

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Dirección de proyectos



Escuela de Ingeniería Electromecánica
Escuela de Física

Documento tipo 1 del proyecto

**“Optimización de un perfil aerodinámico de una turbina
eólica de eje horizontal para aplicaciones de pequeña escala
en zonas boscosas” Código: 1341015**

Ing. Gustavo Richmond Navarro, coordinador

Ing. Mariana Montenegro Montero

Met. Gustavo Murillo Zumbado

Ing. Frank Marín Guillén

Ing. Noel Ureña Sandí

Ing. Carlos Otárola Zúñiga

Cartago, Costa Rica

Marzo de 2021

Contenido

1. Datos del proyecto	4
1.1 Código y título	4
1.2 Autores y direcciones	4
2. Resumen	5
2.1 Palabras clave	5
3. Sobre el contenido de este documento	6
4. Introducción	7
5. Marco teórico	8
5.1 Modelamiento de la turbulencia en mecánica de fluidos computacional.....	8
5.1.1 Producción de energía cinética turbulenta P_k	9
5.1.2 Disipación de energía cinética turbulenta D_k	10
5.1.3 Función de mezcla F_1	10
6. Metodología	11
6.1 Consideraciones preliminares	11
6.2 Simulaciones de los perfiles estándar y proponer un nuevo diseño	12
7. Resultados	13
7.1 Simulación de los perfiles estándar.....	13
7.1.1 Coeficiente de arrastre.....	13
7.1.2 Coeficiente de sustentación.....	16
7.1.3 Relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre	19
7.2 Variantes para optimización del perfil aerodinámico	21
7.2.1 Flap o alerón.....	22
7.2.2 Aleta en el borde de salida.....	23
7.2.3 Generadores de vórtices	23
8. Discusión	25
9. Conclusiones.....	28
10. Recomendaciones	29
11. Agradecimientos	30
12. Referencias.....	31
Apéndice 1: Artículo aceptado para publicación “Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio de la provincia de Cartago”	34
Apéndice 2: Artículo en revisión “Modelo dinámico de la velocidad del viento en una zona boscosa tropical”	55

Apéndice 3: Modelos de turbulencia para flujo en transición.....	70
Apéndice 4: Validación de simulación utilizando OpenFOAM.....	74
Apéndice 5: Tutorial de CFD en software libre para simulación de perfiles aerodinámicos	78
Apéndice 6: Diseño experimental	93

1. Datos del proyecto

1.1 Código y título

Código: 134105

Título: Optimización de un perfil aerodinámico de una turbina eólica de eje horizontal para aplicaciones de pequeña escala en zonas boscosas

1.2 Autores y direcciones

Nombre	Correo	Grado académico
Gustavo Richmond Navarro *	grichmond@tec.ac.cr	Máster
Mariana Montenegro Montero	mmontenegro@tec.ac.cr	Máster
Gustavo Murillo Zumbado	gmurillo@tec.ac.cr	Bachiller
Frank Marín Guillén	fmarin@tec.ac.cr	Licenciado
Noel Ureña Sandí	nurena@tec.ac.cr	Licenciado
Carlos Otárola Zúñiga	cotarola@tec.ac.cr	Máster

* Coordinador

2. Resumen

En este proyecto de alcance explicativo se caracteriza el recurso eólico en algunas regiones boscosas en Costa Rica, se modela la longitud de rugosidad propia de este tipo de regiones y se propone un perfil aerodinámico adecuado para las condiciones de estudio.

Se recolectan y procesan con Matlab los datos de velocidad de viento de fuentes externas y con equipos propios, lo que permite determinar los niveles de intensidad de turbulencia en las zonas boscosas de interés, así como las velocidades de viento típicas. Con Eureka se obtienen relaciones funcionales entre las variables para obtener modelos de la longitud de rugosidad.

Por otra parte, se prueban distintos paquetes de simulación numérica, de los cuales OpenFOAM posee la capacidad adecuada para realizar las simulaciones que muestran las curvas de respuesta de los perfiles aerodinámicos de interés, con lo que se define el perfil aerodinámico buscado.

Entre los principales resultados destaca que la intensidad de turbulencia en las regiones de interés ronda el 25 % y que la velocidad de viento a 10 metros de altura en los puntos de estudio, tiene una mayor frecuencia a los 3 m/s. Se propone un modelo dinámico de la longitud de rugosidad, que toma valores entre 0.5 y 1, en concordancia con la literatura.

Se concluye que el perfil aerodinámico el SG6043, es el más adecuado para las condiciones de interés, entre los que ofrece la literatura; al mismo se le realizan algunas modificaciones para mejorar su respuesta en flujo turbulento.

2.1 Palabras clave

Intensidad de turbulencia, perfil aerodinámico, flujo turbulento, simulación numérica.

3. Sobre el contenido de este documento

De acuerdo con lo indicado en las “Normativas para la gestión de proyectos de investigación y extensión” disponible en este [enlace](#), se podrán aceptar como alternativos al documento 1 del informe final, otros productos tales como: Artículos científicos en proceso de aprobación por una revista indexada o ya publicados.

Por lo anterior, este documento contiene en adelante lo referente al objetivo específico #3 del proyecto de investigación, dado que todo lo referente a los objetivos 1 y 2 están contenidos en publicaciones como se detalla a continuación:

Objetivo específico	Productos	% de logro	Comentarios
OE1: Caracterizar el recurso eólico en regiones boscosas en Costa Rica.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Perfiles de velocidad en función del tiempo. 2. Distribuciones de la velocidad del viento (frecuencia con la que se dan diferentes velocidades de viento). 3. Caracterización de la turbulencia en la corriente de viento. 	100 %	<p>Los tres productos se encuentran en el artículo: Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio de la provincia de Cartago, aceptado para publicación en la revista Tecnología en Marcha. Ver apéndice 1.</p> <p>El producto 1 se encuentra en las figuras 3, 4, 5 y 6.</p> <p>El producto 2 se encuentra en la figura 8.</p> <p>El producto 3 se encuentra en la figura 9.</p>
OE2: Modelar la longitud de rugosidad característica de este tipo de regiones.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Valor de la longitud de rugosidad (en inglés roughness length, identificada como z_0) de la zona boscosa. 	100 %	<p>El producto se encuentra en el artículo: Modelo dinámico de la velocidad del viento en una zona boscosa tropical, sometido a revisión en la revista Tecnología en Marcha. Ver apéndice 2.</p> <p>El producto 1 se encuentra en el cuadro 4.</p>
OE3: Definir el perfil aerodinámico o la combinación de perfiles existentes que captura mayor cantidad de energía para las condiciones de estudio	<ol style="list-style-type: none"> 1. Geometría del perfil aerodinámico. 	100 %	<p>El perfil aerodinámico existente que captura la mayor cantidad de energía en las condiciones de estudio es el SG6043, de acuerdo a las simulaciones realizadas.</p> <p>El producto 1 se encuentra en las Figuras 11, 12 y 13 de este documento.*</p>

* Adicionalmente se publicó un artículo sobre el tema, llamado: Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas. DOI: <https://doi.org/10.22507/rli.v17n1a22>

4. Introducción

La demanda energética de la sociedad moderna ha crecido de manera vertiginosa en las últimas décadas. De modo que, incluso en las comunidades remotas en los países en desarrollo, se busca el acceso a la electricidad, frecuentemente con sistemas aislados solares o híbridos solares más eólicos, con baterías (Madriz-Vargas, 2017). En este tipo de aplicaciones, así como en aplicaciones habitacionales, se emplean turbinas eólicas de pequeña escala.

Por otro lado, en los últimos años la tendencia en el campo de la energía eólica ha sido construir turbinas eólicas más grandes y de mayor potencia, buscando las zonas donde el viento tiene la menor perturbación posible, empleando alturas de buje cada vez mayores y ubicando los aerogeneradores fuera de la costa, tomando en cuenta la información que brindan los mapas de potencial eólico que identifican las regiones con los mejores vientos. No obstante, como lo estableció (Mertens, 2006), los mejores sitios ya están ocupados por lo que el problema de micro generación toma mayor relevancia.

El interés por la investigación en el campo de turbinas eólicas de pequeña escala no es algo reciente, por ejemplo, en (Giguere y Selig, 1998) crean una serie de perfiles aerodinámicos específicamente para micro generación eólica, otros autores como (Wright y Wood, 2004) han estado involucrados en el tema en aspectos como la inercia del rotor directamente relacionada con la capacidad de arranque a bajas velocidades.

Estos trabajos muestran la necesidad de las turbinas de pequeña escala, por tanto, este proyecto de investigación abarca la revisión de literatura de los perfiles que se han empleado en pequeña escala, con el objetivo de determinar el perfil aerodinámico o la combinación de perfiles existentes que captura mayor cantidad de energía en turbinas eólicas de pequeña escala, para varios números de Reynolds y a varias Intensidades de turbulencia. Esto con miras a futuros diseños de turbinas de pequeña escala en zonas de alta turbulencia, por ejemplo, los bosques.

La naturaleza del estudio es cuantitativa, de alcance explicativo. Se realiza un análisis numérico del desempeño aerodinámico de los perfiles aerodinámicos de interés para distintos valores de intensidad de turbulencia y a distintos números de Reynolds. Se realiza de esta manera pues esto ha sido poco reportado en la literatura. No se abarca una fase experimental al no disponer de equipos adecuados para la medición de las variables de interés.

5. Marco teórico

En el campo de las turbinas eólica de pequeña escala, diferentes autores han empleado distintos perfiles aerodinámicos para turbinas eólicas de pequeña escala. Como parte de los resultados de esta investigación se ha publicado una amplia y generosa revisión de los perfiles que más se emplean según la literatura en el campo de turbinas pequeña, bajo el título “Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas” (Richmond et al., 2020). En esa publicación se obtiene que los perfiles de uso muy frecuente son el SG6043, S809 y NACA0012, siendo el primero de ellos el que presenta mejor desempeño aerodinámico. Se concluye que un perfil adecuado para una turbina eólica de pequeña escala para zonas boscosas debe ser diseñado para regulación por *stall* (pérdida aerodinámica) y poseer una alta robustez ante cambios de rugosidad superficial. El perfil con mayor potencial, según la literatura para esta aplicación, es el SG6043, siendo 110 % y 85 % más eficiente que NACA0012 y S809, respectivamente, para un número de Reynolds de 2×10^5 ; empero, se requiere más investigación en temas como desempeño aerodinámico de los perfiles ante altos niveles de turbulencia.

La relevancia de los estudios en condiciones con alta turbulencia, son mencionadas por (Tummala et al., 2016) al destacar que las fluctuaciones del viento para turbinas eólicas de pequeña escala, a alturas sobre el suelo de 10 m o 15 m, afecta directamente su desempeño. Lo cual es respaldado por (Pagnini et al., 2015) donde se indica que la turbulencia juega un rol crucial en la eficiencia de las turbinas eólicas.

Este efecto de la turbulencia puede eventualmente ser positivo, según afirma (Lubitz, 2014), quien señala que a bajas velocidades un incremento en la turbulencia puede incrementar la producción de energía, de modo que la producción energética anual se puede ver favorecida por un aumento en la intensidad de turbulencia.

Este posible aumento de la eficiencia estaría relacionado con el aumento en el coeficiente de sustentación que se reporta en (Devinant et al., 2002) y (Sicot et al., 2008) al aumentar la turbulencia. En otros ensayos con turbulencia generada artificialmente con rejillas, se ha reportado un ligero aumento en la producción de energía en comparación al flujo sin turbulencia (Chu y Chiang, 2014)

Una parte importante y novedosa de este proyecto de investigación, es que existe muy poca literatura en el tema del efecto de la intensidad de turbulencia sobre los perfiles aerodinámicos, al variar el número de Reynolds (Kamada et al., 2016). Ejemplo de esto son (Li et al., 2016) que presenta diferentes curvas de potencia para varios valores de intensidad de turbulencia y (Li et al., 2011) que muestra el efecto de la turbulencia propiamente en el desempeño de las aspas. Por otra parte, en (Wang et al., 2014) se respalda la idea de que la fuerza de sustentación se incrementa al aumentar la turbulencia.

5.1 Modelamiento de la turbulencia en mecánica de fluidos computacional

Para lograr calcular las variables de interés en este proyecto, es necesario resolver las ecuaciones que gobiernan al fluido (aire) alrededor de un perfil aerodinámico. Estas ecuaciones son altamente no lineales y para ellas no existe una solución analítica. Ahí es donde resulta necesario emplear modelos y resolverlos mediante un computador. Para comprender los modelos de turbulencia se ha

generado como producto de este proyecto, un reporte técnico que se puede consultar en (Richmond-Navarro, 2019). En este se explica desde lo más básico que es la mecánica de fluidos computacional, se presentan las ecuaciones de Navier-Stokes, que son las que gobiernan el fenómeno y se comentan los principales modelos de turbulencia usados en el paquete COMSOL Multiphysics, de simulación numérica.

Para el caso de flujo sobre perfiles aerodinámicos con alta turbulencia, resulta necesario emplear modelos de flujo en transición (Lin y Sarlak, 2016). Por este motivo, se ha preparado un reporte técnico específico para este proyecto, visible en el Apéndice 3, llamado “Modelos de turbulencia para flujo en transición”. En este se explica en detalle que, para las condiciones del proyecto en cuestión, es necesario emplear el modelo SST (Shear Stress Transport) de transición $\gamma - Re_\theta$. Este incorpora la intermitencia γ y el número de Reynolds al cual empieza la intermitencia Re_θ .

La principal razón para el uso de este modelo de transición es que tiene la capacidad de simular con mayor fidelidad las burbujas de separación laminar que ocurren en los perfiles de interés en las condiciones de flujo turbulento, como se muestra en el Apéndice 3, Figuras 2 y 3.

El modelo SST de transición $\gamma - Re_\theta$ es similar al modelo $k-\omega$ SST pero hay tres términos que son distintos en las ecuaciones de transporte, señalados en rojo en las ecuaciones 1 y 2 (Lin y Sarlak, 2016).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - D_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \omega) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right) + \frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega^2}}{\omega} \nabla k : \nabla \omega \quad (2)$$

A continuación, se explica en detalle la manera en la que cambian los tres términos indicados en rojo, del modelo $k-\omega$ SST al modelo de transición $\gamma - Re_\theta$.

5.1.1 Producción de energía cinética turbulenta P_k

El término de producción de energía cinética turbulenta P_k va multiplicado por la intermitencia γ , la cual representa el porcentaje de tiempo que hay fluctuaciones turbulentas presentes en la capa límite. Si la intermitencia es cero, se tiene capa límite laminar, si es 1 la capa límite es turbulenta y en el rango de 0 a 1 es transición, como se ilustra en la Figura 1 y según la ecuación 3.

$$P_k \rightarrow P_k \gamma \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (3)$$

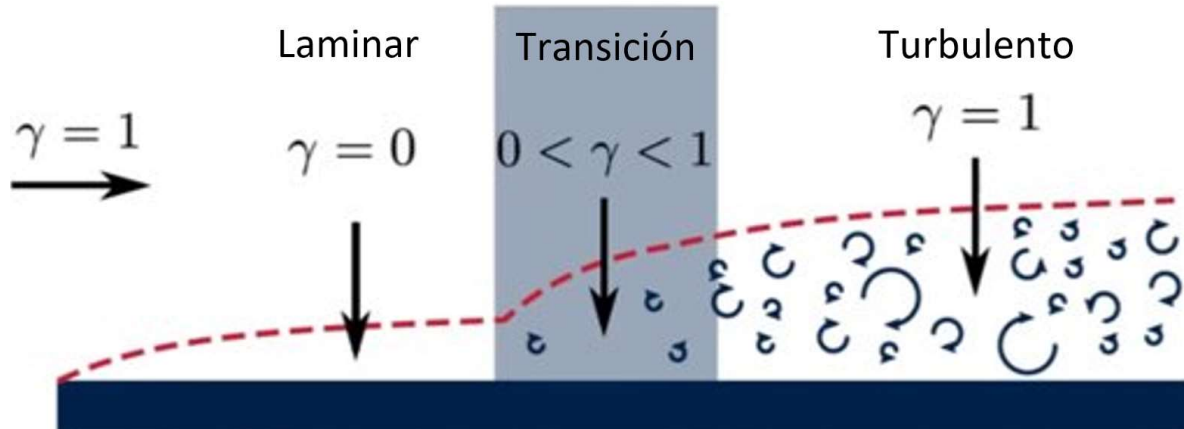


Figura 1. Concepto de intermitencia en el modelo SST de transición $\gamma - Re_\theta$ (Lin y Sarlak, 2016).

5.1.2 Disipación de energía cinética turbulenta D_k

El término de disipación de energía cinética turbulenta D_k va multiplicado por el máximo entre 0,1 y el valor de la intermitencia. Lo que pone un límite inferior de un 10% del valor de la disipación en el modelo $k-\omega$ SST. Esto matemáticamente se expresa en la ecuación 4:

$$D_k * \max(\gamma, 0,1) \quad (4)$$

5.1.3 Función de mezcla F_1

La función de mezcla F_1 es la que define en el modelo $k-\omega$ SST si se usa el modelo $k-\omega$ o el $k-\epsilon$, de modo que F_1 vale 1 cerca de la pared ($k-\omega$) y vale 0 en la corriente libre ($k-\epsilon$). En el modelo SST de transición $\gamma - Re_\theta$ el término F_1 recibe una corrección para evitar que su valor sea 0 en la capa límite laminar, de modo que de acuerdo con (Langley, s.f.) la función de mezcla se escribe como en la ecuación 5.

$$F_1 = \max\left(F_{1,sst}, e^{-\left(\frac{\rho d \sqrt{k}}{120\mu}\right)^8}\right) \quad (5)$$

En este modelo, las ecuaciones de transporte para γ y Re_θ se muestran en las ecuaciones 6, 7 y 8.

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \gamma) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \nabla \gamma \right) + P_\gamma - D_\gamma \quad (6)$$

$$Re_\theta = \frac{\rho U \theta}{\mu} \quad (7)$$

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{\rho U}{\rho_{\infty} U_{\infty}} \left(1 - \frac{U}{U_{\infty}}\right) dy \quad (8)$$

El Re_{θ} representa el punto donde la intermitencia empieza a incrementarse y es parte del cálculo de término de producción P_{γ} .

6. Metodología

6.1 Consideraciones preliminares

Con el objetivo de definir el perfil aerodinámico o la combinación de perfiles existentes que captura mayor cantidad de energía para las condiciones de estudio, orientado al producto “Geometría del perfil aerodinámico”; las actividades asociadas a este objetivo específico en el marco del proyecto de investigación en cuestión, de acuerdo con la propuesta original, fueron:

1. Estudiar los distintos modelos de turbulencia aplicables al fenómeno.
2. Realizar el asocié de los perfiles existentes que son óptimos para las condiciones eólicas encontradas.
3. Realizar simulaciones para valorar la respuesta de los perfiles bajo las condiciones del viento.
4. Proponer un nuevo diseño de perfil según las condiciones de interés mediante simulaciones.
5. Validar los resultados mediante experimentos en túneles de viento.

Sobre la actividad 1, ya se comentó en el marco teórico la generación de 2 documentos sobre modelos de turbulencia.

Sobre la actividad 2, se indicó en el marco teórico que se realizó una publicación en una revista indexada, sobre el tema, en el mismo documento se puede observar la metodología correspondiente.

Sobre la actividad 5, no fue posible realizar una validación de resultados mediante experimentos en túneles de viento, pero de acuerdo con el plan de administración de riesgo incluido en la propuesta original del proyecto, ya se había contemplado este riesgo. La acción de mitigación correspondiente fue “Validar los resultados mediante la comparación con otras investigaciones, en caso que no sea posible acceder a túneles de viento para realizar las validaciones correspondientes.”

En virtud de lo anterior, se realizó una validación de las simulaciones realizadas en este proyecto, visible en el Apéndice 4. En este documento se muestra la comparación y validación del modelo empleado y sus resultados, frente a mediciones experimentales y simulaciones de otros autores. La validación de resultados incluye un estudio de independencia de la malla. Los resultados de esta validación se muestran en las Figuras 3 y 4 del Apéndice 4, siendo correspondientemente para el coeficiente de sustentación (Cl) y el de arrastre (Cd). Resulta evidente la buena correlación entre los resultados experimentales y las simulaciones desarrolladas en esta investigación.

Sobre las actividades 3 y 4 se detalla a continuación la metodología correspondiente. Del mismo modo los resultados abarcarán únicamente estas dos actividades.

6.2 Simulaciones de los perfiles estándar y proponer un nuevo diseño

Se propone un diseño experimental del tipo factorial con niveles mixtos, donde las variables de respuesta serán las curvas de coeficiente de sustentación y arrastre del perfil aerodinámico, así como la relación entre la sustentación y el arrastre. Los factores y niveles de las simulaciones están de forma resumida en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen del diseño experimental de simulación de perfiles aerodinámicos.

Variable	Niveles						Total
Perfiles	S809	NACA0012	SG6043				3
Número de Reynolds	5×10^4	1×10^5	5×10^5	1×10^6			4
Intensidad de turbulencia (IT)	0%	5%	10%	20%	30%		5
Ángulo de ataque	0°	5°	10°	15°	20°	25°	6
Total de simulaciones							360

Todas las simulaciones son realizadas en OpenFOAM. En el Apéndice 5 se ha incluido un tutorial detallado del procedimiento a seguir para realizar las simulaciones, abarcando desde el pre proceso donde se define la geometría, mallado y condiciones de frontera; la simulación en OpenFOAM y el post procesamiento de los resultados donde se muestra cómo realizar la visualización y la extracción de los resultados (a saber, las curvas de sustentación y arrastre).

En cada simulación se considera el flujo de aire alrededor del perfil, a una velocidad y ángulo definidos por un tiempo de 4000 s, el cual se tomó para asegurar que el flujo se estabilice y la solución converja. Como parámetros fijos se consideró una densidad del aire de $1,2056 \text{ kg/m}^3$, una cuerda de 0,2 m y una viscosidad cinemática del aire de $1,1516 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

El diseño experimental completo con las 360 unidades de experimentación que se indican como “total de simulaciones” en la Tabla 1, se muestra en el Apéndice 6. Cada fila de este apéndice es una combinación única de los factores de este experimento. Al ejecutar una a una las simulaciones con cada combinación particular, usando los niveles de las variables del Apéndice 6 según las instrucciones del Apéndice 5, se obtiene uno de los puntos que componen las Figuras de la 2 a la 10. De modo que en esas figuras se presentan todos los resultados de las 360 simulaciones realizadas.

Para proponer un nuevo diseño de perfil se consideran dispositivos de control de flujo, con base en los resultados y la literatura existente, mediante una revisión de literatura en la que se buscó los experimentos y publicaciones cuyas condiciones fueran correspondientes al flujo de interés en esta investigación, tal como se detalla en los resultados.

7. Resultados

7.1 Simulación de los perfiles estándar

Como se describió en la metodología, se realizaron 360 simulaciones con los perfiles estándar, sin modificaciones. A continuación, se presentan los resultados en gráficos donde la variable independiente es el ángulo de ataque. Se han agrupado los cinco valores de intensidad de turbulencia en el mismo gráfico para valorar cómo cambia la variable dependiente en cada caso.

Las variables dependientes son el coeficiente de sustentación (C_L), el coeficiente de arrastre (C_D) y la razón C_L/C_D . Cada gráfico corresponde a un perfil aerodinámico y un número de Reynolds. Considerando que se tienen 3 perfiles aerodinámicos, 4 números de Reynolds y que se evalúan 3 diferentes variables dependientes (C_L , C_D y C_L/C_D), se presentan entonces $3 \times 4 \times 3 = 36$ gráficos.

7.1.1 Coeficiente de arrastre

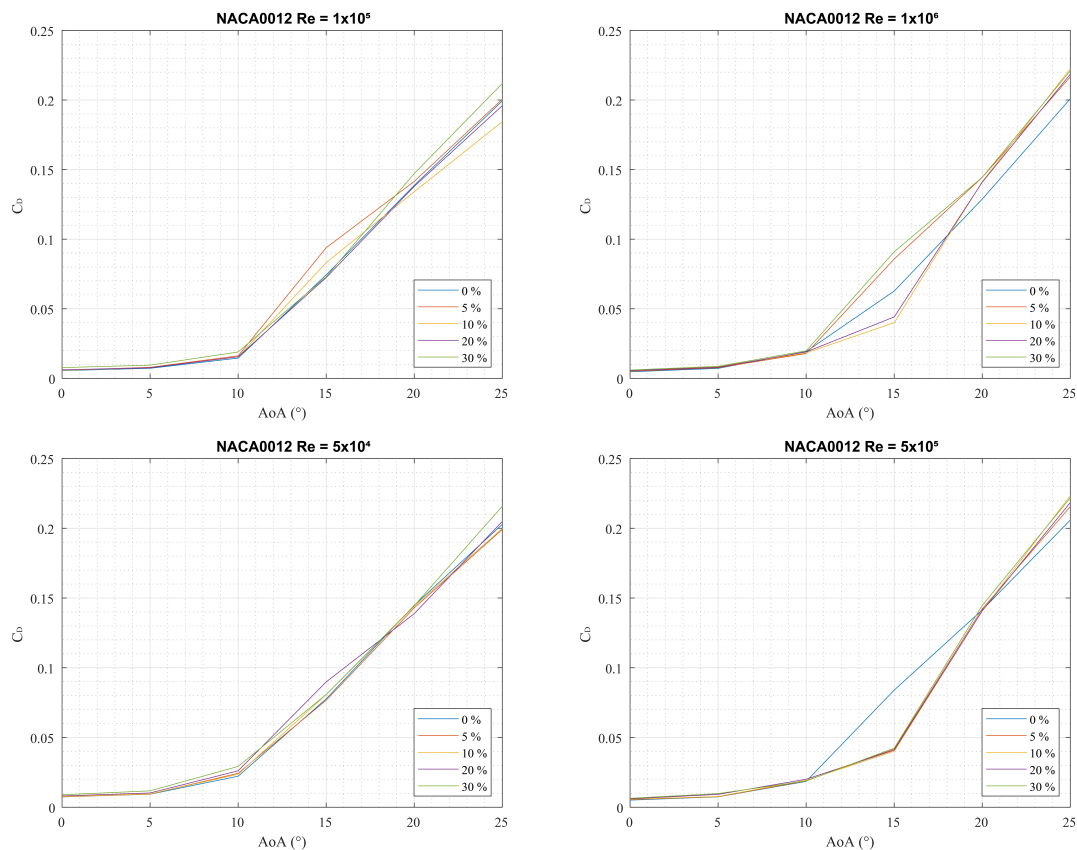


Figura 2. Coeficiente de arrastre para el perfil NACA0012.

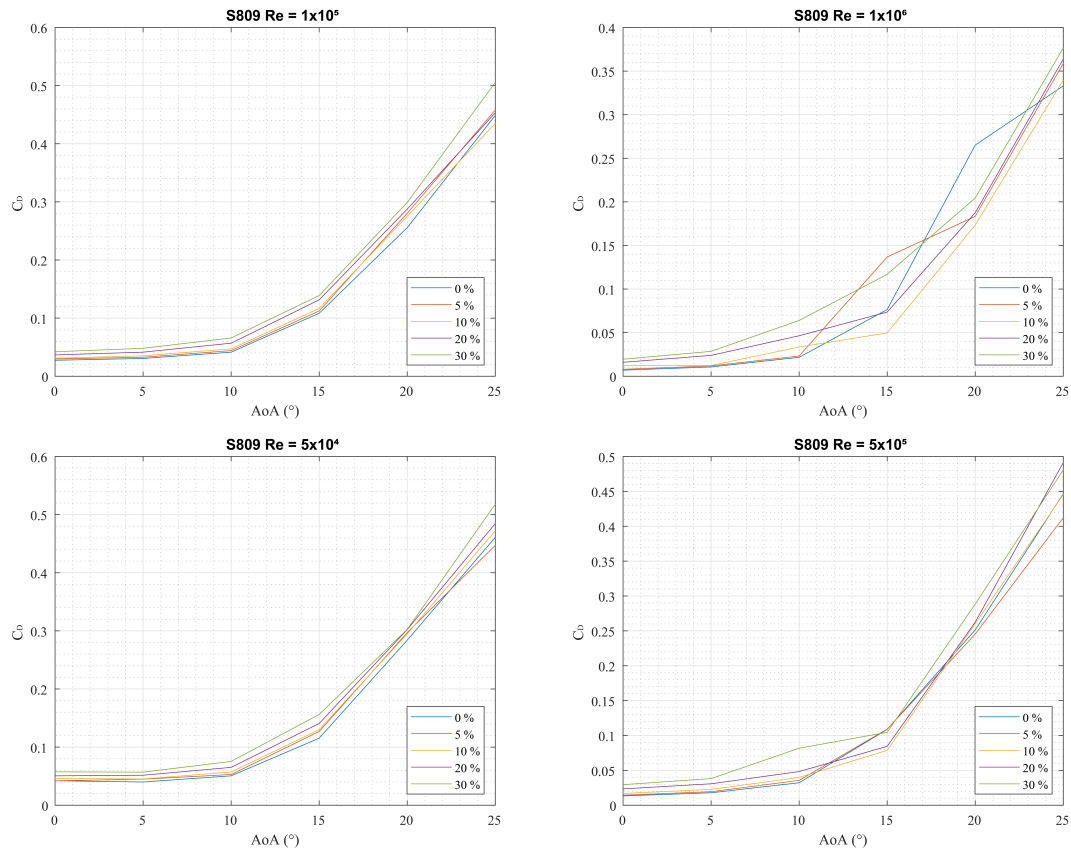


Figura 3. Coeficiente de arrastre para el perfil S809

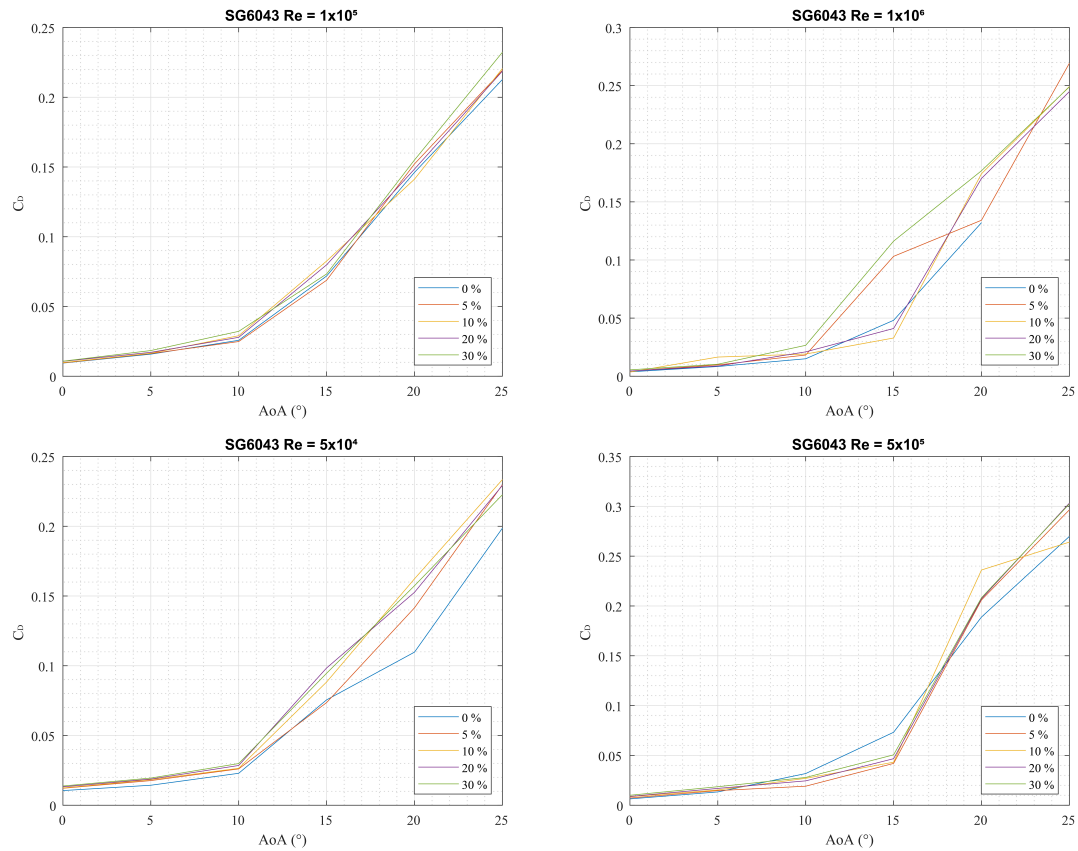


Figura 4. Coeficiente de arrastre para el perfil SG6043.

7.1.2 Coeficiente de sustentación

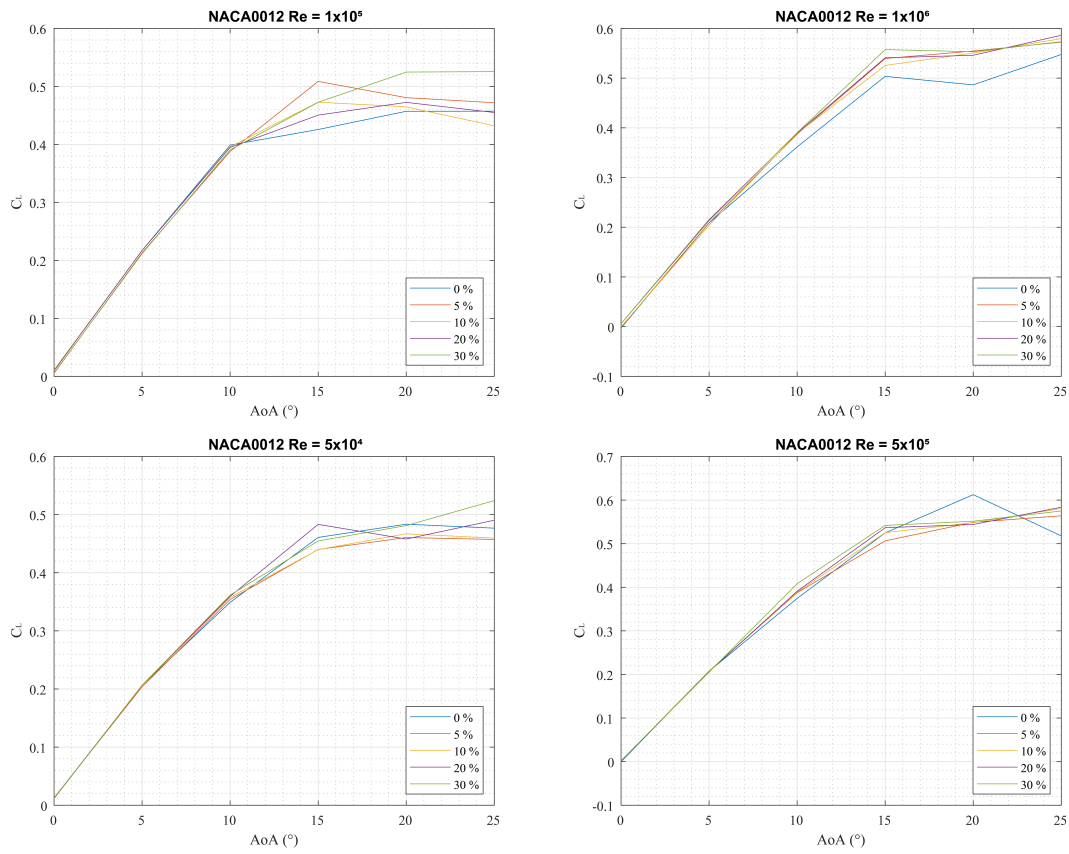


Figura 5. Coeficiente de sustentación para el perfil NACA0012.

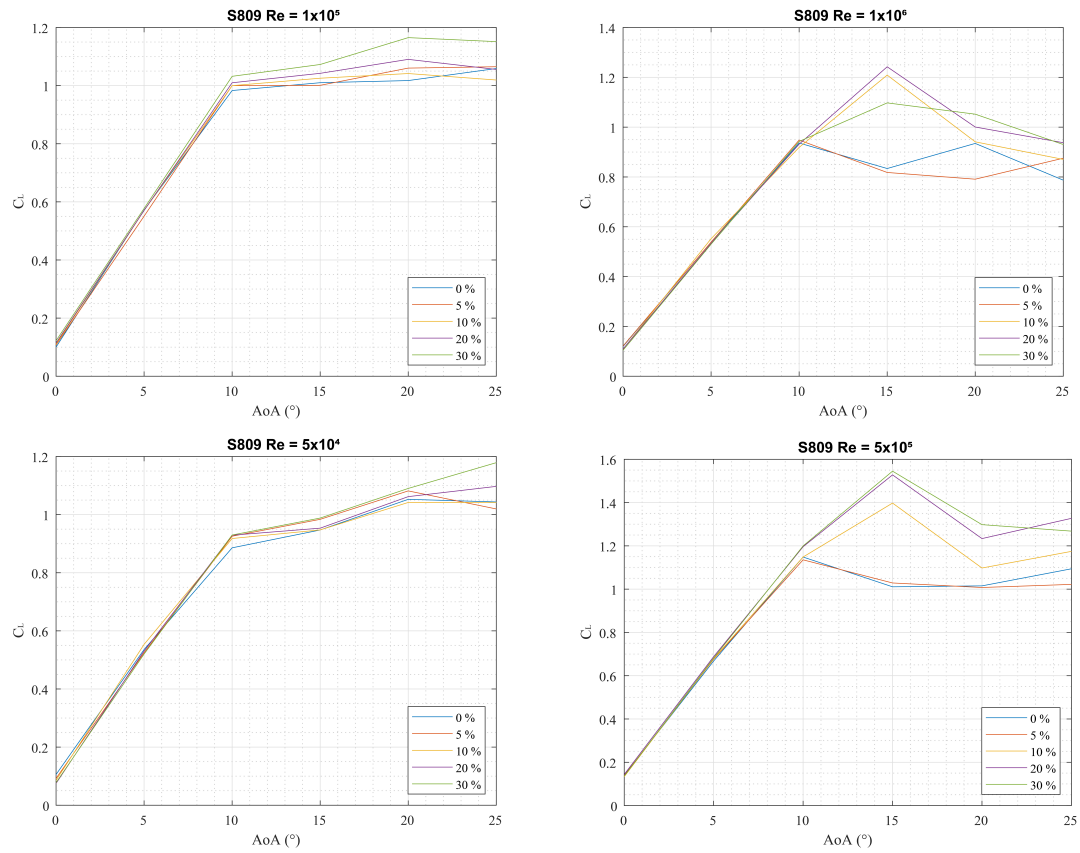


Figura 6. Coeficiente de sustentación para el perfil S809.

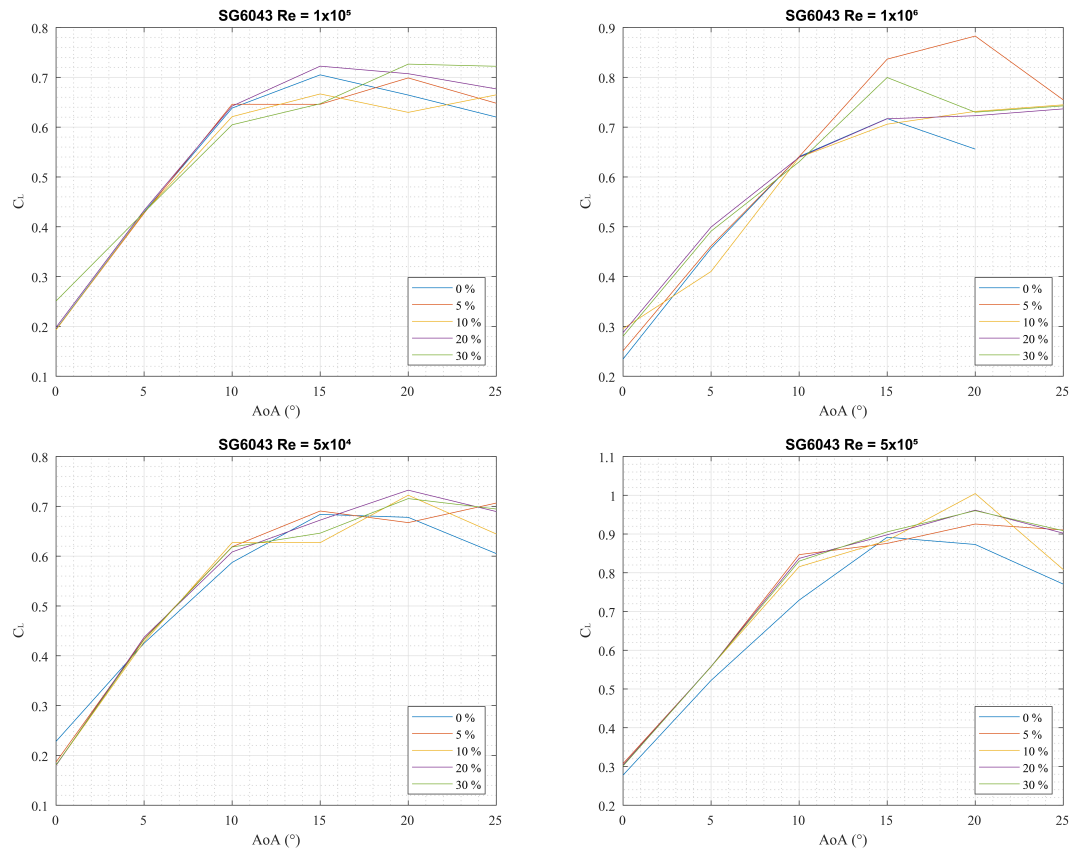


Figura 7. Coeficiente de sustentación para el perfil SG6043.

7.1.3 Relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre

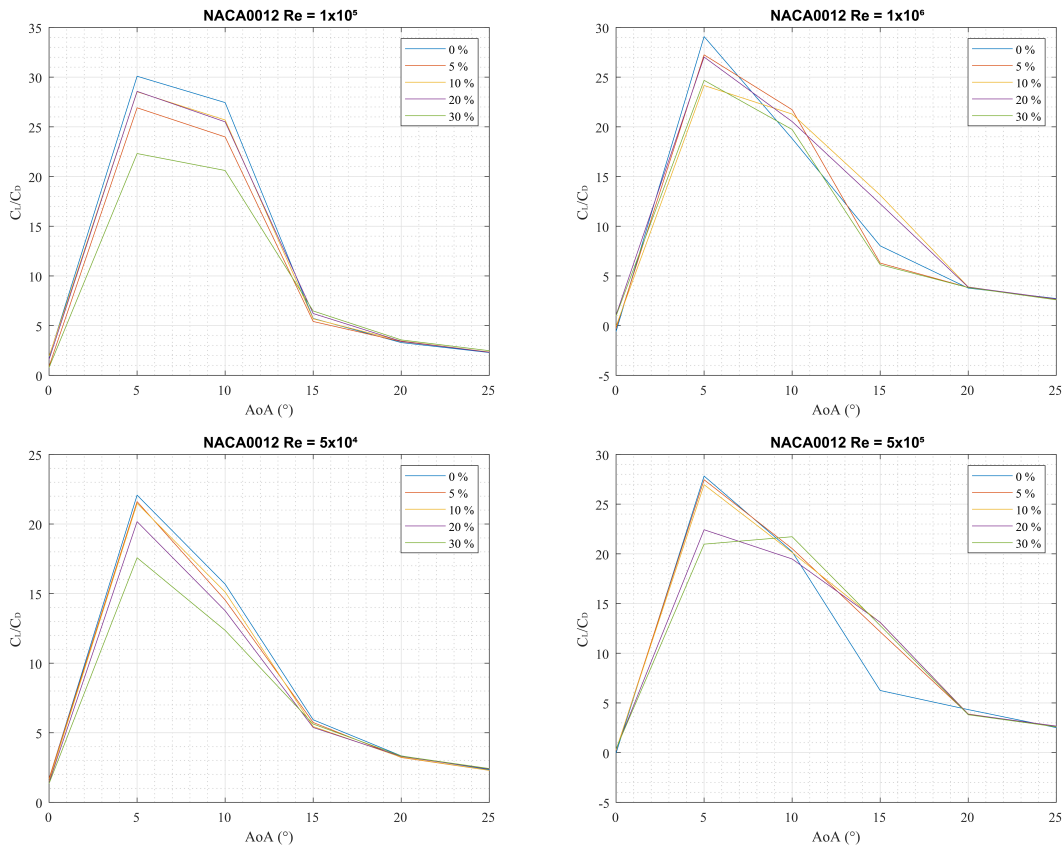


Figura 8. Relación entre el coeficiente de sustentación y el de arrastre para el perfil NACA0012.

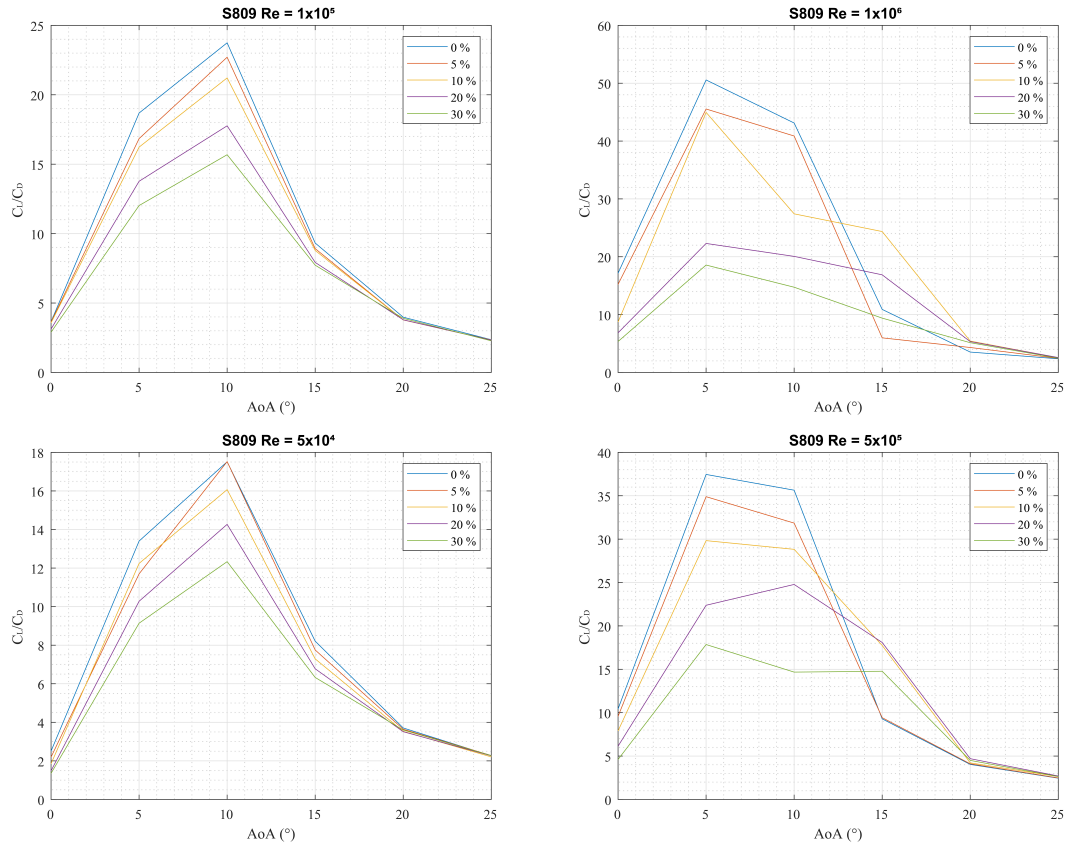


Figura 9. Relación entre el coeficiente de sustentación y el de arrastre para el perfil S809.

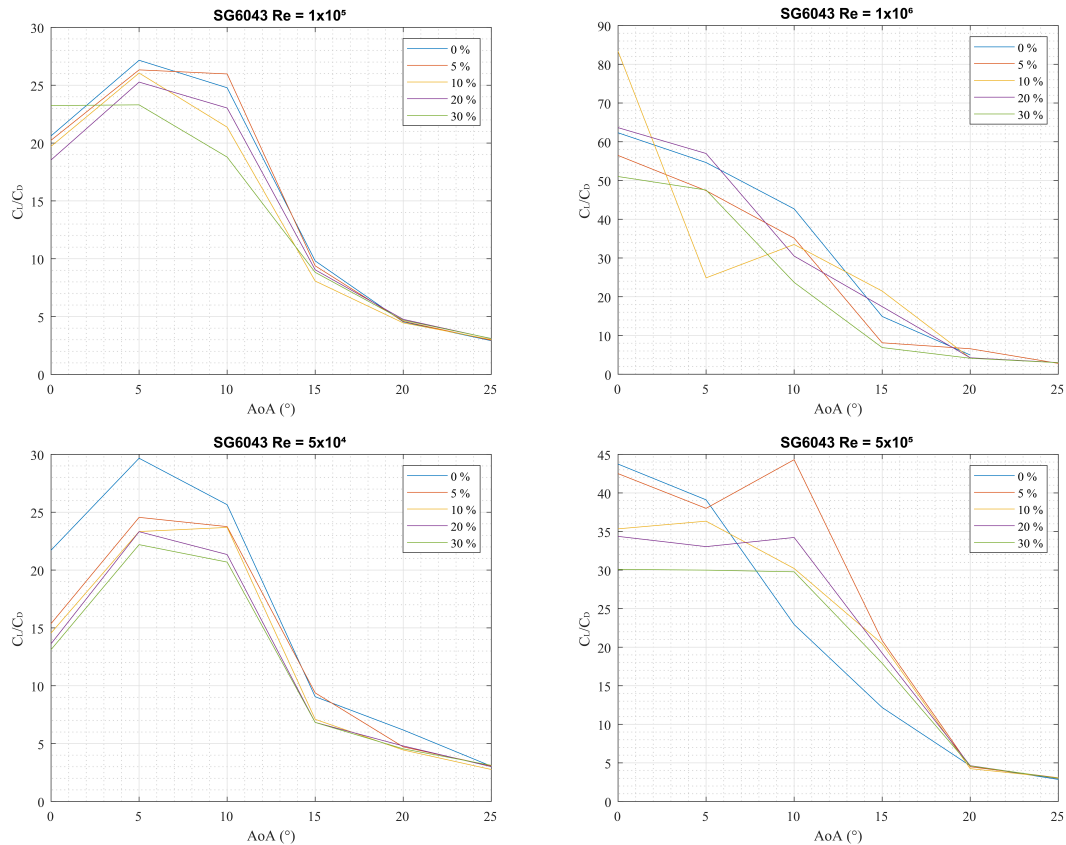


Figura 10. Relación entre el coeficiente de sustentación y el de arrastre para el perfil SG6043.

7.2 Variantes para optimización del perfil aerodinámico

Durante la operación de una turbina eólica, puede existir la separación de flujo, lo cual disminuye la potencia de salida. Este fenómeno ocurre especialmente cerca de la raíz del asa, y sobre todo en condiciones de alta turbulencia como se tienen en zonas boscosas. Existen muchos métodos que se han propuesto para mejorar el rendimiento, mediante el uso de dispositivos como alerones, aletas, generadores de vórtices, succionadores, jets sintéticos, paredes flexibles, entre otros.

También se puede alterar la geometría del perfil, o combinar diferentes métodos. En este documento se han seleccionado tres modificaciones al perfil SG6043, el cual, según las simulaciones realizadas en OpenFOAM, es el que presenta mejor relación de empuje-arrastre para condiciones boscosas de bajo número de Reynolds y alta intensidad de turbulencia. Al incorporar los dispositivos de control de flujo se optimiza el diseño del perfil original y se obtengan mejores valores de empuje en el rango de operación seleccionados.

El uso de dispositivos sirve para tener un control sobre los efectos aerodinámicos y disminuir las fuerzas ejercidas sobre el rotor o en este caso el perfil aerodinámico (Pechlivanoglou et al., 2011). Se puede controlar el flujo alrededor del perfil de manera pasiva cambiando la geometría del mismo, de forma que se controlen las cargas asociadas y se mejore el rendimiento del empuje (Van Dam et al., 2008). Utilizando dispositivos, se aumenta el empuje a bajas velocidades de viento, lo que

permite que la turbina entre en operación antes, y además aumenta el rango de operación, pues retrasa la entrada a condición de *stall* (Van Dam et al., 2008). Las tres modificaciones seleccionadas fueron: alerón, aleta, y generador de vórtices. Estos dispositivos son muy eficientes y sencillos de implementar.

7.2.1 Flap o alerón

Los alerones son dispositivos de alto empuje, solapas colocadas al borde de salida de un perfil y sujetadas por medio de bisagras, de tal manera que se pueden inclinar un rango de ángulos o estar estacionaria. Son ampliamente utilizados en turbinas de eje horizontal para aliviar las cargas (Mohan Kumar et al., 2019). El concepto de alerón rígido es usado universalmente, desde aviación hasta sector eólico. La deflexión causada por el alerón logra vencer la transición de flujo laminar a turbulenta hasta cierto punto (Pechlivanoglou et al., 2011).

Se considera que es un dispositivo de alta eficiencia tanto para regular la potencia, así como aligerar las cargas inducidas. Los alerones son fáciles de construir, sin embargo, a la hora de implementarlos, se pueden encontrar problemas, sobretodo porque hay que modificar los moldes y la estructura de las aspas, de lo contrario se pueden generar concentraciones de estrés y causar fallas. La mayor desventaja de usar alerones es que se aumenta el arrastre si el ángulo de deflexión supera los 10° debido a que se forma un volumen de baja presión por la separación de flujo en el lado de succión del alerón (Pechlivanoglou, 2013).

En (Berg et al., 2014) se estudia la influencia de los alerones posicionados a ángulos en un rango de -20° hasta 20° , y se observa que las simulaciones predicen una mayor capacidad de control cuando los alerones se colocan con ángulos negativos, es decir, tienen un ángulo de deflexión hacia abajo. Andersen et al. (2010) consiguieron resultados positivos con un alerón de 10% de la longitud de la cuerda. He et al. (2018) también usaron un alerón de ese tamaño, y con una inclinación variable entre -10° y 10° . Bofeng et al. (2018) utilizaron también un alerón del 10% de la longitud de cuerda del perfil, inclinado entre -5° y 10° , y concluyeron que en ese rango el rendimiento mejora cuando el ángulo de ataque del perfil es pequeño.

En este caso, se propone modificar la geometría del perfil SG6043 de tal manera que un alerón rígido se formara en el último 10% de la longitud de cuerda, con un ángulo de inclinación de -10° , como se muestra en la Figura 11. El alerón es sencillo, no cambia la forma del perfil fuera de la zona mencionada. Se podría obtener incluso una mayor eficiencia si el alerón se incluye como parte de la morfología del perfil, evitando la presencia de esquinas (Castillo-Acero et al., 2016).



Figura 11. Perfil SG6043 con un alerón de 10% de la longitud de la cuerda y ángulo de -10° .

7.2.2 Aleta en el borde de salida

Una aleta es un dispositivo de control de flujo activo que se coloca en el lado de presión cerca del borde de salida del perfil, proyectado a un ángulo recto del mismo. Se conocen también con el nombre de Gurney flaps. Con una configuración simple, las aletas permiten gran control aerodinámico (Pechlivanoglou et al., 2011).

Se ha visto que el coeficiente de empuje aumenta más cuando la altura de la aleta corresponde a un 2% de la longitud de la cuerda del perfil, sin embargo, también se aumentan los valores de arrastre. De acuerdo con los experimentos de Barlas y van Kuik (2010), los mejores resultados en general, se obtuvieron cuando se coloca una aleta de 1% de la longitud de cuerda a 95% de longitud de cuerda del borde de entrada.

Los mayores valores en las relaciones entre coeficiente de empuje y coeficiente de arrastre, según Fernández-Gamiz et al. (2017), surgieron al utilizar aletas que se colocaron a 95% de la longitud de la cuerda y con una altura de 2% de la cuerda, para un número de Reynolds de 7×10^6 . Además, notaron que el aumento en potencia de salida al usar aletas es más notable cuando las velocidades de viento son bajas.

Tomando estos resultados previos en cuenta para la propuesta de perfil, se diseñó la aleta en el perfil SG6043 a la misma distancia de longitud de cuerda, un 95%, como se muestra en la Figura 12. Es una aleta que corresponde al 2% de la longitud de cuerda, debido a que el tamaño del perfil es muy pequeño y la manufactura de una aleta tan pequeña se vuelve muy complicada.



Figura 12. Perfil SG6043 con una aleta de 2% de la longitud de la cuerda ubicada a 95% de la cuerda.

7.2.3 Generadores de vórtices

Implementados por primera vez en 1947 para el control de aeronaves, los generadores de vórtices son dispositivos que, al pasar el fluido sobre ellos, generan vorticidad concentrada, es decir torbellinos (Li et al., 2019). El fluido fuera de la capa límite de alta energía se atrae al piso de la capa límite, a la vez inyectando energía al fluido de baja energía cerca del piso de la capa límite, retrasando así la separación de la misma.

Al igual que los otros dispositivos mostrados en este documento, son fáciles de instalar. Sin embargo, deben colocarse siempre más adelante de donde ocurre la separación del fluido, por lo que a ángulos de ataque muy altos pueden perder su efectividad. Seshagiri et al. (2009) encontraron que, para vientos de bajas velocidades, generadores de vórtices de 2% de la cuerda del perfil, colocados a 20% del borde de entrada, presentaban buenos resultados. Los generadores de vórtices logran mayor eficiencia si se diseñan para crear vórtices en tres dimensiones, cerca de las paredes de un aspa. Se pueden colocar de forma que actúen en pares que formen vórtices contra-rotatorios

que incrementan el empuje en el aspa (Lögdberg, 2006). Existen también micro-generadores, llamados así porque su altura máxima se encuentra entre el 10% y el 50% del ancho de la capa límite, incurren en menos arrastre (Van Dam et al., 2008), estos pueden generar mejores resultados, especialmente en flujos laminares. A sabiendas de que las simulaciones son en dos dimensiones, y tomando en cuenta que se tienen condiciones de números de Reynolds relativamente pequeños, se diseñó el perfil modificado de SG6043 con un generador de vórtices de 2% de la cuerda del perfil, a un 20% del borde de entrada, tal y como se puede observar en la figura 13.

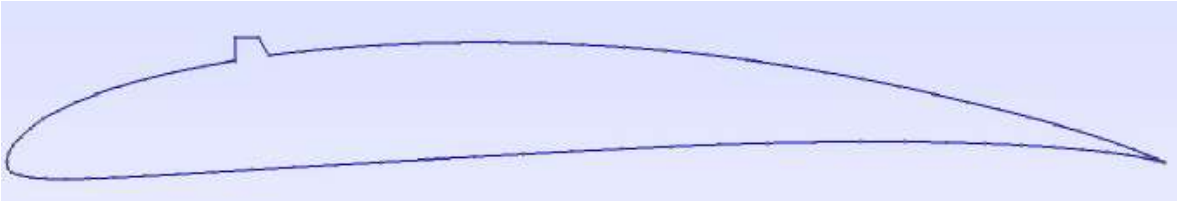


Figura 13. Perfil SG6043 con generador de vórtices de 2% de la longitud de la cuerda ubicado a 20% de la cuerda.

8. Discusión

Al simular los perfiles aerodinámicos NACA0012, S809 y SG6043 en condiciones de flujo turbulento para distintos números de Reynolds, es posible observar la respuesta de los coeficientes de sustentación y arrastre; así como la relación entre ellos para distintos ángulos de ataque.

En la Figura 2 se muestra el coeficiente de arrastre para el perfil NACA0012 en las condiciones de los cuatro números de Reynolds de interés. Los valores mínimos y máximos de este coeficiente son muy similares en las cuatro gráficas. Además, no hay una tendencia clara del efecto de la turbulencia a nivel general. De forma específica se puede ver que en el caso de $Re = 5 \times 10^5$ el coeficiente de arrastre es menor en todos los casos que la turbulencia es distinta de cero.

En términos generales se puede afirmar que el coeficiente de arrastre en el perfil NACA0012 no es significativamente afectado por el cambio en la turbulencia ni por el número de Reynolds, dentro de los parámetros de esta investigación.

En la Figura 3 se presenta el mismo coeficiente de arrastre, pero para el caso del perfil S809. En este caso resulta notorio que al aumentar el número de Reynolds ocurre una ligera disminución en el coeficiente de arrastre, en particular para ángulos de ataque mayores a 10° . Esto está relacionado con la formación de la burbuja de separación laminar, la cual tiene menor probabilidad de formarse cuando el flujo tiene más energía, esto es, para mayor número de Reynolds. En este caso el efecto de la turbulencia es más notorio y definido que para el perfil NACA0012. En las 4 gráficas se aprecia un ligero aumento del arrastre al incrementarse la turbulencia, salvo en el caso de mayor número de Reynolds, donde el comportamiento es errático.

Dado que en el perfil S809 el arrastre aumenta al incrementarse la turbulencia, se puede indicar que este perfil puede no resultar adecuado para aplicaciones en flujo turbulento.

La Figura 4 presenta de nuevo el coeficiente de arrastre, pero para el perfil SG6043. El comportamiento de los valores máximos del arrastre al incrementarse el número de Reynolds es el contrario que para el caso del perfil S809, pues ahora al aumentar el Reynolds se registran valores mayores de arrastre. Esto indica una ventaja para el perfil SG6043 pues los números de Reynolds bajos son los más usuales en las aplicaciones de interés de este proyecto, en particular $Re = 1 \times 10^5$ que es un valor típico de operación de turbinas eólicas de pequeña escala, de acuerdo con la literatura. Para la gráfica específica de $Re = 1 \times 10^5$, el comportamiento de la curva de coeficiente de arrastre en función de la turbulencia no está muy bien definido. La curva de este coeficiente para la turbulencia de 30% resulta mayor en unos casos y menor en otros, al compararla con la curva de turbulencia 0%.

Considerando que la respuesta del arrastre en el perfil SG6043 no es particularmente sensible ante cambios en la intensidad de turbulencia y que su tendencia es a la baja al disminuir el número de Reynolds, se identifican estas características como ventajas que posee este perfil para aplicaciones en flujo turbulento en turbinas de pequeña escala.

Si se comparan los resultados mostrados para el coeficiente de sustentación de los tres perfiles, en las Figuras 5, 6 y 7, se observa que los máximos de sustentación que ofrece el perfil NACA0012 son sumamente estables, alrededor de 0,6. En cambio para los perfiles S809 y SG6043, sus valores máximos pueden ser incluso el doble. Por esta razón, se centrará la discusión en las Figuras 6 y 7,

considerando que la sustentación ofrecida por el perfil NACA0012 resulta significativamente menor que en el caso de los otros dos perfiles.

En la Figura 6 es posible observar que la turbulencia tiene un efecto positivo en el coeficiente de sustentación en el perfil S809, para todos los números de Reynolds de interés. No obstante, como se mencionó anteriormente respecto de la Figura 3, en este perfil el arrastre también aumenta al aumentar la turbulencia. Para definir de mejor forma lo adecuado o no que puede resultar este perfil particular, se valorará en breve el resultado de la razón entre sustentación y arrastre. De este modo es posible conocer cuál es el efecto dominante.

El comportamiento de la sustentación del perfil SG6043 se presenta en la Figura 7. Las curvas de sustentación son en su mayoría mayores conforme aumenta la turbulencia, pero la tendencia no es tan clara como en el caso del perfil S809. Los valores de coeficiente de sustentación son en general menores en el perfil SG6043 que en el caso del S809, salvo para ángulos de ataque pequeños.

Tanto en el caso del perfil S809 como para el SG6043, las curvas de sustentación aumentan al aumentar el Reynolds, hasta un máximo en $Re = 5 \times 10^5$, para luego registrar una disminución en $Re = 10^6$.

Para determinar de manera más clara el comportamiento de los perfiles aerodinámicos, en las Figuras 8, 9 y 10 se presenta la relación entre sustentación y arrastre. De ellas destaca que el perfil NACA0012 tiene los valores mínimos y además presenta una caída importante al aumentar el ángulo de ataque. Si se tiene en mente que para las aplicaciones de flujo turbulento son usuales los cambios en la dirección del viento en el eje horizontal, debido a las fluctuaciones propias de la turbulencia, se debe reconocer que el mantener una adecuada respuesta aerodinámica para ángulos de ataque grandes es importante. Por esta razón una vez más se identifica que el perfil NACA0012 no resulta con un desempeño deseable en las condiciones de este estudio.

La tendencia del efecto de la turbulencia en los perfiles S809 y SG6043 es a disminuir la relación C_L/C_D según se observa en las Figuras 9 y 10. Pero en el caso del S809 la tendencia es mucho más clara y constante, para el SG6043 en algunos casos la turbulencia más bien aumenta la relación C_L/C_D .

Al analizar la Figura 9 es evidente que el impacto es más negativo en el caso del perfil S809. Por ejemplo, si se comparan los casos de turbulencia 0% y 30%: para el ángulo de ataque de 10° , con $Re = 10^5$ la razón C_L/C_D cae de 24 a 15,5 en el S809 y de 25 a 19 en el SG6043. Es decir, una pérdida del 35% para el S809 y del 24% para el SG6043.

Si se analiza de manera similar el caso $Re = 5 \times 10^5$, la razón C_L/C_D cae de 36 a 15 en el S809 y en el SG6043 más bien ocurre un aumento desde 23 hasta 30. Es decir, una pérdida del 58% para el S809 y un aumento del 30% para el SG6043.

Con este panorama, es posible afirmar que el comportamiento del perfil S809 es menos adecuado que la respuesta del perfil SG6043 en flujo turbulento. Debido al impacto negativo persistente de la turbulencia en la relación C_L/C_D para el perfil S809.

Considerando que el perfil que resulta más adecuado para el flujo turbulento es el SG6043, se procedió a realizar modificaciones con miras a optimizar su desempeño en flujo turbulento. Las cuales fueron la incorporación de alerones, aletas y generadores de vórtices.

Los resultados de la incorporación de estos elementos de optimización, propuestos en esta investigación, deben ser evaluados preferiblemente mediante experimentación, para tomar en cuenta los posibles efectos tridimensionales que se generan con estas modificaciones.

En todo caso, según las múltiples fuentes consultadas, los tres perfiles propuestos son los que pueden capturar la mayor cantidad de energía en las condiciones de interés en esta investigación.

9. Conclusiones

Luego de analizar la respuesta de los perfiles aerodinámicos NACA0012, S809 y SG6043 ante variaciones en el número de Reynolds y la intensidad de turbulencia, se puede concluir que:

1. El arrastre en el perfil NACA0012 no es significativamente afectado por el cambio en la turbulencia ni por el número de Reynolds, sin embargo, este perfil posee los valores de sustentación más bajos al ser comparado con los perfiles S809 y SG6043.
2. El perfil NACA0012 tiene los valores mínimos de sustentación entre arrastre y además presenta una caída importante al aumentar el ángulo de ataque. Por esta razón se identifica que el perfil NACA0012 no resulta con un desempeño deseable en las condiciones de este estudio.
3. El perfil S809 no es adecuado para aplicaciones en flujo turbulento dado que el arrastre aumenta al aumentar la turbulencia. Esto a pesar que la turbulencia tiene un efecto positivo en el coeficiente de sustentación en este perfil. La no idoneidad se sustenta en que la tendencia del efecto de la turbulencia en el perfil S809 es a disminuir la relación C_L/C_D .
4. Algunas de las ventajas que posee este perfil SG6043 para aplicaciones en flujo turbulento en turbinas de pequeña escala son que la respuesta del arrastre no es particularmente sensible ante cambios en la intensidad de turbulencia y su tendencia es a la baja al disminuir el número de Reynolds. Además, las curvas de sustentación son en su mayoría mayores conforme aumenta la turbulencia
5. En el perfil SG6043 la turbulencia disminuye o aumenta la relación C_L/C_D , pero en los casos que la disminuye el efecto es menor que en el perfil S809.
6. De los perfiles en estudio, resulta como más adecuado para turbinas eólicas de pequeña escala, el perfil SG6043.

10. Recomendaciones

Al estudiar el comportamiento aerodinámico de varios perfiles en condiciones de flujo turbulento, mediante simulación numérica, se generan las siguientes recomendaciones:

1. Ampliar el estudio incorporando combinaciones de las variantes de optimización, es decir, realizar experimentos de perfiles con alerones y generadores de turbulencia al a vez, entre otras combinaciones.
2. Incorporar otros perfiles aerodinámicos que son propuestos en la literatura de forma específica para turbinas de pequeña escala, aunque estos sean mencionados solo en una publicación. Atender esta recomendación puede demandar una cantidad de tiempo muy grande, por lo que deberá valorarse algún criterio o apoyarse en estudiantes asistentes para la realización de las simulaciones.
3. Realizar experimentos en túneles de viento, cuando las condiciones así lo permitan.
4. Los tres perfiles propuestos para la optimización de la captura de energía, deben ser puestos a prueba mediante experimentos, con las condiciones de flujo turbulento.

Sobre posibles proyectos futuros que se podrían desprender de esta investigación, se puede mencionar:

1. Continuar con la manufactura de aspas según los resultados de este proyecto.
2. Desarrollar un análisis de un rotor, tanto numérico como experimental, que permita eventualmente la construcción de una turbina eólica adecuada para flujo turbulento y en zonas de bajo potencial eólico.

11. Agradecimientos

Al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y al Ing. Maikel Méndez Morales por los datos aportados para el desarrollo de esta investigación.

Al PhD. Benito Stradi Granados por todo el soporte de computación en la nube con la plataforma Windows Azure, lo que permitió el rápido procesamiento de la información para la generación de algunas publicaciones y participación en conferencias.

A los asistentes del Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE), de la Escuela de Ingeniería Electromecánica. Se hace el agradecimiento a una numerosa cantidad de estudiantes de distintas carreras que han dedicado, de forma gratuita y/o remunerada, su tiempo a distintas labores como toda de datos, procesamiento de documentos e instalación de equipos de medición en el marco de este proyecto de investigación.

12. Referencias

- Andersen, P. B., Henriksen, L., Gaunaa, M., Bak, C., & Buhl, T. (2010). Deformable trailing edge flaps for modern megawatt wind turbine controllers using strain gauge sensors. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 13(2-3), 193-206.
- Barlas, T. K., & van Kuik, G. A. (2010). Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines. *Progress in Aerospace Sciences*, 46(1), 1-27.
- Berg, J. C., Barone, M. F., & Yoder, N. C. (2014). SMART wind turbine rotor: data analysis and conclusions. SAND2014-0712, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Bofeng, X., Junheng, F., Qing, L., Chang, X., Zhenzhou, Z., & Yue, Y. (2018, June). Aerodynamic performance analysis of a trailing-edge flap for wind turbines. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1037, No. 2, p. 022020). IOP Publishing.
- Castillo-Acero, M. A., Cuerno-Rejado, C., & Gómez-Tierno, M. A. (2016). Morphing structure for a rudder. *The Aeronautical Journal*, 120(1230), 1291-1314.
- Chu, C. R., & Chiang, P. H. (2014). Turbulence effects on the wake flow and power production of a horizontal-axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 124, 82-89.
- Devinant, P., Laverne, T., & Hureau, J. (2002). Experimental study of wind-turbine airfoil aerodynamics in high turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(6), 689-707.
- Fernandez-Gamiz, U., Zulueta, E., Boyano, A., Ramos-Hernanz, J. A., & Lopez-Guede, J. M. (2017). Microtab design and implementation on a 5 MW wind turbine. *Applied Sciences*, 7(6), 536.
- Giguere, P., & Selig, M. S. (1998). New airfoils for small horizontal axis wind turbines.
- He, K., Qi, L., Zheng, L., & Chen, Y. (2018). Combined pitch and trailing edge flap control for load mitigation of wind turbines. *Energies*, 11(10), 2519.
- Kamada, Y., Maeda, T., Murata, J., & Nishida, Y. (2016). Visualization of the flow field and aerodynamic force on a Horizontal Axis Wind Turbine in turbulent inflows. *Energy*, 111, 57-67.
- Langley Research Center. Turbulence Modeling Resource. En línea: https://turbmodels.larc.nasa.gov/langtrymenter_4eqn.html
- Li, S. W., Wang, S., Wang, J. P., & Mi, J. C. (2011). Effect of turbulence intensity on airfoil flow: Numerical simulations and experimental measurements. *Applied Mathematics and Mechanics*, 32(8), 1029-1038.
- Li, Q. A., Murata, J., Endo, M., Maeda, T., & Kamada, Y. (2016). Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a Horizontal Axis Wind Turbine (Part I: Power performance). *Energy*, 113, 713-722.

- Li, X., Yang, K., & Wang, X. (2019). Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Vortex Generator Height on Vortex Characteristics and Airfoil Aerodynamic Performance. *Energies*, *12*(5), 959.
- Lin, M., & Sarlak, H. (2016, June). A comparative study on the flow over an airfoil using transitional turbulence models. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1738, No. 1, p. 030050). AIP Publishing LLC.
- Lögberg, O. (2006). *Vortex generators and turbulent boundary layer separation control*.
- Lubitz, W. D. (2014). Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine. *Renewable Energy*, *61*, 69-73.
- Madriz-Vargas, R., Bruce, A., Watt, M., Mogollón, L. G., & Álvarez, H. R. (2017). Community renewable energy in Panama: a sustainability assessment of the “Boca de Lura” PV-Wind-Battery hybrid power system. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, *2*, 18.
- Mertens, S. (2006). Wind energy in the built environment: concentrator effects of buildings.
- Mohan Kumar, P., Sivalingam, K., Lim, T. C., Ramakrishna, S., & Wei, H. (2019). Strategies for enhancing the low wind speed performance of H-Darrieus wind turbine—Part 1. *Clean Technologies*, *1*(1), 185-204.
- Pagnini, L. C., Burlando, M., & Repetto, M. P. (2015). Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment. *Applied Energy*, *154*, 112-121.
- Pechlivanoglou, G. (2013). Passive and active flow control solutions for wind turbine blades.
- Pechlivanoglou, G., Nayeri, C. N., & Paschereit, C. O. (2011, January). Performance optimization of wind turbine rotors with active flow control. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 54617, pp. 763-775).
- Richmond-Navarro, G. (2019). Modelos de turbulencia introductorio. Reporte Técnico. Instituto Tecnológico de Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.2.21060.17289
- Richmond-Navarro, G., Montenegro-Montero, M., & Otárola, C. (2020). Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas. *Revista Lasallista de Investigación*, *17*(1).
- Seshagiri, A., Cooper, E., & Traub, L. W. (2009). Effects of vortex generators on an airfoil at low Reynolds numbers. *Journal of Aircraft*, *46*(1), 116-122.
- Sicot, C., Devinant, P., Loyer, S., & Hureau, J. (2008). Rotational and turbulence effects on a wind turbine blade. Investigation of the stall mechanisms. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, *96*(8-9), 1320-1331.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indrāja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 1351-1371.
- Van Dam, C. P., Berg, D. E., & Johnson, S. J. (2008). *Active load control techniques for wind turbines* (No. SAND2008-4809). Sandia National Laboratories.

Wang, S., Zhou, Y., Alam, M. M., & Yang, H. (2014). Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 26(11), 115107.

Wright, A. K., & Wood, D. H. (2004). The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 92(14-15), 1265-1279.

Apéndice 1

Artículo aceptado para publicación

Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio
de la provincia de Cartago

Costa Rica's wind resource assessment: A case study for
Cartago province

Gustavo Murillo Zumbado

Instituto Tecnológico de Costa Rica

gmurillo@tec.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0002-1947-3567>

Gustavo Richmond Navarro

Instituto Tecnológico de Costa Rica

grichmond@tec.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Pedro Casanova Treto

Universidad de Costa Rica

pedro.casanova@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-8508-6293>

Julio César Rojas Gómez

Instituto Tecnológico de Costa Rica

jrojas@tec.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0003-1375-2191>

Resumen

La evaluación del recurso eólico es vital para el desarrollo e implementación de sistemas de aprovechamiento eólico para la generación de energía. Costa Rica no posee estudios por zonas de manera específica como se plantea, que permita a los profesionales en el área tomar decisiones en función del potencial y características del viento. Con el presente estudio se

brinda por primera vez la caracterización del recurso eólico en la provincia de Cartago. La caracterización se realiza para la capa límite superficial, con datos medidos a 10 m de altura sobre el nivel del suelo tomando la magnitud de la velocidad y dirección del viento obtenidas de ocho estaciones meteorológicas. Durante la caracterización del recurso eólico se analizaron los datos de forma estadística y usando códigos computacionales que permitieron obtener resultados de la información colectada. Al procesar la información brindada por las estaciones meteorológicas se determina que los promedios de velocidades del viento se encuentran entre los 3 m/s y 5 m/s a una altura de 10 m sobre la superficie. Además, la intensidad de turbulencia se registra entre 15% y 30% y se determinaron dos periodos bien marcados en cuanto a la magnitud del viento, de noviembre a febrero para intensidades fuertes y septiembre a octubre para intensidades más bajas. Para la provincia de Cartago las direcciones que predominan son las componentes Norte o Este, siendo las dos componentes más recurrentes en los datos analizados.

Palabras clave

Recurso eólico, intensidad de turbulencia, rosa de los vientos.

Abstract

Wind resource assessment is essential for the development and implementation of wind power systems. Costa Rica have no studies by zones in a specific way as proposed, which allows professionals in the area to make decisions based on the potential and characteristics of the wind. This study provides for the first time the characterization of the wind resource in the province of Cartago. The characterization is carried out for the surface boundary layer, with data measured at 10 m above ground level, taking the magnitude of the wind speed and direction obtained from eight meteorological stations. During the characterization of the wind resource, the data was analyzed statistically and using computational codes that allowed obtaining results from the information collected. When processing the information provided by the meteorological stations, it is determined that the average wind speeds are between 3 m/s and 5 m/s at a height of 10 m above the surface. In addition, the intensity of turbulence is recorded between 15% and 30% and two well marked periods were determined in terms of the magnitude of the wind, from November to February for strong intensities and

September to October for lower intensities. For the province of Cartago, the directions that predominate are the North or East components, being the two most recurrent components in the analyzed data.

Keywords

Wind resource, turbulence intensity, wind rose.

Introducción

A nivel global las energías renovables y la eficiencia energética son pilares de la transformación energética y una de las claves para mitigar el efecto del cambio climático. En 2017, el sector eléctrico sumó 167 GW de capacidad energética renovable global, esto es un crecimiento del 8,3 % con respecto al año 2016 y una continuidad de las tasas de crecimiento de años anteriores, con una media del 8 % anual desde 2010. Siendo de destacar que, entre el 2008 y el 2017, la capacidad global se duplicó [1].

En el caso de la energía eólica, la capacidad instalada acumulada en el planeta en 2001 fue de 23 900 MW y en 2017 alcanzó 539 123 MW, representando un aumento de más de 22 veces en un periodo de 16 años [2].

En particular, un país que se ha comprometido a alcanzar una matriz de energía eléctrica 100% renovable para el año 2030 es Costa Rica [3]. Una nación reconocida en la comunidad internacional por sus políticas de conservación y protección de la biodiversidad y que aspira a la carbono neutralidad para el 2100 [4].

Debido a la crisis del petróleo de la década de los 70's, los países como Costa Rica se vieron forzados a buscar nuevas fuentes de producción energética, los primeros estudios sobre energía eólica se realizan finalizando esa década. En la zona de Tilarán se da la construcción de los primeros parques eólicos en la década de los 90's, posteriormente se desarrolló el parque eólico Tejona, perteneciente al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y que inició sus operaciones en 2002 [5].

De acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018: “Alberto Cañas Escalante”, Costa Rica pretende suplir su demanda de energía mediante una matriz que asegure un suministro óptimo, continuo y promoviendo el uso eficiente de energía, con predominio de fuentes renovables y al menor costo [6].

Para el año 2017, el 99,67% de la generación bruta anual de energía fue mediante fuentes renovables, siendo 11,49% energía eólica [7]. Además, considerando que en Costa Rica las tres principales fuentes que conforman la matriz energética son: la hidroeléctrica, la eólica y la geotérmica (en ese orden), una de las ventajas de la energía eólica es que forma un buen complemento de la energía hidroeléctrica, pues los vientos se aceleran cuando baja el caudal de los ríos [8].

Para el correcto aprovechamiento de la energía del viento, son necesarios los mapas de potencial eólico. El primero fue realizado en 1984 [9]. Entre 2008 y 2009 el ICE y la Universidad de Costa Rica emplearon modelos de meso-escala, similar al estudio de [23], para elaborar mapas y archivos con datos del recurso eólico en Costa Rica y hasta 20 km dentro del mar [5], un estudio de 2011 presenta el mapa de velocidad del viento media anual [9], siendo el más reciente de 2017, cuando el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) realiza un estudio para manejar e incorporar una mayor variedad de energías renovables en Costa Rica [10].

Considerando este panorama, se puede afirmar que Costa Rica no cuenta con estudios sobre el recurso eólico en regiones específicas del país, a partir de datos de estaciones meteorológicas. Al profundizar en este recurso, se podría revelar un potencial en alguna localidad particular, partiendo de un análisis más detallado, como el desarrollado por [11], que basado en variables como la velocidad y, dirección del viento, evidencia un gran potencial en una región colombiana.

Estudios similares en Reino Unido han permitido identificar las mejores zonas para el uso de turbinas de pequeña escala [12]. En Suecia, mediciones directas de la velocidad del viento, mediante mástiles de 100 m de altura, se emplean para determinar los sitios adecuados para el emplazamiento de parque eólicos [13]. En Nigeria se han desarrollado estudios del perfil de velocidad de viento, procesando mediciones de velocidad de viento a 10 m de altura, mediante redes neuronales [14]. Entre tanto en Japón, se emplean técnicas avanzadas de mecánica de fluidos computacional para predecir el comportamiento del viento sobre terreno complejo [15].

El tema de evaluación del recurso eólico es de interés en localidades alrededor de todo el mundo como Pakistán [16], Burkina Faso [17] y Australia [18]. Siendo de interés incluso en desiertos en China [19] y con técnicas sumamente variadas como mediante satélites con

escaterómetro en el mar Mediterráneo [20] o bien técnicas estadísticas en tres dimensiones a partir de datos medidos en tierra, empleadas en Alemania, pero exportables a cualquier otra área en el mundo [21].

Con este panorama, en el presente trabajo se caracteriza el recurso eólico en la provincia de Cartago, Costa Rica, la cual contaba con un 65% de su territorio cubierto por zonas boscosas, para el año 2005 [22]. Esta caracterización se realiza para la capa límite superficial, con datos medidos a 10 m de altura sobre el nivel del suelo, siendo el primer estudio en su tipo en Costa Rica.

Metodología

Descripción de la zona de estudio

Este estudio se concentra en la provincia de Cartago, de las siete provincias en las que se divide Costa Rica, Cartago es la segunda más pequeña con área aproximada de 3124,67 km² y se encuentra ubicada en la parte central del país, como se muestra en la Figura 1. Está formada por ocho cantones: Cartago, Paraíso, La Unión, Jiménez, Turrialba, Alvarado, Oreamuno y El Guarco [24].



Figura 1. Ubicación geográfica de la provincia de Cartago.

Fuente: Atlas de cantones de Costa Rica.

Según su clima, se ubica en la región climática del Valle Central. La región del valle central es afectada por las vertientes del Pacífico y del Caribe, esto genera un clima mixto que permite subdividir la región en oriental y occidental. Cartago se ubica en la parte oriental, zona con mayor influencia de la vertiente del Caribe [25]. La lluvia media anual presente en el valle central va de 1950 mm a 2820 mm y la temperatura media anual se encuentra en el rango de 15 °C a 22 °C [26].

Descripción de los datos

Los datos disponibles son magnitud de la velocidad y dirección del viento. Proviene de ocho estaciones meteorológicas, cuyos detalles se presentan en la Tabla 1 y su ubicación en la Figura 2. Las estaciones ITCR Cartago, RECOPE Ochoyogo y Volcán Irazú son administradas por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN), suministran datos con resolución temporal horaria y abarcan un periodo de 10 años de mediciones. Las estaciones Campamento, Terrena Guatuso, San Pablo y Tierra Blanca son administradas por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), presentan datos con resolución temporal diaria y comprenden un período de 5 años. Por último, la estación meteorológica ITCR CIVCO administrada por el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO), con iguales coordenadas de ubicación de la estación ITCR.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del IMN en la provincia de Cartago

ID	Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste	Periodo	
				Inicio	Fin
1	ITCR Cartago	09° 51' 08"	83° 54' 31"	01/01/2007	31/12/2017
1	ITCR CIVCO	09° 51' 08"	83° 54' 31"	31/08/2011	02/05/2017
2	RECOPE Ochoyogo	09° 53' 40,21"	83° 56' 19,41"	01/01/2007	31/12/2017
3	Volcán Irazú	09° 58' 47,53"	83° 50' 16,14"	01/01/2007	31/12/2017
4	Campamento	09° 52' 52.65"	83°38'46.28"	01/01/2013	31/12/2017
5	Terrena de Guatuso	09°49'18.90"	83°56'37.63"	01/01/2013	31/12/2017
6	San Pablo	09°56'14.34"	83°50' 06.30"	01/01/2013	31/12/2017
7	Tierra Blanca	09°54'47.16"	83°53'12.85"	01/01/2013	31/12/2017



Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas según ID mostrado en la Tabla 1.

Los datos son adquiridos con estaciones meteorológicas marca Campbell Scientific, que poseen anemómetros que mide la magnitud de la velocidad del viento en un rango de 0 m/s a 50 m/s con una precisión de $\pm 0,5$ m/s y un valor umbral de 0,5 m/s. Para la medición de la dirección del viento, disponen de una veleta que mide en un rango de 0° a 360° con una precisión de $\pm 5^\circ$ y un valor umbral de 10° para velocidades entre 0,8 m/s y 1,8 m/s y de 5° para velocidades de 1,8 m/s o mayores. También se utilizan estaciones meteorológicas marca Davis, equipadas con un anemómetro que mide magnitudes de la velocidad del viento en el rango de 0 m/s a 80 m/s con una precisión de ± 1 m/s, una resolución de 0,1 m/s y un valor umbral de 0,4 m/s. La dirección del viento, se determina a través de una veleta que mide en un rango de 0° a 360° con una precisión de $\pm 3^\circ$ para valores de velocidad de 1,6 m/s o superiores.

Descripción de los métodos de análisis

Para caracterizar el recurso eólico se analizan los datos con el apoyo del software Matlab, mediante la escritura de códigos computacionales que permiten obtener resultados de la información colectada.

El primer análisis que se realiza es la representación de las series de tiempo de la velocidad del viento, posteriormente se grafica la velocidad del viento de forma mensual y horaria, para visualizar variaciones estacionales y a lo largo de las 24 horas del día, respectivamente.

El segundo análisis que se efectúa es la distribución de frecuencia para las distintas velocidades del viento.

El tercer análisis que se efectúa es la intensidad de turbulencia, únicamente en la estación CIVCO, debido a su frecuencia de muestreo, que es cada 1 minuto.

Se utiliza la estadística descriptiva para poder representar, organizar y analizar la información recopilada de las estaciones meteorológicas. Este método permite identificar rangos o valores importantes; o patrones temporales del recurso eólico. Esto mediante medidas de tendencia central, en particular la media muestral, definida como: el promedio aritmético simple de los datos [27].

En el análisis de los datos se utiliza la media muestral de dos formas distintas, la primera para estimar distintos promedios del periodo de estudio, obteniendo datos horarios, diarios y mensuales. Con esto se tiene una descripción de la variación horaria y mensual del valor promedio del período comprendido por las estaciones meteorológicas. Los datos horarios, representan la variación del viento a lo largo de las 24 horas del día. Los datos mensuales permiten ver estacionalidad en los datos e identificar periodos de variación del viento a lo largo del año.

La segunda forma de utilizar la media muestral es para obtener los datos diarios y mensuales. De modo que se tiene una serie de tiempo diaria y mensual de los diez años de estudio, para cada estación meteorológica.

Se realizan histogramas de frecuencia, de modo que se representa gráficamente la distribución de frecuencia de los datos, se utiliza la frecuencia relativa.

También se utilizan medidas de dispersión, en particular la desviación estándar muestral, definida como la raíz cuadrada de la varianza muestral, es decir, de la medición de la distancia de los datos respecto a la media muestral.

Tanto la media muestral como la desviación estándar muestral se utilizan para el cálculo de la intensidad de turbulencia (I_T), una de las medidas básicas de la turbulencia del viento [28], dada por la Ecuación (1).

$$I_T = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (1)$$

Donde S es la desviación estándar, \bar{x} es el promedio de los datos, i es el i ésimo dato, n es la cantidad total de datos y x_i es el dato en la i ésima posición.

Para el análisis de intensidad de turbulencia se toman los datos cada 1 minuto, disponibles únicamente en la estación CIVCO, se realiza mediante Matlab el procesamiento de los datos para generar promedios y desviaciones estándar cada 10 minutos. Posteriormente se eliminan todas las entradas que tienen velocidad cero, pues en este caso no es posible calcular la intensidad de turbulencia.

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico de la intensidad y dirección del viento en las provincias de Cartago. Para mostrar el comportamiento general del recurso eólico, en las Figuras 3 y 4 se muestra la serie de tiempo de la magnitud de la velocidad del viento, en el período comprendido por cada estación. La Figura 3 se refiere a las estaciones administradas por el ICE y muestra intensidades máximas entre los 5 m/s y 7 m/s en la estación de San Pablo de Cot; las menores intensidades están entre 0 m/s y 1 m/s en la estación de Campamento. En el eje horizontal se ubica la escala temporal, se abarcan todos los datos de disponibles desde 2013 hasta 2018 y se coloca para orientación el mes de enero de cada año, indicado como “Jan”.

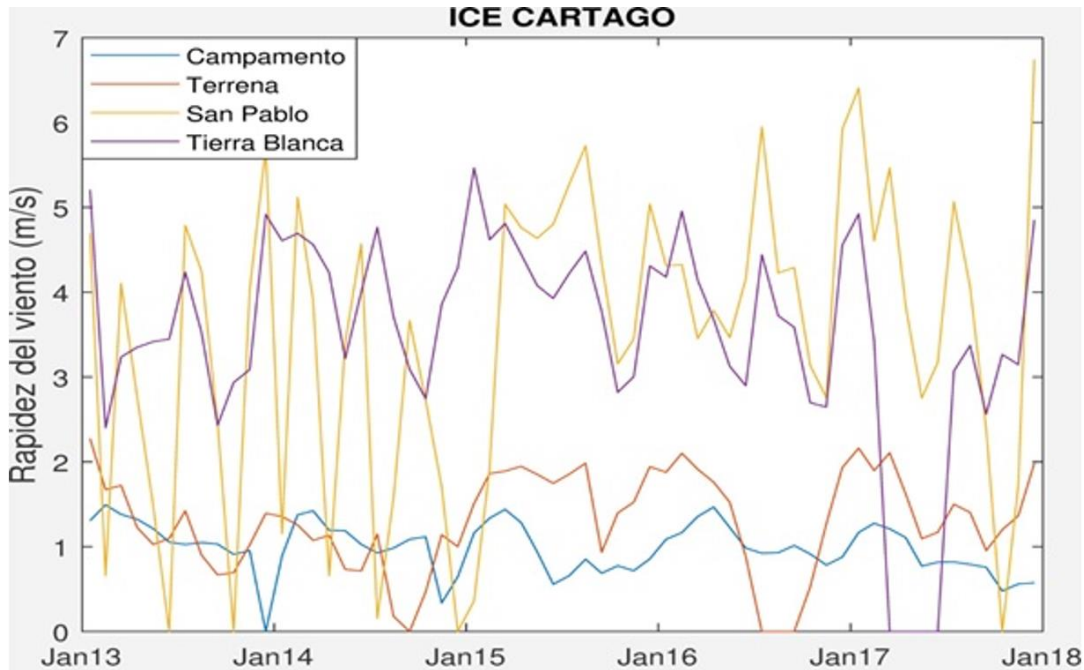


Figura 3. Series de tiempo de la magnitud del viento en las estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Cartago, administradas por el ICE.

La Figura 4 se refiere a las estaciones administradas por el IMN y muestra intensidades máximas entre los 5 m/s y 7 m/s en la estación de RECOPE en Ochomogo; las menores intensidades están en la misma estación en periodos de calma (0 m/s).

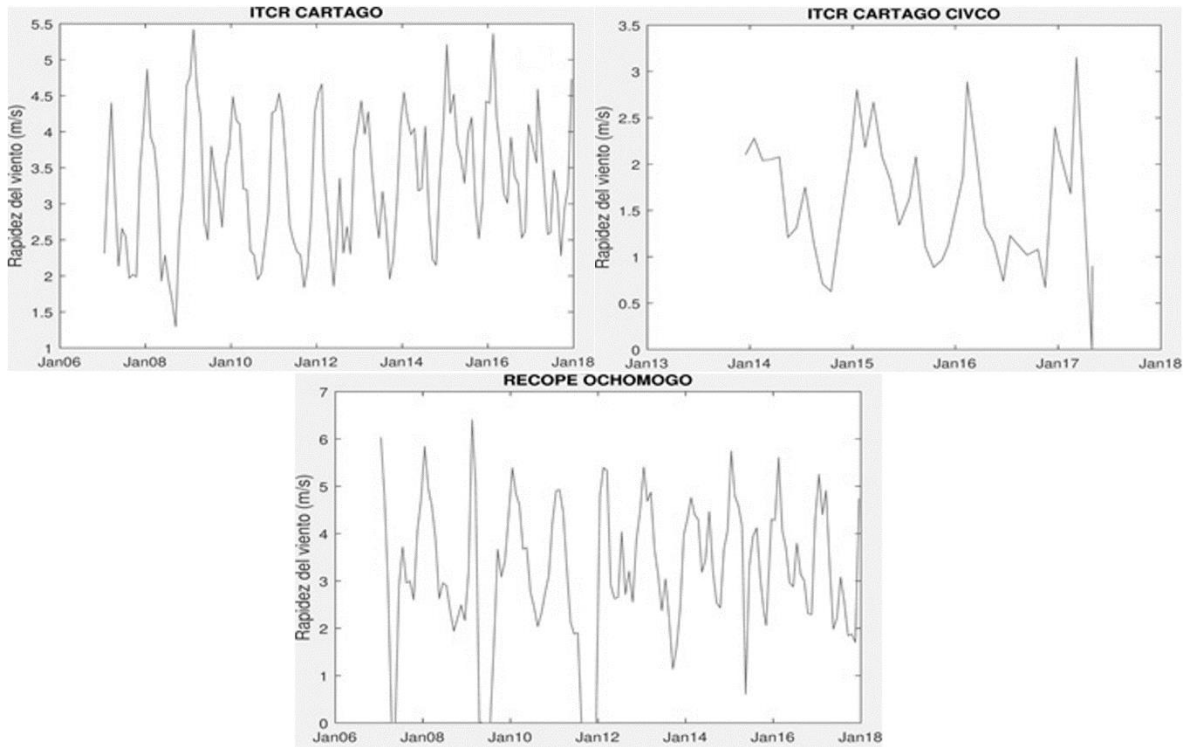


Figura 4. Series de tiempo de la magnitud de la velocidad del viento en las estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Cartago, administradas por el IMN.

Variación mensual del viento

Al analizar los promedios anuales de todos los datos disponibles, se obtiene que para la región del valle central la variación mensual presenta un aumento del viento para los meses de fin de año e inicio de año, es decir los meses que van de noviembre hasta febrero. Luego se presenta una disminución de los datos con un pequeño aumento entre junio o julio, periodo conocido como las canículas; un mínimo se presenta en setiembre y octubre. En la Figura 5 se presenta la distribución mensual de la magnitud de la velocidad del viento para las estaciones meteorológicas del estudio. Se muestra una distribución típica para la región climática.

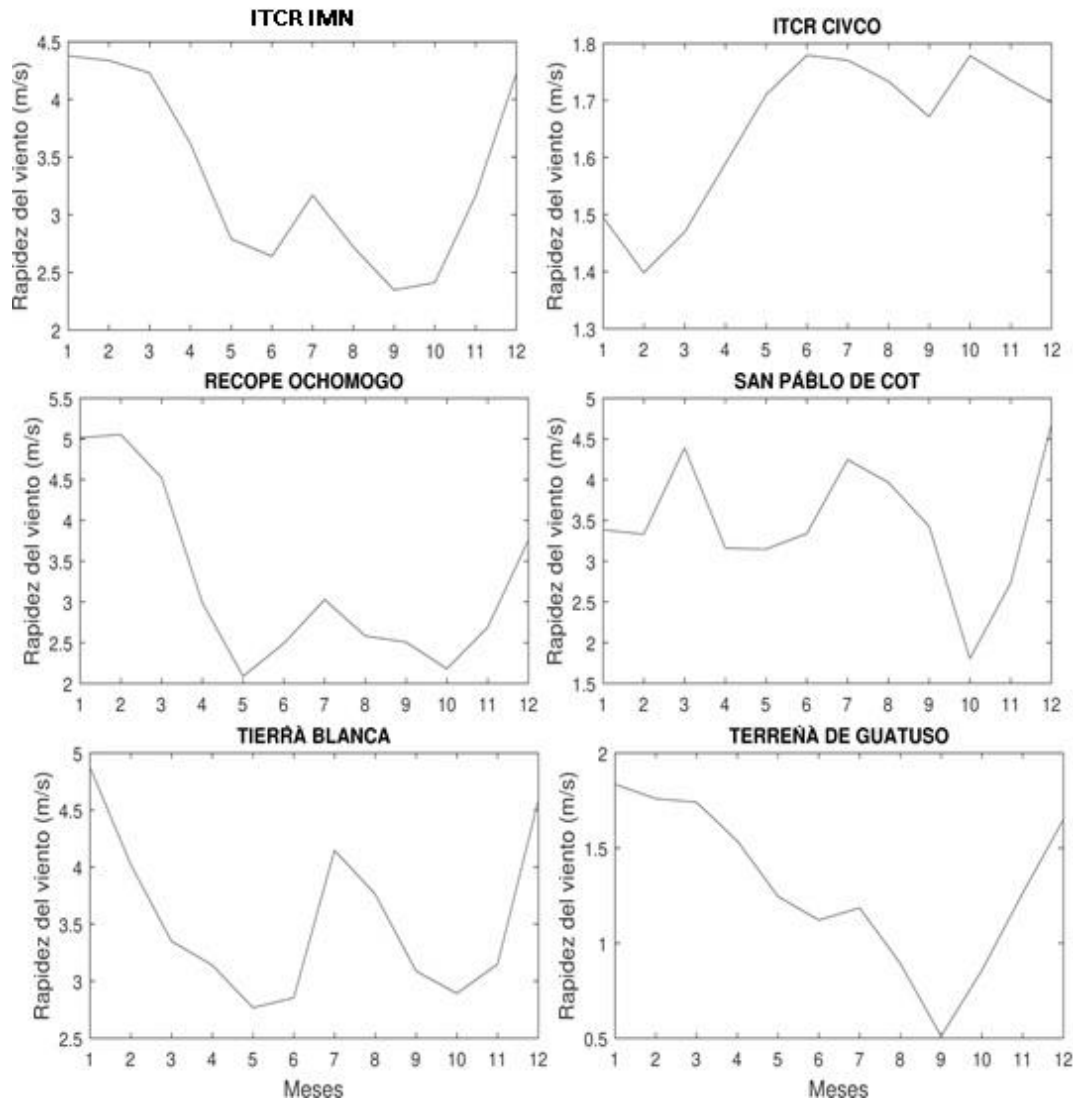


Figura 5. Distribución mensual de la magnitud del viento en las estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Cartago (el eje horizontal indica el mes).

Variación horaria del viento

Utilizando las estaciones meteorológicas administradas por el IMN y el CIVCO, se logra ver la distribución a lo largo de las 24 horas del día. Donde los máximos de velocidad del viento se presentan cerca de mediodía, Figura 5. Los máximos son entre 3 m/s y 5 m/s aproximadamente, la estación del CIVCO se encuentra a una altura menor que las estaciones del IMN, esa diferencia de altura se traduce en una diferencia en la magnitud del viento de 2 m/s en el máximo y un desfase del máximo de dos horas aproximadamente, como se ve en la Figura 6. La estación del IMN ubicada en el Volcán Irazú presenta un comportamiento distinto, con intensidades casi constantes de 6 m/s en horas de la noche y madrugada, con un

decaimiento de la intensidad a partir de las 7:00 a.m. llegando al mínimo de 4 m/s, cerca de las 4:00 p.m., según se aprecia en la Figura 6.

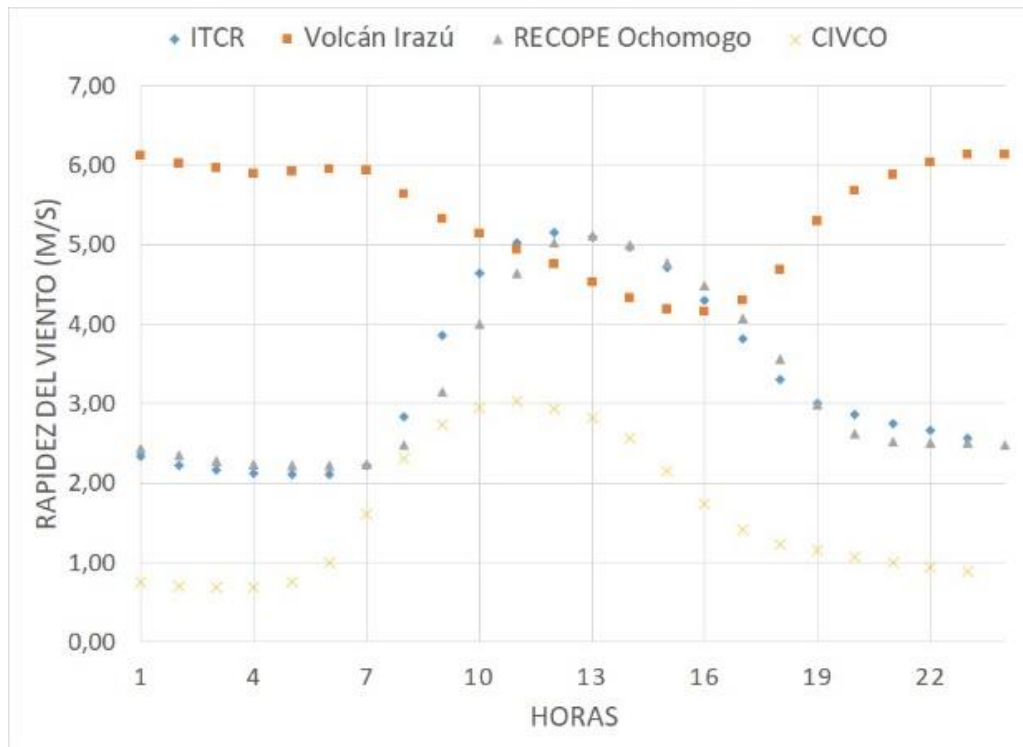


Figura 6. Distribución horaria de la magnitud del viento en las estaciones meteorológicas administradas por el IMN y el CIVCO.

Dirección del Viento

La provincia de Cartago se encuentra en la parte oriental del valle central y es influenciada por la Vertiente del Caribe, de modo que los vientos alisios son los que predominan en la provincia. En las Figuras 7a-7d se puede observar la rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas administradas por el IMN y el ICE. En cada imagen se indica la escala de velocidad del viento en m/s.

Se puede determinar, según los datos de las estaciones, que las componentes predominantes son las Este o Norte, teniendo clara influencia los vientos alisios que entran por la Vertiente del Caribe y que afectan la provincia de Cartago.

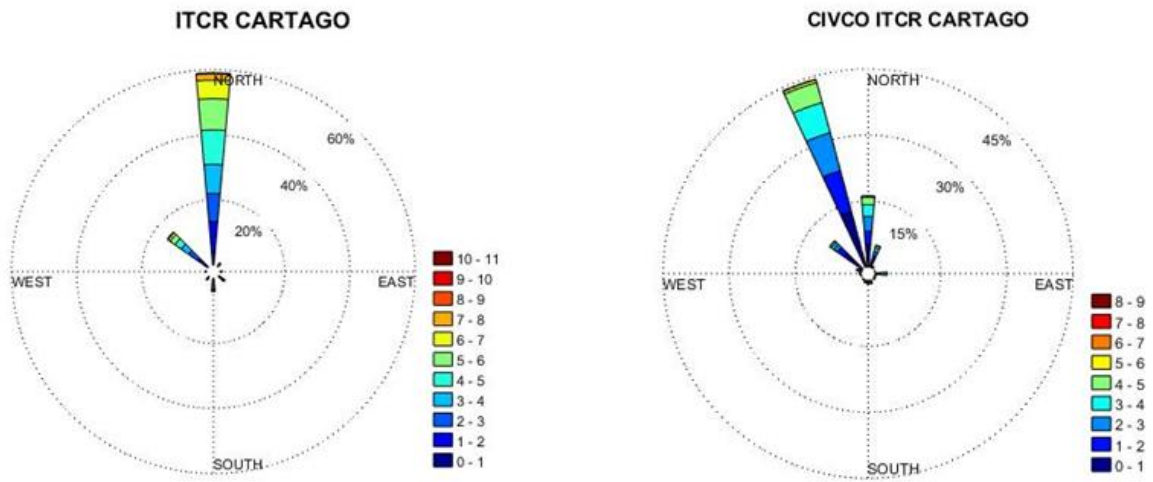


Figura 7a. Rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas ITCR y CIVCO.

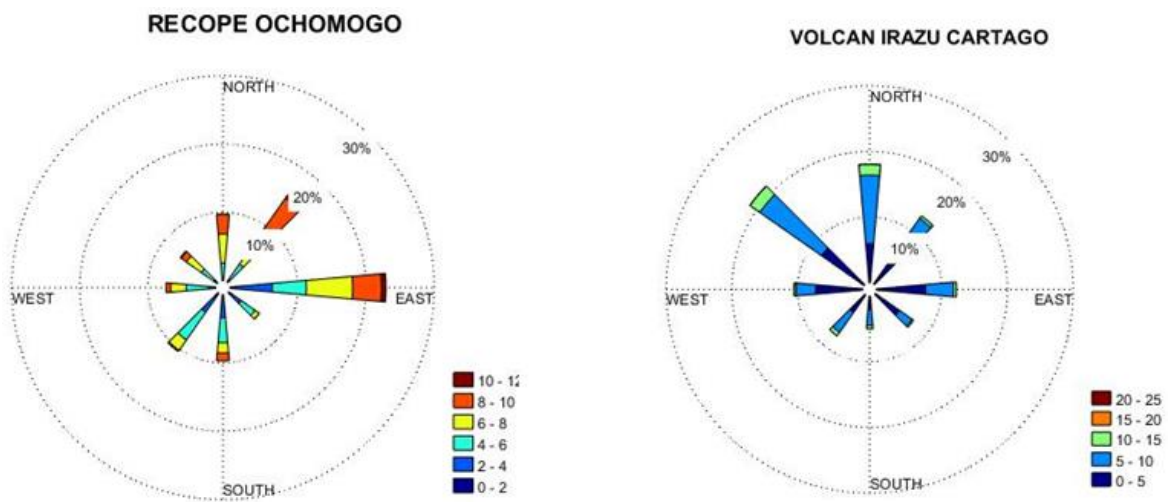


Figura 7b. Rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas RECOPE Ochomogo y Volcán Irazú.

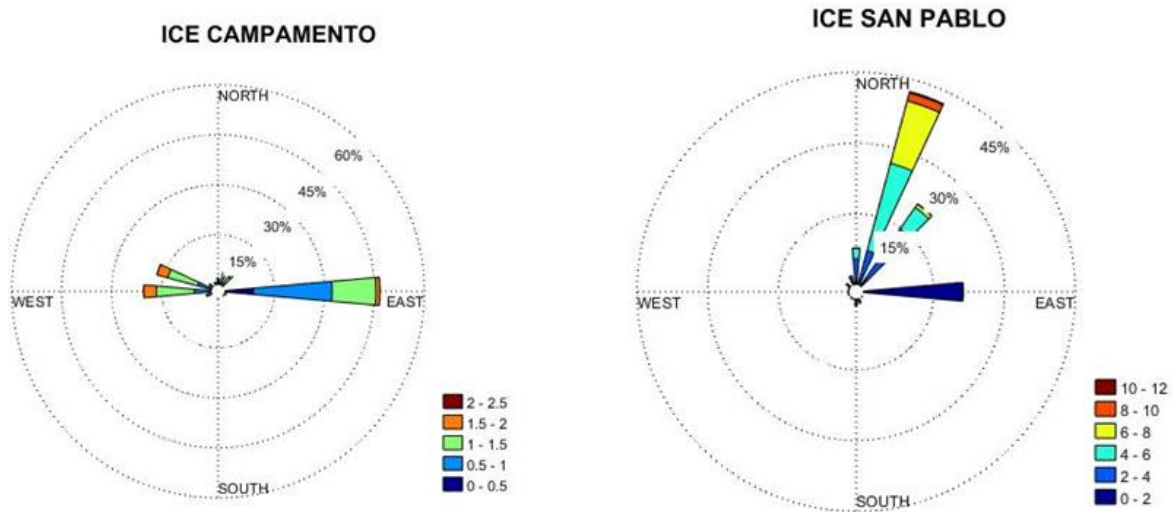


Figura 7c. Rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas Campamento y San Pablo, administradas por el ICE.

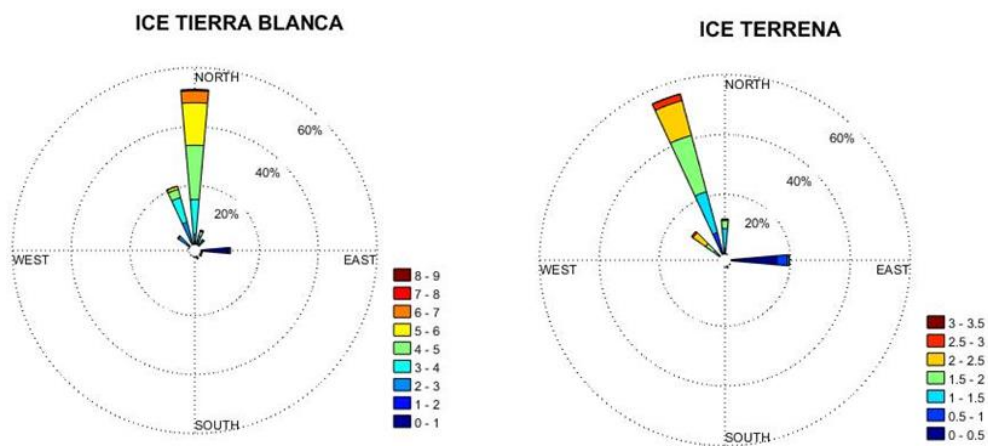


Figura 7d. Rosa de los vientos para las estaciones meteorológicas Tierra Blanca y Terrena, administradas por el ICE.

Frecuencia de distribución de la velocidad del viento según su intensidad

Como se muestra en las Figuras 8a y 8b, para la provincia de Cartago se cuenta con un predominio de las intensidades de velocidad de viento entre 1 m/s y 2 m/s aunque en dos de las estaciones la magnitud que predomina se encuentra entre 4 m/s y 5 m/s, estas estaciones son las ubicadas en Tierra Blanca y en el volcán Irazú. Ambas estaciones se encuentran a mayor altitud y es esperable encontrar intensidades del viento mayores.

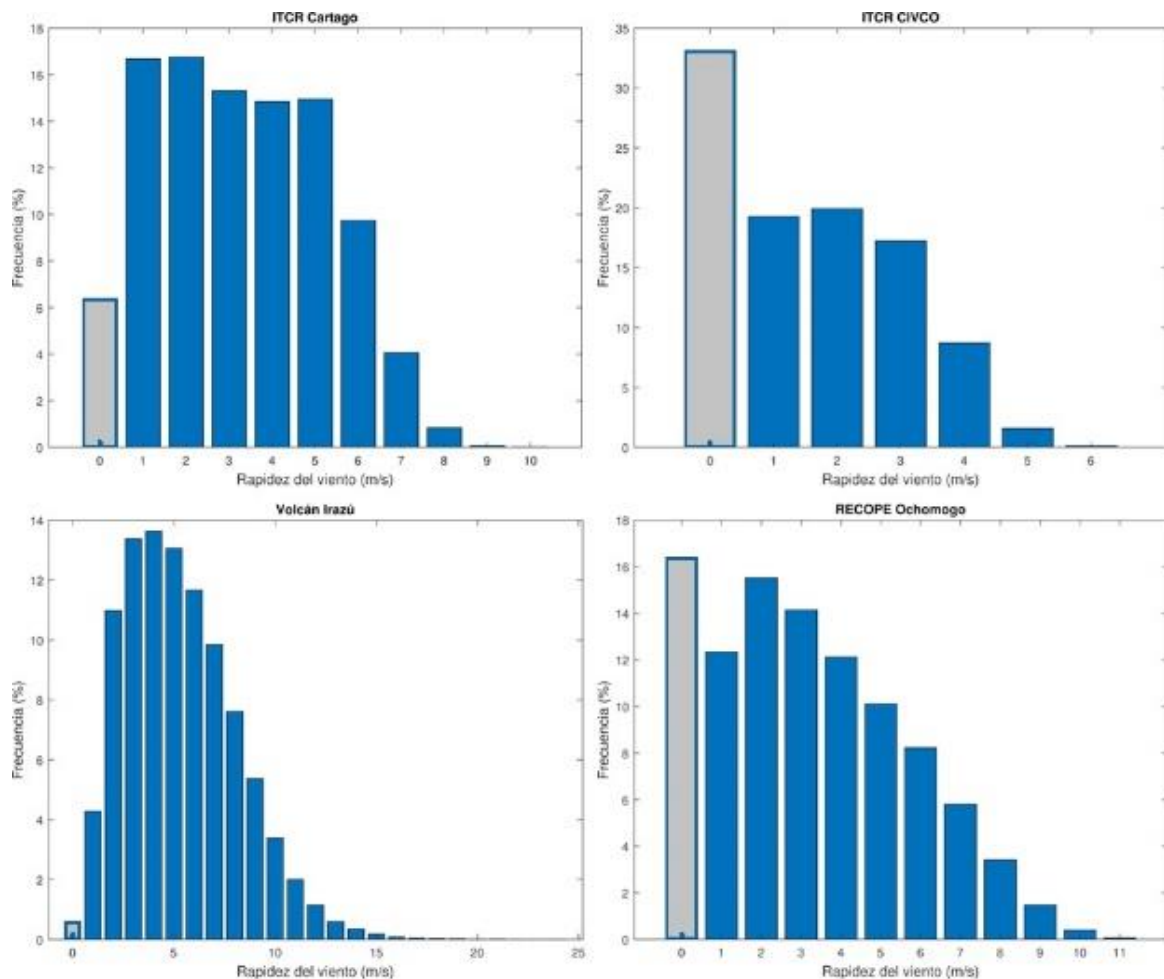


Figura 8a. Distribución de frecuencia de la magnitud de la velocidad del viento en las estaciones ITCR, CIVCO, Volcán Irazú y Ochomogo.

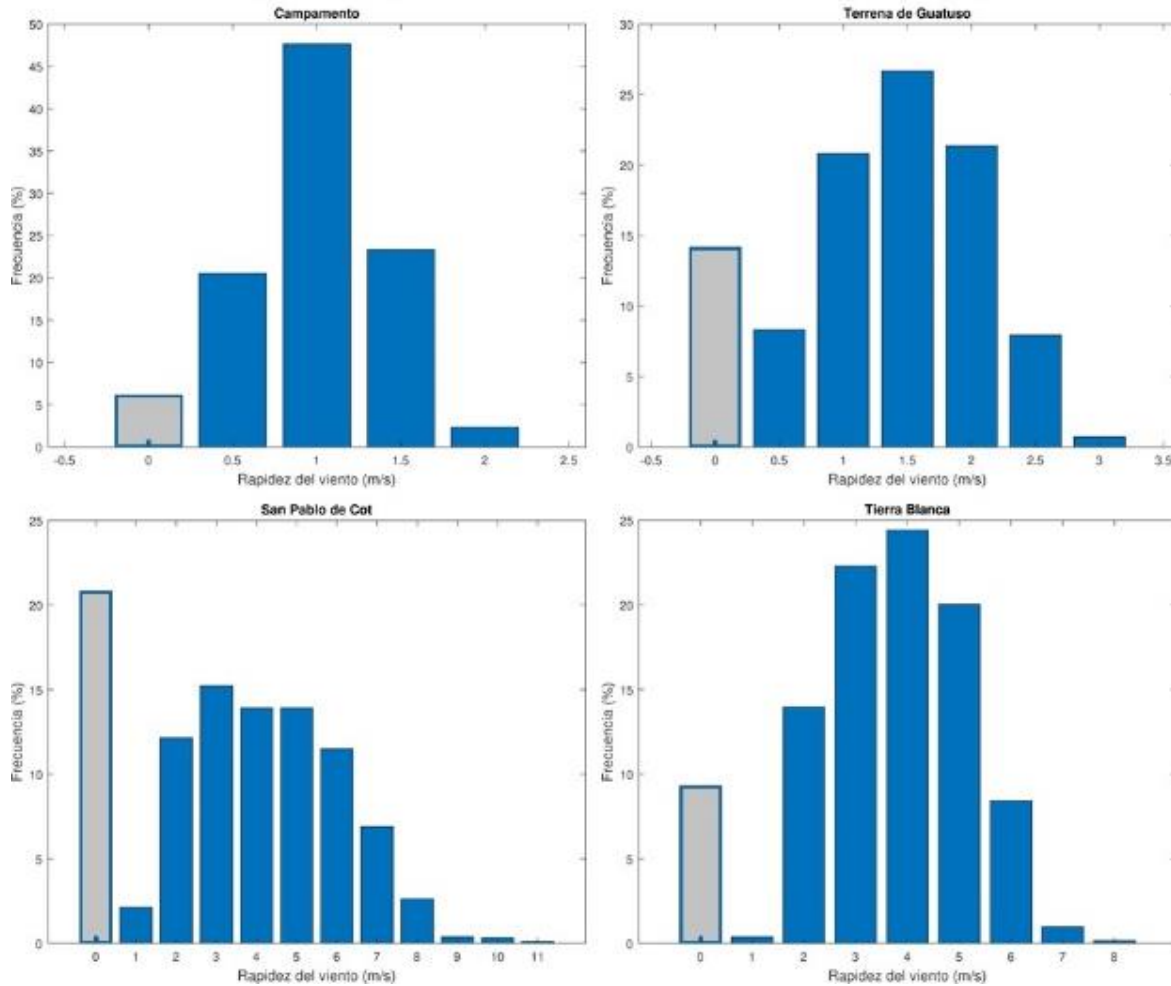


Figura 8b. Distribución de frecuencia de la magnitud del viento en las estaciones Campamento, Terrena, San Pablo y Tierra Blanca.

Es de mencionar que se consideró el viento calmo (intensidades de 0 m/s), representado por una barra gris en las Figuras 8a y 8b, en tres de las ocho estaciones analizadas. El viento calmo representa el porcentaje mayor en la distribución de frecuencia en algunos casos, la estación donde esto es más evidente por la diferencia porcentual que se genera es en la estación administrada por el CIVCO, pero esta estación se encuentra a una altura sobre la superficie de 1,5 m esto hace que sea esperable que las intensidades del viento se encuentren dentro de las más bajas o que predomine el viento calmo.

La estación Volcán Irazú es la única que exhibe de forma clara la distribución típica de Weibull, que es característica de los histogramas de velocidad del viento.

Intensidad de turbulencia en la estación CIVCO

Al analizar los datos disponibles en la estación CIVCO, de un total de 151 018 promedios tomados cada 10 minutos, se descartan 26 796 promedios por ser iguales a cero.

Con los datos restantes se hace una primera vista de los datos y se obtienen valores de intensidad de turbulencia (IT) de hasta 300 %. Estos valores tan altos de IT se deben a que algunos promedios son muy cercanos a cero. Considerando la incertidumbre del equipo y la posible aplicación de la intensidad de turbulencia para diseño de turbinas eólicas, las cuales no operan a velocidades menores a 1 m/s de velocidad de viento, se descartan todos los promedios menores a 1 m/s.

En este caso se descartan 38 431 promedios, los cuales efectivamente corresponden a valores de IT entre 100 % y 300 % en su mayoría.

Siendo así, se descartaron en total 65 227, entre ceros y valores promedio menores a 1 m/s. Esto corresponde a un 43 % de los datos disponibles, lo cual es previsible al ser una estación ubicada a 1,5 metros de altura sobre el nivel del suelo, como se mencionó anteriormente.

Con los datos restantes, un total de 85 791 promedios calculados cada 10 minutos, se obtiene el histograma de la Figura 9, la única estación dentro de las que se incluyen en este estudio, que permite generar este tipo de gráficos debido a su frecuencia de muestreo.

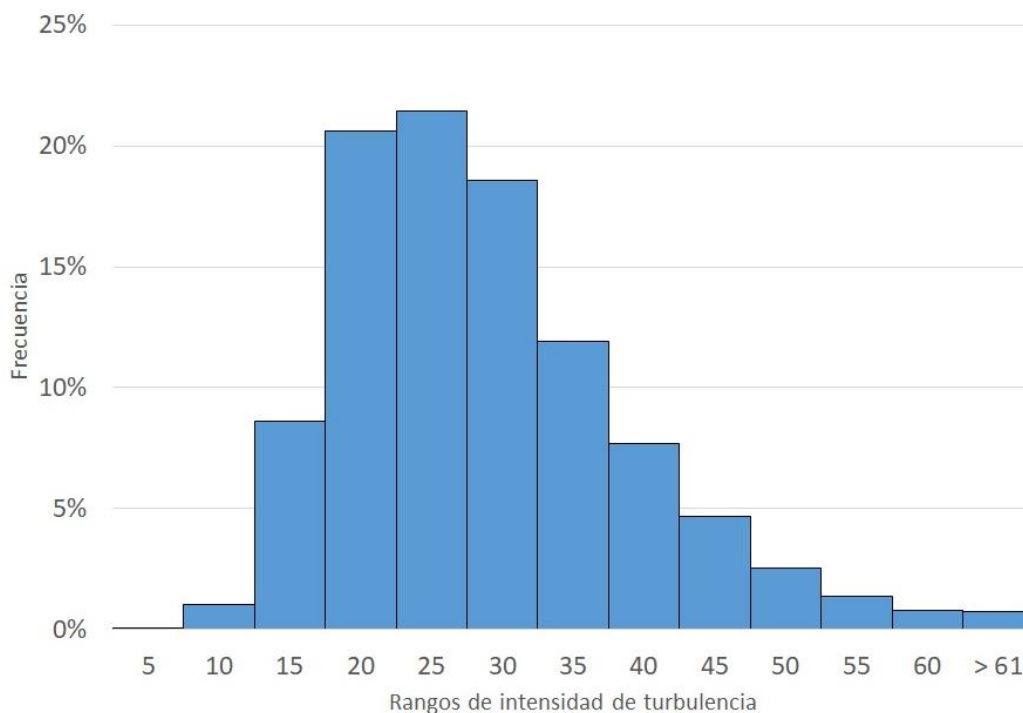


Figura 9. Histograma de la intensidad de turbulencia en la estación CIVCO.

En el histograma de la Figura 9, la cifra de intensidad de turbulencia en el eje horizontal, se interpreta como “menor o igual” para cada rango, siendo por ejemplo el número 10, el rango de IT mayor que 5% y menor o igual que 10%. De este modo las barras de mayor tamaño, indicadas como 20, 25 y 30, representan los valores de IT mayores que 15% y hasta 30%. Estos rangos tan elevados de intensidad de turbulencia implican mucha variabilidad en la velocidad del viento. Se debe tener presente que los datos de esta estación se toman a 1,5 m sobre el nivel del suelo, por lo que es razonable registrar velocidades bajas y también capturar el efecto que tienen los obstáculos superficiales sobre el viento.

Conclusiones

Este estudio, el primero en su tipo en Costa Rica, orientado a analizar el recurso eólico en la provincia de Cartago, dentro de la capa límite superficial, con datos medidos a 10 m de altura sobre el nivel del suelo, permite indicar las siguientes características del recurso eólico en la provincia en estudio:

- En promedio los valores del viento en la región se encuentran entre los 3 y 5 m/s, esto a una altura de 10 m sobre la superficie.
- Al comparar dos estaciones ubicadas en el mismo punto, la estación a menor altura llega al máximo de velocidad de viento al menos 2 horas antes que la estación ubicada a 10 m de altura.
- La estación a mayor altura sobre el nivel del mar, pero siempre a 10 m sobre el nivel de la superficie, ubicada en el Volcán Irazú, registra las mayores velocidades en promedio, alrededor de 6 m/s.
- Con base en los datos tomados a 1,5 m de altura en las instalaciones del ITCR, la intensidad de turbulencia registra valores principalmente entre 15 y 30%.

En forma general, en la provincia de Cartago la magnitud del viento se puede diferenciar en dos periodos bien marcados, uno en los meses de fin e inicio de año (de noviembre a febrero) en los cuales las intensidades del viento son fuertes y otro periodo en los cuales la intensidad del viento disminuye hasta alcanzar los valores más bajos (septiembre y octubre).

Esta provincia presenta una fuerte influencia de los vientos alisios, provenientes de la Vertiente del Caribe, de modo que las direcciones que predominan son las componentes Norte o Este, siendo las dos componentes más recurrentes en los datos analizados.

Bibliografía

- [1] International Renewable Energy Agency, «Transformación Energética Mundial, hoja de ruta hasta el 2050,» IRENA, Abu Dhabi, 2018.
- [2] Global Wind Energy Council, «Global Wind Statistics,» Brussels, 2018.
- [3] L. Merino, «Estado de la Nación 2017,» Servicios Graficos AC, Pavas, 2017.
- [4] L. M. Mora, «Programa País Carbono Neutralidad 2.0,» Dirección de Cambio Climático, 2017.
- [5] R. D. Bolaños, «Desarrollo de los proyectos de energía eólica en Costa Rica (1979-2005),» Centro de Investigaciones Geofísicas, San Pedro, 2006.
- [6] Ministerio de Ambiente y energía, «Plan Nacional de Energía 2015-2030,» Minae, San Jose, 2015.
- [7] Instituto Costarricense de Electricidad, «Plan de Expansión de la generación eléctrica 2016-2035,» Proceso de expansión del sistema de dirección de planificación y desarrollo eléctrico, San Jose, 2017.
- [8] Instituto Costarricense de Electricidad, «Plan de Expansión de la Generación Electrica 2018-2034,» Proceso de expansión del sistema de la dirección de planificación y desarrollo eléctrico, San Jose, 2019.
- [9] J. B. Morales, «Energías Renovables no Convensionales,» San Jose, 2015.
- [10] T. Ackerman, F. Fernández, P. Schierhorn y F. Montoya, «Estudio de Red Costa Rica,» Energynautics, Darmstadt, 2017.
- [11] J. De la cruz, G. Valencia y M. Vanegas, «Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolivar en Colombia,» Inginiare, vol. 26, n° 2, pp. 319-328, 2017.
- [12] J. T. Millward-Hopkins, A. Tomlin, M. Pourkashanian, D. Ingham and L. Ma, «Mapping the Urban Wind Resource over UK Cities using an Analytical Downscaling Method,» Copenhagen, 2012.
- [13] P. Enevoldsen and F. Hendrik «Mapping the Wind Energy Potential of Sweden: A Sociotechnical Wind Atlas,» Hindawi, p. 11, 2018.
- [14] D. A. Fadare, «The application of artificial neural networks to mapping of wind speed profile for energy application in Nigeria,» Applied Energy, vol. 3, n° 87, pp. 934-942, 2010.
- [15] K. Ono and T. Uchida, «High-performance parallel simulation of airflow for complex terrain surface,» Hindawi, pp. 1-10, 2019.
- [16] D. Elliott, «Wind Resource Assessment and mapping for Afghanistan and Pakistan,» National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2011.

- [17] M. Landry, Y. Ouedraogo, Y Gagnon and A. Ouedraogo, «On the wind resource mapping of Burkina Faso,» *International Journal of Green Energy*, vol. 2, n° 14, pp. 150-156, 2017.
- [18] A. Prasad, R. A. Taylor and M. Kay, «Assessment of solar and wind resource synergy in Australia,» *Applied Energy*, pp. 354-367, 2017.
- [19] L. Li, X. Wang , L. Luo, Y. Zhao, X. Zong and N. Bachagha, « Mapping of wind energy potential over the Gobi Desert in Northwest China based on multiple sources of data,» *Frontiers of Earth Science*, vol. 2, n° 12, pp. 264-279, 2018.
- [20] B. R Furevik, A. M. Sempreviva, L. Cavaleri, J. M Lefèvre and C. Transerici, «Eight years of wind measurements from scatterometer for wind resource mapping in the Mediterranean Sea,» *Wind Energy*, vol. 3, n° 14, pp. 355-372, 2011.
- [21] C. Jung and D. Schindler, «3D statistical mapping of Germany's wind resource using WSWS,» *Energy Conversion and Management*, n° 159, pp. 96-108, 2018.
- [22] L. Muñoz, «Decimoquinto informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible(2008),» Pavas, 2008.
- [23] M. Brower, J. W. Zack, B. Bailey, M. N Schwartz and D. L. Elliott «Mesoscale modeling as a tool for wind resource assessment and mapping,» National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2004.
- [24] Instituto de desarrollo rural, «Región Central Caracterización del Territorio Cartago-Oreamuno-El Guarco-La Unión,» 2016.
- [25] Instituto meteorológico Nacional, «El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica,» San Jose, 2008.
- [26] R. Villalobos y J. Solano, «Regiones y subregiones climaticas de Costa Rica,» 2012.
- [27] L. R. Ojeda, *Probabilidad y estadística básica para ingenieros*, Guayaquil, 2007.
- [28] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe and E. Bossanyi, *Wind energy handbook*, 2011.

Apéndice 2

Artículo en revisión

Modelo dinámico de la velocidad del viento en una zona boscosa tropical

Dynamic model of wind speed in a tropical forested landscape

Frank Marín-Guillén

Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica

fmarin@itcr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0002-0136-5728>

Gustavo Richmond-Navarro

Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica

grichmond@tec.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Gustavo Murillo-Zumbado

Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica

gmurillo@itcr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0002-1947-3567>

Pedro Casanova-Treto

Universidad de Costa Rica. Costa Rica

pedro.casanova@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-8508-6293>

Resumen

Costa Rica establece en sus estrategias nacionales el desarrollo de energías renovables para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, la explotación del recurso eólico es una de las alternativas para este fin. Para maximizar este recurso es necesario entender la interacción del viento con el terreno, en especial en un país que el 52 % de cobertura corresponde a zona boscosa. Lograr encontrar un modelo dinámico que describa la

conducta del viento y que considere la longitud de rugosidad como variable y no como una constante, como usualmente se utiliza en la literatura, es el objetivo de este trabajo. Para lograr esto se analizan series de tiempo de datos obtenidos de dos estaciones meteorológicas, administradas por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), ambas estaciones ubicadas en el Campus de Cartago del ITCR, los datos corresponden a alturas sobre el suelo de 1.5 m y de 10 m. Se utiliza el software Eureka para encontrar la relación de las distintas variables meteorológicas, tanto para la longitud de rugosidad como para la velocidad del viento. Se obtienen varias expresiones en distintos escenarios y se logra obtener un modelo para la velocidad del viento en el eje vertical, que sustituye el valor clásico de la longitud de rugosidad por una función, haciendo posible estimar el valor de la velocidad del viento en el eje vertical con mediciones en un punto cercano al suelo de modo que evita tener que instalar equipo costoso y grandes estructuras.

Palabras clave

Velocidad del viento; recurso eólico; longitud de rugosidad; zonas boscosas; modelo dinámico

Abstract

Costa Rica has established the development of renewable energy sources as part of the strategy to diminish the fossil fuel dependency. The utilization of wind as a source of energy is one of the alternatives. To maximize the use of wind is necessary to understand the wind-landscape interaction, especially in a country where 52 % of the terrain is covered by forest. The aim of this paper is to find a dynamic model that describes the wind behaviour that considers the roughness length as a variable and not as a constant, as it is usually considered within the literature. A series of data obtained from two different weather stations are analysed. The weather stations are managed by two different institutions: Instituto Tecnológico de Costa Rica (Costa Rica Institute of Technology) and Instituto Meteorológico Nacional (Costa Rica Institute of Meteorology). Both weather stations are located at the main campus of Costa Rica Institute of Technology and data were obtained at two heights above ground level: 1.5 meters and 10 meters. Eureka software was used to find a correlation between the different weather variables and roughness length as for wind speed. Several expressions are obtained in various scenarios as well as a model for wind speed that replaces the classic roughness length constant value with a dynamic expression, being able to estimate the wind speed at the vertical axis with data from a measuring height near to the ground, avoiding the investment in high value equipment and the necessity of installing support structures of considerable scale.

Keywords

Wind speed; wind resource; roughness length; forested landscape; dynamic model.

Introducción

Las fuentes de energía renovables son de particular interés para los países en vías de desarrollo [1]. A manera de ejemplo, una de las principales estrategias de la República de Costa Rica en su Plan Nacional de Energía 2015 – 2030, es disminuir la dependencia de combustibles fósiles [2], una alternativa que contribuye a alcanzar este tipo de objetivos es la explotación del recurso eólico.

El comportamiento del viento depende en gran medida de la composición de la superficie, siguiendo con el ejemplo de Costa Rica, su superficie está cubierta en un 52 % por zonas boscosas [3], lo cual es usual en los países tropicales. Por esta razón, es necesario comprender en detalle la interacción entre este tipo de terrenos y el viento, para aprovechar el recurso eólico en las zonas boscosas tropicales.

En la literatura existen múltiples modelos para el perfil de viento, por ejemplo, la Ley Logarítmica [4] mostrada en la ecuación 1, relaciona la magnitud de la velocidad del viento (u); con la altura sobre el suelo (z), el esfuerzo cortante superficial (τ_0), la densidad del aire (ρ), la longitud de rugosidad (z_0) y la constante de Von Karman (k).

$$u = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

La longitud de rugosidad se define como la altura sobre el suelo a la cual la velocidad es nula, depende principalmente de la vegetación y el tipo de terreno. Según el tipo de superficie varios autores han reportado valores para la longitud de rugosidad como se muestra en el cuadro 1, del cual destaca que, en terreno plano como hielo, la longitud de rugosidad es sumamente pequeña. También se puede apreciar que para superficies específicas existe una discrepancia notable cuando se comparan los valores reportados por los diferentes autores.

Cuadro 1. Valores de longitud de rugosidad para diferentes terrenos según varios autores.

Surface	ESDU (1972)	Troen and Lundtang Petersen (1989)	Wieringa (1992)	Fiedler according to Hasager and Jensen (1999)	Davenport et al. (2000)
Ice	10^{-5}				
Water	$10^{-4} - 10^{-3}$				
Snow	0.002				
Bare soil		0.03	0.004	0.03	0.005
Grassland	0.005–0.02	0.03	0.06	0.08	0.03
Winter crops (winter)		0.1	0.09	0.12	0.1
Winter crops	0.05	0.1	0.18	0.09	0.25
Summer crops	0.05	0.1	0.18	0.09	0.25
Clearings		0.1	0.35	0.004	0.2
Shrubs	0.2	0.4	0.45	0.3	0.5
Conifer forest	1–2	0.4	1.6	0.9	1.0
Deciduous forest	1–2	0.4	1.7	1.2	2.0
Settlement	0.5–2	0.4	0.7	0.5	2.0

Fuente: [5]

Una manera usual de emplear la Ley Logarítmica de la ecuación 1 es relacionar la velocidad del viento a dos diferentes alturas, de modo que se puede obtener la expresión mostrada en la ecuación 2 para la velocidad (u_2) a una altura (z_2), en función de la velocidad (u_1) a una altura (z_1) y de la longitud de rugosidad (z_0) del sitio particular.

$$u_2 = u_1 \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (2)$$

La longitud de rugosidad puede ser despejada de la ecuación 2 para obtener la expresión que se presenta en la ecuación 3.

$$z_0 = e^{\frac{u_2 \ln(z_1) - u_1 \ln(z_2)}{u_2 - u_1}} \quad (3)$$

En presencia de obstáculos prominentes tales como árboles, la altura de la Ley Logarítmica debe ser reemplazada por la expresión $(z - z_d)$, tal como se muestra en la ecuación 4. El término (z_d) es conocido como altura de desplazamiento del plano cero [6].

$$u = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{k} \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) \quad (4)$$

Considerando que tanto la longitud de rugosidad como la altura de desplazamiento del plano cero se deben al terreno, en el caso de la primera debido al tipo de vegetación y en el caso de la segunda debido a obstáculos más grandes, es posible conceptualizar la suma de ambas como el punto donde inicia el perfil de velocidad vertical, como se muestra en la figura 1.

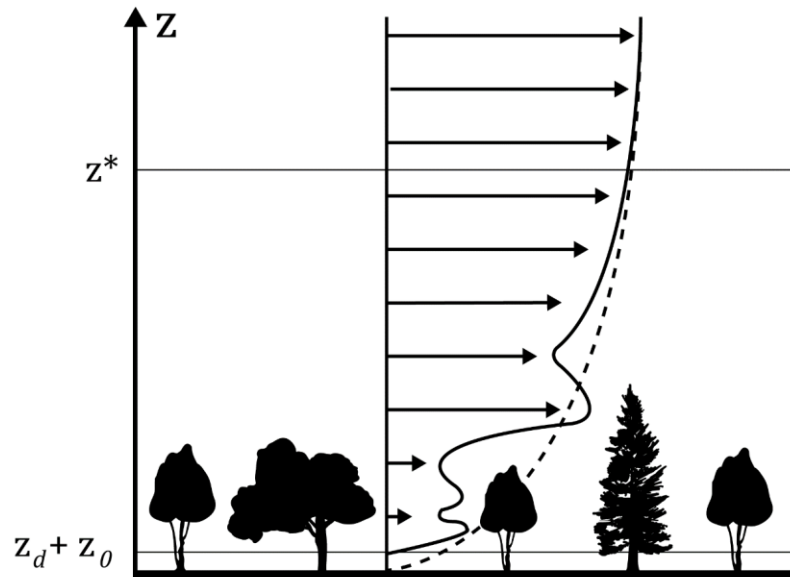


Figura 1. Perfil de viento vertical en una zona boscosa.

La altura mínima para la cual la ecuación 4 es válida, se identifica como (z^*) en la figura 1 y se denomina altura de difusión de estela, la cual marca la división entre la sub capa rugosa (en inglés buffer layer, transition layer o roughness sublayer -RSL-) y la sub capa inercial (en inglés logarithmic layer). Autores como Mertens [7] indican valores de (z^*) entre 34.5 y 39 m. A manera de referencia, en zonas urbanas (z_d) puede tomarse como tres cuartos del promedio de la altura de las edificaciones [4].

Otro modelo para el perfil de viento es conocido como la Ley de Potencia y se muestra en la ecuación 5. En este caso se relaciona la velocidad del viento con una velocidad de referencia (u_{ref}) a una altura de referencia (z_{ref}) y existe un exponente (α) que depende de la rugosidad del terreno, así como del rango de alturas. Resultados experimentales [8] indican que usualmente (α) = 1/7.

$$u = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (5)$$

Investigaciones en sitios específicos, que hacen uso de herramientas como redes neuronales, reportan modelos explícitos para (α) en función de la velocidad medida a una altura de referencia [9].

Existe una relación entre el exponente de la Ley de Potencia y la longitud de rugosidad de la Ley Logarítmica [4], como se muestra en la ecuación 6.

$$\alpha = \left(\frac{1}{\ln \left(\frac{h_{ref}}{z_0} \right)} \right) \quad (6)$$

Donde (h_{ref}) es la altura para la cual la ecuación 1 da el mismo resultado que la ecuación 5.

De los modelos presentados se extrae que la determinación de la longitud de rugosidad es fundamental para conocer el perfil de velocidad y estimar así el recurso eólico, sin embargo, distintas investigaciones señalan que la longitud de rugosidad es variable en muy distintos tipos de [10]-[12]. En el caso de [13] se analizan los efectos del cambio de la altura promedio de los árboles en la longitud de rugosidad y se encuentra que la relación entre estos términos es sumamente variable.

Por otra parte, para modelar el recurso eólico en general, más allá del perfil de velocidad, existen propuestas metodológicas para el mapeo mediante expresiones explícitas que consideran la forma y distribución de los obstáculos en el suelo [14], en sitios o regiones específicas, también modelos semi-empíricos que se alimentan de grandes cantidades de datos y diseñados específicamente para evaluar sitios de potencial para turbinas eólicas de pequeña escala [15]. Sin embargo, los métodos más usuales, requieren de la caracterización de la estructura completa del terreno, específicamente de la altura de los obstáculos como árboles en zonas boscosas [16], esto con herramientas muy avanzadas y costosas como mediciones láser conocidas como LiDAR (Del acrónimo en inglés Light Detection and Ranging) [17], o bien censado remoto en general [18], las cuales requieren de un alto costo de inversión.

Considerando la amplia variabilidad que existe en la literatura para el valor de (z_0) y lo distintos que pueden ser sus valores para un bosque, como se indica en el cuadro 1, el objetivo de esta investigación es contribuir al modelamiento del recurso eólico en un área boscosa tropical, proponiendo una expresión para (z_0) a partir de la velocidad del viento medida a una única altura, cercana al suelo, para con ello poder describir el perfil de velocidad con un modelo dinámico, que dependa de una expresión variable de la longitud de rugosidad, sin el uso de equipos de alto costo.

Metodología

En esta investigación se trabajó con dos conjuntos de datos de velocidad del viento, provenientes de diferentes fuentes, tomados en el mismo punto a 1.5 y 10 metros de altura sobre el nivel del suelo. Se realizó la asociación de los datos en función del tiempo, con lo que se construyó una tabla con la velocidad del viento a dos alturas para cada momento del tiempo.

Se calculó la longitud de rugosidad para cada pareja de datos, empleando la ecuación 3. Luego se procesaron los datos con el software de inteligencia artificial Eureka, de Nutonian Inc., el cual permite encontrar una relación funcional entre las variables, usando una técnica

de búsqueda evolutiva llamada regresión simbólica. En diferentes escenarios se buscó obtener la longitud de rugosidad como una función de la velocidad del viento medida a 1.5 m de altura, para finalmente reemplazar el valor de (z_0) en la ecuación 3 y obtener una expresión dinámica para la velocidad del viento en el eje vertical en función únicamente de una velocidad y altura de referencia, siendo independiente de un valor fijo de longitud de rugosidad.

Descripción de los datos

Los datos abarcan del 31 de agosto de 2011 al 2 de mayo de 2017, las variables fueron registradas 1 vez por hora. El punto de medición está en las coordenadas 09°51'08" N, 83°54'31" O, a 1360 metros sobre el nivel del mar. Lo que corresponde a una zona boscosa tropical.

Las mediciones a 10 m de altura sobre el suelo fueron adquiridas con una estación meteorológica marca Campbell Scientific, cuyo anemómetro mide la magnitud de la velocidad del viento en un rango de 0 m/s a 50 m/s con una precisión de ± 0.5 m/s y un valor umbral de 0.5 m/s. Estos datos fueron facilitados a los autores por el Instituto Meteorológico Nacional, para fines únicamente de investigación.

Los datos a 1.5 metros sobre el suelo se tomaron con una estación meteorológica marca Davis, equipada con un anemómetro que mide magnitudes de la velocidad del viento en el rango de 0 m/s a 80 m/s con una precisión de ± 1 m/s, una resolución de 0.1 m/s y un valor umbral de 0.4 m/s. Estos datos fueron tomados directamente por personal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En ambas alturas se emplearon anemómetros de copas para determinar la velocidad del viento.

Pre procesamiento de los datos con Microsoft Excel y Matlab

Al tener dos fuentes de información de dos estaciones de distintos fabricantes, se requirió un pre proceso de ordenamiento, identificación y filtrado para tener los datos del mismo momento de tiempo para las dos alturas. Esto se hizo con un código programado en Matlab en el cual también se eliminaron todas las entradas de tiempo calmo, es decir de 0 m/s.

Con el procesamiento de datos en Matlab se identificaron y eliminaron todos los pares de datos en los que la velocidad del viento a 1.5 m era mayor que a 10 m de altura. Pues esa condición no coincide con el modelo logarítmico en el cual se basa este estudio.

Luego se calculó el promedio simple de los datos y la desviación estándar, adicionalmente para cada momento del tiempo se calculó la longitud de rugosidad, empleando la ecuación 3.

El último paso en el pre procesamiento fue clasificar, en Microsoft Excel, los datos según su fecha como valores en el día o la noche y en estación seca o lluviosa. Se consideró el día en horario de 6 am a 5:59 pm. El resto es la noche. No se hace distinción alguna de los cambios en el horario de salida y puesta del sol en el punto de medición, a lo largo del año, pues al estar cerca del ecuador terrestre, estos cambios son despreciables. Por otro lado, la estación seca se consideró desde diciembre hasta abril y la lluviosa de mayo a noviembre.

Procesamiento de los datos mediante regresión simbólica

Una vez construida una tabla con las columnas: fecha, hora, estación (seca o lluviosa), horario (diurno/nocturno), velocidad del viento a 1.5 m de altura (m/s), velocidad del viento a 10 m de altura (m/s) y longitud de rugosidad (m), se exportaron las tablas de datos a Eureka y se definió una búsqueda de una relación funcional expresada en la ecuación 7, donde (u_1) se refiere a la velocidad del viento medida a 1.5 m de altura sobre el suelo.

$$z_0 = f(u_1) \quad (7)$$

Por la naturaleza del fenómeno, se incluyó entre los bloques de búsqueda de Eureka las operaciones básicas: suma, resta, multiplicación y división; además de las operaciones más complejas como el exponencial, el logaritmo, raíces, potencias y factoriales. No se consideraron las funciones trigonométricas al ser conocido que el fenómeno no es oscilatorio, de acuerdo con los modelos encontrados en la literatura y presentados en la introducción.

Se realizaron nueve búsquedas de la relación funcional de la ecuación 7, considerando la segregación de datos que se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Conjuntos de datos seleccionados para cada búsqueda del modelo de la longitud de rugosidad.

Filtrado en los datos	Número de búsqueda	Codificación del modelo
Ninguno (Todos los datos son considerados)	1	Total
Horario diurno	2	Día
Horario nocturno	3	Noche
Estación seca	4	Seca
Estación lluviosa	5	Lluviosa
Horario diurno y estación seca	6	Día-Seca
Horario diurno y estación lluviosa	7	Día-Lluviosa
Horario nocturno y estación seca	8	Noche-Seca
Horario nocturno y estación lluviosa	9	Noche-Lluviosa

Se empleó la plataforma Windows Azure como recurso de computación en la nube, debido a la gran demanda de recursos que representa Eureka, permitiendo correr el programa por varios días para cada búsqueda, sin comprometer los resultados por posibles interrupciones.

Para cada búsqueda del cuadro 2 se ejecutó Eureka hasta lograr convergencia en el error absoluto medio en los modelos de regresión simbólica.

Análisis y Resultados

Al calcular el promedio simple de todos los resultados puntuales de longitud de rugosidad, se obtiene que $(\bar{z}_0) = 0.577$ con una desviación estándar de 0.495, por lo cual, se ve la necesidad de un modelo para esta variable, considerando que la desviación es casi del tamaño del promedio. A la vez, se encuentra que los datos son consistentes con la literatura, pues al comparar el promedio obtenido con los valores del cuadro 1, se encuentra que el orden de magnitud para bosque es el correcto.

Los resultados se presentan en dos grupos, en primera instancia se muestran los modelos generales de longitud de rugosidad obtenidos según las nueve búsquedas descritas en la metodología.

Luego, a la luz de los resultados mismos, se repite el proceso de búsqueda acotando la función objetivo, eliminando el logaritmo natural, el factorial, la potencia y la raíz; conservando únicamente la función exponencial, junto con las operaciones básicas. Con esta iteración se obtienen los denominados modelos exponenciales.

Finalmente, se presenta la propuesta de modelo dinámico de velocidad del viento en función de la altura, para la zona boscosa tropical específica de este estudio.

Modelos generales para z_0

Siguiendo la metodología, al correr Eureka según las nueve búsquedas detalladas en el cuadro 2, se obtienen los nueve modelos que se detallan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Modelos generales para la longitud de rugosidad.

Codificación del modelo	Modelo $z_0 =$	Coefficiente de correlación	Error absoluto promedio
Total	$e^{\frac{0.106-0.732u_1}{u_1+0.263}}$	0.922	0.130
Día	$\frac{1.99}{1.22 + u_1} - 0.263$	0.832	0.130
Noche	$1.56 + u_1 - 1.93u_1^{0.749}$	0.887	0.131
Seca	$0.104 + (3.38u_1)^{(-0.173-0.284u_1)}$	0.896	0.109
Lluviosa	$\frac{1.91}{1.13 + u_1} - 0.278$	0.859	0.143
Día-Seca	$\frac{2.48}{2.31 + u_1^2}$	0.808	0.102
Día-Lluviosa	$\frac{2.42}{1.33 + u_1} - 0.329$	0.828	0.139
Noche-Seca	$(0.263u_1 - 0.604)! - 0.77$	0.826	0.114

Noche-Lluviosa	$\frac{2.11}{1.18 + u_1} - 0.345$	0.861	0.143
----------------	-----------------------------------	-------	-------

Considerando, por un lado, que los modelos ofrecen una amplia variabilidad de funciones y que el modelo con el total de los datos es el que posee un mayor coeficiente de correlación, sin sacrificar el error absoluto promedio; por otro lado, que el modelo Total tiene una estructura muy similar a la ecuación 3, se repite el proceso de búsqueda eliminando del motor de Eureka las funciones logaritmo natural, factorial, potencia y la raíz. Con esto se obtienen los modelos exponenciales, que se detallan a continuación.

Modelos exponenciales z_0

Al repetir el proceso de búsqueda funcional descrito en la metodología, pero eliminando las funciones logaritmo natural, factorial, potencia y la raíz, se obtienen los nueve modelos exponenciales mostrados en el cuadro 4.

Cuadro 4. Modelos exponenciales para la longitud de rugosidad.

Codificación del modelo	Modelo $z_0 =$	Coefficiente de correlación	Error absoluto promedio
Total	$e^{\frac{0.106-0.732u_1}{u_1+0.263}}$	0.922	0.130
Día	$0.111 + \frac{1.38 + 2.05u_1^2}{e^{1.83u_1}}$	0.832	0.129
Noche	$0.125 + \frac{1.14}{u_1 + 0.858e^{0.375u_1^2}}$	0.887	0.131
Seca	$0.0864 + \frac{2.74}{1.01 + u_1 + e^{u_1}}$	0.896	0.110
Lluviosa	$\frac{0.111}{0.2 + u_1} + e^{-0.634u_1}$	0.860	0.143
Día-Seca	$0.0884 + \frac{2.8}{1.56 + e^{u_1}}$	0.811	0.102
Día-Lluviosa	$0.0145 + \frac{1.07u_1}{e^{u_1} - 1.03}$	0.829	0.138
Noche-Seca	$0.133 + \frac{1.32}{u_1 + e^{0.396u_1^2}}$	0.909	0.114
Noche-Lluviosa	$\frac{0.428 + 0.832u_1}{e^{u_1} - 0.714}$	0.861	0.142

Con el objetivo de determinar si los modelos exponenciales representan una mejora respecto de los generales, se muestra en las gráficas 2 y 3 la comparación de los coeficientes de correlación y el error absoluto promedio para los modelos generales y exponenciales. En la figura 2 destaca que, en los modelos exponenciales, el coeficiente de correlación

aumenta levemente respecto de los modelos generales. En la figura 3 se presenta una disminución del error absoluto promedio, por lo que se puede afirmar que los modelos exponenciales del cuadro 4 resultan más adecuados para describir el fenómeno. El modelo exponencial para la búsqueda 8, correspondiente a Noche-Seca, experimenta un aumento significativo en cuanto a coeficiente de correlación, respecto del modelo general. Esto sitúa al modelo Noche-seca fuera de la tendencia, la cual es un ligero aumento en el coeficiente de correlación.

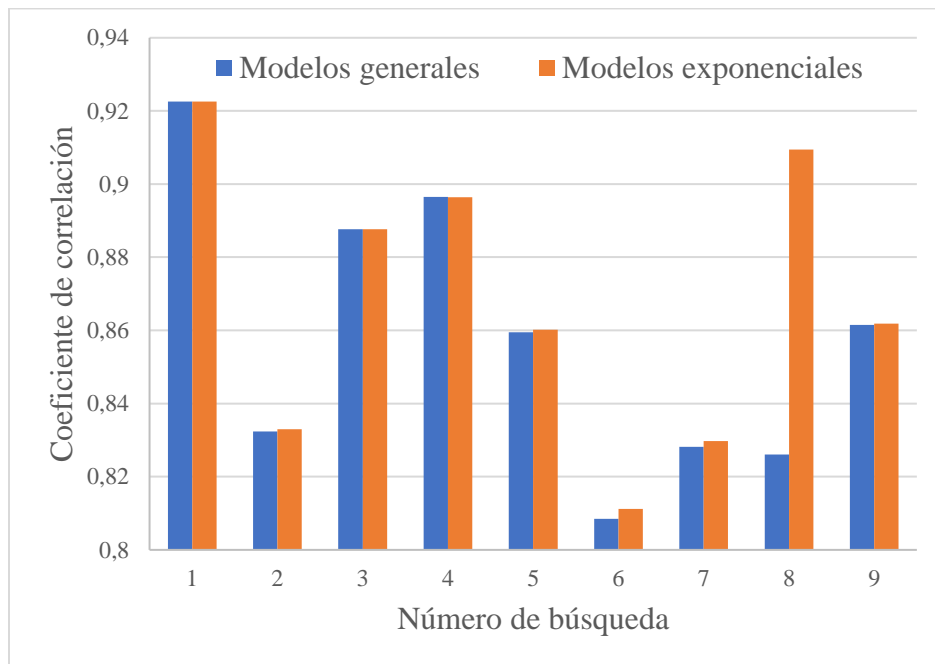


Figura 2. Comparación del coeficiente de correlación entre los modelos generales y exponenciales.

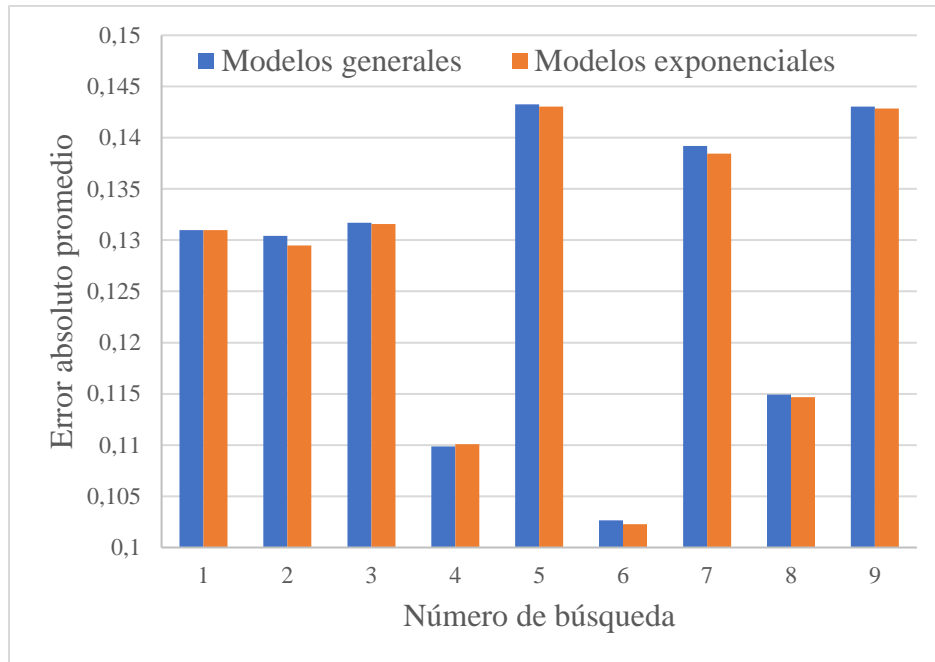


Figura 3. Comparación del error absoluto promedio entre los modelos generales y exponenciales.

Como se evidencia en estos resultados, los modelos segregados tienen menor coeficiente de correlación que el modelo que contempla el total de los datos. Esto se debe a que al segregar los datos se pierde la continuidad del fenómeno en estudio, lo que genera una disminución en la correlación del modelo.

Por lo anterior, se opta por emplear un único modelo para todo momento del tiempo y para todas las posibles condiciones como día, noche, estación lluviosa o seca. Esto resulta particularmente conveniente pues permite describir la velocidad del viento sin tomar en cuenta parámetros adicionales.

Modelo dinámico de la velocidad del viento

Considerando los resultados de los modelos exponenciales, se encuentra que la expresión para (z_0) con mayor coeficiente de correlación es el modelo que considera todos los datos, lo que resulta conveniente pues una misma expresión puede emplearse para describir el fenómeno de velocidad del viento, en todo momento.

Si se toma la ecuación 2 y se reemplaza (z_0) por la expresión obtenida en la búsqueda 1, se obtiene la ecuación 8, que permite calcular la velocidad del viento (u_2) a una altura cualquiera (z_2) en función de la velocidad del viento (u_1) a una altura (z_1), pero independiente de la longitud de rugosidad, para el sitio particular.

$$u_2 = u_1 \frac{\ln(z_2) - \frac{0.106 - 0.732u_1}{u_1 + 0.263}}{\ln(z_1) - \frac{0.106 - 0.732u_1}{u_1 + 0.263}} \quad (8)$$

La ecuación 8 se ha indicado como el modelo dinámico de la velocidad del viento, pues considera el valor de la longitud de rugosidad como una variable, que toma determinados valores en función de la propia velocidad del viento de referencia, es decir, el (z_0) deja de ser una constante en esta propuesta y ahora es un valor dinámico.

Esta propuesta comprende de alguna manera los valores distintos que ofrece la literatura para la longitud de rugosidad.

Ahora bien, en el caso de los datos analizados, (z_1) = 1.5 m y se han obtenido las constantes de la ecuación 8, pero de manera general, se puede plantear la ecuación 9, en función de tres parámetros a, b, c. Lo cual representa la posible aplicación de esta propuesta para otros escenarios, donde sería necesario determinar estos tres parámetros.

$$u_2 = u_1 \frac{\ln(z_2) - \frac{a - b u_1}{u_1 + c}}{\ln(z_1) - \frac{a - b u_1}{u_1 + c}} \quad (9)$$

Una comparación rápida de la ecuación 2 con la ecuación 9 haría pensar que se pasó de no conocer (z_0) a no conocer tres parámetros, lo que a primera vista complicaría innecesariamente el análisis. Sin embargo, con esta formulación se ha reemplazado el valor constante de (z_0) por un conjunto de parámetros que capturan la naturaleza variable de (z_0), la cual ha sido identificado como tal en la literatura, por lo tanto, este procedimiento puede ser replicado en otras localidades para describir el perfil de velocidad de viento a baja altura.

Conclusiones

En esta investigación se desarrolló un modelo para la velocidad del viento en el eje vertical, sustituyendo el valor clásico de la longitud de rugosidad, por una expresión dinámica que depende de la velocidad del viento, lo cual captura el resultado de varias investigaciones que mencionan precisamente que el (z_0) no es una constante.

El modelo propuesto en la ecuación 9 es válido para todas las estaciones del año y los posibles escenarios como horario diurno y nocturno. Intentar obtener modelos segregados implica interrumpir la continuidad del fenómeno y se traduce en una reducción en la correlación del modelo.

La expresión para la velocidad del viento que se propone, no depende directamente de la longitud de rugosidad sino de tres parámetros, que para cualquier otra localidad deberán ser determinados experimentalmente y que capturan el efecto variable de la longitud de rugosidad.

Con la metodología propuesta en esta investigación es posible conocer el valor de la velocidad del viento en el eje vertical, únicamente con realizar mediciones en un punto cercano al suelo, lo que permite conocer el recurso eólico sin necesidad de instalar equipos de gran envergadura.

Agradecimientos

Al Instituto Meteorológico Nacional y al Ing. Maikel Méndez Morales por facilitar los datos para esta investigación. A los estudiantes asistentes Emanuel Fallas y Gonzalo Madrigal por su colaboración con este documento. Al profesor Benito Stradi por el soporte con Cloud Computing. Al ITCR por el financiamiento mediante el proyecto: Optimización de un perfil aerodinámico de una turbina eólica de eje horizontal para aplicaciones de pequeña escala en zonas boscosas.

Referencias

- [1] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajya y V. H. Krishna, "A review on small scale wind turbines," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 56, pp. 1351-1371, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- [2] "Plan Nacional de Energía 2015-2030," MINAET, San José, Costa Rica, 2015.
- [3] FAO, *Situación de los bosques del mundo. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra*. Roma, Italia, 2016.
- [4] J. D. Holmes, *Wind loading of structures*, EUA: CRC Press, 2018.
- [5] T. Foken y C. J. Napo, *Micrometeorology*, vo1. 2, Berlin, Alemania: Springer.
- [6] K. Sunderland, T. Woolmington, J. Blackledge y M. Conlon, "Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction," *J. Wind. Eng. Ind.*, vol. 121, pp. 70-81, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.001>
- [7] S. Mertens, "Book Review: Wind Energy in the Built Environment —Concentrator Effects of Buildings," *Wind. Eng.*, vol. 30, n. 5, pp. 451–452, 2006, doi: <http://dx.doi.org/10.1260/030952406779502623>
- [8] W. Tong, "Fundamentals of wind energy", en *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, CIUDAD, PAÍS: WIT Press, 2010, pp 1-44.
- [9] M. Beccali, G. Cirrincione, A. Marvuglia y C. Serporta, "Estimation of wind velocity over a complex terrain using the Generalized Mapping Regressor", *Appl. Energy*, vol. 87, n. 3, pp. 884-893, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.026>
- [10] L. Kang, J. Zhang, X. Zou, H. Cheng, C. Zhang y Z. Yang, "Experimental investigation of the aerodynamic roughness length for flexible plants," *Bound.-Layer Meteorol.*, vol. 172, n. 3, pp. 397-416, 2019.

- [11] A. Rigden, D. Li y G. Salvucci, "Dependence of thermal roughness length on friction velocity across land cover types: A synthesis analysis using AmeriFlux data," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 249, pp. 512-519, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.003>
- [12] E. S. Miles, J. F. Steiner y F. Brun, "Highly variable aerodynamic roughness length (z_0) for a hummocky debris-covered glacier," *J. Geophys. Res.*, vol. 122, n. 16, pp. 8447-8466, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/2017JD026510>
- [13] K. D. Maurer, B. S. Hardiman, C. S. Vogel y G. Bohrer, "Canopy-structure effects on surface roughness parameters: Observations in a Great Lakes mixed-deciduous forest," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 177, pp. 24-34, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.002>
- [14] J. T. Millward-Hopkins, A. S. Tomlin, L. Ma, D. B. Ingham y M. Pourkashanian, "Mapping the wind resource over UK cities," *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 202-211, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.039>
- [15] S. M. Weekes y A. S. Tomlin, "Evaluation of a semi-empirical model for predicting the wind energy resource relevant to small-scale wind turbines," *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 280-288, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.053>
- [16] L. É. Boudrealt, A. Bechmann, N.N. Sørensen, A. Sogachev y E. Dellwik, "Canopy structure effects on the wind at a complex forested sites," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 524, no. 1, p. 012112, 2014.
- [17] L. É. Boudrealt, A. Bechmann, L. Tarvainen, L. Klemedtsson, I. Shendryk y E. Dellwik, "A LiDAR method of canopy structure retrieval for wind modeling of heterogeneous forests," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 201, pp. 86-97, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.014>
- [18] D. Hu, S. Cao, S. Chen y N. Feng, "Mapping aerodynamic roughness length with multi-source remote sensing data," en *2016 4th. Int. Workshop on Earth Obs. Remote Sens. App. (EORSA)*, 2016, pp. 373-376.

Apéndice 3: Modelos de turbulencia para flujo en transición

Ing. Mariana Montenegro Montero, M.Sc.

1. Modelos de turbulencia para simular perfiles aerodinámicos

Conforme el diseño aerodinámico de componentes industriales avanza, ha sido necesario el desarrollo de métodos más rápidos para el cálculo de comportamiento de fluidos alrededor de áreas de interés. El campo de dinámica de fluidos computacional responde a esa necesidad evolucionando rápidamente para poder simular soluciones utilizando cada vez modelos más complejos que logren abarcar detalles y comportamientos que difíciles de visualizar. Existen varios modelos que se acercan al comportamiento real del flujo, especialmente en flujos laminares (como el modelo SST), sin embargo cuando éstos entran en un comportamiento de transición hacia flujos turbulentos, los modelos no logran resultados fieles a la realidad.

El caso del diseño de un perfil aerodinámico presenta un desafío en el momento de escoger un modelo de turbulencia pues en el caso de bajos Re , fácilmente ocurre separación de la capa límite. Conforme el flujo se separa se vuelve altamente inestable, resultando en un estado de transición en la zona inmediata posterior (downstream), donde entra en turbulencia, y crea una burbuja de separación [3]. La burbuja es dependiente de Re , así como la curvatura del perfil y la distribución de presión entre otros. En rangos de Re menores a 10^5 la burbuja es corta y no causa mucho efecto sobre el empuje, y en rangos de Re de 10^5 la burbuja es más larga y afecta el flujo drásticamente.[2].

Aunque ningún modelo es 100% preciso, algunos se acercan más al comportamiento del flujo en regímenes de transición. Diferentes modelos de RANS (Reynolds Average Navier Stokes) se pueden encontrar en software comerciales como COMSOL [1]. Sin embargo, por su alto costo computacional, modelos que introduzcan componentes de transición son menos implementados.

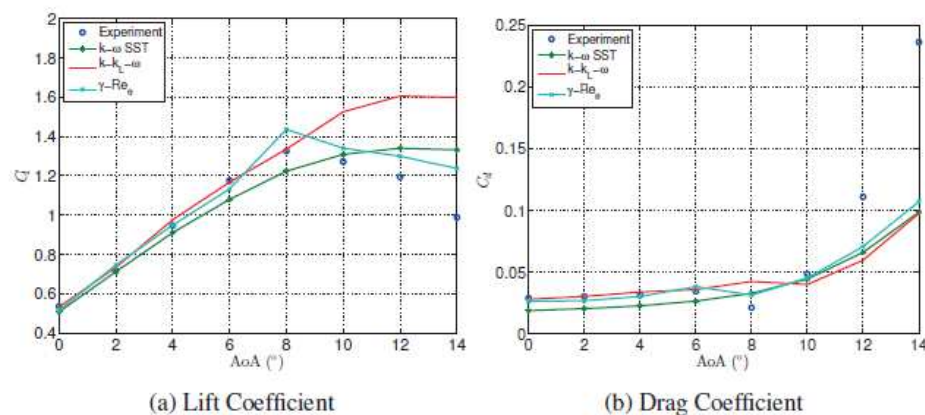


Fig. 1. Resultados de diferentes modelos para mismo perfil aerodinámico [4].

2. Modelo SST

El modelo de transporte de esfuerzo cortante Menter SST $K - \omega$ [5] es uno de los más comunes para simulaciones de perfiles, aunque para velocidades muy altas a las cuales el gradiente de presión se elimina por el flujo turbulento anulando la separación. Es un modelo de dos ecuaciones que permite un buen desarrollo del flujo cerca de la pared y captura los efectos de la subcapa viscosa e incorpora el modelo de turbulencia estándar $K - \omega$. Las ecuaciones que describen el modelo son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G_k - Y_k S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (2)$$

Donde G representa la generación de energía cinética turbulenta y la razón de disipación específica, la difusividad se da por Γ , y la disipación por Y.

3. SST de transición ($\gamma - Re_\theta$)

Este modelo fue creado específicamente para flujos en transición. Es una alteración del modelo SST incorporando la intermitencia γ y el número de Re de transición al cual empieza la intermitencia Re_θ . Debido a esto, se resuelven 4 ecuaciones de transporte, donde las primeras dos son parecidas a 1 y 2.

Las ecuaciones de intermitencia y momento de transición las describió Menter [6] como:

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial\rho U_j \gamma}{\partial x_j} = P_x \gamma 1 - E_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} - E_{\gamma 2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Re_{\theta t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j Re_{\theta t})}{\partial x_j} = P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta t} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial Re_{\theta t}}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

Y el acoplamiento de la transición del modelo SST $K - \omega$ se hace modificando la ecuación de K.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k^* - Y_k^* + S_k \quad (5)$$

$$G_k^* = \gamma_{eff} G_k \quad (6)$$

$$Y_k^* = \min(\max(\gamma_{eff}, 0.1), 1.0) Y_k \quad (7)$$

Es crucial que la longitud de escala sea menor a 1 para que se capture el comportamiento de transición.

4. Comparación entre modelo SST sin y con transición

Como ya es evidente, la diferencia entre ambos modelos mencionados es que el SST de transición es capaz de modelar más fielmente la separación que ocurre debido a la velocidad del flujo y de la curvatura del perfil. Es por esta razón que al calcular los coeficientes de empuje y arrastre en el perfil a ángulos de ataque pequeños, no existe una diferencia notable entre los dos modelos. La diferencia es crucial cuando se aproxima el ángulo de ataque al cual entra en zona de separación. En estos casos, el error del modelo de transición es menor y se puede simular ese momento de separación, mientras que el modelo SST subestima el empuje y "arrastra" el error a lo largo del perfil, por lo que la presión simulada a lo largo del mismo es incorrecta. La figura 1 presenta

resultados de simulaciones usando ambos modelos y comparándolos a resultados experimentales realizados en DTU, según [4]. Además, el coeficiente de arrastre es subestimado por el modelo SST, debido a que no presentan los vórtices en la estela que aumentan el arrastre.

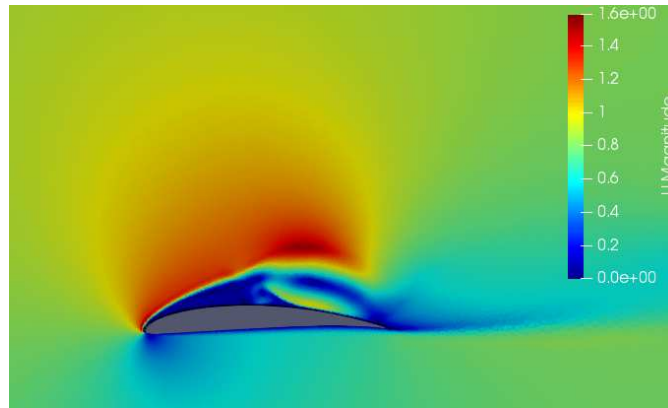


Fig. 2. Contorno de velocidad en la superficie del perfil utilizando modelo SST.

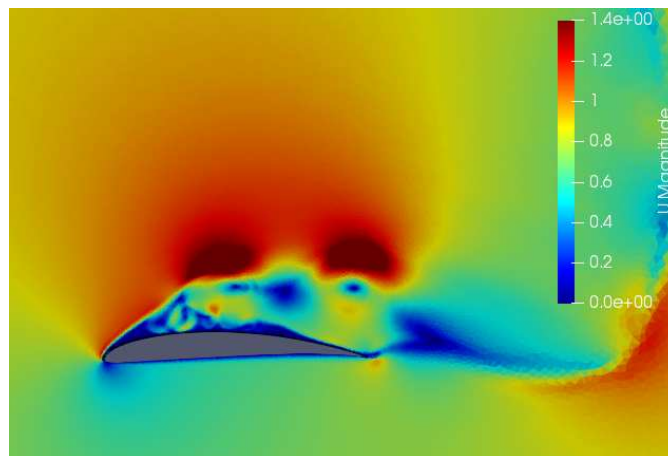


Fig. 3. Contorno de velocidad en la superficie del perfil utilizando modelo SST con transición.

Se presentan también las figuras 2 y 3 que muestran los contornos del perfil SG6043, con un Re de 1×10^4 y a un ángulo de ataque de 15° usando ambos modelos, sin y con transición respectivamente. Aunque en ambos modelos son visibles, en el modelo de transición se pueden distinguir las burbujas de separación con mayor facilidad lo cual es una indicación de la captura efectiva del comportamiento del flujo en puntos posteriores.

Por estas razones se decidió utilizar el modelo SST de transición para las simulaciones necesarias según el proyecto VIE 1341015 del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Ésto presentó un problema, ya que el software seleccionado (COMSOL) no cuenta con este modelo en su directorio. Se investigó y se encontró que el software de licencia libre OpenFOAM sí cuenta con este modelo. OpenFOAM [7] es un software de CFD que corre en ambiente Linux, es capaz de realizar simulaciones relativamente rápido. Se procedió entonces a usar este nuevo software para las simulaciones del proyecto.

References

- [1] URL: http://www.comsol.com.au/downloads/manuals/PDU_Manual.pdf.

-
- [2] S M A Aftab et al. "Turbulence Model Selection for Low Reynolds Number Flows". In: *PloS one* (Apr. 2016). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4841523/>.
 - [3] S. Batill and T. Mueller. "Experimental studies of the laminar separation bubble on a two-dimensional airfoil at low Reynolds numbers". In: *13th Fluid and Plasma Dynamics Conference* (1980). DOI: 10.2514/6.1980-1440.
 - [4] Mou Lin and Hamid Sarlak. "A comparative study on the flow over an airfoil using transitional turbulence models". In: (2016). DOI: 10.1063/1.4951806.
 - [5] F. R. Menter. "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications". In: *AIAA Journal* 32.8 (1994), 1598 to 1605. DOI: 10.2514/3.12149.
 - [6] F. R. Menter et al. "A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I Model Formulation". In: *Volume 4: Turbo Expo 2004* (2004). DOI: 10.1115/gt2004-53452.
 - [7] *OpenFOAM User Guide: CFD Direct, Architects of OpenFOAM*. July 2018. URL: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>.

Apéndice 4: Validación de simulación utilizando OpenFOAM

Ing. Mariana Montenegro Montero, M.Sc.

1. Introducción

Cualquier análisis que se elabore en un proyecto solo será tan confiable como los resultados de la pruebas realizadas sean fidedignos. Es por esta razón que es de buena práctica validar los procesos de prueba con resultados conocidos. Esta validación es de alta importancia en simulaciones, pues los resultados obtenidos son por definición imitaciones aproximadas de sistemas en el mundo real. Al comparar los resultados de la validación con datos experimentales, se puede determinar la precisión del modelo. A continuación se presenta el proceso de validación del modelo simulado de flujo en transición de un perfil aerodinámico.

El perfil aerodinámico S826, mostrado en la figura 1, es parte de una familia de perfiles que han sido desarrollados por NREL específicamente para turbinas horizontales. Es por esto que se cuentan con los datos experimentales suficientes para utilizar este perfil para validar el modelo de simulación. Además, se tienen los datos de simulaciones realizadas en el artículo "A Comparative Study on the Flow over an Airfoil Using Transitional Turbulence Models" de Lin y Sarlak [2]. Esos resultados son especialmente útiles, pues el modelo de simulación a utilizarse en el presente proyecto es el mismo que se presenta en en el artículo. Por lo tanto, se ha procedido a validar la simulación propia con los resultados de Lin y Sarlak, además de compararlos con datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad Técnica de Dinamarca y que se presentan en el mismo artículo.

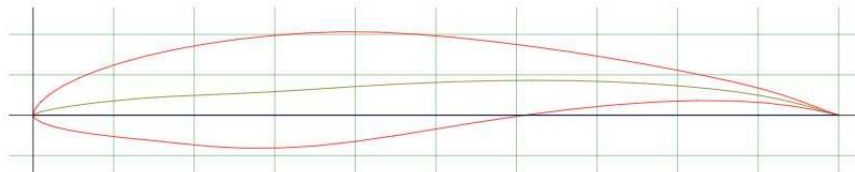


Fig. 1. Geometría normalizada del perfil S826, [1].

2. Preparación de la simulación

Utilizando el perfil aerodinámico S826 antes mencionado, se elaboró un modelo con las condiciones de viento mostradas en la tabla I.

Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Número de Reynolds	Re	1×10^5	-
Ángulo de ataque	AoA	[0,14]	$^\circ$
Intensidad de turbulencia	Tu	0.2	%
Densidad	ρ	1.18	kg/m ³
Cuerda	c	0.1	m
Viscosidad cinemática	μ	1.1516×10^{-5}	m ² /s

Tabla I
VALORES DE VARIABLES DE ENTRADA.

Se elaboró un modelo de simulación utilizando el programa OpenFOAM, a partir del caso precargado de un perfil en dos dimensiones. Debido a las condiciones de velocidad de viento, el modelo de turbulencia seleccionado se basó en el modelo de transporte de esfuerzo cortante Menter SST $k - \omega$ [3], el cual es uno de los más comunes para simulaciones de perfiles. El modelo SST de transición ($\gamma - Re_\theta$) fue creado específicamente para flujos en transición. Es una alteración del modelo SST incorporando la intermitencia γ y el número de Re de transición al cual empieza la intermitencia Re_θ [4].

En el modelo, las cantidades de turbulencia q , ω y Re_θ se estiman a partir de la velocidad del viento, la intensidad de turbulencia y la viscosidad, como se observa en las ecuaciones 1, 2 y 3. Además, la cantidad de turbulencia restante, γ tiene un valor determinado igual a 1. Por otro lado, las condiciones de frontera de la velocidad U y presión p son fija y de gradiente cero, respectivamente.

$$k = \frac{3}{2}(U \cdot Tu)^2 \quad (1)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{0.09l} \quad (2)$$

$$Re_\theta = \begin{cases} 1173.51 - 589.428 \cdot Tu + \frac{0.2196}{Tu^2}, & \text{si } Tu < 0.013 \\ \frac{331.5}{Tu \cdot 100 - 0.5658^{0.6771}}, & \text{si } Tu \geq 0.013 \end{cases} \quad (3)$$

3. Validación de la malla

La exactitud de la solución depende en gran medida de la calidad de la malla que se utilice, por eso se realizó un análisis de independencia de malla para verificar su confiabilidad. El criterio que se utiliza comúnmente (y en este caso) es el número de celdas o elementos en la malla. Pueden ocurrir errores en la simulación debido a que la malla es muy gruesa, es decir, los elementos son muy grandes. Cuando esto sucede, los efectos en cada elemento no se calculan bien, creando errores que se van arrastrando de elemento a elemento. Al utilizar mallas lo suficientemente finas, se puede separar cada efecto adecuadamente en un elemento, creando así un estimado a la solución real más veraz.

El modelo se construyó con una malla triangular, y se manipuló el factor de tamaño de elemento par obtener entre 2×10^4 y $1,7 \times 10^6$ elementos. Se obtuvo la independencia de la malla a partir de $1,0 \times 10^6$ elementos, como se puede observar en la figura 2, por lo cual se procedió a trabajar con una malla de ese tamaño para las simulaciones restantes.

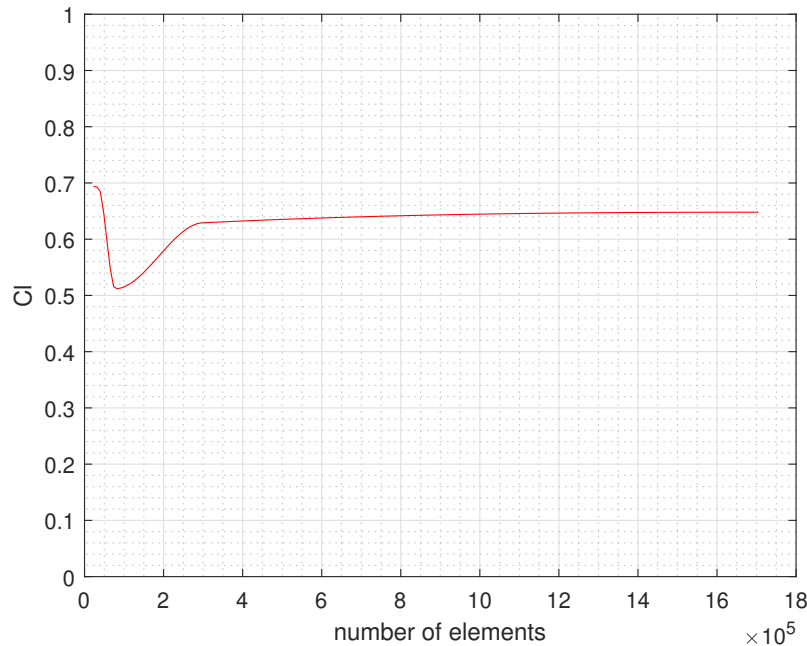


Fig. 2. Validación de malla.

4. Resultados

En las figuras 3 y 4 se muestran los coeficientes de empuje y arrastre respectivamente, en función del ángulo de ataque. Hay tres soluciones, la nueva simulación, la de Lin y Sarlak, y los datos experimentales obtenidos en el laboratorio de DTU.

Se puede ver en la figura 3 cómo ambas simulaciones tienen un comportamiento consistente a los datos reales, sobretodo a pequeños ángulos de ataque. Una de las grandes ventajas de usar el modelo SST de transición es que el ángulo de ataque en el que ocurre la separación logra predecirse correctamente, debido a que se logra simular de mejor manera la generación de la burbuja de separación y de reinserción. Los datos de la nueva simulación se acercan más a los datos reales una vez que se entra en *stall*, zona en la cual la simulación de Lin y Sarlak tiende a sobre estimar el coeficiente de empuje.

En la figura 4 se observa más bien que el coeficiente de arrastre tiende a subestimarse en las simulaciones. Este error es común en simulaciones, debido a la alta turbulencia en esos casos.

En general, el error de la nueva simulación con respecto a los datos experimentales es del 11%, menor al 14% de Lin y Sarlak. Esta diferencia puede deberse a que la malla que se usó en esta simulación es de un orden mayor a la que ellos usaron, obteniendo así una solución más fidedigna.

References

- [1] *Airfoil Tools*. URL: <http://www.airfoiltools.com/>.
- [2] Mou Lin and Hamid Sarlak. "A comparative study on the flow over an airfoil using transitional turbulence models". In: (2016). DOI: 10.1063/1.4951806.
- [3] F. R. Menter. "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications". In: *AIAA Journal* 32.8 (1994). DOI: 10.2514/3.12149.
- [4] F. R. Menter et al. "A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I - Model Formulation". In: *Volume 4: Turbo Expo 2004* (2004). DOI: 10.1115/gt2004-53452.

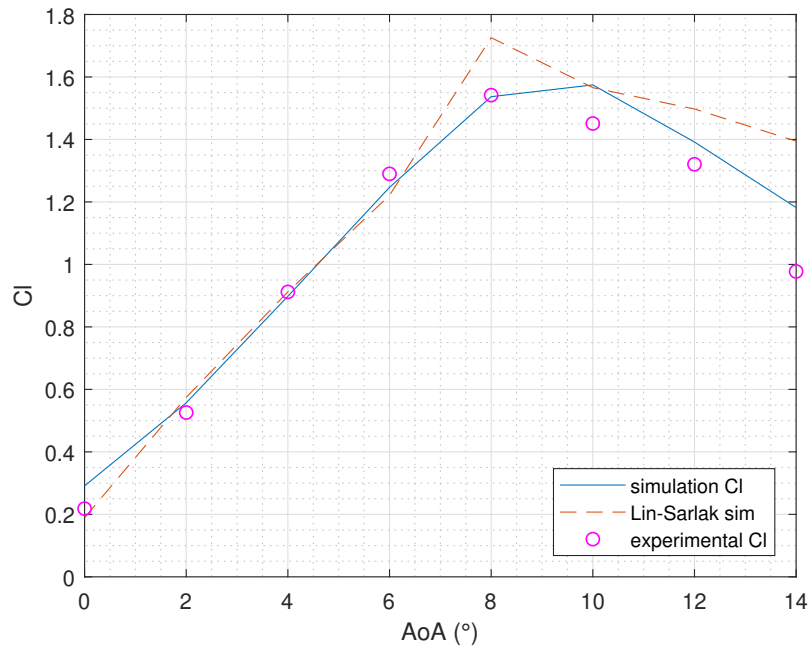


Fig. 3. Comparación de resultados de coeficiente de empuje en función del ángulo de ataque.

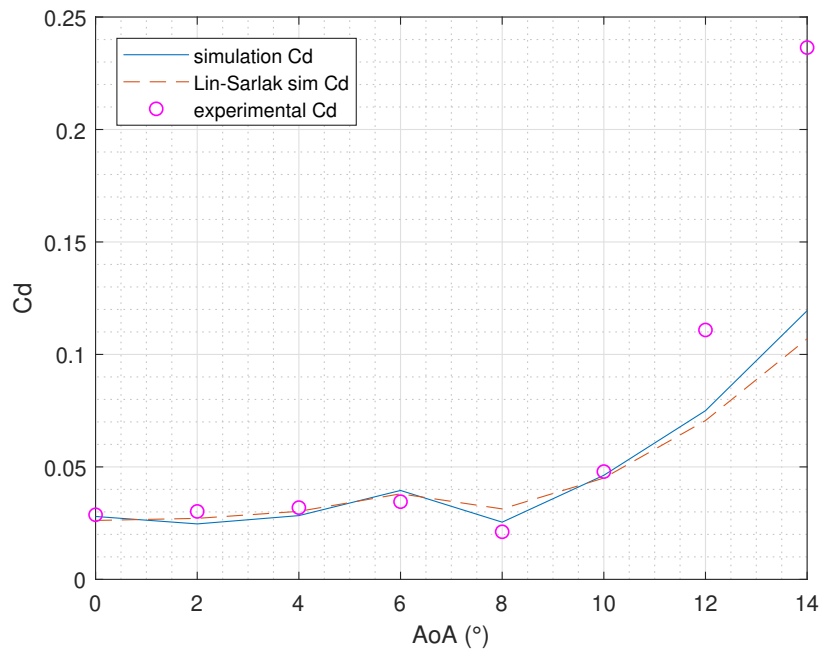


Fig. 4. Comparación de resultados de coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque.

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Apéndice 5: Tutorial de CFD en software libre para simulación de perfiles aerodinámicos

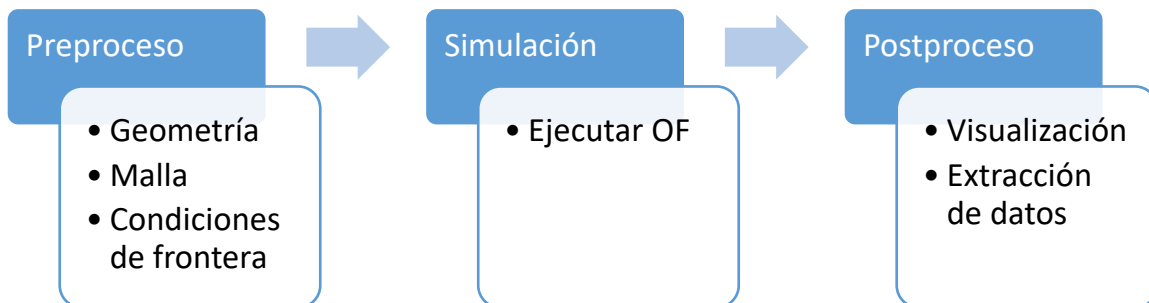
Elaborado para OpenFOAM v-1812

Mariana Montenegro Montero
26-6-2019

INTRODUCCIÓN

Este documento es un tutorial para implementar un caso de flujo incompresible alrededor de un perfil aerodinámico en 2D. El flujo a simular es aire con número de Reynolds bajo y los perfiles han sido seleccionados previamente para el estudio específico. El caso se simula con el programa de software libre OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation). Este programa contiene más de 250 aplicaciones que corren como ejecutables empaquetados en una gran colección de librerías de archivos en C++.

El proceso para utilizar OpenFOAM se puede dividir en tres pasos. El primer paso es el pre-proceso, donde se manipulan los datos y se crea el enmallado para la geometría. El segundo paso es resolver utilizando alguna aplicación del programa, para este caso se utiliza una aplicación que cae en la categoría de *solucionador* una aplicación diseñada para resolver problemas específicos en mecánica de fluidos. El último paso es el post-proceso, cuando se hace una extracción de datos para su análisis y visualización. Cada uno de los pasos se cubre en este documento, prestando mayor importancia a las variables pertinentes para el caso a tratar, y entendiéndose que los datos y archivos que se utilizan pueden cambiar dependiendo del uso que se le dé al programa.



El alcance de este documento es lograr que el lector aplique el solucionador necesario para las geometrías previamente seleccionadas, y que sea capaz de extraer datos utilizando el código proporcionado. Este tutorial no cubre todo el rango de utilidad de OpenFOAM, tampoco se pretende entrar en detalles sobre la física ni el modelo de turbulencia a tratar.

Para poder seguir los pasos de este tutorial, el lector debe tener instalado en su computadora los siguientes programas:

Ubuntu Bash 18.04 LTS (si utiliza Windows 10)	Orange
OpenFOAM v-1812	Green
Python	Grey
Gmsh	Blue
ParaView	Purple
Matlab	Yellow
Notepad++ (u otro editor de código que soporte C++)	Red

Se ha asignado un color a cada programa que se podrá visualizar al lado derecho de la página cuando éste deba ser usado durante el procedimiento.

PRE-PROCESO

Geometría

Lo primero que se debe hacer en el pre-proceso es crear un enmallado para la geometría a tratar en el formato adecuado. Se puede hacer esto con varios programas, OpenFOAM tiene un comando que convierte de FLUENT a Foam, por ejemplo. gmsh se escogió para este caso porque es un programa liviano que permite importar fácilmente los datos de coordenadas en 2D de los perfiles.

1) Obtener los datos geométricos.

La forma que usualmente se da la geometría de un perfil aerodinámico es mediante una lista de coordenadas en 2D. Esos datos se extraen gratuitamente en formato .dat de la página web Airfoil Tools (Airfoil Tools, 2019). En la página se puede buscar el perfil con solo su nombre, y permite ver varias características del mismo. Se debe buscar el archivo .dat o las coordenadas en texto simple y copiarlas a una nota en Notepad++ que se guarda como un archivo tipo .dat. Como el formato de los datos depende de la organización que creó el perfil, no siempre es compatible con gmsh. El archivo debe tener la siguiente forma:

```
1 1.000000 0.000000 0.000000
2 0.996203 0.000487 0.000000
3 0.985190 0.002373 0.000000
```

- Ningún encabezado
- Espacio simple entre ejes
- Incluir la coordenada z como una lista de ceros.
- Ninguna línea en blanco al final del archivo

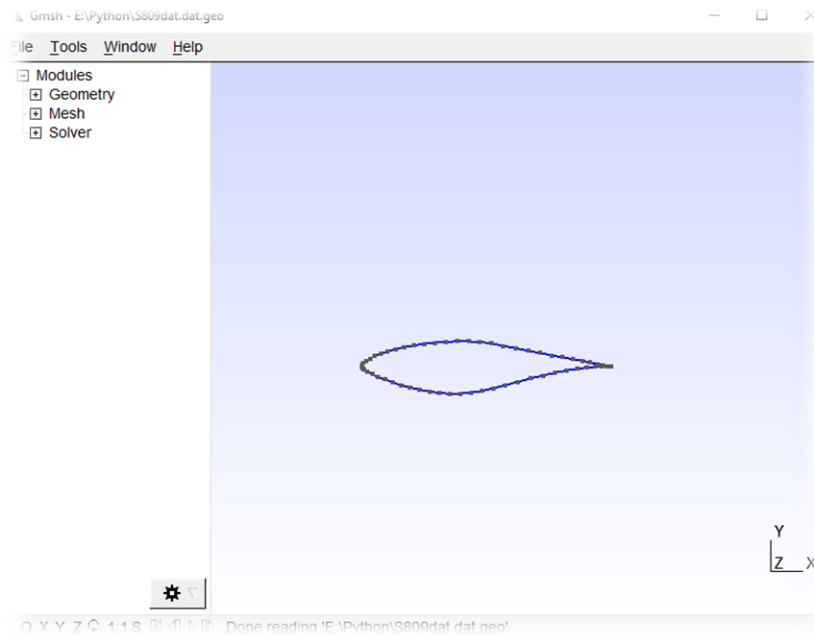
2) Transformar los datos a gmsh

Un código de Python que traslada el archivo de puntos geométricos a formato de gmsh, el cual tiene el nombre `dat2gmsh.py`. se puede conseguir en (Ingram, The python script for converting points to gmsh points, 2012). En la interfaz de Python se puede correr el código como sigue, donde `s809.dat` es el nombre del archivo con los puntos geométricos del perfil. El código crea un nuevo documento tipo .geo.

```
python dat2gmsh.py s809.dat
```

Malla

El nuevo documento se puede abrir en gmsh, como se ve en la siguiente imagen. Todavía no se tiene la información necesaria para correr OF, ya que el programa no opera puramente en 2D. Además, se deben nombrar las caras y superficies que van a actuar en la simulación.



- 1) Cerrar la geometría

Es importante que la geometría esté cerrada (el punto final coincida con el inicial). En Geometry, se puede escoger la opción de editar código para agregar el punto y una BSpine manualmente, o usar la interfaz, para crear la última línea para cerrar la forma. Además, se debe agregar un Line Loop para unir a todas las líneas como una sola curva.

Seguidamente, hay que formar la superficie del fluido. Para esto, se forma un rectángulo alrededor del perfil, creando cuatro puntos y uniéndolos mediante líneas. Las líneas del rectángulo también se cierran mediante Line Loop.
- 2) Definir superficies

Con la geometría en 2D finalizada, se debe extruir la misma, al ancho de una capa. Al extruir se crean nuevas superficies que se deben definir como `physical surfaces`, y nombrarse. De la misma manera, se define el volumen de trabajo como `physical volume`. Los nombres que se le dan a cada superficie se muestran en la siguiente figura, luego será muy útil al definir los límites del modelo.

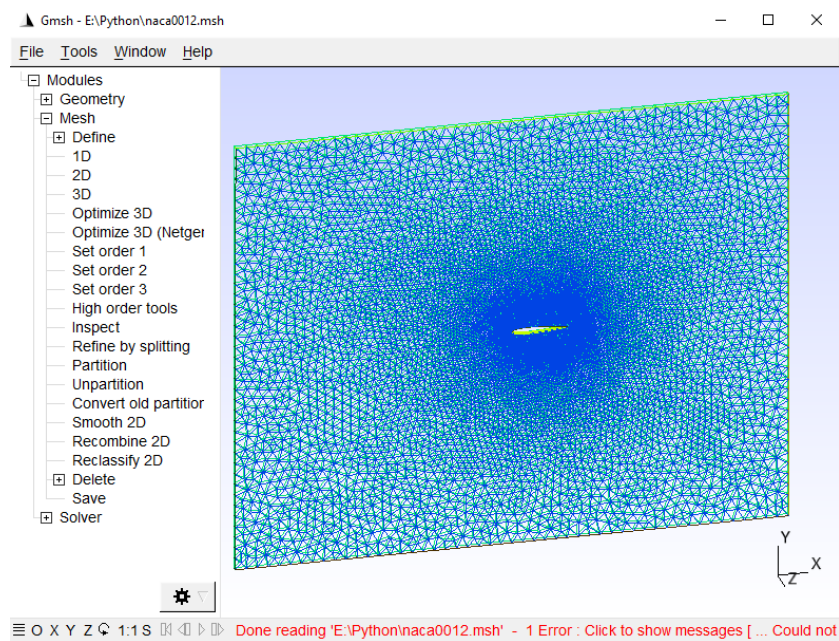
```

139 Physical Surface("airfoil") = {1051, 1043, 1047};
140 //+
141 Physical Surface("frontAndBack") = {1007, 1052};
142 //+
143 Physical Surface("inlet") = {1035};
144 //+
145 Physical Surface("outlet") = {1027};
146 //+
147 Physical Surface("walls") = {1039, 1031};
148 //+
149 Physical Volume("fluid") = {1};

```

3) Enmallado en 3D

La última tarea realizada en gmsh es crear la malla en 3D mesh. El tamaño de la malla se puede manipular en las opciones, es importante que sea lo suficientemente fina como para que capture la física del modelo adecuadamente. La geometría completada se exporta expresándola como un archivo tipo .msh, y guardándolo en el directorio adecuado.



Condiciones iniciales y de frontera

OpenFOAM tiene una gran variedad de librerías y aplicaciones. Cada librería contiene tres directorios que contienen los archivos necesarios para correr la aplicación. A continuación, se da una breve explicación de los contenidos de cada uno de los directorios para el caso de un flujo alrededor de un cuerpo:

- **constant**
Tiene la descripción de la malla y las propiedades físicas
- **system**
Contiene los parámetros asociados al procedimiento de solución. El archivo `controlDict` tiene los parámetros de control, por lo que siempre se debe revisar.
- **0**
Contiene los archivos de variables que definen el problema en el tiempo inicial. Se escribe un nuevo directorio conforme se determina el tiempo de escritura.

Una manera sencilla de utilizar el programa es copiando una librería de uno de los ejemplos precargados con el programa, y cambiar los parámetros necesarios y geometrías dentro de los directorios.

1) Propiedades del modelo

Empezando por el directorio `constant`, el primer archivo que se verá será `transportProperties`, abriendo el mismo en el editor de código. Este tiene la información sobre el modelo de turbulencia a utilizarse, y se muestra en la imagen abajo. De las líneas 1 a 16 se tiene el encabezado, que va a ser igual en todos los archivos de todos los directorios. En la línea 22 el modelo de turbulencia debe ponerse en `kOmegaSSTLM`, el cual es el modelo de transición Gamma-Re. La turbulencia debe estar en `on`.

```

1  /*-----*-- C++ -*-----*\
2  | ===== |
3  |  \ \ /  /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  |  \ \ /  /  O peration  | Version:  v1812
5  |  \ \ /  /  A nd        | Web:      www.OpenFOAM.com
6  |  \ \ /  /  M anipulation |
7  \*-----*--\
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     location     "constant";
14     object       turbulenceProperties;
15 }
16 // ***** //
17
18 simulationType RAS;
19
20 RAS
21 {
22     RASModel      kOmegaSSTLM;
23
24     turbulence    on;
25
26     printCoeffs  on;
27 }
28
29 // ***** //

```

2) Establecer propiedades de las superficies

El subdirectorio `polyMesh` contiene los datos de la geometría importada de `gmsH`. Para importarla del archivo tipo `.msh`, se debe de escribir los siguientes comandos en Ubuntu:

```
gmsH2Foam s809.msh
checkMesh
```

`checkMesh` revisa que el enmallado esté correcto. Si hay errores se debe volver a `gmsH`, de lo contrario se puede proceder a abrir el archivo `boundary`. Aquí se deben encontrar las superficies que se definieron en `gmsH`, y a cada una se le asigna un tipo de parche (`type` y `physicalType`), que describe el tipo de superficie que es. Se debe ver como sigue:

```
18 5
19 (
20     frontAndBack
21     {
22         type            empty;
23         physicalType    empty;
24         nFaces          225120;
25         startFace      167916;
26     }
27     outlet
28     {
29         type            patch;
30         physicalType    outlet;
31         nFaces          48;
32         startFace      393036;
33     }
34     walls
35     {
36         type            wall;
37         physicalType    wall;
38         nFaces          96;
39         startFace      393084;
40     }
41     inlet
42     {
43         type            patch;
44         physicalType    inlet;
45         nFaces          48;
46         startFace      393180;
47     }
48     airfoil
49     {
50         type            wall;
51         physicalType    wall;
52         nFaces          1656;
53         startFace      393228;
54     }
55 )
```

Nota: De Gmsh se importan los datos del perfil normalizados. Se puede cambiar la escala en el mismo programa antes de importarlos. En OF también se puede escalar, utilizando el comando `transformPoints -scale (x y z)`.

3) Datos generales de la simulación

El segundo subdirectorio que se revisa es `system`. Aquí se trata de solo editar `controlDict`. El aspecto más importante que se ve en este archivo son los tiempos, el tiempo inicial debe de ser 0, mientras que el final se puede cambiar dependiendo de la estabilidad de la simulación. Una adición que se puede hacer es el espacio `functions`, que crea un nuevo subdirectorio llamado `postProcessing` con los archivos de `Cl`, `Cd` y `Cm` ya calculados, ahorrando tiempo de post-proceso. En esa parte es importante revisar las constantes, especialmente `magUInf`, que es la velocidad del viento a estudiar.

```

48 functions
49 {
50     forceCoeffs1
51     {
52         type            forceCoeffs;
53         libs            ("libforces.so");
54         writeControl    timeStep;
55         writeInterval  10;
56         log             true;
57         patches        (airfoil);
58         rho            rhoInf; // Indicates incompressible.
59         rhoInf        1.204; // Redundant for incompressible (value does not matter).
60         liftDir       (0 1 0);
61         dragDir       (1 0 0);
62         CofR          (0 0 0); // Quarter-chord.
63         pitchAxis     (0 0 1);
64         magUInf       3.79; // Matches O/U.
65         lRef          0.1; // Normalized chord.
66         Aref          0.01; // Cell depth * chord.
67     }
68 }

```

Si la solución diverge, se pueden cambiar los factores de relajación en el archivo `fvSolution`.

4) Datos iniciales

El último subdirectorio, `0`, es el que tiene más archivos que se deben editar, pues cada uno representa una variable única de cada corrida. Para este subdirectorio se ha escrito en Matlab un pequeño código llamado `calcddata.m` que facilita el cálculo de las variables del modelo según los datos de entrada.

```

%% Código para calcular variables del modelo de turbulencia SSTLM

clear
clc

%% datos de entrada

```

```

Re = 1e5;           % número de Reynolds
Tu = 0.05;         % intensidad de turbulencia
mu = 1.516e-5;    % viscosidad cinética [m^2/s]
rho = 1.204;       % densidad [kg/m^3]
c = 0.2;           % longitud de cuerda [m]
theta = [0 5 10 15 20 25]; % ángulo de ataque [°]
S = 0.1;           % span [m]

%% datos calculados

U = Re*mu/c;       % velocidad del viento [m/s]
l = 0.07*c;        % integral length scale
k = 3/2*(U*Tu)^2; % k
w = (k)^0.5/(0.09*1); % omega

if Tu<0.013
    Retheta = 1173.51-589.428*Tu+0.2196/Tu^2;
else
    Retheta = 331.5/(Tu*100-0.5658)^(0.671);
    % Transition momentum thickness Re
end

%% componentes U

Uxy(1,:) = U*cosd(theta);
Uxy(2,:) = U*sind(theta);

```

Los primeros dos archivos que se revisan son presión p y velocidad U . Una nota importante aquí es que la presión dada en OpenFOAM es en unidades de m^2/s^2 , es decir, la presión cinemática, la cual es constante y 0. Por otro lado, en la velocidad es donde se define el ángulo de ataque, pues está se da en forma vectorial. Solo se debe cambiar el espacio `internalField`, en la línea 19, en esta variable y en las otras de este subdirectorio.

Las otras variables a cambiar son propias del modelo de turbulencia y dependientes del Re . Re_{theta} , k , y ω se utilizan para describir la turbulencia en transición del flujo.

```
15 // ***** //
16
17 dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
18
19 internalField   uniform (3.79 0 0);
20
21 boundaryField
22 {
23     inlet
24     {
25         type      freestreamVelocity;
26         freestreamValue $internalField;
27     }
28
29     outlet
30     {
31         type      freestreamVelocity;
32         freestreamValue $internalField;
33     }
34
35     frontAndBack
36     {
37         type      empty;
38     }
39
40     walls
41     {
42         type      freestreamVelocity;
43         freestreamValue $internalField;
44     }
45
46     airfoil
47     {
48         type      fixedValue;
49         value     (0.0 0.0 0.0);
50     }
51 }
52
53 // ***** //
```

SIMULAR EN OPENFOAM

Cuando se está seguro de que los archivos tienen los datos correctos, es hora de correr OpenFOAM.

- 1) En el Bash, se debe abrir el directorio, y simplemente poner el comando `simpleFoam`. Se debe ver algo así, en donde el usuario y nombre de la computadora están en verde, y el directorio de trabajo en azul:

```
mmontenegro@MI-67696:/mnt/e/tutorial/s809/1Re5e4/3Tu10/AoA0$ simpleFoam
```

El modelo empezará a correr y dependiendo de la malla y del tiempo de simulación puede durar varios minutos. Cabe mencionar que se pueden abrir varias ventanas y correr varias simulaciones al mismo tiempo. Evidentemente eso hará que cada simulación sea más lenta, pero permite dejar corriendo simulaciones complejas al final del día.

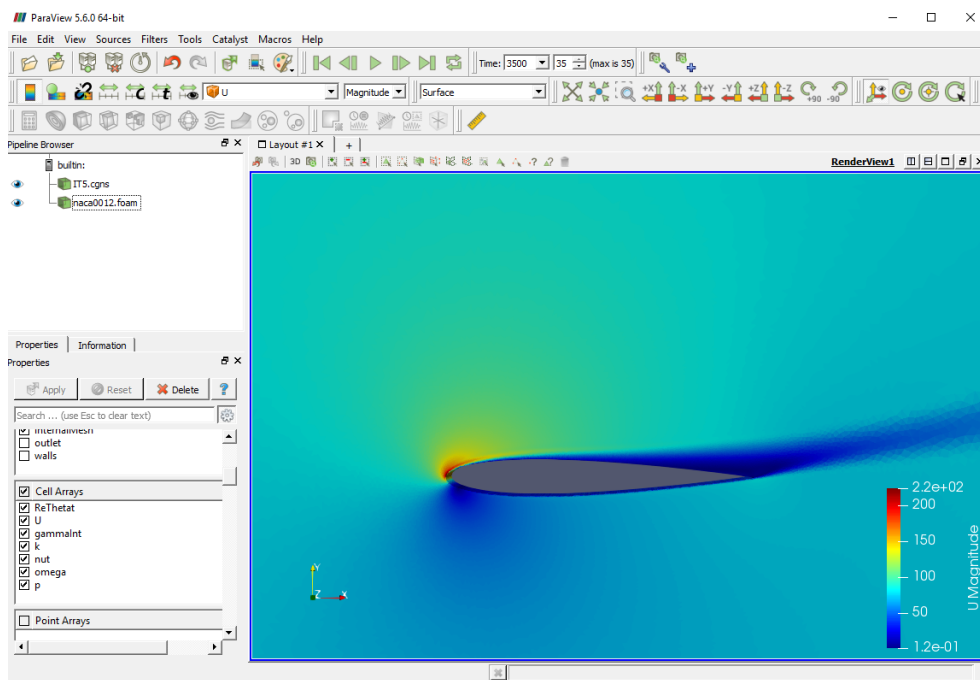
Algunos errores comunes son un error de lectura de alguno de los archivos. En ese caso hay que revisar el archivo en cuestión, un espacio mal puesto puede causar error fatal en la simulación. Si la simulación para antes de tiempo, es muy probable que sea un error de divergencia, que se puede verificar observando los datos que imprime de `Cl` y `Cd`. Si éstos son muy altos, es importante revisar cada variable, y en caso extremo revisar el archivo `fvsolution` del subdirectorio `system`, y revalorar los factores de relajación, aunque se aconseja que éste sea la última opción.

POST-PROCESO

Al terminar la simulación se pueden ver varios nuevos subdirectorios de tiempo, donde se han escrito los resultados. También está el subdirectorio de `postProcessing`, del cual se pueden extraer los datos para procesarlos en otros programas.

1) Visualización utilizando ParaView

ParaView es una herramienta muy útil que permite leer todos los resultados y crea animaciones sencillas. Permite integrar valores y obtener resultados visuales fácilmente, en función del tiempo.



2) Extracción de datos con Matlab

Se ha escrito otro código de Matlab que extrae, promedia los C_d y C_l en función del ángulo de ataque. Extraer los datos de esta manera permite graficar los coeficientes.

```
%% extracción de datos
%% Inicialization
```

```

Cl = zeros(5000,6);
Cd = Cl;
Clf = Cl;
Clr = Cl;
Cm = Cl;
Cl_mean = ones(1,6);
Cd_mean = ones(1,6);
factor2 = [4 4 400 2000];
factor3 = [1 1 20 400];

%% Cl Cd vs. AoA plots from OpenFOAM

AoA_re = [0 5 10 15 20 25];

perfil = string({"naca0012", "s809", "sg6043"});
Re = string({"1Re5e4", "2Re1e5", "3Re5e5", "4Re1e6"});
Tu = string({"1Tu0" "2Tu5" "3Tu10" "4Tu20" "5Tu30"});
AoA = string({"AoA0" "AoA5" "AoA10" "AoA15" "AoA20" "AoA25"});

Refig = string({"5e4", "1e5", "5e5", "1e6"});

for a = 3

    for b = 3:4

        for c = 1:5

            for d = 1:6

                dirformat =
'E:\\tutorial\\%s\\%s\\%s\\%s\\postProcessing\\forceCoeffs1\\0';
                direc = sprintf(dirformat,perfil(a),Re(b),Tu(c),AoA(d));
                name = 'coefficient.dat';
                file= fullfile(direc, name);
                coeff = importdata(file);

                Clr(end-size(coeff.data(:,1))+1:end,d) = coeff.data(:,6);
                Clf(end-size(coeff.data(:,1))+1:end,d) = coeff.data(:,5);
                Cl(end-size(coeff.data(:,1))+1:end,d) = coeff.data(:,4);
                Cd(end-size(coeff.data(:,1))+1:end,d) = coeff.data(:,3);
                Cm(end-size(coeff.data(:,1))+1:end,d) = coeff.data(:,2);

                % mean coeffs

                Cl_mean(1,d) = mean(nonzeros(Cl(:,d)));
                Cd_mean(1,d) = mean(nonzeros(Cd(:,d)));

            end
        end
    end
end

```

BIBLIOGRAFÍA

Abedi, H. (2011). *A simpleFoam tutorial*. Gothenburg.

Airfoil Tools. (1 de Agosto de 2019). Obtenido de Airfoil Tools: <http://airfoiltools.com/>

Greenshields, C. J. (10 de Julio de 2018). *User Guide*. Obtenido de OpenFOAM Foundation: <https://openfoam.org>

Ingram, G. (14 de Noviembre de 2012). *The Durham gmesh Tutorial*. Obtenido de Grant Ingram's University Website: <http://community.dur.ac.uk/g.l.ingram/index.php>

Ingram, G. (14 de Noviembre de 2012). *The Durham OpenFOAM Tutorial*. Obtenido de Grant Ingram's University Website: <https://community.dur.ac.uk/g.l.ingram/download.php>

Ingram, G. (2012). *The python script for converting points to gmesh points*. Obtenido de Grant Ingram's University Website: <https://community.dur.ac.uk/g.l.ingram/download.php>

Combinación	Perfil	Número de Reynolds	Intensidad de turbulencia (IT)	Ángulo de ataque
1	S809	5x10 ⁴	0%	0°
2	S809	5x10 ⁴	0%	5°
3	S809	5x10 ⁴	0%	10°
4	S809	5x10 ⁴	0%	15°
5	S809	5x10 ⁴	0%	20°
6	S809	5x10 ⁴	0%	25°
7	S809	5x10 ⁴	5%	0°
8	S809	5x10 ⁴	5%	5°
9	S809	5x10 ⁴	5%	10°
10	S809	5x10 ⁴	5%	15°
11	S809	5x10 ⁴	5%	20°
12	S809	5x10 ⁴	5%	25°
13	S809	5x10 ⁴	10%	0°
14	S809	5x10 ⁴	10%	5°
15	S809	5x10 ⁴	10%	10°
16	S809	5x10 ⁴	10%	15°
17	S809	5x10 ⁴	10%	20°
18	S809	5x10 ⁴	10%	25°
19	S809	5x10 ⁴	20%	0°
20	S809	5x10 ⁴	20%	5°
21	S809	5x10 ⁴	20%	10°
22	S809	5x10 ⁴	20%	15°
23	S809	5x10 ⁴	20%	20°
24	S809	5x10 ⁴	20%	25°
25	S809	5x10 ⁴	30%	0°
26	S809	5x10 ⁴	30%	5°
27	S809	5x10 ⁴	30%	10°
28	S809	5x10 ⁴	30%	15°
29	S809	5x10 ⁴	30%	20°
30	S809	5x10 ⁴	30%	25°
31	S809	1x10 ⁵	0%	0°
32	S809	1x10 ⁵	0%	5°
33	S809	1x10 ⁵	0%	10°
34	S809	1x10 ⁵	0%	15°
35	S809	1x10 ⁵	0%	20°
36	S809	1x10 ⁵	0%	25°
37	S809	1x10 ⁵	5%	0°
38	S809	1x10 ⁵	5%	5°
39	S809	1x10 ⁵	5%	10°
40	S809	1x10 ⁵	5%	15°
41	S809	1x10 ⁵	5%	20°
42	S809	1x10 ⁵	5%	25°
43	S809	1x10 ⁵	10%	0°
44	S809	1x10 ⁵	10%	5°
45	S809	1x10 ⁵	10%	10°
46	S809	1x10 ⁵	10%	15°

Combinación	Perfil	Número de Reynolds	Intensidad de turbulencia (IT)	Ángulo de ataque
47	S809	1x10 ⁵	10%	20°
48	S809	1x10 ⁵	10%	25°
49	S809	1x10 ⁵	20%	0°
50	S809	1x10 ⁵	20%	5°
51	S809	1x10 ⁵	20%	10°
52	S809	1x10 ⁵	20%	15°
53	S809	1x10 ⁵	20%	20°
54	S809	1x10 ⁵	20%	25°
55	S809	1x10 ⁵	30%	0°
56	S809	1x10 ⁵	30%	5°
57	S809	1x10 ⁵	30%	10°
58	S809	1x10 ⁵	30%	15°
59	S809	1x10 ⁵	30%	20°
60	S809	1x10 ⁵	30%	25°
61	S809	5x10 ⁵	0%	0°
62	S809	5x10 ⁵	0%	5°
63	S809	5x10 ⁵	0%	10°
64	S809	5x10 ⁵	0%	15°
65	S809	5x10 ⁵	0%	20°
66	S809	5x10 ⁵	0%	25°
67	S809	5x10 ⁵	5%	0°
68	S809	5x10 ⁵	5%	5°
69	S809	5x10 ⁵	5%	10°
70	S809	5x10 ⁵	5%	15°
71	S809	5x10 ⁵	5%	20°
72	S809	5x10 ⁵	5%	25°
73	S809	5x10 ⁵	10%	0°
74	S809	5x10 ⁵	10%	5°
75	S809	5x10 ⁵	10%	10°
76	S809	5x10 ⁵	10%	15°
77	S809	5x10 ⁵	10%	20°
78	S809	5x10 ⁵	10%	25°
79	S809	5x10 ⁵	20%	0°
80	S809	5x10 ⁵	20%	5°
81	S809	5x10 ⁵	20%	10°
82	S809	5x10 ⁵	20%	15°
83	S809	5x10 ⁵	20%	20°
84	S809	5x10 ⁵	20%	25°
85	S809	5x10 ⁵	30%	0°
86	S809	5x10 ⁵	30%	5°
87	S809	5x10 ⁵	30%	10°
88	S809	5x10 ⁵	30%	15°
89	S809	5x10 ⁵	30%	20°
90	S809	5x10 ⁵	30%	25°
91	S809	1x10 ⁶	0%	0°
92	S809	1x10 ⁶	0%	5°

Combinación	Perfil	Número de Reynolds	Intensidad de turbulencia (IT)	Ángulo de ataque
93	S809	1x10 ⁶	0%	10°
94	S809	1x10 ⁶	0%	15°
95	S809	1x10 ⁶	0%	20°
96	S809	1x10 ⁶	0%	25°
97	S809	1x10 ⁶	5%	0°
98	S809	1x10 ⁶	5%	5°
99	S809	1x10 ⁶	5%	10°
100	S809	1x10 ⁶	5%	15°
101	S809	1x10 ⁶	5%	20°
102	S809	1x10 ⁶	5%	25°
103	S809	1x10 ⁶	10%	0°
104	S809	1x10 ⁶	10%	5°
105	S809	1x10 ⁶	10%	10°
106	S809	1x10 ⁶	10%	15°
107	S809	1x10 ⁶	10%	20°
108	S809	1x10 ⁶	10%	25°
109	S809	1x10 ⁶	20%	0°
110	S809	1x10 ⁶	20%	5°
111	S809	1x10 ⁶	20%	10°
112	S809	1x10 ⁶	20%	15°
113	S809	1x10 ⁶	20%	20°
114	S809	1x10 ⁶	20%	25°
115	S809	1x10 ⁶	30%	0°
116	S809	1x10 ⁶	30%	5°
117	S809	1x10 ⁶	30%	10°
118	S809	1x10 ⁶	30%	15°
119	S809	1x10 ⁶	30%	20°
120	S809	1x10 ⁶	30%	25°
121	NACA0012	5x10 ⁴	0%	0°
122	NACA0012	5x10 ⁴	0%	5°
123	NACA0012	5x10 ⁴	0%	10°
124	NACA0012	5x10 ⁴	0%	15°
125	NACA0012	5x10 ⁴	0%	20°
126	NACA0012	5x10 ⁴	0%	25°
127	NACA0012	5x10 ⁴	5%	0°
128	NACA0012	5x10 ⁴	5%	5°
129	NACA0012	5x10 ⁴	5%	10°
130	NACA0012	5x10 ⁴	5%	15°
131	NACA0012	5x10 ⁴	5%	20°
132	NACA0012	5x10 ⁴	5%	25°
133	NACA0012	5x10 ⁴	10%	0°
134	NACA0012	5x10 ⁴	10%	5°
135	NACA0012	5x10 ⁴	10%	10°
136	NACA0012	5x10 ⁴	10%	15°
137	NACA0012	5x10 ⁴	10%	20°
138	NACA0012	5x10 ⁴	10%	25°

Combinación	Perfil	Número de Reynolds	Intensidad de turbulencia (IT)	Ángulo de ataque
139	NACA0012	5x10 ⁴	20%	0°
140	NACA0012	5x10 ⁴	20%	5°
141	NACA0012	5x10 ⁴	20%	10°
142	NACA0012	5x10 ⁴	20%	15°
143	NACA0012	5x10 ⁴	20%	20°
144	NACA0012	5x10 ⁴	20%	25°
145	NACA0012	5x10 ⁴	30%	0°
146	NACA0012	5x10 ⁴	30%	5°
147	NACA0012	5x10 ⁴	30%	10°
148	NACA0012	5x10 ⁴	30%	15°
149	NACA0012	5x10 ⁴	30%	20°
150	NACA0012	5x10 ⁴	30%	25°
151	NACA0012	1x10 ⁵	0%	0°
152	NACA0012	1x10 ⁵	0%	5°
153	NACA0012	1x10 ⁵	0%	10°
154	NACA0012	1x10 ⁵	0%	15°
155	NACA0012	1x10 ⁵	0%	20°
156	NACA0012	1x10 ⁵	0%	25°
157	NACA0012	1x10 ⁵	5%	0°
158	NACA0012	1x10 ⁵	5%	5°
159	NACA0012	1x10 ⁵	5%	10°
160	NACA0012	1x10 ⁵	5%	15°
161	NACA0012	1x10 ⁵	5%	20°
162	NACA0012	1x10 ⁵	5%	25°
163	NACA0012	1x10 ⁵	10%	0°
164	NACA0012	1x10 ⁵	10%	5°
165	NACA0012	1x10 ⁵	10%	10°
166	NACA0012	1x10 ⁵	10%	15°
167	NACA0012	1x10 ⁵	10%	20°
168	NACA0012	1x10 ⁵	10%	25°
169	NACA0012	1x10 ⁵	20%	0°
170	NACA0012	1x10 ⁵	20%	5°
171	NACA0012	1x10 ⁵	20%	10°
172	NACA0012	1x10 ⁵	20%	15°
173	NACA0012	1x10 ⁵	20%	20°
174	NACA0012	1x10 ⁵	20%	25°
175	NACA0012	1x10 ⁵	30%	0°
176	NACA0012	1x10 ⁵	30%	5°
177	NACA0012	1x10 ⁵	30%	10°
178	NACA0012	1x10 ⁵	30%	15°
179	NACA0012	1x10 ⁵	30%	20°
180	NACA0012	1x10 ⁵	30%	25°
181	NACA0012	5x10 ⁵	0%	0°
182	NACA0012	5x10 ⁵	0%	5°
183	NACA0012	5x10 ⁵	0%	10°
184	NACA0012	5x10 ⁵	0%	15°

Combinación	Perfil	Número de Reynolds	Intensidad de turbulencia (IT)	Ángulo de ataque
185	NACA0012	5x10 ⁵	0%	20°
186	NACA0012	5x10 ⁵	0%	25°
187	NACA0012	5x10 ⁵	5%	0°
188	NACA0012	5x10 ⁵	5%	5°
189	NACA0012	5x10 ⁵	5%	10°
190	NACA0012	5x10 ⁵	5%	15°
191	NACA0012	5x10 ⁵	5%	20°
192	NACA0012	5x10 ⁵	5%	25°
193	NACA0012	5x10 ⁵	10%	0°
194	NACA0012	5x10 ⁵	10%	5°
195	NACA0012	5x10 ⁵	10%	10°
196	NACA0012	5x10 ⁵	10%	15°
197	NACA0012	5x10 ⁵	10%	20°
198	NACA0012	5x10 ⁵	10%	25°
199	NACA0012	5x10 ⁵	20%	0°
200	NACA0012	5x10 ⁵	20%	5°
201	NACA0012	5x10 ⁵	20%	10°
202	NACA0012	5x10 ⁵	20%	15°
203	NACA0012	5x10 ⁵	20%	20°
204	NACA0012	5x10 ⁵	20%	25°
205	NACA0012	5x10 ⁵	30%	0°
206	NACA0012	5x10 ⁵	30%	5°
207	NACA0012	5x10 ⁵	30%	10°
208	NACA0012	5x10 ⁵	30%	15°
209	NACA0012	5x10 ⁵	30%	20°
210	NACA0012	5x10 ⁵	30%	25°
211	NACA0012	1x10 ⁶	0%	0°
212	NACA0012	1x10 ⁶	0%	5°
213	NACA0012	1x10 ⁶	0%	10°
214	NACA0012	1x10 ⁶	0%	15°
215	NACA0012	1x10 ⁶	0%	20°
216	NACA0012	1x10 ⁶	0%	25°
217	NACA0012	1x10 ⁶	5%	0°
218	NACA0012	1x10 ⁶	5%	5°
219	NACA0012	1x10 ⁶	5%	10°
220	NACA0012	1x10 ⁶	5%	15°
221	NACA0012	1x10 ⁶	5%	20°
222	NACA0012	1x10 ⁶	5%	25°
223	NACA0012	1x10 ⁶	10%	0°
224	NACA0012	1x10 ⁶	10%	5°
225	NACA0012	1x10 ⁶	10%	10°
226	NACA0012	1x10 ⁶	10%	15°
227	NACA0012	1x10 ⁶	10%	20°
228	NACA0012	1x10 ⁶	10%	25°
229	NACA0012	1x10 ⁶	20%	0°
230	NACA0012	1x10 ⁶	20%	5°

Combinación	Perfil	Número de Reynolds	Intensidad de turbulencia (IT)	Ángulo de ataque
231	NACA0012	1x10 ⁶	20%	10°
232	NACA0012	1x10 ⁶	20%	15°
233	NACA0012	1x10 ⁶	20%	20°
234	NACA0012	1x10 ⁶	20%	25°
235	NACA0012	1x10 ⁶	30%	0°
236	NACA0012	1x10 ⁶	30%	5°
237	NACA0012	1x10 ⁶	30%	10°
238	NACA0012	1x10 ⁶	30%	15°
239	NACA0012	1x10 ⁶	30%	20°
240	NACA0012	1x10 ⁶	30%	25°
241	SG6043	5x10 ⁴	0%	0°
242	SG6043	5x10 ⁴	0%	5°
243	SG6043	5x10 ⁴	0%	10°
244	SG6043	5x10 ⁴	0%	15°
245	SG6043	5x10 ⁴	0%	20°
246	SG6043	5x10 ⁴	0%	25°
247	SG6043	5x10 ⁴	5%	0°
248	SG6043	5x10 ⁴	5%	5°
249	SG6043	5x10 ⁴	5%	10°
250	SG6043	5x10 ⁴	5%	15°
251	SG6043	5x10 ⁴	5%	20°
252	SG6043	5x10 ⁴	5%	25°
253	SG6043	5x10 ⁴	10%	0°
254	SG6043	5x10 ⁴	10%	5°
255	SG6043	5x10 ⁴	10%	10°
256	SG6043	5x10 ⁴	10%	15°
257	SG6043	5x10 ⁴	10%	20°
258	SG6043	5x10 ⁴	10%	25°
259	SG6043	5x10 ⁴	20%	0°
260	SG6043	5x10 ⁴	20%	5°
261	SG6043	5x10 ⁴	20%	10°
262	SG6043	5x10 ⁴	20%	15°
263	SG6043	5x10 ⁴	20%	20°
264	SG6043	5x10 ⁴	20%	25°
265	SG6043	5x10 ⁴	30%	0°
266	SG6043	5x10 ⁴	30%	5°
267	SG6043	5x10 ⁴	30%	10°
268	SG6043	5x10 ⁴	30%	15°
269	SG6043	5x10 ⁴	30%	20°
270	SG6043	5x10 ⁴	30%	25°
271	SG6043	1x10 ⁵	0%	0°
272	SG6043	1x10 ⁵	0%	5°
273	SG6043	1x10 ⁵	0%	10°
274	SG6043	1x10 ⁵	0%	15°
275	SG6043	1x10 ⁵	0%	20°
276	SG6043	1x10 ⁵	0%	25°

Combinación	Perfil	Número de Reynolds	Intensidad de turbulencia (IT)	Ángulo de ataque
277	SG6043	1x10 ⁵	5%	0°
278	SG6043	1x10 ⁵	5%	5°
279	SG6043	1x10 ⁵	5%	10°
280	SG6043	1x10 ⁵	5%	15°
281	SG6043	1x10 ⁵	5%	20°
282	SG6043	1x10 ⁵	5%	25°
283	SG6043	1x10 ⁵	10%	0°
284	SG6043	1x10 ⁵	10%	5°
285	SG6043	1x10 ⁵	10%	10°
286	SG6043	1x10 ⁵	10%	15°
287	SG6043	1x10 ⁵	10%	20°
288	SG6043	1x10 ⁵	10%	25°
289	SG6043	1x10 ⁵	20%	0°
290	SG6043	1x10 ⁵	20%	5°
291	SG6043	1x10 ⁵	20%	10°
292	SG6043	1x10 ⁵	20%	15°
293	SG6043	1x10 ⁵	20%	20°
294	SG6043	1x10 ⁵	20%	25°
295	SG6043	1x10 ⁵	30%	0°
296	SG6043	1x10 ⁵	30%	5°
297	SG6043	1x10 ⁵	30%	10°
298	SG6043	1x10 ⁵	30%	15°
299	SG6043	1x10 ⁵	30%	20°
300	SG6043	1x10 ⁵	30%	25°
301	SG6043	5x10 ⁵	0%	0°
302	SG6043	5x10 ⁵	0%	5°
303	SG6043	5x10 ⁵	0%	10°
304	SG6043	5x10 ⁵	0%	15°
305	SG6043	5x10 ⁵	0%	20°
306	SG6043	5x10 ⁵	0%	25°
307	SG6043	5x10 ⁵	5%	0°
308	SG6043	5x10 ⁵	5%	5°
309	SG6043	5x10 ⁵	5%	10°
310	SG6043	5x10 ⁵	5%	15°
311	SG6043	5x10 ⁵	5%	20°
312	SG6043	5x10 ⁵	5%	25°
313	SG6043	5x10 ⁵	10%	0°
314	SG6043	5x10 ⁵	10%	5°
315	SG6043	5x10 ⁵	10%	10°
316	SG6043	5x10 ⁵	10%	15°
317	SG6043	5x10 ⁵	10%	20°
318	SG6043	5x10 ⁵	10%	25°
319	SG6043	5x10 ⁵	20%	0°
320	SG6043	5x10 ⁵	20%	5°
321	SG6043	5x10 ⁵	20%	10°
322	SG6043	5x10 ⁵	20%	15°

Combinación	Perfil	Número de Reynolds	Intensidad de turbulencia (IT)	Ángulo de ataque
323	SG6043	5x10 ⁵	20%	20°
324	SG6043	5x10 ⁵	20%	25°
325	SG6043	5x10 ⁵	30%	0°
326	SG6043	5x10 ⁵	30%	5°
327	SG6043	5x10 ⁵	30%	10°
328	SG6043	5x10 ⁵	30%	15°
329	SG6043	5x10 ⁵	30%	20°
330	SG6043	5x10 ⁵	30%	25°
331	SG6043	1x10 ⁶	0%	0°
332	SG6043	1x10 ⁶	0%	5°
333	SG6043	1x10 ⁶	0%	10°
334	SG6043	1x10 ⁶	0%	15°
335	SG6043	1x10 ⁶	0%	20°
336	SG6043	1x10 ⁶	0%	25°
337	SG6043	1x10 ⁶	5%	0°
338	SG6043	1x10 ⁶	5%	5°
339	SG6043	1x10 ⁶	5%	10°
340	SG6043	1x10 ⁶	5%	15°
341	SG6043	1x10 ⁶	5%	20°
342	SG6043	1x10 ⁶	5%	25°
343	SG6043	1x10 ⁶	10%	0°
344	SG6043	1x10 ⁶	10%	5°
345	SG6043	1x10 ⁶	10%	10°
346	SG6043	1x10 ⁶	10%	15°
347	SG6043	1x10 ⁶	10%	20°
348	SG6043	1x10 ⁶	10%	25°
349	SG6043	1x10 ⁶	20%	0°
350	SG6043	1x10 ⁶	20%	5°
351	SG6043	1x10 ⁶	20%	10°
352	SG6043	1x10 ⁶	20%	15°
353	SG6043	1x10 ⁶	20%	20°
354	SG6043	1x10 ⁶	20%	25°
355	SG6043	1x10 ⁶	30%	0°
356	SG6043	1x10 ⁶	30%	5°
357	SG6043	1x10 ⁶	30%	10°
358	SG6043	1x10 ⁶	30%	15°
359	SG6043	1x10 ⁶	30%	20°
360	SG6043	1x10 ⁶	30%	25°