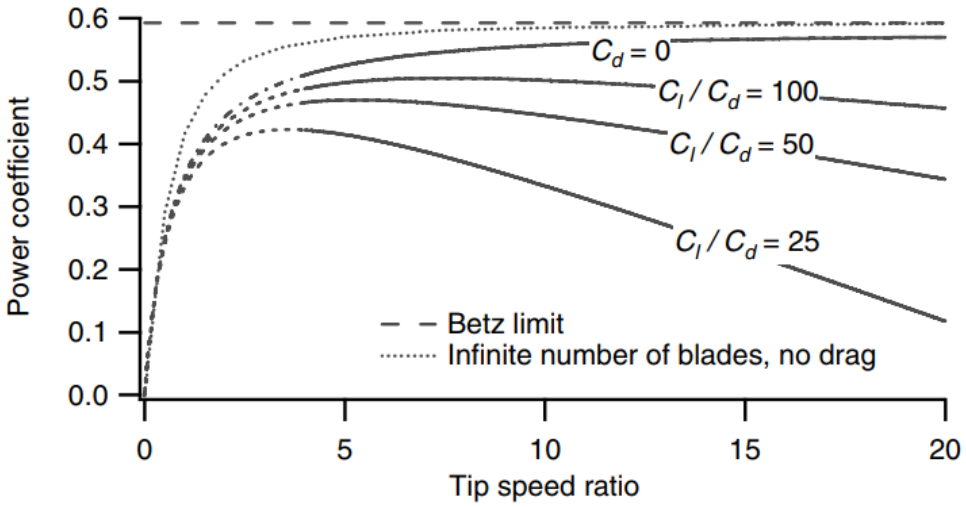


Figura 3. Relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) y coeficiente de potencia
Fuente: [11].

Matemáticamente se expresa como:

$$\frac{C_L}{C_D}$$

Valores elevados de esta relación indican que el perfil produce grandes niveles de sustentación con pérdidas relativamente bajas por arrastre, lo que se traduce en una mayor eficiencia aerodinámica. Por el contrario, valores reducidos reflejan un

desempeño menos favorable debido a que gran parte de la energía disponible se pierde al vencer la resistencia del aire.

En los aerogeneradores de eje horizontal, la relación C_L/C_D es un criterio fundamental para la selección de perfiles aerodinámicos, ya que influye directamente en la capacidad de las palas para convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Por esta razón, numerosos estudios utilizan este parámetro como criterio principal para identificar las configuraciones más eficientes bajo diferentes condiciones de operación y números de Reynolds.

Dado que el presente trabajo tiene como objetivo comparar diferentes perfiles NACA, la relación C_L/C_D se empleará como uno de los principales indicadores para evaluar y seleccionar el perfil con mejor comportamiento aerodinámico para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia.

3.3 Perfiles aerodinámicos

Los perfiles aerodinámicos constituyen el elemento fundamental para la generación de fuerzas aerodinámicas sobre alas, hélices y palas de aerogeneradores. Su geometría determina la distribución de presiones alrededor de la superficie y, en consecuencia, la magnitud de la sustentación y la resistencia producidas durante la interacción con el flujo de aire. De acuerdo con Anderson [10], el desempeño aerodinámico de un perfil está estrechamente relacionado con su forma geométrica, particularmente con la distribución de curvatura y espesor a lo largo de la cuerda. Asimismo, Abbott y Von Doenhoff [12] señalan que pequeñas modificaciones en la geometría del perfil pueden provocar cambios significativos en sus características aerodinámicas, como la sustentación máxima, el arrastre y el comportamiento en pérdida.

En el ámbito de la energía eólica, los perfiles aerodinámicos son empleados en las palas de los aerogeneradores para maximizar la extracción de energía del viento. La selección adecuada del perfil permite incrementar la relación sustentación-arrastre y mejorar la eficiencia global del rotor, siendo uno de los aspectos más importantes en el diseño aerodinámico de turbinas eólicas.

3.3.1 Definición de perfil aerodinámico

Un perfil aerodinámico puede definirse como la sección transversal de una superficie diseñada para generar fuerzas aerodinámicas específicas cuando se encuentra inmersa en una corriente de aire [11]. Desde el punto de vista geométrico, corresponde a la forma obtenida al realizar un corte perpendicular al eje longitudinal de un ala o una pala [12]. En la Figura 4 se muestran ejemplos de perfiles aerodinámicos, desde la propuesta de Wright en 1908 hasta perfiles más especializados como el NACA 747A315 en 1944.

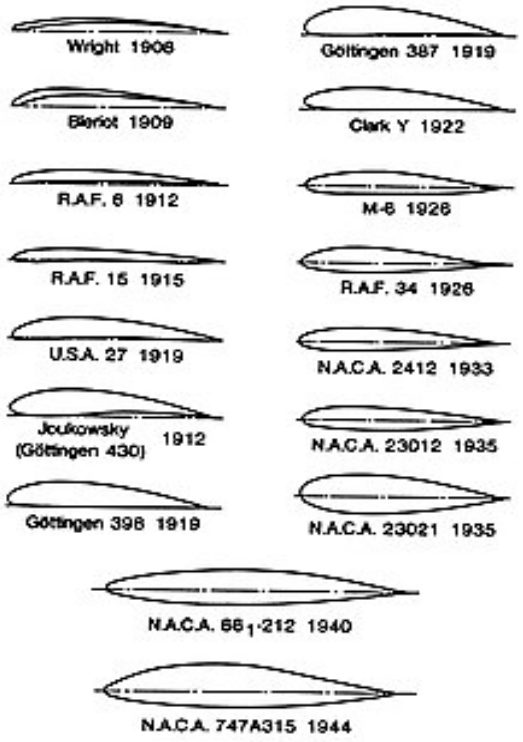


Figura 4. Perfiles aerodinámicos a través del tiempo

Fuente: [13]

Cuando el flujo de aire circula alrededor del perfil, se produce una distribución desigual de velocidades y presiones entre la superficie superior e inferior, originando una fuerza resultante denominada sustentación (Figura 5). Simultáneamente aparece una fuerza de resistencia aerodinámica asociada a los efectos viscosos y a la distribución de presiones sobre la superficie. El balance entre ambas fuerzas determina el rendimiento aerodinámico del perfil.

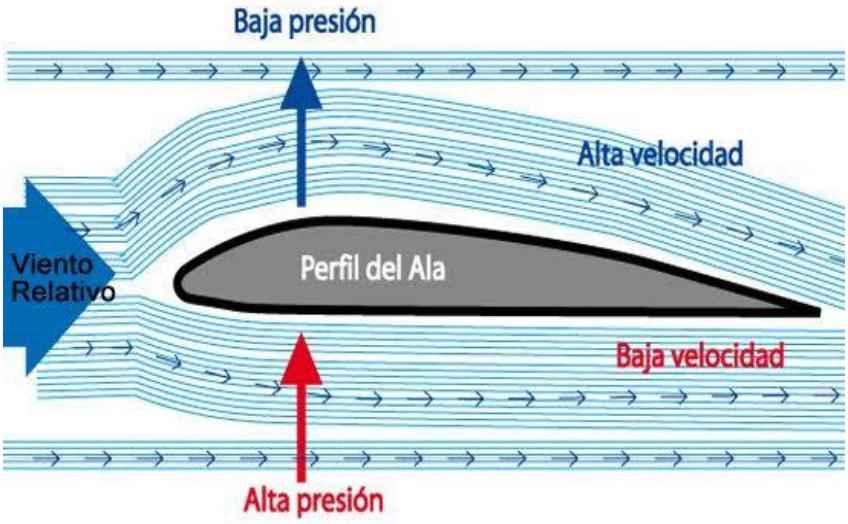


Figura 5. Flujo de aire alrededor del perfil aerodinámico

Fuente: [14]

3.3.2 Geometría del perfil

La geometría de un perfil aerodinámico se describe mediante diversos elementos característicos que permiten definir su forma y analizar su comportamiento aerodinámico. Entre los principales se encuentran el borde de ataque, el borde de salida, la cuerda, la línea de curvatura media y la distribución de espesor (Figura 6). Abbott y Von Doenhoff [12] consideran que estos parámetros constituyen la base para la clasificación y diseño de perfiles aerodinámicos.

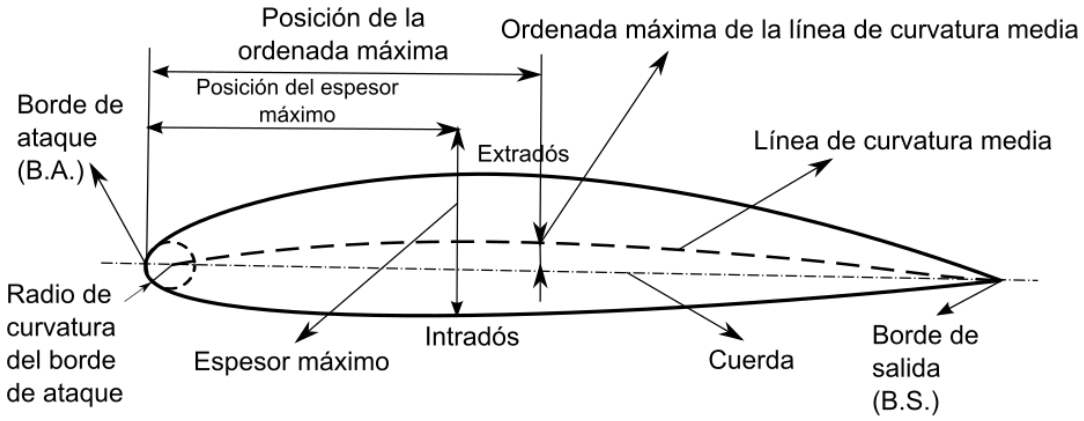


Figura 6. Geometría de un perfil aerodinámico

Fuente: [13]

El borde de ataque corresponde al punto más frontal del perfil que entra en contacto con el flujo de aire, mientras que el borde de salida es la región donde las corrientes de aire que recorren ambas superficies se reúnen nuevamente. La cuerda es la línea recta que une ambos bordes y sirve como referencia para definir dimensiones y ángulos aerodinámicos.

La línea de curvatura media se obtiene uniendo los puntos equidistantes entre las superficies superior e inferior del perfil. Esta línea permite cuantificar el camber o curvatura y constituye uno de los parámetros más influyentes sobre la capacidad de generación de sustentación.

3.3.3 Camber

El camber, también denominado curvatura media del perfil, representa la distancia entre la línea de cuerda y la línea media, medida perpendicularmente a la cuerda (Figura 7). Este parámetro describe el grado de curvatura del perfil y ejerce una influencia directa sobre las características de sustentación [12].

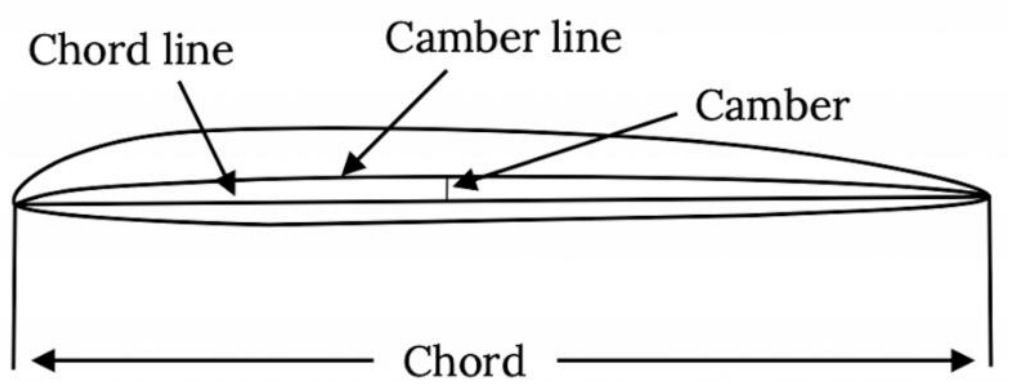


Figura 7. Representación del camber en el perfil aerodinámico
Fuente: [15]

De acuerdo con la teoría de perfiles delgados desarrollada por Abbott y retomada por Anderson, un incremento en el camber provoca un aumento de la sustentación para un mismo ángulo de ataque y desplaza el ángulo de sustentación nula hacia valores negativos. Esto significa que un perfil camberado puede generar sustentación incluso cuando se encuentra alineado con el flujo incidente.

En aplicaciones de energía eólica, la selección del camber busca optimizar la eficiencia aerodinámica de las palas. Un camber adecuado permite obtener mayores coeficientes de sustentación y, por ende, incrementar el par generado por el rotor. Sin embargo, valores excesivos pueden aumentar la sensibilidad a la pérdida y elevar la resistencia aerodinámica.

3.3.4 Espesor

El espesor de un perfil aerodinámico corresponde a la distancia entre las superficies superior e inferior medida perpendicularmente a la línea media [10]. Habitualmente se expresa como un porcentaje de la longitud de cuerda y se identifica mediante el valor máximo de dicha distancia a lo largo del perfil.

El espesor influye tanto en el comportamiento aerodinámico como en las características estructurales del perfil. Anderson [10] señala que perfiles más gruesos ofrecen mayor volumen interno y resistencia mecánica, aunque también pueden modificar la distribución de presiones y afectar el arrastre. Por el contrario, perfiles más delgados suelen presentar menores resistencias aerodinámicas, pero poseen limitaciones estructurales.

En aerogeneradores modernos, es común utilizar perfiles de mayor espesor en la región cercana a la raíz de la pala para soportar las cargas estructurales más elevadas, mientras que en las secciones externas se emplean perfiles más delgados orientados a maximizar la eficiencia aerodinámica y la producción de potencia.

3.4 Series NACA

Las series NACA constituyen una familia de perfiles aerodinámicos desarrollados por el *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) durante las décadas de 1920 a 1940 (Figura 8). Estos perfiles fueron diseñados mediante procedimientos analíticos y experimentales con el objetivo de estandarizar la geometría de las secciones aerodinámicas y facilitar su aplicación en aeronaves, hélices y posteriormente en turbinas eólicas. La principal ventaja de las series NACA radica en

que su geometría puede definirse matemáticamente a partir de una nomenclatura específica, lo que permite reproducir con precisión las características del perfil.

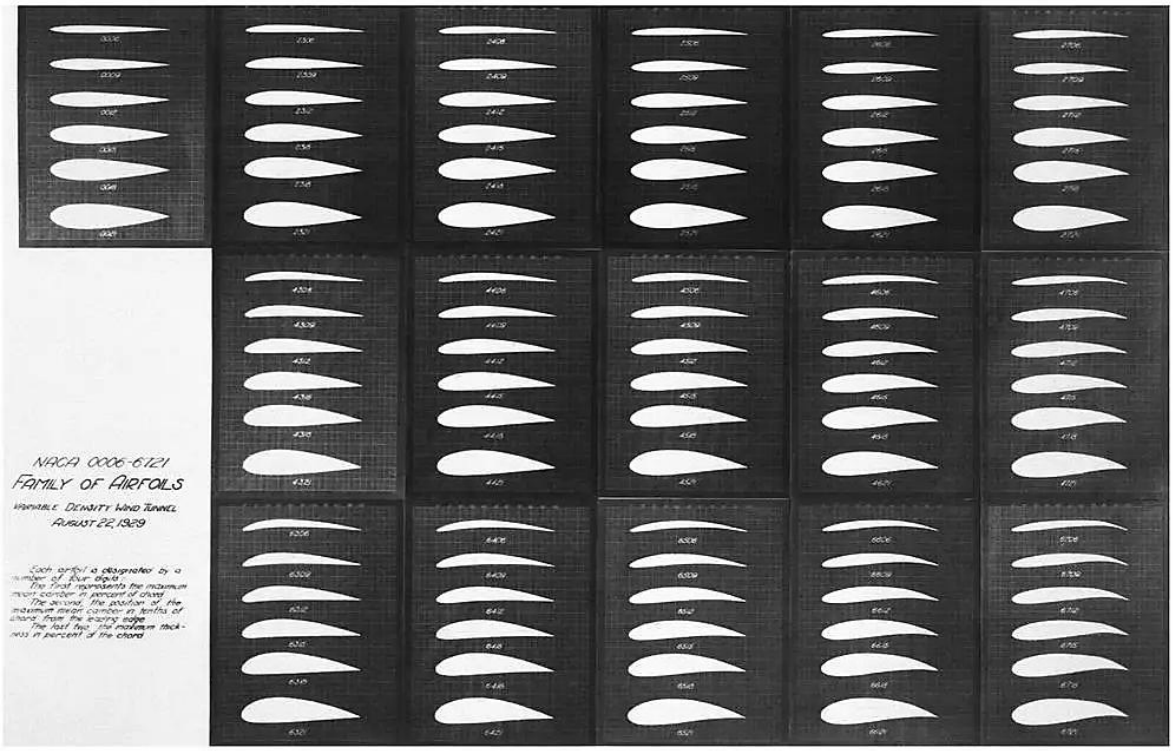


Figura 8. Familia de perfiles aerodinámicos NACA

Fuente: [19]

La evolución de las series NACA condujo al desarrollo de distintas familias de perfiles, entre las que destacan las series de cuatro y cinco dígitos. Cada una de estas familias buscó mejorar aspectos específicos del desempeño aerodinámico, tales como la generación de sustentación, la reducción del arrastre o el control de la distribución de presión sobre la superficie del perfil.

3.4.1 Serie NACA de cuatro dígitos

La serie NACA de cuatro dígitos fue una de las primeras familias desarrolladas y continúa siendo una de las más utilizadas debido a su simplicidad geométrica. En esta serie, cada dígito tiene un significado específico relacionado con la geometría del perfil.

La nomenclatura general es:

NACA MPXX

donde:

- *M* representa el máximo camber expresado como porcentaje de la cuerda.
- *P* indica la posición del máximo camber en décimos de la cuerda.
- *XX* corresponde al espesor máximo expresado como porcentaje de la cuerda.

Por ejemplo, en el perfil *NACA 4412* (Figura 9):

- 4% de camber máximo
- Camber máximo ubicado al 40% de la cuerda
- Espesor máximo de 12% de la cuerda



Figura 9. Representación gráfica del perfil NACA 4412

Fuente: [16]

Los perfiles de esta serie poseen una geometría relativamente sencilla y presentan buenas características de sustentación para numerosas aplicaciones. Perfiles como el NACA 2412 y el NACA 4412 se encuentran entre los más estudiados y utilizados en aplicaciones aeronáuticas y académicas.

3.4.2 Serie NACA de cinco dígitos

La serie NACA de cinco dígitos fue desarrollada con el propósito de obtener mayores coeficientes de sustentación y mejores características aerodinámicas que las alcanzadas por la serie de cuatro dígitos. En esta familia, la nomenclatura está

relacionada con el coeficiente de sustentación de diseño y con la posición del máximo camber.

La nomenclatura general es:

NACA LPQXX

donde:

- El primer dígito está relacionado con el coeficiente de sustentación de diseño
- Los siguientes dígitos describen la posición y características de la línea media
- Los dos últimos indican el espesor relativo del perfil

Un ejemplo ampliamente conocido es el NACA 23012, el cual fue utilizado en numerosas aeronaves debido a su elevada capacidad de generar sustentación manteniendo un nivel moderado de resistencia aerodinámica (Figura 10).

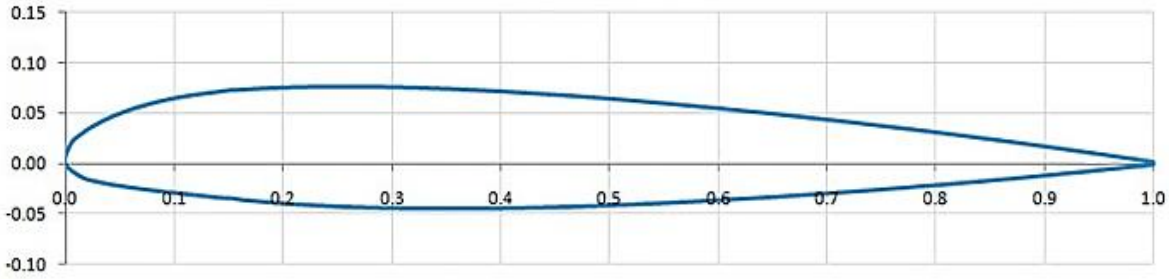


Figura 10. Representación gráfica del perfil NACA 23012

Fuente: [17]

En comparación con la serie de cuatro dígitos, estos perfiles presentan líneas medias diseñadas mediante principios aerodinámicos más avanzados y permiten alcanzar coeficientes máximos de sustentación superiores.

3.5 Variables de estudio

El comportamiento aerodinámico de un perfil puede describirse mediante diversos parámetros que permiten evaluar su capacidad para generar sustentación y minimizar las pérdidas por resistencia. En esta investigación se consideran como variables de estudio el ángulo de ataque (α), el coeficiente de sustentación (C_L), el

coeficiente de arrastre (C_D), la relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) y el número de Reynolds (Re). Estas variables son ampliamente utilizadas en aerodinámica para caracterizar el desempeño de perfiles alares y determinar su aplicabilidad en sistemas de conversión de energía eólica.

3.5.1 Ángulo de ataque (α)

El ángulo de ataque (α) se define como el ángulo formado entre la línea de cuerda del perfil aerodinámico y la dirección del flujo de aire incidente [10]. Esta variable constituye uno de los parámetros más importantes en el análisis aerodinámico, ya que controla directamente la distribución de presiones sobre la superficie del perfil y, por tanto, la generación de sustentación (Figura 11).

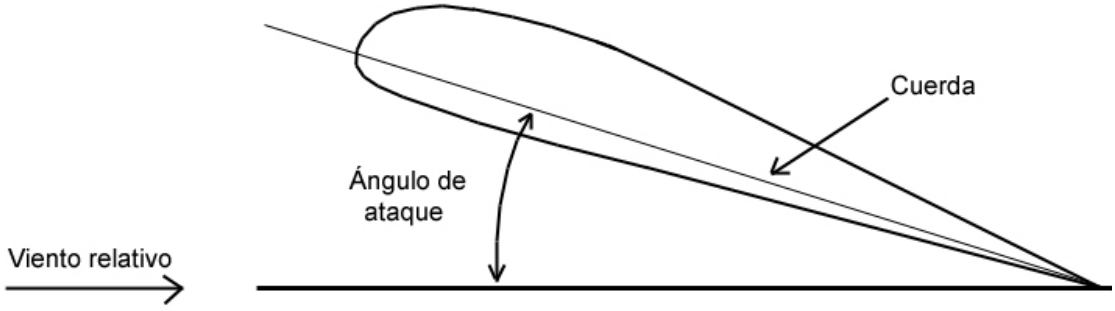


Figura 11. Representación gráfica del ángulo de ataque (α)
Fuente: [18]

De acuerdo con Anderson [10], para ángulos de ataque pequeños la sustentación aumenta aproximadamente de manera lineal con el incremento de α. Sin embargo, al superar un valor crítico, el flujo comienza a separarse de la superficie superior del perfil, provocando una disminución repentina de la sustentación y un incremento significativo de la resistencia aerodinámica, fenómeno conocido como pérdida.

En aerogeneradores, el ángulo de ataque es una variable de gran importancia debido a que determina la cantidad de energía que puede extraerse del viento. Una selección adecuada de este parámetro permite maximizar la eficiencia aerodinámica de las palas y optimizar el desempeño del rotor.

3.5.2 Coeficiente de sustentación (C_L)

El coeficiente de sustentación (C_L) es un parámetro adimensional que representa la capacidad de un perfil para generar sustentación bajo determinadas condiciones de flujo [10]. Se expresa mediante la siguiente ecuación:

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

donde:

- L = fuerza de sustentación (N)
- ρ= densidad del aire (kg/m³)
- V= velocidad del flujo (m/s)
- A= área de referencia (m²)

Este coeficiente permite comparar perfiles de diferentes dimensiones bajo distintas condiciones de operación. Valores elevados de C_L indican una mayor capacidad de generación de sustentación, característica deseable en aplicaciones donde se busca maximizar la transferencia de energía del viento hacia el rotor.

En perfiles aerodinámicos, el valor de C_L depende principalmente del ángulo de ataque, la geometría del perfil y el número de Reynolds.

3.5.3 Coeficiente de arrastre (C_D)

El coeficiente de arrastre (C_D) es una magnitud adimensional que cuantifica la resistencia que experimenta un cuerpo al desplazarse a través de un fluido [10]. Se determina mediante:

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

donde:

- D= fuerza de arrastre (N)
- ρ= densidad del aire (kg/m³)

- V= velocidad del flujo (m/s)
- A= área de referencia (m²)

El arrastre se origina principalmente por dos mecanismos: la fricción producida por la viscosidad del aire sobre la superficie del perfil y la distribución de presiones alrededor de este. La reducción del coeficiente de arrastre es fundamental para mejorar la eficiencia aerodinámica, ya que disminuye las pérdidas energéticas asociadas al movimiento del flujo.

En turbinas eólicas, perfiles con bajos valores de C_D permiten incrementar el rendimiento energético del rotor y mejorar la conversión de energía disponible en el viento.

3.5.4 Relación sustentación-arrastre (C_L/C_D)

La relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) constituye uno de los indicadores más importantes del desempeño aerodinámico de un perfil [20]. Esta relación expresa cuánta sustentación es capaz de generar un perfil por cada unidad de resistencia producida:

$$\frac{C_L}{C_D}$$

Valores elevados de esta relación indican una alta eficiencia aerodinámica, ya que permiten obtener grandes fuerzas de sustentación con pérdidas mínimas por arrastre. Por esta razón, el cociente C_L/C_D suele emplearse como criterio principal para seleccionar perfiles destinados a aplicaciones aeronáuticas y eólicas.

En aerogeneradores, la maximización de la relación C_L/C_D contribuye directamente al incremento del coeficiente de potencia del rotor y, por consiguiente, a una mayor producción de energía eléctrica. Perfiles con relaciones elevadas permiten operar más cerca de las condiciones óptimas de eficiencia aerodinámica.

3.5.5 Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas presentes en un flujo [10]. Se calcula mediante la expresión:

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu}$$

donde:

- ρ= densidad del aire (kg/m³)
- V= velocidad del flujo (m/s)
- c= longitud característica o cuerda del perfil (m)
- μ= viscosidad dinámica del aire (Pa·s)

El número de Reynolds determina las características de la capa límite y la transición entre flujo laminar y turbulento. Cambios en esta variable modifican significativamente la distribución de presiones, el arrastre y la sustentación generada por el perfil. Abbott y Von Doenhoff [12] destacan que perfiles que presentan excelentes características aerodinámicas a determinados valores de Reynolds pueden comportarse de forma diferente cuando este parámetro cambia.

En el caso de aerogeneradores de pequeña escala, los números de Reynolds suelen ser considerablemente menores que los presentes en aeronaves comerciales, por lo que resulta indispensable evaluar el comportamiento de los perfiles dentro del rango específico de operación esperado.

3.6 Software XFOIL

XFOIL es un programa computacional desarrollado por Mark Drela y Harold Youngren en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) para el análisis y diseño de perfiles aerodinámicos subsónicos [21]. El software es ampliamente utilizado en investigación aerodinámica debido a su capacidad para predecir las características de sustentación y resistencia de perfiles alares mediante la combinación de métodos de flujo potencial y modelos de capa límite viscosa.

El programa permite realizar análisis bidimensionales de perfiles aerodinámicos bajo diferentes condiciones de operación. Debido a su precisión y bajo costo computacional, se ha convertido en una de las herramientas más empleadas para la evaluación preliminar de perfiles utilizados en aeronaves y turbinas eólicas.

En esta investigación se utilizaron datos aerodinámicos obtenidos de AirfoilTools, plataforma que proporciona polares generadas mediante el código XFOIL para diferentes condiciones de operación. Mediante esta plataforma se obtienen los valores de:

- Ángulo de ataque (α)
- Coeficiente de sustentación (C_L)
- Coeficiente de arrastre (C_D)
- Relación de eficiencia aerodinámica (C_L/C_D)
- Número de Reynolds (Re)

Su utilización permite realizar comparaciones objetivas entre diferentes perfiles NACA bajo condiciones equivalentes de operación, facilitando la identificación de aquellos que presentan mejores características aerodinámicas para aplicaciones en aerogeneradores.

3.7 Polares aerodinámicas

3.7.1 Definición de polar aerodinámica

Una polar aerodinámica es una representación gráfica de la respuesta aerodinámica de un perfil frente a variaciones de las condiciones de flujo. Estas curvas permiten evaluar la capacidad de un perfil para generar sustentación, minimizar el arrastre y operar con alta eficiencia [12].

Las polares constituyen una de las herramientas más utilizadas en el diseño de alas, hélices y palas de aerogeneradores debido a que resumen de manera visual el comportamiento aerodinámico de una sección alar.

Entre las polares más utilizadas se encuentran:

- Polar de sustentación ($C_L-\alpha$)
- Polar de arrastre ($C_D-\alpha$)
- Polar de resistencia (C_D-C_L)
- Polar de eficiencia aerodinámica ($C_L/C_D-\alpha$)

Estas curvas permiten caracterizar el comportamiento de los perfiles bajo las condiciones específicas de operación para las cuales han sido diseñados [21].

3.7.2 Polar de sustentación ($C_L-\alpha$)

La polar $C_L-\alpha$ representa la variación del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque. En perfiles aerodinámicos convencionales, el coeficiente de sustentación aumenta de manera aproximadamente lineal conforme se incrementa el ángulo de ataque [10]. Esta región se conoce como región lineal de sustentación y constituye la zona de operación más eficiente para la mayoría de las aplicaciones aeronáuticas y eólicas. Al continuar aumentando el ángulo de ataque se alcanza un valor máximo de sustentación denominado C_{Lmax}.

A partir de este punto se produce la separación del flujo sobre la superficie del perfil. Como consecuencia, la sustentación disminuye rápidamente y la estabilidad aerodinámica se ve afectada.

3.7.3 Polar de arrastre ($C_D-\alpha$)

La polar $C_D-\alpha$ muestra la variación del coeficiente de arrastre conforme cambia el ángulo de ataque. En general, para pequeños ángulos de ataque los perfiles presentan valores reducidos de arrastre debido a que el flujo permanece adherido a la superficie. Sin embargo, conforme aumenta el ángulo de ataque también se incrementa la resistencia aerodinámica debido al aumento de las pérdidas por fricción y por presión.

Cuando el perfil se aproxima a la pérdida, la separación del flujo genera un incremento abrupto del coeficiente de arrastre.

3.7.4 Polar de resistencia (C_D−C_L)

La polar C_D−C_L, conocida comúnmente como polar de resistencia, representa la relación entre los coeficientes de arrastre y sustentación de un perfil.

Esta curva es una de las representaciones más utilizadas en aerodinámica porque permite analizar simultáneamente la capacidad de generación de sustentación y el costo aerodinámico asociado a dicha sustentación.

Generalmente, la polar presenta una forma parabólica donde los valores mínimos de arrastre corresponden a condiciones de sustentación moderada. Conforme aumenta el coeficiente de sustentación, también se incrementan las pérdidas por resistencia.

3.7.5 Polar de eficiencia aerodinámica (C_L/C_D−α)

La polar C_L/C_D−α permite identificar el ángulo de ataque en el que el perfil alcanza su máxima eficiencia aerodinámica. Este punto es importante porque representa las condiciones bajo las cuales se obtiene la mayor producción de fuerza útil con las menores pérdidas posibles. Valores altos de C_L/C_D indican perfiles altamente eficientes y, por tanto, atractivos para aplicaciones en turbinas eólicas.

En el diseño de aerogeneradores, el análisis de esta polar es fundamental para seleccionar perfiles que permitan maximizar el coeficiente de potencia de la turbina y mejorar la producción energética del sistema.

4. Planteamiento del problema

La creciente demanda mundial de energía y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de tecnologías basadas en fuentes renovables. Entre ellas, la energía eólica se ha consolidado como una de las alternativas más viables para la generación de electricidad debido a su capacidad para aprovechar un recurso limpio, renovable y ampliamente disponible [20]. En este contexto, los aerogeneradores de baja potencia representan una opción tecnológica importante para aplicaciones de generación distribuida, electrificación rural y suministro energético en zonas aisladas.

El desempeño de un aerogenerador depende en gran medida de la eficiencia aerodinámica de sus palas, ya que estas son responsables de captar la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica. Dentro del diseño de las palas, uno de los aspectos más relevantes es la selección del perfil aerodinámico, dado que su geometría determina las fuerzas de sustentación y arrastre generadas durante la operación. Una selección inadecuada del perfil puede ocasionar una disminución significativa en la capacidad de extracción de energía del viento, reduciendo el rendimiento global del sistema y afectando su viabilidad técnica y económica [7].

A pesar de la amplia disponibilidad de perfiles aerodinámicos desarrollados para aplicaciones aeronáuticas y eólicas, no todos presentan el mismo comportamiento bajo las condiciones de operación características de los aerogeneradores de baja potencia. Factores como el ángulo de ataque, el número de Reynolds, la geometría del perfil y las condiciones del flujo influyen directamente en los coeficientes de sustentación y arrastre, modificando la eficiencia aerodinámica alcanzada por las palas. En muchos casos, la selección de perfiles se realiza con base en información bibliográfica general o en estudios desarrollados para condiciones diferentes a las reales de operación, lo que puede conducir a decisiones de diseño poco eficientes.

Una evaluación insuficiente del comportamiento aerodinámico puede generar estimaciones incorrectas de las cargas que actúan sobre las palas y sobre los componentes mecánicos del aerogenerador. Esto puede provocar pérdidas de rendimiento energético, incremento en los esfuerzos estructurales, mayores costos de mantenimiento y una reducción de la vida útil de los equipos. Por lo tanto, resulta fundamental realizar análisis aerodinámicos que permitan comparar objetivamente el desempeño de distintos perfiles bajo condiciones equivalentes de operación.

En la actualidad, herramientas de simulación permiten analizar perfiles aerodinámicos de manera eficiente mediante la obtención de polares aerodinámicas y parámetros de desempeño como el coeficiente de sustentación (C_L), el coeficiente de arrastre (C_D), la relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) y su comportamiento ante diferentes ángulos de ataque y números de Reynolds [12]. Sin embargo, aún existe

la necesidad de generar información comparativa que facilite la selección de perfiles adecuados para aerogeneradores de baja potencia, particularmente entre los perfiles de la familia NACA que continúan siendo ampliamente utilizados en investigación y diseño preliminar.

Por ello, surge la necesidad de evaluar y comparar el comportamiento aerodinámico de diferentes perfiles NACA mediante datos aerodinámicos disponibles en AirfoilTools, considerando variables como el ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre, la relación sustentación-arrastre y el número de Reynolds. El análisis de estas variables permitirá identificar los perfiles con mejor desempeño aerodinámico bajo las condiciones de estudio, contribuyendo a optimizar el diseño de las palas y mejorar la eficiencia energética de los aerogeneradores de baja potencia [20].

5. Hipótesis

5.1 Hipótesis de investigación (H_1)

Se plantea que existen diferencias en el comportamiento aerodinámico de los perfiles NACA 0012, NACA 2412, NACA 3412, NACA 4412 y NACA 23012 cuando son evaluados bajo las mismas condiciones de operación y números de Reynolds.

Se espera que los perfiles con curvatura positiva presenten mayores coeficientes de sustentación (C_L) y una relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) superior en comparación con los perfiles simétricos. En particular, se plantea que el perfil NACA 4412 mostrará uno de los mejores desempeños aerodinámicos dentro de los perfiles analizados, alcanzando valores elevados de sustentación y eficiencia aerodinámica para los ángulos de ataque considerados.

Las polares aerodinámicas obtenidas permitirán identificar diferencias entre los perfiles estudiados y determinar aquel que presente la combinación más favorable de coeficiente de sustentación (C_L), coeficiente de arrastre (C_D) y relación sustentación-arrastre (C_L/C_D) para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia.

5.2 Hipótesis nula (H_0)

No existen diferencias en el comportamiento aerodinámico de los perfiles NACA 0012, NACA 2412, NACA 3412, NACA 4412 y NACA 23012 cuando son evaluados bajo las mismas condiciones de operación y números de Reynolds.

Los perfiles presentan valores equivalentes de coeficiente de sustentación (C_L), coeficiente de arrastre (C_D) y relación sustentación-arrastre (C_L/C_D), por lo que ninguno de ellos muestra una ventaja aerodinámica respecto a los demás para su aplicación en aerogeneradores de baja potencia.

6. Objetivos

6.1 General

Analizar el comportamiento aerodinámico de los perfiles NACA 0012, 2412, 3412, 4412 y 23012 utilizados en aerogeneradores de baja potencia mediante datos de AirfoilTools, considerando la influencia del ángulo de ataque y el número de Reynolds sobre los coeficientes de sustentación (C_L), arrastre (C_D) y la relación sustentación-arrastre (C_L/C_D), con el fin de identificar el perfil que presente el mejor desempeño aerodinámico bajo condiciones representativas de operación.

6.2 Específicos

1. Determinar las características aerodinámicas de los perfiles NACA 0012, NACA 2412, NACA 3412, NACA 4412 y NACA 23012 mediante la obtención de los coeficientes de sustentación (C_L), arrastre (C_D) y eficiencia aerodinámica (C_L/C_D) para diferentes ángulos de ataque y números de Reynolds.
2. Comparar el comportamiento aerodinámico de los perfiles analizados bajo condiciones representativas de operación de aerogeneradores de baja potencia, evaluando la influencia del ángulo de ataque sobre los parámetros C_L, C_D y C_L/C_D.

3. Identificar el perfil que presente el mejor desempeño aerodinámico a partir del análisis comparativo de las polares aerodinámicas y de los valores obtenidos de C_L, C_D y C_L/C_D en las condiciones de operación evaluadas.

4. Analizar la influencia de la curvatura geométrica de los perfiles NACA en el desempeño aerodinámico, estableciendo tendencias entre la geometría del perfil y su eficiencia para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia.

7. Metodología

7.1 Contexto institucional de la investigación

La presente investigación se desarrolló en colaboración entre el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan (TESCH) y el Instituto Tecnológico del Istmo (ITI), en el marco de una estancia académica orientada al estudio de perfiles aerodinámicos para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia.

La recopilación de los datos aerodinámicos utilizados en esta investigación se realizó en el Instituto Tecnológico del Istmo, ubicado en Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca. Durante la estancia académica se contó con el acompañamiento de investigadores y profesores de la institución, quienes brindaron orientación técnica para la selección de perfiles aerodinámicos, la obtención de información mediante herramientas de simulación y la interpretación preliminar de los resultados.

El procesamiento de la información, el análisis comparativo de los perfiles, la elaboración de las gráficas, la discusión de resultados y la estructuración del documento de tesis fueron desarrollados en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, Estado de México, como parte de las actividades académicas correspondientes al proyecto de investigación.

La participación de ambas instituciones permitió integrar los recursos académicos y técnicos necesarios para el desarrollo del estudio, favoreciendo la obtención de resultados confiables y el análisis de los perfiles aerodinámicos evaluados.

7.2 Enfoque de la investigación

Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que el análisis se realizó a partir de variables aerodinámicas expresadas mediante valores numéricos obtenidos por simulación computacional. Asimismo, corresponde a una investigación aplicada de alcance descriptivo y comparativo, ya que busca evaluar y comparar el comportamiento aerodinámico de diferentes perfiles NACA para identificar aquellos que presentan un mejor desempeño en aplicaciones de aerogeneradores de baja potencia.

El diseño de la investigación es no experimental, ya que no se manipularon físicamente las variables de estudio, sino que se analizaron mediante simulaciones numéricas utilizando herramientas especializadas.

7.3 Diseño metodológico

El procedimiento metodológico se desarrolló en cinco etapas (Figura 12).

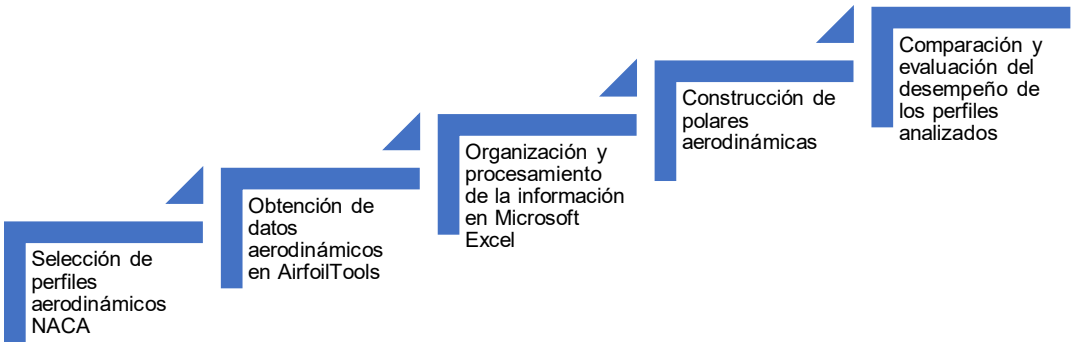


Figura 12. Diseño metodológico de la investigación

Esta metodología permitió identificar el perfil con mejores características aerodinámicas para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia.

7.3.1 Selección de perfiles aerodinámicos

Se seleccionaron cinco perfiles pertenecientes a las series NACA debido a su amplia utilización en estudios aerodinámicos y aplicaciones eólicas (Tabla 1).

La selección incluyó un perfil simétrico, varios perfiles con diferente nivel de curvatura y un perfil perteneciente a la serie de cinco dígitos, permitiendo evaluar la influencia de la geometría en el comportamiento aerodinámico.

Tabla 1. Perfiles aerodinámicos seleccionados

Perfil	**Característica**
NACA 0012	Simétrico
NACA 2412	Camber 2%
NACA 3412	Camber 3%
NACA 4412	Camber 4%
NACA 23012	Serie NACA de cinco dígitos

7.3.2 Obtención de datos aerodinámicos

Los datos aerodinámicos fueron obtenidos a partir de la plataforma AirfoilTools, la cual proporciona información aerodinámica generadas mediante el código XFOIL para diferentes condiciones de operación. Para todos los perfiles se consideraron las mismas condiciones de operación con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados.

Se analizaron los siguientes números de Reynolds: 200000, 300000, 400000, 500000 y 600000.

Asimismo, se evaluó un rango de ángulos de ataque comprendido entre $-5^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ obteniéndose para cada condición los valores de Coeficiente de sustentación (C_L) y Coeficiente de arrastre (C_D).

7.3.3 Procesamiento de datos

Los datos obtenidos fueron exportados a Microsoft® Excel® (versión 2607 compilación 16.0.20228.20124) de 64 bits, para su organización y análisis. Se creó una hoja de trabajo para cada perfil aerodinámico y para cada número de Reynolds

analizado. Posteriormente se calcularon los valores de eficiencia aerodinámica mediante la ecuación C_L/C_D.

Con el propósito de identificar tendencias generales de comportamiento en el intervalo de números de Reynolds considerado (200 000 a 600 000), se calcularon valores promedio de C_L, C_D y C_L/C_D para cada ángulo de ataque a partir de los cinco números de Reynolds evaluados. Este procedimiento permitió obtener una representación global del desempeño aerodinámico de cada perfil y facilitar su comparación bajo condiciones representativas de operación de aerogeneradores de baja potencia.

Adicionalmente, para conservar la información asociada a cada condición de flujo, se elaboró una tabla de síntesis con los principales parámetros aerodinámicos obtenidos para cada perfil y número de Reynolds analizado.

7.3.4 Construcción de polares aerodinámicas

Con los datos obtenidos, se elaboraron las siguientes polares aerodinámicas para evaluar el comportamiento de los perfiles seleccionados:

- Polar de sustentación ($C_L-\alpha$). Permitió identificar la capacidad de generación de sustentación de cada perfil y determinar el valor máximo de C_L.
- Polar de arrastre ($C_D-\alpha$). Ayudó al análisis del incremento de la resistencia aerodinámica conforme aumentó el ángulo de ataque.
- Polar de resistencia (C_D-C_L). Permitió evaluar el costo aerodinámico asociado a la generación de sustentación y comparar la eficiencia relativa de los perfiles.
- Polar de eficiencia aerodinámica ($C_D/C_L-\alpha$). Se utilizó como criterio principal para determinar el perfil con mejor desempeño aerodinámico.

7.3.5 Análisis comparativo de perfiles

Los perfiles fueron comparados considerando valor máximo de C_L, valor mínimo de C_D, valor máximo de C_L/C_D, ángulo de ataque asociado al máximo C_L/C_D y comportamiento de las polares aerodinámicas.

La información generada permitió identificar diferencias entre perfiles y evaluar la influencia de la curvatura geométrica sobre el desempeño aerodinámico.

8. Resultados y discusión

8.1 Síntesis de resultados por número de Reynolds

Con el propósito de complementar el análisis comparativo y conservar la información específica asociada a cada condición de flujo, en la Tabla 2 se presentan los principales parámetros aerodinámicos obtenidos para cada perfil y número de Reynolds evaluado. Se incluyen el coeficiente de sustentación máximo (C_L máximo), el coeficiente de arrastre mínimo (C_D mínimo) y la relación máxima sustentación-arrastre (C_L/C_D máximo). Esta síntesis permite identificar la influencia del número de Reynolds sobre el desempeño de los perfiles antes de presentar la comparación global basada en los valores promedio utilizados para la construcción de las polares aerodinámicas.

Tabla 2. Parámetros aerodinámicos por perfil y número de Reynolds

Perfil	**Reynolds**	**C_L máximo**	**C_D mínimo**	**C_L/C_D máximo**
NACA 0012	200000	1.0753	0.0102	47.4426
	300000	1.1223	0.0077	53.4586
	400000	1.1573	0.0067	57.9595
	500000	1.2021	0.0062	61.8595
	600000	1.2352	0.0059	65.0179
NACA 2412	200000	1.2825	0.0098	67.3132
	300000	1.3058	0.0078	77.2405

Perfil	Reynolds	C_L máximo	C_D mínimo	C_L/C_D máximo
	400000	1.3368	0.0068	83.9775
	500000	1.3744	0.0063	89.0566
	600000	1.3958	0.0060	93.8856
NACA 3412	200000	1.3972	0.0098	74.0258
	300000	1.3942	0.0080	85.4183
	400000	1.4070	0.0070	94.0563
	500000	1.4421	0.0065	100.6112
	600000	1.4717	0.0063	106.0906
NACA 4412	200000	1.4361	0.0100	77.8874
	300000	1.4361	0.0081	91.4297
	400000	1.4596	0.0073	101.0226
	500000	1.4967	0.0071	108.6703
	600000	1.5261	0.0067	114.7580
NACA 23012	200000	1.3811	0.0095	50.0903
	300000	1.4240	0.0077	61.2642
	400000	1.4545	0.0073	69.8943
	500000	1.4823	0.0068	77.4081
	600000	1.5051	0.0065	83.3012

Los resultados muestran una tendencia general de mejora del desempeño aerodinámico conforme aumenta el número de Reynolds. En todos los perfiles se observa un incremento de la relación C_L/C_D máximo y una reducción de los valores mínimos de C_D, lo que indica una mayor eficiencia aerodinámica a Reynolds más elevados.

El perfil NACA 4412 presentó el mejor desempeño en todo el intervalo analizado, alcanzando los mayores valores de C_L/C_D max, desde 77.8874 para Re = 200 000 hasta 114.7580 para Re = 600 000. Los perfiles NACA 3412 y NACA 2412 también mostraron mejoras importantes con el incremento del número de Reynolds, mientras que el NACA 0012 mantuvo consistentemente los valores más bajos de eficiencia aerodinámica.

Los resultados confirman que tanto la geometría del perfil como el número de Reynolds influyen significativamente en el comportamiento aerodinámico. Asimismo, muestran que el NACA 4412 conserva su ventaja relativa bajo todas las condiciones evaluadas, respaldando su selección para futuras etapas de diseño de palas para aerogeneradores de baja potencia.

8.2 Caracterización general de los perfiles analizados

Con el propósito de realizar una comparación integral de los perfiles aerodinámicos estudiados, se presenta en la Tabla 3 una síntesis de los principales parámetros obtenidos a partir del análisis. Se consideran la relación máxima de sustentación y arrastre (C_L/C_D máximo), el ángulo de ataque óptimo (α óptimo), el coeficiente de sustentación máximo (C_L máximo) y el coeficiente de arrastre mínimo (C_D mínimo). Estos parámetros permiten identificar las características aerodinámicas más relevantes de cada perfil y determinar cuál presenta las condiciones más favorables para su aplicación en un aerogenerador de baja potencia.

Tabla 3. Características generales de los perfiles analizados

Perfil	**C_L/C_D máximo**	**α óptimo**	**C_L máximo**	**C_D mínimo**
NACA 0012	56.7565	6°	1.1423	0.0073
NACA 2412	81.7674	6°	1.3355	0.0074
NACA 3412	91.7702	6°	1.4191	0.0075
NACA 4412	98.5905	7°	1.4634	0.0079
NACA 23012	68.2828	10°	1.4454	0.0078

Fuente: Elaboración propia

8.3 Polar de sustentación (C_L−α)

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 13, se observa que el coeficiente de sustentación (C_L) presenta un comportamiento dependiente del ángulo de ataque (α) para los cinco perfiles aerodinámicos analizados. En términos generales, el incremento del ángulo de ataque produce un aumento progresivo del C_L hasta alcanzar una condición máxima, después de la cual se presenta una disminución asociada con el inicio de la pérdida aerodinámica. Este comportamiento se relaciona con el incremento de la diferencia de presiones entre las superficies superior e inferior del perfil conforme aumenta el ángulo de ataque y, posteriormente, con la separación del flujo cuando se alcanzan ángulos elevados.

Dentro del conjunto de perfiles evaluados, el NACA 4412 presentó el mayor desempeño en términos de sustentación. Este perfil mantuvo valores de C_L superiores a los obtenidos por los demás perfiles y conservó esta tendencia a lo largo de gran parte del intervalo analizado. El comportamiento puede atribuirse principalmente a la curvatura del perfil, ya que el NACA 4412 es un perfil asimétrico con mayor camber que los perfiles de menor curvatura y, por lo tanto, puede generar una diferencia de presión más favorable para producir sustentación.

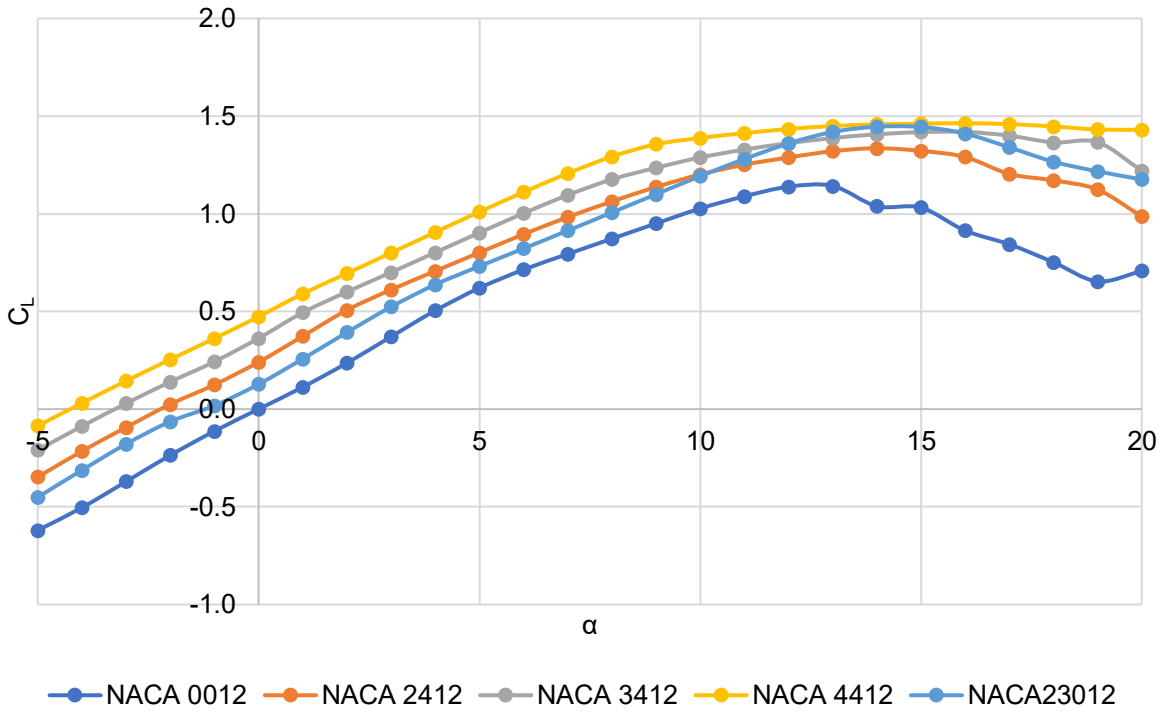


Figura 13. C_L vs ángulo de ataque α

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones experimentales y numéricas que han estudiado la influencia de la curvatura sobre el comportamiento aerodinámico. Oyewola, Idowu y Labiran analizaron experimentalmente los perfiles NACA 0012, NACA 4412 y NACA 6412 bajo diferentes ángulos de ataque y condiciones superficiales. Los autores observaron que los perfiles con curvatura, particularmente el NACA 4412 y el NACA 6412, desarrollan mayores coeficientes de sustentación que el NACA 0012, perfil simétrico. Asimismo, encontraron una relación importante entre la curvatura del perfil y su capacidad para generar sustentación, debido a las diferencias de presión que se desarrollan entre las superficies del perfil [22].

De manera similar, Ali, Mehdi y Naik realizaron un estudio mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de perfiles NACA 0012 y NACA 4412 orientados a aplicaciones de aerogeneradores de baja velocidad. El análisis consideró ángulos de ataque de 0°, 5°, 10° y 15°, así como velocidades comprendidas entre 5 y 8 m/s. Los

resultados mostraron diferencias importantes en la distribución de presión y velocidad entre ambos perfiles, destacando el comportamiento favorable del NACA 4412 para las condiciones estudiadas [23].

En los resultados de la presente investigación, el incremento de C_L se mantuvo aproximadamente de manera lineal desde α = -5° hasta un intervalo cercano a 12°–15°. Este comportamiento indica que, durante esta región, el aumento del ángulo de ataque permite incrementar la sustentación generada por los perfiles. Sin embargo, después de alcanzar el máximo C_L, el crecimiento comienza a disminuir y posteriormente se observa una reducción del coeficiente. Esta transición representa el inicio de la pérdida aerodinámica, debido a que el flujo deja de permanecer adherido a la superficie del perfil y comienza a separarse.

El comportamiento descrito también ha sido identificado en investigaciones realizadas mediante CFD para perfiles empleados en aplicaciones eólicas. En un estudio sobre un perfil NACA 4412 utilizado en una pala de aerogenerador, se encontró que el coeficiente de sustentación aumenta conforme se incrementa el ángulo de ataque hasta alcanzar un valor máximo asociado con el ángulo de pérdida. En dicho trabajo se analizaron ángulos de ataque de 0° a 16° y diferentes números de Reynolds, observándose que la posición de la pérdida depende de las condiciones del flujo y del número de Reynolds [24].

Para los perfiles analizados en este trabajo, el NACA 4412 alcanzó el mayor valor de C_L que fue de 1.45. En segundo lugar, se encontraron los perfiles NACA 23012 y NACA 3412, cuyos valores C_L máximos fueron de 1.43 y 1.44, respectivamente. El NACA 2412 alcanzó un valor máximo cercano a C_L = 1.35, mientras que el NACA 0012 presentó el menor valor, aproximadamente C_L = 1.15. Además, el NACA 0012 presentó una disminución más evidente después de aproximadamente 13°, lo que indica una pérdida de sustentación más marcada dentro del intervalo estudiado.

La menor sustentación obtenida por el NACA 0012 puede relacionarse con su geometría simétrica. A diferencia de los perfiles curvados, este perfil no presenta camber y, por ello, su capacidad para generar sustentación a ángulos de ataque

pequeños es menor. Esta característica ha sido documentada en estudios comparativos de perfiles aerodinámicos. Mahato et al. compararon mediante CFD el NACA 0012, de geometría simétrica, con el NACA 4418, de geometría asimétrica, para aplicaciones de aerogeneradores. Los autores concluyeron que el perfil asimétrico presenta ventajas en términos de sustentación y relación (C_L/C_D), por lo que resulta más favorable para determinadas aplicaciones de turbinas eólicas de eje horizontal [24].

Asimismo, investigaciones enfocadas específicamente en el NACA 0012 han demostrado que su comportamiento aerodinámico depende considerablemente del número de Reynolds y del ángulo de ataque. Un estudio mediante CFD sobre una pala de aerogenerador basada en este perfil evaluó números de Reynolds, encontrando que tanto la sustentación como la resistencia varían con las condiciones del flujo y que la selección del régimen de operación resulta importante para caracterizar correctamente el desempeño del perfil [25].

Por otra parte, debe considerarse que alcanzar el mayor C_L no significa necesariamente que un perfil sea el más eficiente para un aerogenerador. Para determinar el desempeño aerodinámico global también es necesario analizar el coeficiente de resistencia (C_D) y, principalmente, la relación de sustentación-resistencia (C_L/C_D). En aplicaciones eólicas, un perfil que produzca una sustentación elevada pero también una resistencia considerable puede presentar un desempeño energético inferior al de otro perfil con un C_L ligeramente menor, pero con menor C_D. Estudios recientes realizados con los perfiles NACA 0012, NACA 4412 y NACA 6412 han mostrado que los perfiles con curvatura pueden presentar mayores relaciones C_L/C_D que el NACA 0012 en determinadas condiciones de operación, particularmente en ángulos de ataque bajos y medios [22].

En consecuencia, los resultados de la Figura 13 permiten establecer que el NACA 4412 presenta la mayor capacidad de generación de sustentación entre los perfiles estudiados, seguido por el NACA 23012, NACA 3412 y NACA 2412, mientras que el NACA 0012 presenta el menor valor máximo. La tendencia observada coincide con investigaciones previas que señalan la influencia positiva de la curvatura sobre la

generación de sustentación [22], [23], [24]. Por lo tanto, desde el punto de vista exclusivo de la sustentación, el NACA 4412 representa la alternativa más favorable de los perfiles evaluados. Sin embargo, para determinar cuál de ellos resulta más conveniente para el diseño de un aerogenerador de baja potencia, este resultado debe complementarse con el análisis de C_D, la relación C_L/C_D, el ángulo de pérdida y las condiciones de número de Reynolds correspondientes al funcionamiento real del aerogenerador.

8.4 Polar de arrastre (C_D−α)

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Figura 14, el coeficiente de arrastre (C_D) presentó un comportamiento directamente relacionado con el ángulo de ataque (α) y con la geometría de cada perfil aerodinámico. En términos generales, todos los perfiles presentaron valores de arrastre relativamente bajos en los primeros ángulos de ataque analizados; sin embargo, conforme aumentó Alpha, el coeficiente de arrastre comenzó a incrementarse de manera progresiva.

Este comportamiento se volvió más evidente a partir de aproximadamente 10°–14°, intervalo en el que el flujo comienza a experimentar mayores efectos de separación sobre la superficie del perfil.

En la mayor parte del intervalo de ángulos de ataque elevados, el NACA 0012 presentó los valores de C_D más altos entre los perfiles analizados. Este comportamiento resulta particularmente importante debido a que el NACA 0012 es un perfil simétrico y, aunque puede presentar características favorables para determinadas condiciones de operación, su desempeño en términos de resistencia se ve afectado conforme aumenta el ángulo de ataque. En contraste, el NACA 4412 mantiene valores de arrastre inferiores durante una parte considerable del intervalo estudiado, seguido por los perfiles NACA 23012 y NACA 3412.

El comportamiento observado coincide con investigaciones experimentales y numéricas que han comparado perfiles simétricos y asimétricos. Oyewola, Labiran e Idowu estudiaron experimentalmente los perfiles NACA 0012, NACA 4412 y NACA 6412, encontrando que la geometría y la condición superficial tienen una influencia

significativa sobre las fuerzas aerodinámicas. Observaron diferencias en los coeficientes de sustentación y arrastre entre los perfiles analizados, destacando que la modificación de la curvatura puede favorecer el comportamiento aerodinámico en determinadas condiciones de operación [22]. Esta evidencia permite establecer una relación con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde el NACA 4412 presenta un comportamiento de arrastre más favorable que el NACA 0012 en buena parte del intervalo analizado.

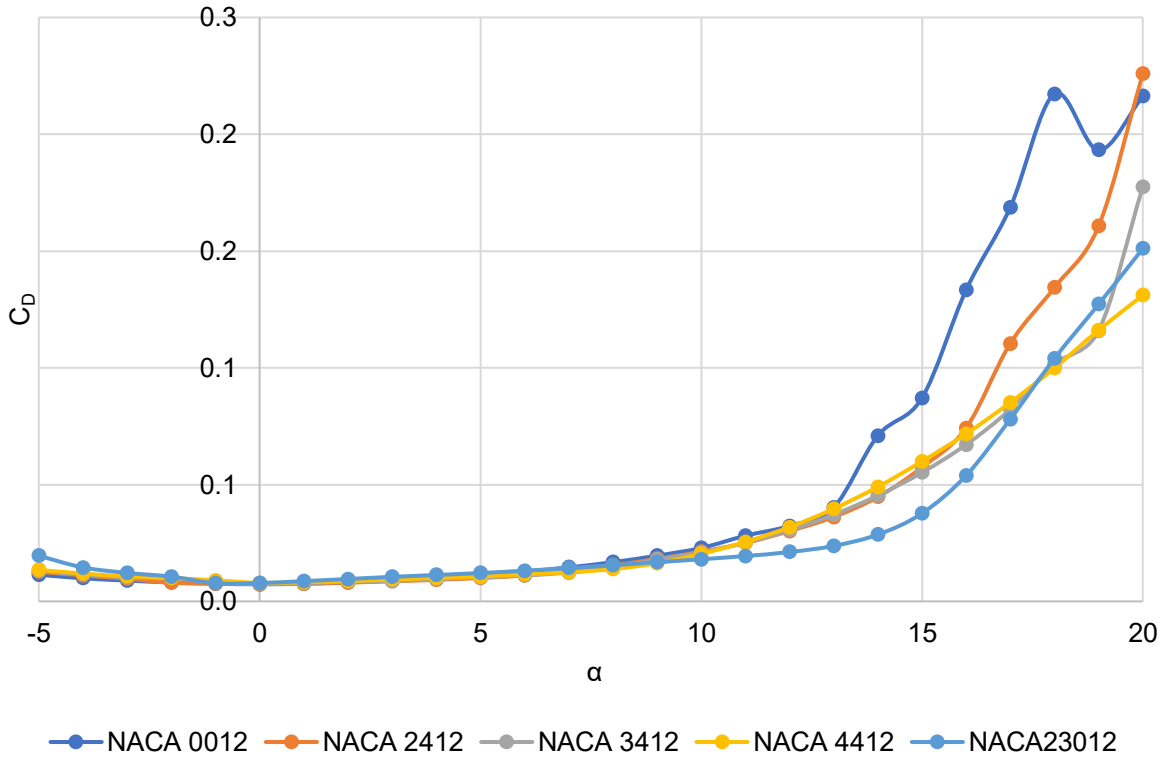


Figura 14. C_D vs ángulo de ataque α

Fuente: Elaboración propia

El incremento del arrastre se mantuvo relativamente reducido desde α = -5° hasta aproximadamente 10°. A partir de este intervalo se observó una tendencia creciente de C_D, que posteriormente se intensificó entre aproximadamente 14° y 16°. Este comportamiento puede relacionarse con el incremento de la separación del flujo y con la formación de regiones de recirculación sobre la superficie del perfil. Cuando el

ángulo de ataque continúa aumentando, la separación del flujo se vuelve más importante y produce un incremento considerable de la resistencia aerodinámica.

Resultados semejantes fueron identificados por estudios realizados mediante dinámica de fluidos computacional. Ali, Mehdi y Naik analizaron los perfiles NACA 0012 y NACA 4412 para diferentes ángulos de ataque y velocidades de flujo orientados a aplicaciones de aerogeneradores. Sus resultados mostraron que las características de presión y velocidad alrededor del perfil cambian considerablemente conforme se modifica el ángulo de ataque, afectando directamente las fuerzas de sustentación y arrastre [23]. Por lo tanto, el comportamiento obtenido en la Figura 14 es consistente con la respuesta aerodinámica esperada cuando los perfiles operan a ángulos de ataque cada vez mayores.

Un comportamiento particularmente importante se presenta en el NACA 2412. Aunque este perfil mantiene valores de C_D intermedios durante una parte considerable del intervalo, a partir de aproximadamente 14° se observa un crecimiento más pronunciado. Entre 19° y 20°, el coeficiente de arrastre alcanza valores cercanos a $C_D = 0.28$, convirtiéndose en el valor máximo registrado entre los perfiles evaluados. Este incremento indica que, a estos ángulos de ataque, el flujo experimenta una separación considerable y, en consecuencia, se produce un aumento de la resistencia aerodinámica.

El comportamiento de la resistencia debe analizarse juntamente con el coeficiente de sustentación obtenido anteriormente. La pérdida aerodinámica no se identifica únicamente por un aumento del C_D, sino por la combinación de un incremento considerable de la resistencia y una reducción o pérdida de crecimiento de C_L. A partir de la comparación de las Figuras 13 y 14, se puede establecer que los primeros indicios de este fenómeno aparecen aproximadamente entre 13° y 15°, aunque el ángulo exacto varía dependiendo del perfil. Esta variación es relevante debido a que la geometría de cada perfil determina la forma en que el flujo permanece adherido a su superficie y, por lo tanto, el momento en que comienza la separación.

El NACA 0012 presenta indicios de pérdida aerodinámica antes que el NACA 4412, debido a que la disminución de C_L se acompaña de un incremento más rápido de C_D. En el caso del NACA 4412, el incremento del arrastre es más gradual y se conserva un nivel elevado de sustentación durante una mayor parte del intervalo analizado. Este comportamiento sugiere que el perfil puede mantener condiciones aerodinámicas favorables durante un rango de operación más amplio.

Una tendencia similar fue encontrada por Mahato et al., quienes realizaron un estudio CFD comparativo entre los perfiles NACA 0012 y NACA 4418 para aplicaciones de aerogeneradores. Identificando diferencias importantes en las características aerodinámicas de ambos perfiles y señalaron ventajas del perfil con curvatura en términos de sustentación y comportamiento de la relación sustentación-resistencia para las condiciones analizadas [24]. Aunque el perfil estudiado en dicha investigación no corresponde exactamente al NACA 4412 utilizado en este trabajo, la comparación resulta relevante debido a que permite observar la influencia que tiene la geometría curvada sobre el desempeño aerodinámico frente a un perfil simétrico.

Asimismo, las investigaciones sobre perfiles empleados en aerogeneradores muestran que el número de Reynolds y el ángulo de ataque tienen una influencia importante sobre el comportamiento de la resistencia. En particular, los estudios realizados sobre el NACA 0012 han mostrado que las características del flujo y la separación pueden modificar significativamente los coeficientes aerodinámicos a diferentes condiciones de operación [24]. Por esta razón, los resultados de C_D obtenidos en esta investigación deben interpretarse considerando las condiciones de simulación utilizadas y no como valores independientes de las condiciones de flujo.

Otro aspecto importante es que un bajo coeficiente de arrastre por sí solo no permite determinar cuál es el perfil óptimo para una pala de aerogenerador. En aplicaciones eólicas es necesario obtener una combinación favorable entre sustentación y resistencia. Por ello, el parámetro C_L/C_D adquiere especial importancia, ya que permite determinar cuánta sustentación puede obtenerse por unidad de resistencia aerodinámica. Un perfil puede presentar un C_D relativamente bajo, pero si también genera poca sustentación, su desempeño global puede no ser superior. De manera

similar, un perfil con una sustentación elevada puede resultar poco eficiente si genera una resistencia excesiva.

En este sentido, los resultados obtenidos en las Figuras 13 y 14 muestran una tendencia favorable para el NACA 4412, debido a que este perfil combina los mayores valores de sustentación con valores de arrastre relativamente bajos durante gran parte del intervalo estudiado. Esta característica es particularmente importante para el diseño de palas de aerogeneradores de baja potencia, donde se busca aprovechar de manera eficiente la energía disponible en el viento. Sin embargo, la selección definitiva del perfil debe realizarse mediante el análisis conjunto de C_L, C_D, C_L/C_D, el ángulo de pérdida y las condiciones de número de Reynolds correspondientes al aerogenerador.

Por lo tanto, los datos permiten sostener que el NACA 4412 presenta el comportamiento más favorable en términos de resistencia aerodinámica, mientras que el NACA 0012 presenta mayores valores de C_D en buena parte de los ángulos elevados. El NACA 2412, por su parte, muestra un incremento particularmente pronunciado del arrastre después de aproximadamente 14°, alcanzando un valor cercano a C_D = 0.28 entre 19° y 20°. La comparación entre los resultados de sustentación y arrastre indica que el NACA 4412 posee características potencialmente favorables para su aplicación en aerogeneradores de baja potencia, debido a su capacidad para generar una elevada sustentación sin un incremento proporcionalmente elevado de la resistencia.

8.5 Polar de resistencia (C_D−C_L)

La Figura 15 presenta la polar de resistencia de los cinco perfiles aerodinámicos evaluados, permitiendo analizar de manera conjunta la variación del coeficiente de sustentación (C_L) con respecto al coeficiente de arrastre (C_D). Este tipo de representación permite identificar las condiciones en las que cada perfil puede generar una mayor sustentación sin que exista un incremento excesivo de la resistencia aerodinámica. Por ello, la polar constituye un elemento importante para valorar el desempeño de los perfiles destinados a aplicaciones eólicas.

A partir de los resultados obtenidos, el NACA 4412 mostró el comportamiento aerodinámico más favorable dentro del conjunto analizado. El perfil alcanzó valores de sustentación cercanos a 1.45, mientras que el incremento de C_D se mantuvo relativamente moderado en comparación con otros perfiles. Esta característica indica que el NACA 4412 puede desarrollar una cantidad considerable de sustentación sin generar un aumento proporcionalmente elevado de la resistencia, condición favorable para el funcionamiento de una pala de aerogenerador.

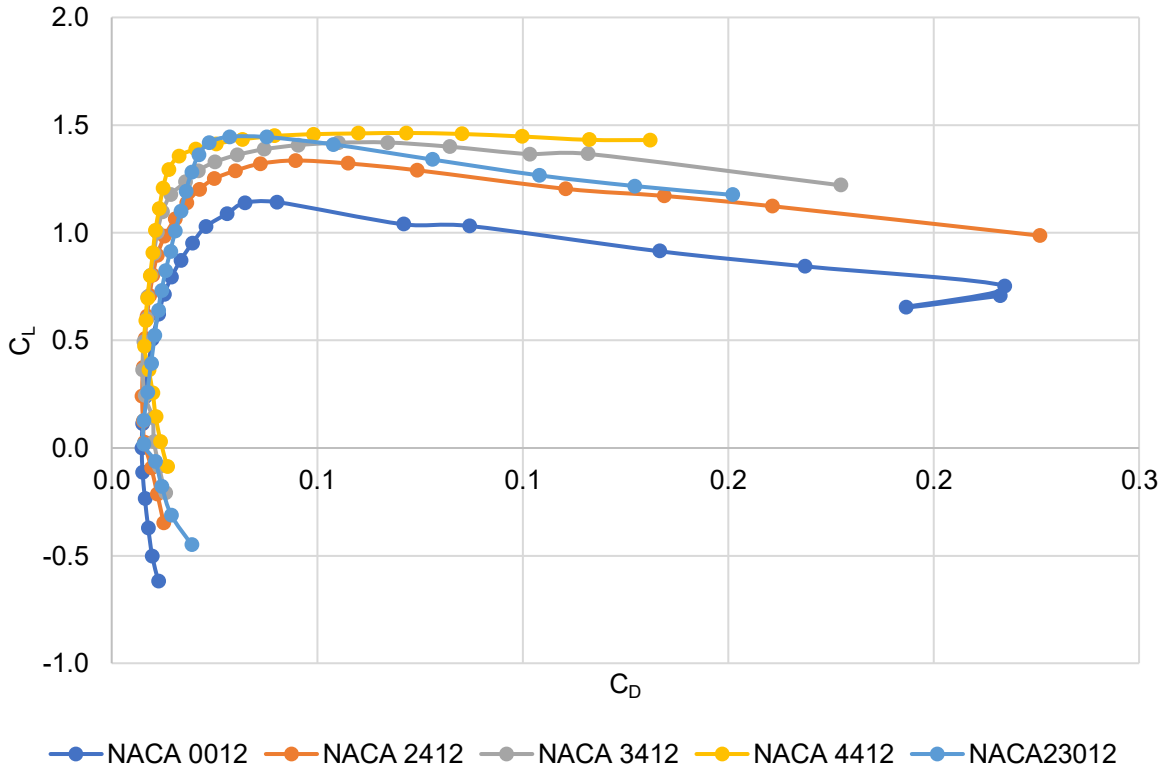


Figura 15. C_D vs C_L

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento del NACA 3412 presentó una tendencia semejante a la observada en el NACA 4412. Sin embargo, su desempeño global resulta ligeramente inferior, debido a que la relación entre sustentación y resistencia no alcanzó los niveles obtenidos por el NACA 4412. Esta diferencia, aunque puede parecer reducida, adquiere importancia cuando se considera que las palas de un aerogenerador

operan de manera continua y que pequeñas variaciones en la eficiencia aerodinámica pueden repercutir en la capacidad de aprovechamiento de la energía disponible en el viento.

Por otro lado, el NACA 2412 presentó un comportamiento intermedio entre los perfiles evaluados. Este perfil alcanzó valores de C_L cercanos a 1.35, aunque requiere un incremento mayor del coeficiente de arrastre para alcanzar dichos niveles de sustentación. Esto significa que, aunque puede proporcionar una sustentación adecuada, su desempeño resulta menos favorable que el del NACA 4412 cuando se consideran simultáneamente las fuerzas de sustentación y resistencia.

El NACA 23012 también desarrolló valores elevados de sustentación; no obstante, el aumento asociado del coeficiente de arrastre redujo su eficiencia aerodinámica respecto al NACA 4412. En este caso, la polar muestra que una mayor sustentación no necesariamente representa un mejor desempeño global, debido a que la resistencia aerodinámica también interviene directamente en la eficiencia del perfil.

En contraste, el NACA 0012 presentó el comportamiento menos favorable de los perfiles estudiados. Su capacidad de generación de sustentación fue inferior, alcanzando un valor de 1.15, mientras que la resistencia aumentó de manera más significativa a medida que se incrementó el ángulo de ataque. Debido a estas características, el perfil presenta una menor capacidad para transformar las condiciones del flujo en una fuerza aerodinámica útil para la generación de potencia.

Los resultados obtenidos guardan relación con investigaciones realizadas sobre perfiles NACA utilizados en aplicaciones eólicas. Oyewola, Labiran e Idowu analizaron los perfiles NACA 0012, NACA 4412 y NACA 6412 y encontraron diferencias importantes en sus características de sustentación y resistencia, asociadas principalmente con la geometría y la curvatura de los perfiles [22]. De manera similar, Mahato et al. realizaron un análisis mediante CFD de los perfiles NACA 0012 y NACA 4418 para aplicaciones de aerogeneradores, identificando un comportamiento aerodinámico favorable de los perfiles con curvatura al considerar

conjuntamente sus características de sustentación y resistencia [24]. Estos resultados respaldan la tendencia observada en la presente investigación, donde los perfiles curvados tienen ventajas respecto al perfil simétrico NACA 0012.

La evaluación de la polar también permite complementar los resultados obtenidos mediante el análisis individual de C_L y C_D. Mientras que el coeficiente de sustentación permite identificar la capacidad del perfil para generar fuerza de sustentación y el coeficiente de arrastre representa la resistencia producida por el flujo, la relación C_L/C_D proporciona una medida más representativa de la eficiencia aerodinámica. En este caso, el NACA 4412 obtuvo el valor máximo de C_L/C_D = 98.5905, superior al registrado por los demás perfiles analizados.

El valor obtenido demuestra que el NACA 4412 logra una relación favorable entre las fuerzas aerodinámicas generadas, ya que produce una elevada sustentación en comparación con la resistencia que experimenta. Esta condición es especialmente relevante para el diseño de palas de aerogeneradores de baja potencia, debido a que una mayor eficiencia aerodinámica puede favorecer el aprovechamiento de la energía cinética disponible en el viento y contribuir a mejorar el desempeño del rotor.

La comparación de las polares de resistencia y de los valores de C_L/C_D permite establecer que el NACA 4412 presentó el desempeño aerodinámico global más favorable entre los cinco perfiles estudiados. Aunque otros perfiles, como el NACA 3412 y el NACA 23012, presentan valores importantes de sustentación, el NACA 4412 consigue un equilibrio más conveniente entre sustentación y resistencia. Por su parte, el NACA 0012 presenta las condiciones menos favorables debido a su menor capacidad de sustentación y al incremento de resistencia observado a ángulos de ataque elevados.

Por lo anterior, los resultados de la Figura 15, complementados con los valores de C_L/C_D, respaldan la selección del NACA 4412 como el perfil candidato para el diseño de la pala del aerogenerador de baja potencia considerado en esta investigación. No obstante, esta selección debe complementarse con las condiciones de operación del aerogenerador, particularmente el número de Reynolds, el rango de velocidades del

viento y la distribución de ángulos de ataque a lo largo de la pala, con el propósito de verificar que el comportamiento observado en la simulación sea adecuado para las condiciones reales de funcionamiento.

8.6 Polar de eficiencia ($C_L/C_D-\alpha$)

La relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre C_L/C_D constituyó uno de los principales parámetros para evaluar la eficiencia aerodinámica de un perfil, debido a que permite determinar la cantidad de sustentación que puede generarse por cada unidad de resistencia aerodinámica. A partir de los resultados obtenidos, se observó que el ángulo de ataque correspondiente a la máxima eficiencia no es el mismo para todos los perfiles analizados, lo que indica que cada geometría presenta un intervalo de operación en el que sus características aerodinámicas son más favorables.

En el caso del NACA 4412, la mayor eficiencia se alcanzó aproximadamente a un ángulo de ataque de 7°, donde se obtuvo la máxima relación C_L/C_D de los cinco perfiles estudiados, con un valor cercano a 99 (Figura 16). Este resultado coincidió con el comportamiento observado previamente en los análisis de sustentación y arrastre, en los cuales el NACA 4412 presentó valores elevados de C_L acompañados de un incremento relativamente reducido de C_D. Por lo tanto, su elevada relación C_L/C_D no depende exclusivamente de una alta generación de sustentación, sino del equilibrio favorable entre sustentación y resistencia.

Además, el NACA 4412 mantuvo valores elevados de eficiencia entre 4° y 9°. Este intervalo resulta relevante para una posible aplicación en una pala de aerogenerador, debido a que demuestra que el desempeño favorable del perfil no se encuentra limitado a un único ángulo de ataque. En condiciones de operación variables, esta característica puede representar una ventaja, ya que el ángulo de ataque local de una sección de la pala puede modificarse como consecuencia de los cambios en la velocidad del viento y en la velocidad de rotación del rotor.

Por otra parte, el NACA 23012 alcanzó su máxima eficiencia entre 10° y 11°. Aunque este perfil presentó una zona de operación favorable, la relación C_L/C_D máxima obtenida fue inferior a la del NACA 4412. Esto demuestra que el ángulo de máxima eficiencia depende directamente de la geometría del perfil y que un perfil que alcance su máximo desempeño a un ángulo de ataque mayor no necesariamente presenta una eficiencia aerodinámica superior.

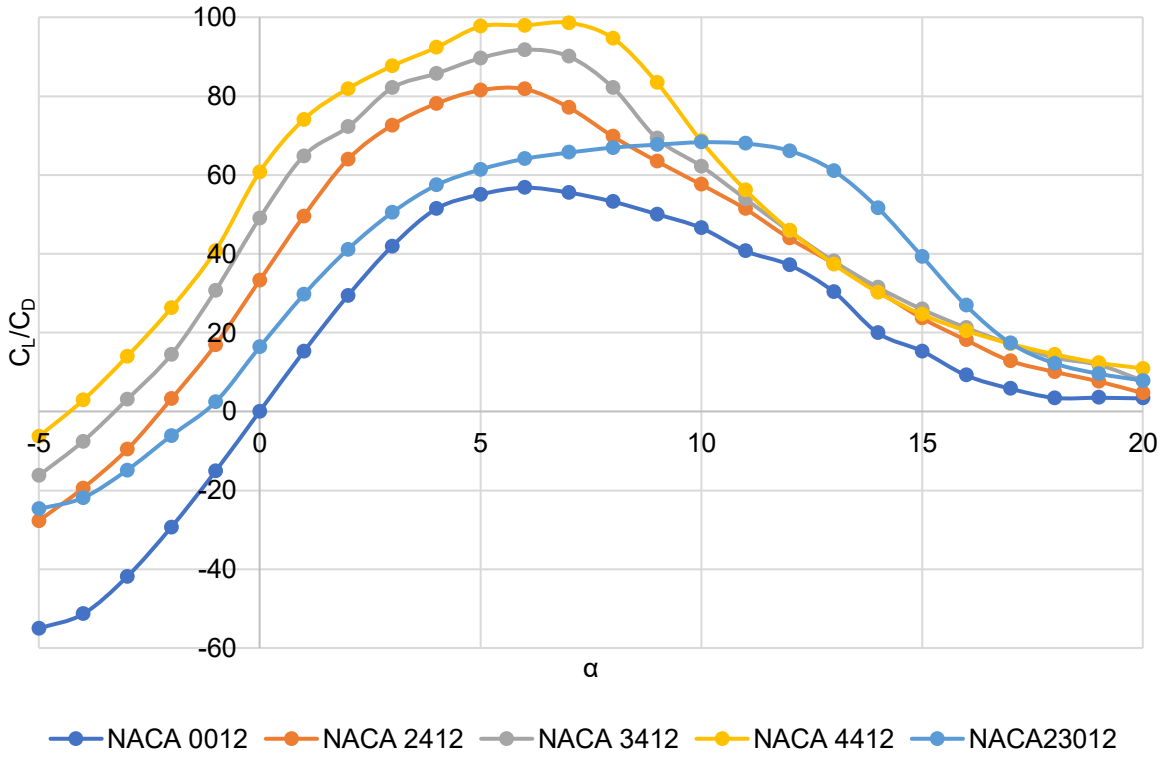


Figura 16. C_L/C_D vs ángulo de ataque α

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos realizados sobre perfiles Mahato et al. realizaron un análisis CFD comparativo de perfiles NACA 0012 y NACA 4418 para aplicaciones de aerogeneradores y señalaron la importancia de considerar conjuntamente la sustentación y la resistencia para determinar el comportamiento aerodinámico de un perfil [24]. Estos estudios respaldan el empleo de la relación C_L/C_D como un parámetro importante para comparar perfiles destinados a aplicaciones eólicas.

A partir de la comparación realizada, el NACA 4412 puede considerarse el perfil más eficiente de los cinco analizados, debido a que presenta la mayor relación C_L/C_D con un valor máximo cercano a 99 alrededor de 7°. Este resultado significa que, bajo las condiciones establecidas en la simulación, el perfil es capaz de generar una cantidad elevada de sustentación utilizando una cantidad relativamente menor de resistencia aerodinámica.

La selección del NACA 4412 también se encuentra respaldada por los resultados obtenidos en los análisis anteriores. En términos de sustentación, este perfil alcanzó el mayor valor de C_L, cercano a 1.45, mientras que en el análisis del coeficiente de arrastre presentó valores relativamente bajos durante una parte considerable del intervalo de ángulos de ataque. Al combinar ambos resultados mediante C_L/C_D, se obtiene una ventaja más evidente respecto a los demás perfiles, debido a que se evalúa simultáneamente la capacidad de producir sustentación y la resistencia generada.

Desde el punto de vista del diseño de una pala para un aerogenerador de baja potencia, estas características hacen del NACA 4412 una alternativa favorable. Una elevada relación C_L/C_D permite que la fuerza aerodinámica útil sea mayor en comparación con la resistencia que se opone al movimiento de la pala. Esto puede contribuir a mejorar el aprovechamiento de la energía eólica y reducir las pérdidas aerodinámicas durante la operación del rotor.

No obstante, la elección definitiva del perfil no debe basarse únicamente en el valor máximo de C_L/C_D. En el diseño de una pala también deben considerarse el número de Reynolds, el rango de velocidades del viento, la distribución de velocidades a lo largo del radio de la pala, el ángulo de ataque de operación, las características de pérdida y las condiciones específicas de funcionamiento del aerogenerador [9]. En consecuencia, el valor máximo obtenido en este análisis representa una condición particularmente favorable del perfil, pero no necesariamente la única condición que deberá utilizarse en el diseño final.

8.7 Comparación global de perfiles

A partir de los resultados obtenidos para los coeficientes de sustentación y arrastre, se realizó una comparación global de los cinco perfiles mediante la relación C_L/C_D, considerada como un parámetro representativo de la eficiencia aerodinámica. Esta relación permite evaluar conjuntamente la capacidad de un perfil para generar sustentación y, al mismo tiempo, limitar la resistencia aerodinámica. Por lo tanto, constituye un criterio importante para la selección de perfiles destinados al diseño de palas de aerogeneradores, debido a que un valor elevado representa una condición aerodinámica favorable para el aprovechamiento de la energía del viento.

Los resultados mostrados en la Figura 17 evidencian diferencias importantes entre los perfiles analizados. El NACA 4412 obtuvo el mayor valor máximo de C_L/C_D, alcanzando 98.5905**,** por lo que se posicionó como el perfil con el mejor desempeño aerodinámico global bajo las condiciones establecidas en esta investigación. Este resultado es consistente con los análisis individuales realizados previamente, en los cuales el NACA 4412 presentó el mayor coeficiente de sustentación, cercano a C_L = 1.45, y valores de C_D relativamente bajos durante una parte considerable del intervalo de ángulos de ataque.

El segundo comportamiento más favorable correspondió al NACA 3412**,** con una relación máxima C_L/C_D = 91.7702. Aunque este perfil presentó un desempeño cercano al NACA 4412, la diferencia observada indica que requiere una mayor resistencia aerodinámica para producir una cantidad equivalente de sustentación. En tercer lugar, se ubicó el NACA 2412, con un valor máximo de C_L/C_D = 81.7674. Estos resultados muestran que, si bien los perfiles NACA 3412 y NACA 2412 presentan características aerodinámicas favorables, su eficiencia global resulta inferior a la obtenida con el NACA 4412 bajo las condiciones analizadas.

El NACA 23012 alcanzó una relación máxima de C_L/C_D = 68.2828, mientras que el NACA 0012 presentó el menor valor, con C_L/C_D = 56.7565). La posición del NACA 0012 resultó congruente con los resultados obtenidos en los análisis anteriores, debido a que este perfil presentó la menor capacidad de generación de sustentación

y un incremento considerable del coeficiente de arrastre a ángulos de ataque elevados. En consecuencia, aunque el perfil simétrico puede presentar características adecuadas para determinadas aplicaciones, dentro de las condiciones establecidas en esta investigación mostró la menor eficiencia aerodinámica de los cinco perfiles evaluados.

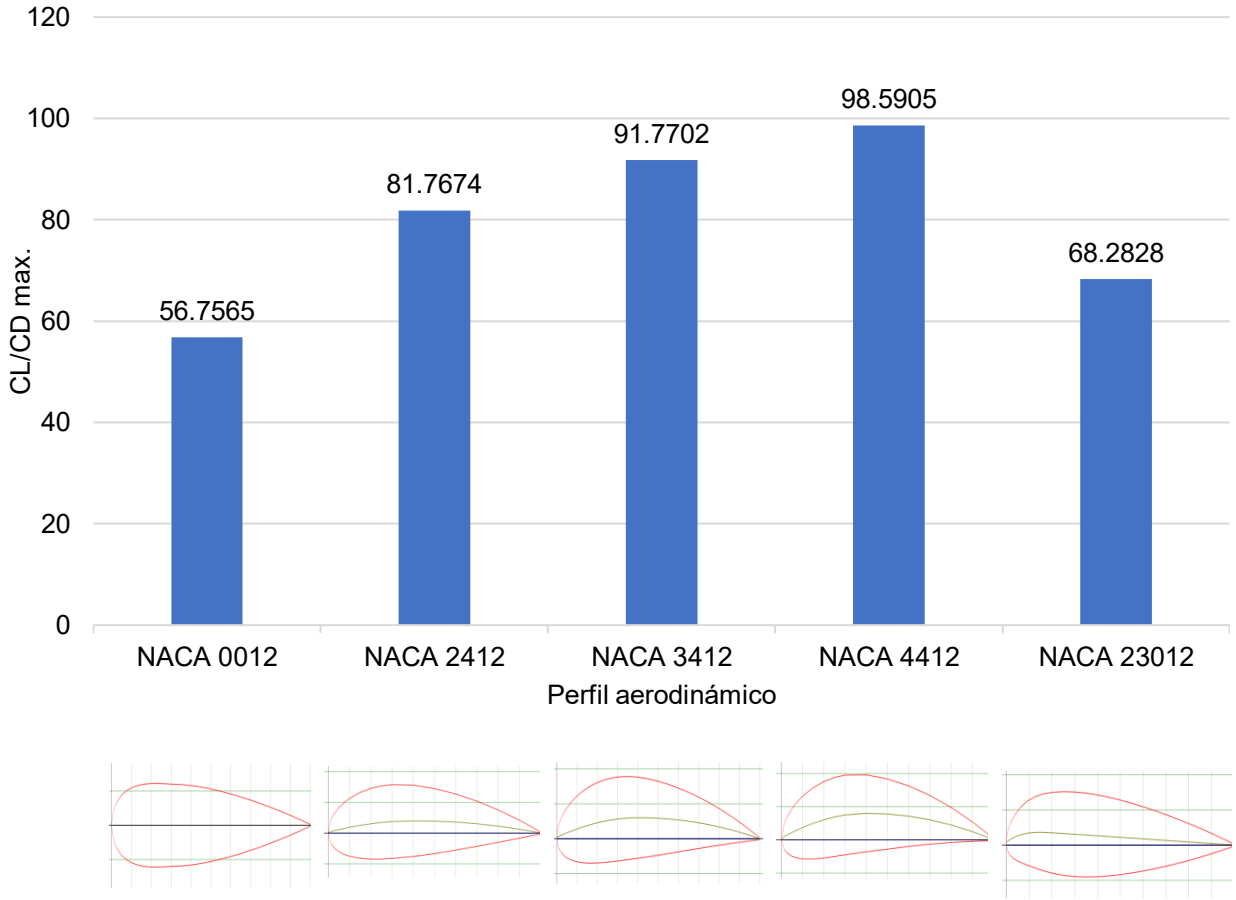


Figura 17. Comparación del C_L/C_D máximo entre perfiles

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre los resultados obtenidos puede relacionarse con la geometría de los perfiles, particularmente con su curvatura. Los perfiles con mayor camber tienden a desarrollar una distribución de presiones que favorece la generación de sustentación, aunque su desempeño final depende también del incremento de resistencia producido por el flujo. En este sentido, los resultados obtenidos muestran

que la geometría del NACA 4412 permite alcanzar un equilibrio favorable entre sustentación y arrastre, lo cual se refleja directamente en el mayor valor de C_L/C_D.

Esta tendencia coincide con investigaciones previas enfocadas en la comparación de perfiles aerodinámicos para aplicaciones eólicas, un estudio sobre aerogeneradores de pequeña escala comparó experimentalmente rotores diseñados con los perfiles NACA 0012 y NACA 4412. Los resultados mostraron que el aerogenerador equipado con el perfil NACA 4412 presentó mayores coeficientes de potencia, asociados con una relación sustentación-arrastre más favorable que la obtenida con el NACA 0012 [26]. Esta investigación proporciona un antecedente particularmente relevante para el presente trabajo, debido a que establece una relación directa entre la selección del perfil, la eficiencia aerodinámica y el desempeño de un aerogenerador de pequeña escala.

De manera adicional, investigaciones más recientes continúan mostrando el potencial del NACA 4412 en aplicaciones de generación eólica. Augusto et al. evaluaron experimentalmente un perfil NACA 4412 para aplicaciones de aerogeneradores de eje horizontal mediante mediciones de presión y análisis de la relación sustentación-arrastre. Encontraron que el perfil NACA 4412 presentó condiciones favorables de eficiencia aerodinámica en determinados intervalos de ángulo de ataque y condiciones de velocidad, demostrando la importancia de mantener una relación adecuada entre sustentación y resistencia para mejorar el desempeño de la turbina [27].

De igual manera, investigaciones recientes sobre aerogeneradores de pequeña escala han empleado el NACA 4412 como perfil base debido a sus características aerodinámicas favorables. Robin et al. evaluaron experimentalmente un aerogenerador de pequeña escala equipado con palas NACA 4412 y encontraron que esta configuración puede utilizarse como referencia para el desarrollo de modificaciones orientadas a mejorar el desempeño energético del rotor [28]. Estos resultados complementan los obtenidos en la presente investigación y muestran que la selección del NACA 4412 como perfil candidato tiene sustento tanto en el análisis aerodinámico como en aplicaciones experimentales de aerogeneradores.

La comparación global también permite observar que el perfil con mayor sustentación no necesariamente es el más eficiente, ya que la eficiencia depende de la relación existente entre sustentación y resistencia. En el caso del presente estudio, el NACA 4412 no solamente alcanzó el mayor C_L, sino que también mantuvo valores de C_D relativamente bajos en gran parte del intervalo analizado. Como resultado, estas dos características se combinaron para producir la mayor relación C_L/C_D entre los cinco perfiles.

A partir de los valores obtenidos, el NACA 4412 superó al NACA 3412 en aproximadamente 7.44%, al NACA 2412 en 20.57%, al NACA 23012 en 44.39% y al NACA 0012 en 73.71% en términos de su relación máxima C_L/C_D. Estas diferencias permiten identificar con mayor claridad la ventaja relativa del NACA 4412 dentro del conjunto analizado. En particular, la diferencia respecto al NACA 0012 evidencia el efecto que puede tener la selección de un perfil curvado frente a uno simétrico cuando el objetivo es maximizar la eficiencia aerodinámica.

9. Conclusiones

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento aerodinámico de los perfiles NACA 0012, 2412, 3412, 4412 y 23012 para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia mediante el análisis de los coeficientes de sustentación (C_L), arrastre (C_D) y la relación sustentación-arrastre (C_L/C_D).

Se determinaron las características aerodinámicas de los cinco perfiles seleccionados mediante el análisis de los coeficientes C_L, C_D y C_L/C_D para diferentes ángulos de ataque y números de Reynolds. Los resultados mostraron diferencias importantes entre los perfiles evaluados, evidenciando que la geometría influye directamente en la capacidad de generar sustentación y en el comportamiento de la resistencia aerodinámica. Los perfiles con mayor curvatura presentaron, en general, mejores niveles de sustentación que el perfil simétrico NACA 0012. Asimismo, se observó una tendencia general de mejora del desempeño aerodinámico conforme

aumentó el número de Reynolds, reflejada en incrementos de la relación C_L/C_D y reducciones del coeficiente de arrastre mínimo.

La comparación entre perfiles permitió identificar que el ángulo de ataque tiene una influencia significativa sobre el comportamiento aerodinámico. En todos los perfiles se observó un incremento progresivo del coeficiente de sustentación conforme aumentó el ángulo de ataque, hasta alcanzar un valor máximo asociado al inicio de la pérdida aerodinámica. Asimismo, el coeficiente de arrastre aumentó con el incremento del ángulo de ataque, aunque con diferente intensidad según la geometría analizada. Estos resultados confirman que la evaluación simultánea de C_L y C_D es necesaria para comprender el desempeño real de un perfil aerodinámico.

El análisis comparativo permitió identificar al perfil NACA 4412 como la alternativa de mejor desempeño aerodinámico bajo las condiciones de estudio. Este perfil alcanzó el mayor coeficiente de sustentación máximo (C_L = 1.4634) y la mayor relación sustentación-arrastre (C_L/C_D = 98.5905), superando a los perfiles NACA 3412, NACA 2412, NACA 23012 y NACA 0012. Además, mantuvo el mejor desempeño relativo en todos los números de Reynolds estudiados, lo que evidencia la estabilidad de su comportamiento aerodinámico dentro del intervalo analizado.

Los resultados demostraron que la curvatura del perfil constituye uno de los factores más importantes en el desempeño aerodinámico. A medida que aumentó el camber de los perfiles analizados, se observó una tendencia hacia mayores valores de sustentación y una mejora en la eficiencia aerodinámica. Esta relación fue particularmente evidente al comparar el perfil simétrico NACA 0012 con los perfiles curvados NACA 2412, 3412 y 4412. Por lo tanto, la geometría del perfil debe considerarse un criterio fundamental durante la selección preliminar de perfiles para aplicaciones eólicas.

La hipótesis de investigación fue aceptada. Los resultados evidenciaron diferencias en el comportamiento aerodinámico de los perfiles NACA 0012, 2412, 3412, 4412 y 23012 cuando fueron evaluados bajo condiciones equivalentes de operación. Asimismo, se corroboró que los perfiles con curvatura positiva presentan mayores

niveles de sustentación y mejor eficiencia aerodinámica que el perfil simétrico estudiado. En particular, el NACA 4412 mostró el mejor desempeño global, tal como se planteó inicialmente.

La principal limitación de esta investigación radica en que el análisis se realizó a partir de datos aerodinámicos bidimensionales, por lo que los resultados representan el comportamiento de una sección de perfil y no el desempeño completo de una pala tridimensional. Asimismo, las conclusiones corresponden exclusivamente a los rangos de número de Reynolds y ángulos de ataque considerados. El análisis comparativo principal se llevó a cabo a partir de valores promedio de los números de Reynolds evaluados; por ello, aunque este procedimiento permitió identificar tendencias generales de desempeño y facilitar la comparación entre perfiles, no se analizaron en detalle las diferencias individuales asociadas a cada número de Reynolds. Finalmente, el estudio no incluyó validación experimental en túnel de viento ni pruebas sobre un rotor físico, por lo que los resultados deben interpretarse como una evaluación preliminar para fines de diseño.

Como trabajo futuro se recomienda incorporar análisis aerodinámicos tridimensionales y metodologías de diseño basadas en la teoría Blade Element Momentum (BEM) para desarrollar una geometría completa de pala a partir del perfil seleccionado. Asimismo, sería conveniente evaluar el comportamiento del NACA 4412 mediante simulaciones CFD de mayor complejidad y realizar validaciones experimentales que permitan contrastar los resultados obtenidos. Se sugiere analizar el desempeño energético de un aerogenerador diseñado con este perfil bajo condiciones reales de operación.

10. Referencias

[1] F. J. Díaz Canul, N. Rosado Hau, J. O. Aguilar Aguilar, G. Becerra Núñez y O. A. Jaramillo Salgado, “Diseño de un rotor Darrieus tipo Phi para aerogeneradores de baja potencia,” *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 25, no. 4, pp. 1-12, Oct. 2024, doi: 10.22201/fi.25940732e.2024.25.4.028.

[2] J. C. Marín Aguilar, M. Sánchez Pozos, J. C. Palacios González y B. M. López Rebollar, “Evaluación del coeficiente de potencia con esquemas DMST para rotores Darrieus con perfiles biomimetizados,” *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 26, no. 1, pp. 1-12, Jan. 2025, doi: 10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.004.

[3] O. López Moles, *“Estudio Aerodinámico de un Perfil NACA,”* Trabajo Fin de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España, 2021. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/2117/357232. [Accedido: 20-sep-2026].

[4] V. G. Kanimozhi, “Analysis of Airfoil Flow Pattern Using CFD,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Confcall 2018, vol. 6, no. 14, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.ijert.org/analysis-of-airfoil-flow-pattern-using-cfd. [Accedido: 20-sep-2026].

[5] J. P. Murcia y Á. Pinilla, “CFD Analysis of Blunt Trailing Edge Airfoils Obtained with Several Modification Methods,” *Revista de Ingeniería*, no. 33, pp. 14-24, 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121022658003. [Accedido: 20-sep-2026].

[6] R. Zhang, “Numerical Analysis of Aerodynamic Performance Characteristics of NACA 2412 and NACA 4412 at Re = 4000000,” *Applied and Computational Engineering*, vol. 130, pp. 9-22, 2025, doi: 10.54254/2755-2721/130/2025.20287.

[7] M. Hasib et al., “CFD Analysis of NACA Airfoils for Wind Turbine and Aerospace Applications at Low Reynolds Numbers,” *Crystal Journal of Materials Science & Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 1-11, 2026.

[8] E. J. López, A. E. Zappa y C. A. Wild Cañón, “*Determinación de las características aerodinámicas de perfiles para aerogeneradores de baja potencia utilizando dinámica de fluidos computacional*,” en XXIII Congreso de

Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2017), 2017. [En línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/95072. [Accedido: 20-sep-2026].

[9] S. Reinoso Salazar, B. Castillo Paguay, B. Carrasco Paredes y J. Mera Cruz, “Diseño y Fabricación de un Generador Eólico de Baja Capacidad para Sectores sin Cableado Eléctrico,” *Polo del Conocimiento*, vol. 9, no. 7, pp. 2304-2324, 2024, doi: 10.23857/pc.v9i7.7628.

[10] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2009.

[11] J. F. Manwell, J. G. McGowan y A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2009.

[12] I. H. Abbott y A. E. Von Doenhoff, *Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data*. New York, NY, USA: Dover Publications, 1959.

[13] “Perfil alar,” Wikipedia, La enciclopedia libre, 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar. [Accedido: 22-sep-2026].

[14] A. Cuadrado, “¿Por qué vuelan los aviones?”, Dikoin Engineering, 10-sep-2020. [En línea]. Disponible en: https://dikoin.com/2020/09/10/por-que-vuelan-los-aviones/?lang=es. [Accedido: 22-sep-2026].

[15] J. F. Marchman III, *Aerodynamics and Aircraft Performance*. Blacksburg, VA, USA: University Libraries at Virginia Tech, 2004. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/10919/96525. [Accedido: 22-sep-2026].

[16] Wikimedia Commons, “NACA airfoils, 4-series, vierstellige NACA-Profile. NACA 4412,” jun. 2008. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NACA_4412.svg. [Accedido: 22-sep-2026].

[17] “Airfoil Geometry,” ScienceDirect Topics, Elsevier. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/airfoil-geometry. [Accedido: 22-sep-2026].

[18] Wikimedia Commons, “Ángulo de ataque de un ala,” 20-jul-2007. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%C3%81ngulo_de_ataque_de_un_ala.jpg. [Accedido: 22-sep-2026].

[19] NASA, “*NACA Airfoils. National Advisory Committee for Aeronautics Airfoils*,” 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.nasa.gov/image-article/naca-airfoils/. [Accedido: 20-sep-2026].

[20] N. Jenkins, T. Burton, E. Bossanyi, D. Sharpe y M. Graham, *Wind Energy Handbook*, 3rd ed. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2021, doi: 10.1002/9781119451143.

[21] M. Drela y H. Youngren, *XFOIL 6.9 User Primer*. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2013. [En línea]. Disponible en: https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/. [Accedido: 20-sep-2026].

[22] O. M. Oyewola, E. T. Idowu y M. J. Labiran, “Combined Effect of Surface Coating and Angle of Attack on the Aerodynamic Performance of NACA 0012, 4412, and 6412 Airfoils,” *Next Materials*, vol. 10, art. no. 101531, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.nxmate.2025.101531.

[23] M. H. Ali, S. N. Mehdi y M. T. Naik, “Comparative Analysis of Low Velocity Vertical Axis Wind Turbine NACA Blades at Different Attacking Angles in CFD,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pt. 3, pp. 2091-2100, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.119.

[24] A. Mahato, R. K. Singh, R. Barnwal y S. C. Rana, “Aerodynamic Characteristics of NACA 0012 vs. NACA 4418 Airfoil for Wind Turbine Applications Through CFD Simulation,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 119, pp. 237-246, 2026, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.439.

[25] B. S. Patil y H. R. Thakare, “Computational Fluid Dynamics Analysis of Wind Turbine Blade at Various Angles of Attack and Different Reynolds Number,” *Procedia Engineering*, vol. 127, pp. 1363-1369, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.495.

[26] M. E. Nakhchi, S. W. Naung y M. Rahmati, “High-Resolution Direct Numerical Simulations of Flow Structure and Aerodynamic Performance of Wind Turbine Airfoil at Wide Range of Reynolds Numbers,” *Energy*, vol. 225, art. no. 120261, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120261.

[27] G. L. Augusto, W. H. Chen, J. A. Gonzaga y L. A. Gan Lim, “Evaluation of NACA4412 Smooth and Denticle-Covered Airfoils Using Blade Element Momentum Theory,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1500, no. 1, art. no. 012009, May 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1500/1/012009.

[28] H. M. Robin, M. M. Ahmed, Md. R. I. Sarker, Md. N. Hasan y M. H. Masud, “Aerodynamic Performance Investigation of a Biomimetic-Based Small-Scale Horizontal-Axis Wind Turbine: An Experimental Analysis,” *Wind Energy*, vol. 28, no. 7, art. no. e70031, Jul. 2025, doi: 10.1002/we.70031.

11. Anexos

NACA 0012

REYNOLDS 200000				REYNOLDS 300000				REYNOLDS 400000				REYNOLDS 500000				REYNOLDS 600000				Promedio			
α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD
-5	-0.6197	0.0131	-47.4502	-5	-0.6262	0.0117	-53.4757	-5	-0.6320	0.0109	-57.8225	-4	-0.4800	0.0090	-53.4521	-5	-0.6028	0.0098	-61.4475	-5	-0.6202	0.0114	-55.0490
-4	-0.5360	0.0118	-45.5782	-4	-0.5388	0.0105	-51.1195	-4	-0.5070	0.0097	-52.3760	-3	-0.3334	0.0079	-42.4713	-4	-0.4590	0.0084	-54.3839	-4	-0.5042	0.0099	-51.3820
-3	-0.4466	0.0110	-40.4896	-3	-0.3973	0.0096	-41.2565	-3	-0.3576	0.0086	-41.6298	-2	-0.2100	0.0069	-30.2594	-3	-0.3196	0.0073	-43.6612	-3	-0.3709	0.0089	-41.9017
-2	-0.3086	0.0107	-28.9765	-2	-0.2373	0.0088	-27.1200	-2	-0.2157	0.0076	-28.3816	-1	-0.1036	0.0064	-16.2893	-2	-0.2090	0.0065	-32.1045	-2	-0.2361	0.0081	-29.3684
-1	-0.1457	0.0103	-14.0909	-1	-0.1062	0.0080	-13.2916	-1	-0.1030	0.0069	-14.8844	0	0.0000	0.0062	0.0000	-1	-0.1046	0.0060	-17.3754	-1	-0.1126	0.0075	-15.1863
0	0.0000	0.0102	0.0000	0	0.0000	0.0077	0.0000	0	0.0000	0.0067	0.0000	1	0.1036	0.0064	16.2893	0	0.0000	0.0059	0.0000	0	0.0000	0.0073	0.0000
1	0.1457	0.0103	14.0909	1	0.1062	0.0080	13.2916	1	0.1030	0.0069	14.8844	2	0.2100	0.0069	30.2594	1	0.1046	0.0060	17.3754	1	0.1126	0.0075	15.1863
2	0.3086	0.0106	29.0038	2	0.2373	0.0087	27.1510	2	0.2157	0.0076	28.3816	3	0.3334	0.0079	42.4713	2	0.2090	0.0065	32.1045	2	0.2361	0.0081	29.3800
3	0.4464	0.0110	40.4714	3	0.3973	0.0096	41.2565	3	0.3576	0.0086	41.6298	4	0.4800	0.0090	53.4521	3	0.3196	0.0073	43.6612	3	0.3709	0.0089	41.8981
4	0.5359	0.0118	45.5697	4	0.5387	0.0105	51.1101	4	0.5071	0.0097	52.3864	6	0.7219	0.0117	61.8595	4	0.4590	0.0084	54.3839	4	0.5041	0.0099	51.3804
5	0.6196	0.0131	47.4426	5	0.6260	0.0117	53.4586	5	0.6318	0.0109	57.8042	7	0.8043	0.0131	61.3969	5	0.6029	0.0098	61.4577	5	0.6201	0.0114	55.0408
6	0.6972	0.0152	45.9591	6	0.7079	0.0134	52.9865	6	0.7158	0.0124	57.9595	8	0.8832	0.0150	58.9193	6	0.7269	0.0112	65.0179	6	0.7139	0.0127	56.7565
7	0.7728	0.0178	43.4890	7	0.7867	0.0154	51.2508	7	0.7964	0.0140	56.7641	9	0.9611	0.0172	55.7806	7	0.8097	0.0125	64.6725	7	0.7940	0.0146	55.5147
8	0.8475	0.0211	40.2231	8	0.8613	0.0180	47.9566	8	0.8763	0.0159	55.1132	10	1.0452	0.0192	54.4943	8	0.8921	0.0140	63.8583	8	0.8721	0.0168	53.2141
9	0.9264	0.0252	36.7182	9	0.9359	0.0213	43.9390	9	0.9543	0.0183	52.2046	12	1.1664	0.0269	43.3767	9	0.9732	0.0158	61.5171	9	0.9502	0.0196	50.0319
10	1.0003	0.0308	32.5301	10	1.0139	0.0240	42.1931	10	1.0280	0.0215	47.8585	13	1.2021	0.0313	38.3567	10	1.0467	0.0188	55.6755	10	1.0268	0.0228	46.5503
11	1.0545	0.0370	28.5386	11	1.0765	0.0295	36.4421	11	1.0977	0.0248	44.2443	15	1.1537	0.0590	19.5443	11	1.1274	0.0211	53.5074	11	1.0890	0.0281	40.6831
12	1.0753	0.0446	24.0883	12	1.1194	0.0349	32.1021	12	1.1357	0.0311	36.5059	16	1.0763	0.0869	12.3912	12	1.1946	0.0241	49.6302	12	1.1383	0.0323	37.1407
13	1.0280	0.0583	17.6450	13	1.1223	0.0431	26.0274	13	1.1573	0.0372	31.1102	19	0.2951	0.0757	3.8967	13	1.2019	0.0311	38.6961	13	1.1423	0.0402	30.3671
14	0.7292	0.1357	5.3748	14	1.0378	0.0644	16.1249	14	1.1540	0.0471	24.5115	20	0.3150	0.0882	3.5706	14	1.2352	0.0367	33.6750	14	1.0391	0.0709	19.9216
15	0.6997	0.1696	4.1246	15	0.9487	0.0945	10.0349	15	1.1274	0.0631	17.8584					15	1.2270	0.0491	25.0153	15	1.0313	0.0871	15.3155
16	0.6987	0.1897	3.6824	16	0.7022	0.1863	3.7684	18	0.7555	0.2135	3.5385					16	1.1780	0.0703	16.7663	16	0.9138	0.1333	9.1521
17	0.7227	0.2034	3.5538	17	0.7412	0.1965	3.7714	19	0.7731	0.2328	3.3214					17	1.0672	0.1062	10.0518	17	0.8437	0.1687	5.7923
18	0.7482	0.2202	3.3983	18	0.7451	0.2181	3.4163	20	0.8029	0.2464	3.2583					20	0.8041	0.2457	3.2722	18	0.7519	0.2173	3.4510
19	0.7713	0.2337	3.3001	19	0.7769	0.2306	3.3685													19	0.6541	0.1932	3.4717
20	0.8073	0.2522	3.2015	20	0.8055	0.2485	3.2420													20	0.7070	0.2162	3.3089

NACA 2412

REYNOLDS 200000				REYNOLDS 300000				REYNOLDS 400000				REYNOLDS 500000				REYNOLDS 600000				Promedio			
α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD
-5	-0.4426	0.0170	-26.0967	-5	-0.3667	0.0137	-26.8056	-5	-0.3211	0.0118	-27.1429	-5	-0.3068	0.0108	-28.4337	-5	-0.3005	0.0100	-30.1707	-5	-0.3475	0.0126	-27.7299
-4	-0.2860	0.0149	-19.2334	-4	-0.2204	0.0120	-18.3820	-4	-0.1903	0.0104	-18.3687	-4	-0.1896	0.0095	-20.0211	-4	-0.1892	0.0089	-21.2823	-4	-0.2151	0.0111	-19.4575
-3	-0.1304	0.0131	-9.9770	-2	0.0235	0.0090	2.6228	-3	-0.0803	0.0092	-8.7473	-3	-0.0806	0.0085	-9.5385	-3	-0.0826	0.0080	-10.3509	-3	-0.0935	0.0097	-9.6534
-1	0.1154	0.0101	11.4257	-1	0.1229	0.0079	15.5767	-2	0.0260	0.0080	3.2338	-2	0.0258	0.0076	3.4127	-2	0.025	0.0073	3.4483	-2	0.0251	0.0080	3.1794
0	0.2802	0.0100	28.0200	0	0.2345	0.0078	29.9107	-1	0.1270	0.0071	17.9379	-1	0.1288	0.0067	19.2814	-1	0.1297	0.0064	20.1398	-1	0.1248	0.0076	16.8723
1	0.4219	0.0098	42.9633	1	0.4009	0.0082	48.7713	0	0.2269	0.0068	33.3186	0	0.2293	0.0063	36.4547	0	0.2319	0.0060	38.5216	0	0.2406	0.0074	33.2451
2	0.5159	0.0101	51.0792	2	0.5150	0.0085	60.3751	1	0.3617	0.0073	49.6841	1	0.3441	0.0066	51.9005	1	0.3376	0.0062	54.5396	1	0.3732	0.0076	49.5717
3	0.6111	0.0107	57.0056	3	0.6099	0.0091	67.3179	2	0.5152	0.0077	66.7358	2	0.5035	0.0072	70.1253	2	0.4832	0.0068	71.3737	2	0.5066	0.0081	63.9378
4	0.7056	0.0114	61.6783	4	0.7046	0.0097	72.3409	3	0.6104	0.0082	74.4390	3	0.6117	0.0076	80.0654	3	0.6129	0.0073	84.1896	3	0.6112	0.0086	72.6035
5	0.7996	0.0123	65.2202	5	0.7991	0.0106	75.7441	4	0.7055	0.0088	79.8981	4	0.7074	0.0082	85.9538	4	0.7089	0.0078	90.5364	4	0.7064	0.0092	78.0815
6	0.8919	0.0133	67.3132	6	0.8929	0.0116	77.2405	5	0.8007	0.0096	83.4063	5	0.8024	0.0090	89.0566	5	0.8046	0.0086	93.8856	5	0.8013	0.0100	81.4626
7	0.9770	0.0148	66.1924	7	0.9795	0.0133	73.5913	6	0.8952	0.0107	83.9775	6	0.8970	0.0101	88.5489	6	0.8983	0.0098	91.7569	6	0.8951	0.0111	81.7674
8	1.0463	0.0178	58.8801	8	1.0567	0.0160	65.8791	7	0.9831	0.0125	78.5851	7	0.9859	0.0120	82.2269	7	0.988	0.0116	85.0258	7	0.9827	0.0128	77.1243
9	1.1055	0.0217	51.0624	9	1.1241	0.0194	58.0930	8	1.0640	0.0151	70.6977	8	1.0703	0.0143	74.9510	8	1.0752	0.0137	78.4245	8	1.0625	0.0154	69.7665
10	1.1528	0.0259	44.4410	10	1.1832	0.0225	52.5166	9	1.1418	0.0176	64.8014	9	1.1523	0.0166	69.5413	9	1.1606	0.0158	73.6421	9	1.1369	0.0182	63.4280
11	1.1994	0.0310	38.6778	11	1.2259	0.0267	45.9827	10	1.2070	0.0206	58.6492	10	1.2277	0.0190	64.7521	10	1.2348	0.0183	67.4017	10	1.2011	0.0213	57.5521
12	1.2429	0.0372	33.4203	12	1.2532	0.0330	37.9758	11	1.2467	0.0246	50.6995	11	1.2813	0.0220	58.1880	11	1.3022	0.0206	63.3366	11	1.2511	0.0250	51.3769
13	1.2737	0.0442	28.7972	13	1.2878	0.0391	32.9529	12	1.2937	0.0286	45.2185	12	1.3096	0.0271	48.3962	12	1.341	0.0246	54.4900	12	1.2881	0.0301	43.9001
14	1.2825	0.0550	23.3097	14	1.3058	0.0474	27.5718	13	1.3099	0.0360	36.4266	13	1.3455	0.0324	41.5663	13	1.3842	0.0289	47.8300	13	1.3202	0.0361	37.5146
15	1.2290	0.0725	16.9564	15	1.2870	0.0613	21.0122	14	1.3287	0.0441	30.1293	14	1.3744	0.0391	35.1239	14	1.3859	0.0378	36.6253	14	1.3355	0.0447	30.5520
16	1.1372	0.0991	11.4764	16	1.2601	0.0773	16.3099	15	1.3368	0.0543	24.6188	15	1.3602	0.0515	26.4014	15	1.3958	0.0476	29.3544	15	1.3218	0.0574	23.6686
17	0.8557	0.2020	4.2370	17	1.1959	0.1023	11.6856	16	1.3258	0.0681	19.4770	16	1.3392	0.0664	20.1778	16	1.3893	0.0604	22.9978	16	1.2903	0.0742	18.0878
18	0.8714	0.2198	3.9638	20	0.9201	0.2493	3.6912	17	1.2892	0.0870	14.8252	17	1.3145	0.0837	15.7124	17	1.364	0.0772	17.6707	17	1.2039	0.1104	12.8262
19	0.9004	0.2331	3.8624					18	1.2205	0.1136	10.7410	18	1.2678	0.1062	11.9401	18	1.3246	0.0978	13.5481	18	1.1711	0.1344	10.0483
20	0.9159	0.2517	3.6384					19	1.1328	0.1492	7.5910	19	1.1913	0.1374	8.6716	19	1.269	0.1228	10.3305	19	1.1234	0.1606	7.6139
								20	0.9265	0.2453	3.7773					20	1.1827	0.1572	7.5250	20	0.9863	0.2259	4.6580

NACA 3412

REYNOLDS 200000				REYNOLDS 300000				REYNOLDS 400000				REYNOLDS 500000				REYNOLDS 600000				Promedio			
α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD
-5	-0.2829	0.0182	-15.5099	-5	-0.2092	0.0141	-14.8369	-5	-0.1862	0.0120	-15.5167	-5	-0.1836	0.0108	-16.9686	-5	-0.1856	0.0101	-18.4493	-5	-0.2095	0.0130	-16.2563
-4	-0.1324	0.0159	-8.3428	-4	-0.0798	0.0123	-6.4931	-4	-0.0727	0.0106	-6.8520	-4	-0.0753	0.0097	-7.7629	-4	-0.0774	0.0091	-8.5055	-4	-0.0875	0.0115	-7.5913
-3	0.0116	0.0139	0.8375	-3	0.0346	0.0109	3.1801	-3	0.0352	0.0096	3.6782	-3	0.0332	0.0088	3.7557	-3	0.0318	0.0084	3.8038	-3	0.0293	0.0103	3.0511
-2	0.1337	0.0119	11.2353	-2	0.1427	0.0097	14.6811	-1	0.2460	0.0076	32.3259	-2	0.1419	0.0082	17.3684	-1	0.2486	0.0072	34.7692	-2	0.1394	0.0099	14.4283
-1	0.2308	0.0101	22.9652	-1	0.2410	0.0082	29.3187	0	0.3451	0.0070	49.2297	-1	0.2478	0.0073	33.8525	0	0.3488	0.0063	55.2773	-1	0.2428	0.0081	30.6463
0	0.4057	0.0098	41.4826	0	0.3692	0.0080	46.3819	1	0.5019	0.0074	67.8243	0	0.3441	0.0065	52.6953	1	0.4727	0.0065	73.2868	0	0.3626	0.0075	49.0134
1	0.5024	0.0100	50.4418	1	0.5023	0.0083	60.8848	2	0.5994	0.0079	76.0660	1	0.4919	0.0069	71.7055	2	0.6003	0.0069	86.6234	1	0.4942	0.0078	64.8287
2	0.6009	0.0105	57.4474	2	0.5998	0.0088	68.4703	3	0.6988	0.0085	82.4057	3	0.6992	0.0079	88.8437	3	0.7002	0.0074	94.1129	2	0.6001	0.0085	72.1518
3	0.7018	0.0112	62.8290	4	0.8009	0.0101	79.0622	4	0.8004	0.0091	87.5711	4	0.8013	0.0085	94.6045	4	0.8025	0.0080	100.1873	3	0.7000	0.0087	82.0478
4	0.8030	0.0120	67.0844	5	0.9016	0.0109	82.8676	5	0.9020	0.0098	91.7599	5	0.9035	0.0092	98.7432	5	0.9053	0.0087	104.4175	4	0.8016	0.0095	85.7019
5	0.9035	0.0129	70.3113	6	0.9995	0.0117	85.2816	6	1.0017	0.0107	94.0563	6	1.0041	0.0100	100.6112	6	1.0068	0.0095	106.0906	5	0.9032	0.0103	89.6199
6	0.9997	0.0137	72.8114	7	1.0925	0.0128	85.4183	7	1.0958	0.0118	92.7073	7	1.0983	0.0113	97.3670	7	1.1005	0.0109	100.6862	6	1.0024	0.0111	91.7702
7	1.0904	0.0147	74.0258	8	1.1723	0.0148	79.3703	8	1.1761	0.0140	83.7678	8	1.1795	0.0136	86.7918	8	1.1823	0.0133	89.1629	7	1.0955	0.0123	90.0409
8	1.1691	0.0163	71.7239	9	1.2305	0.0183	67.4247	9	1.2411	0.0172	72.0313	9	1.2497	0.0165	75.8774	10	1.3220	0.0184	72.0044	8	1.1759	0.0144	82.1633
9	1.2198	0.0198	61.5750	10	1.2719	0.0221	57.5520	10	1.2928	0.0204	63.2485	10	1.3093	0.0192	68.0509	11	1.3763	0.0213	64.6454	9	1.2353	0.0179	69.2271
10	1.2441	0.0248	50.2667	11	1.3055	0.0268	48.6945	11	1.3351	0.0244	54.8071	11	1.3576	0.0226	59.9912	12	1.4159	0.0255	55.4820	10	1.2880	0.0210	62.2245
11	1.2684	0.0305	41.6005	12	1.3291	0.0331	40.1905	12	1.3673	0.0296	46.2551	12	1.3966	0.0271	51.5731	13	1.4452	0.0313	46.2464	11	1.3286	0.0251	53.9477
12	1.2962	0.0370	35.0324	13	1.3512	0.0404	33.4207	13	1.3896	0.0365	38.0400	13	1.4219	0.0334	42.5464	14	1.4717	0.0382	38.5060	12	1.3610	0.0304	45.7066
13	1.3299	0.0438	30.3353	14	1.3688	0.0489	27.9918	14	1.3992	0.0457	30.6305	14	1.4304	0.0424	33.7358	15	1.4714	0.0490	30.0592	13	1.3876	0.0371	38.1178
14	1.3635	0.0513	26.5789	15	1.3865	0.0578	23.9837	15	1.4054	0.0561	25.0696	15	1.4421	0.0523	27.5947	16	1.4696	0.0612	24.0052	14	1.4067	0.0453	31.4886
15	1.3846	0.0606	22.8406	16	1.3900	0.0693	20.0519	16	1.4070	0.0680	20.6912	16	1.4316	0.0655	21.8565	17	1.4437	0.0773	18.6693	15	1.4180	0.0551	25.9096
16	1.3972	0.0715	19.5331	17	1.3942	0.0810	17.2060	17	1.4053	0.0808	17.3966	17	1.4242	0.0796	17.8942	18	1.4284	0.0934	15.2917	16	1.4191	0.0671	21.2276
17	1.3309	0.0923	14.4240	18	1.3594	0.1002	13.5709	18	1.3895	0.0965	14.3930	18	1.4106	0.0951	14.8344	19	1.4065	0.1113	12.6427	17	1.3997	0.0822	17.1180
18	1.2376	0.1230	10.0634	19	1.3066	0.1246	10.4897	19	1.3635	0.1153	11.8216	19	1.3880	0.1125	12.3422	20	1.3839	0.1299	10.6577	18	1.3651	0.1016	13.6307
20	1.0155	0.2444	4.1551	20	1.0062	0.2444	4.1169	20	1.3360	0.1357	9.8489	20	1.3597	0.1327	10.2441					19	1.3662	0.1159	11.8240
																				20	1.2203	0.1774	7.8045

NACA 4412

REYNOLDS 200000				REYNOLDS 300000				REYNOLDS 400000				REYNOLDS 500000				REYNOLDS 600000				Promedio			
α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD
-5	-0.1307	0.0194	-6.7371	-5	-0.0762	0.0145	-5.2734	-5	-0.0717	0.0123	-5.8388	-5	-0.0732	0.0111	-6.6184	-5	-0.0751	0.0103	-7.3268	-5	-0.0854	0.0135	-6.3589
-4	0.0089	0.0166	0.5374	-4	0.0362	0.0127	2.8482	-4	0.0375	0.0109	3.4278	-4	0.0361	0.0100	3.6136	-4	0.0347	0.0093	3.7192	-4	0.0307	0.0119	2.8292
-3	0.1370	0.0144	9.5139	-3	0.1473	0.0113	13.0239	-3	0.1467	0.0100	14.7141	-3	0.1459	0.0092	15.8760	-3	0.1450	0.0087	16.7243	-3	0.1444	0.0107	13.9704
-2	0.2504	0.0128	19.5472	-2	0.2560	0.0104	24.7104	-1	0.3644	0.0087	41.8851	-2	0.2556	0.0086	29.5833	-2	0.2551	0.0082	31.1098	-2	0.2543	0.0100	26.2377
-1	0.3540	0.0108	32.7778	-1	0.3630	0.0094	38.5350	0	0.4578	0.0073	62.6265	-1	0.3645	0.0082	44.2892	-1	0.3645	0.0079	46.2563	-1	0.3621	0.0090	40.7487
0	0.4873	0.0100	48.5842	0	0.4894	0.0081	60.1229	2	0.6938	0.0083	83.9952	0	0.4644	0.0071	65.5932	0	0.4686	0.0070	66.7521	0	0.4735	0.0079	60.7358
1	0.5913	0.0104	56.8558	1	0.5910	0.0086	68.7209	3	0.7987	0.0089	89.7416	1	0.5901	0.0071	82.8792	1	0.5903	0.0067	87.8423	1	0.5907	0.0082	74.0745
2	0.6956	0.0110	63.1789	2	0.6945	0.0092	75.5713	4	0.9042	0.0096	94.4828	2	0.6938	0.0077	90.5744	2	0.6944	0.0072	96.0443	2	0.6946	0.0087	81.8728
3	0.8007	0.0118	67.9711	3	0.7994	0.0099	80.7475	5	1.0084	0.0103	98.0934	3	0.7992	0.0083	96.8727	3	0.8002	0.0078	102.7214	3	0.7999	0.0093	87.6109
4	0.9065	0.0127	71.4905	4	0.9044	0.0106	85.0000	6	1.1088	0.0110	100.4348	4	0.9052	0.0089	102.1670	4	0.9067	0.0084	108.4569	4	0.9057	0.0100	92.3195
5	1.0095	0.0136	74.1189	6	1.1080	0.0123	90.2280	7	1.2052	0.0119	101.0226	5	1.0098	0.0095	105.8491	5	1.0119	0.0090	112.5584	5	1.0099	0.0106	97.6549
6	1.1100	0.0146	76.0795	7	1.2023	0.0132	91.4297	8	1.2926	0.0132	97.7022	6	1.1112	0.0103	108.1986	6	1.1143	0.0097	114.7580	6	1.1105	0.0116	97.9398
7	1.2026	0.0155	77.7376	8	1.2885	0.0143	90.1049	9	1.3546	0.0159	85.0345	7	1.2095	0.0111	108.6703	7	1.2128	0.0106	114.0922	7	1.2065	0.0125	98.5905
8	1.2867	0.0165	77.8874	9	1.3528	0.0166	81.5923	11	1.4176	0.0249	57.0004	8	1.2959	0.0127	102.2810	8	1.2987	0.0123	105.4140	8	1.2925	0.0138	94.6779
9	1.3526	0.0182	74.4824	10	1.3772	0.0211	65.4252	12	1.4399	0.0310	46.4035	9	1.3576	0.0156	87.1374	9	1.3607	0.0153	88.7606	9	1.3557	0.0163	83.4014
10	1.3715	0.0223	61.4471	11	1.3943	0.0269	51.9292	13	1.4568	0.0387	37.6434	10	1.3969	0.0193	72.2659	10	1.4059	0.0187	75.3026	10	1.3879	0.0203	68.6102
11	1.3656	0.0297	46.0263	12	1.4089	0.0339	41.5360	14	1.4596	0.0489	29.8670	11	1.4350	0.0235	61.0898	11	1.4502	0.0223	64.9150	11	1.4125	0.0254	56.1921
12	1.3670	0.0382	35.8229	13	1.4131	0.0431	32.7637	15	1.4559	0.0608	23.9300	12	1.4672	0.0287	51.1933	12	1.4859	0.0271	54.8505	12	1.4338	0.0318	45.9612
13	1.3724	0.0475	28.9231	14	1.4179	0.0533	26.5923	16	1.4499	0.0737	19.6650	13	1.4894	0.0355	41.9313	13	1.5136	0.0332	45.5492	13	1.4491	0.0396	37.3621
14	1.3880	0.0563	24.6361	15	1.4220	0.0642	22.1530	17	1.4483	0.0869	16.6663	14	1.4967	0.0449	33.3712	14	1.5261	0.0417	36.5621	14	1.4577	0.0490	30.2057
15	1.4095	0.0651	21.6580	16	1.4310	0.0748	19.1438	18	1.4449	0.0999	14.4591	15	1.4925	0.0567	26.3320	15	1.5253	0.0529	28.8391	15	1.4610	0.0599	24.5824
16	1.4323	0.0742	19.2928	17	1.4347	0.0870	16.4946	19	1.4344	0.1156	12.4105	16	1.4852	0.0699	21.2353	16	1.5186	0.0659	23.0475	16	1.4634	0.0717	20.4769
17	1.4361	0.0863	16.6485	18	1.4361	0.0994	14.4491	20	1.4274	0.1308	10.9137	17	1.4711	0.0847	17.3725	17	1.5030	0.0809	18.5762	17	1.4586	0.0851	17.1516
18	1.4121	0.1030	13.7110	19	1.4197	0.1159	12.2525					18	1.4608	0.0996	14.6623	18	1.4807	0.0974	15.2007	18	1.4469	0.0999	14.4964
19	1.3901	0.1205	11.5390	20	1.4123	0.1307	10.8073					19	1.4471	0.1150	12.5791	19	1.4651	0.1138	12.8789	19	1.4313	0.1161	12.3320
												20	1.4331	0.1319	10.8692	20	1.4481	0.1307	11.0813	20	1.4302	0.1310	10.9179

NACA 23012

REYNOLDS 200000				REYNOLDS 300000				REYNOLDS 400000				REYNOLDS 500000				REYNOLDS 600000				Promedio			
α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD	α (º)	CL	CD	CL/CD
-5	-0.5103	0.0261	-19.5218	-5	-0.4802	0.0274	-17.5383	-5	-0.4421	0.0166	-26.5685	-5	-0.4194	0.0143	-29.2877	-5	-0.4016	0.0130	-30.7975	-5	-0.4507	0.0195	-24.7428
-4	-0.3951	0.0202	-19.5208	-4	-0.3246	0.0159	-20.4408	-4	-0.2897	0.0134	-21.5711	-4	-0.2765	0.0120	-23.0417	-4	-0.2761	0.0111	-24.9638	-4	-0.3124	0.0145	-21.9076
-3	-0.2202	0.0162	-13.6094	-3	-0.1669	0.0129	-12.9080	-3	-0.1644	0.0114	-14.4211	-3	-0.1688	0.0105	-16.0762	-3	-0.1731	0.0099	-17.4145	-3	-0.1787	0.0122	-14.8858
-2	-0.0621	0.0128	-4.8364	-2	-0.0572	0.0110	-5.1812	-2	-0.0621	0.0102	-6.1182	-2	-0.0665	0.0096	-6.9271	-2	-0.0699	0.0092	-7.5813	-2	-0.0636	0.0106	-6.1289
-1	0.0175	0.0095	1.8363	-1	0.0160	0.0077	2.0779	0	0.1139	0.0073	15.6887	-1	0.0188	0.0069	2.7168	-1	0.0197	0.0069	2.8717	-1	0.0180	0.0078	2.3757
0	0.1743	0.0105	16.5684	0	0.1183	0.0082	14.3917	1	0.2332	0.0083	28.1983	0	0.1149	0.0068	16.9469	0	0.1166	0.0065	17.9109	0	0.1276	0.0079	16.3013
1	0.3458	0.0110	31.3793	1	0.2703	0.0094	28.8474	2	0.3853	0.0093	41.2969	1	0.2192	0.0076	29.0331	1	0.2176	0.0071	30.7345	1	0.2572	0.0087	29.6385
2	0.4498	0.0116	38.6426	2	0.4292	0.0104	41.4686	3	0.5395	0.0103	52.6341	2	0.3587	0.0086	41.8065	2	0.3405	0.0080	42.4035	2	0.3927	0.0096	41.1236
3	0.5393	0.0126	42.7338	3	0.5450	0.0111	48.9228	4	0.6415	0.0109	58.7993	3	0.5081	0.0095	53.4842	3	0.4864	0.0089	54.4072	3	0.5237	0.0105	50.4364
4	0.6287	0.0137	45.7902	4	0.6351	0.0119	53.2355	5	0.7313	0.0117	62.4509	4	0.6471	0.0102	63.3790	4	0.6349	0.0097	65.7246	4	0.6375	0.0113	57.3857
5	0.7192	0.0150	48.0107	5	0.7247	0.0129	56.2655	6	0.8216	0.0126	65.4140	5	0.7374	0.0109	67.5894	5	0.7434	0.0102	72.5977	5	0.7312	0.0121	61.3828
6	0.8113	0.0164	49.3491	6	0.8151	0.0140	58.3047	7	0.9122	0.0136	66.8768	6	0.8282	0.0116	71.3351	6	0.8336	0.0110	75.9891	6	0.8220	0.0131	64.0784
7	0.9046	0.0181	49.8677	7	0.9066	0.0153	59.1775	8	1.0048	0.0147	68.4469	7	0.9187	0.0125	73.2616	7	0.9254	0.0117	79.0940	7	0.9135	0.0143	65.6555
8	0.9988	0.0199	50.0903	8	0.9994	0.0166	60.3502	9	1.0979	0.0159	69.0938	8	1.0114	0.0135	75.0854	8	1.0175	0.0126	80.6899	8	1.0064	0.0155	66.9325
9	1.0906	0.0219	49.7764	9	1.0923	0.0180	60.5824	10	1.1903	0.0170	69.8943	9	1.1055	0.0145	76.2940	9	1.1130	0.0135	82.5668	9	1.0999	0.0168	67.6627
10	1.1792	0.0238	49.5462	10	1.1824	0.0193	61.2642	11	1.2798	0.0183	69.8200	10	1.2006	0.0155	77.4081	10	1.2087	0.0145	83.3012	10	1.1922	0.0180	68.2828
11	1.2596	0.0254	49.5710	11	1.2668	0.0207	61.2276	12	1.3628	0.0200	68.2082	11	1.2917	0.0169	76.6588	11	1.3016	0.0158	82.4319	11	1.2799	0.0194	67.9419
12	1.3279	0.0271	49.0362	12	1.3433	0.0224	59.9955	13	1.4251	0.0226	63.0296	12	1.3772	0.0185	74.2826	12	1.3875	0.0175	79.1049	12	1.3597	0.0211	66.1255
13	1.3684	0.0297	46.0276	13	1.3987	0.0250	55.9928	14	1.4545	0.0274	53.0452	13	1.4442	0.0212	68.2192	13	1.4566	0.0202	72.0020	13	1.4186	0.0237	61.0542
14	1.3811	0.0353	39.1468	14	1.4240	0.0303	47.0744	15	1.4529	0.0365	39.8273	14	1.4759	0.0256	57.6523	14	1.4915	0.0244	61.2526	14	1.4454	0.0286	51.6343
15	1.3657	0.0466	29.2817	15	1.4148	0.0408	34.6510	16	1.4157	0.0535	26.4765	15	1.4823	0.0333	44.4734	15	1.5051	0.0311	48.4734	15	1.4442	0.0377	39.3414
16	1.3245	0.0644	20.5796	16	1.3671	0.0598	22.8536	17	1.3313	0.0800	16.6496	16	1.4542	0.0482	30.1451	16	1.4895	0.0436	34.1707	16	1.4102	0.0539	26.8451
17	1.2752	0.0851	14.9777	17	1.3002	0.0836	15.5526	18	1.2593	0.1059	11.8914	17	1.3757	0.0737	18.6687	17	1.4170	0.0677	20.9430	17	1.3399	0.0780	17.3583
18	1.2353	0.1058	11.6802	18	1.2452	0.1067	11.6712	19	1.2166	0.1278	9.5173	18	1.2830	0.1027	12.4903	18	1.3099	0.0987	13.2662	18	1.2665	0.1040	12.1998
19	1.1937	0.1282	9.3105	19	1.2132	0.1268	9.5693	20	1.2019	0.1452	8.2758	19	1.2231	0.1275	9.5907	19	1.2379	0.1256	9.8528	19	1.2169	0.1272	9.5681
20	1.0766	0.1712	6.2904	20	1.2012	0.1436	8.3626					20	1.1974	0.1476	8.1130	20	1.2014	0.1474	8.1490	20	1.1757	0.1510	7.8382