



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD
DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO MECÁNICO Y CIENCIA DE LOS
MATERIALES EN INGENIERÍA

TESIS

“SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL ROTOR DE UNA TURBINA
EÓLICA DE EJE VERTICAL DE BAJA CAPACIDAD”

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
ING. GERARDO JAVIER MARIN TELLEZ

ASESOR:
DR. VÍCTOR LÓPEZ GARZA

COASESOR:
DR. GILDARDO SOLORIO DÍAZ



ESTE TRABAJO FUE APOYADO POR EL CONSEJO
NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)

MORELIA, MICHOACÁN, MAYO DE 2022

Dedicatoria

A mi indomable ego.

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, especialmente a su programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica por las facilidades brindadas para realizar todo el proceso investigativo.

Al CONACyT, por la beca otorgada que permitió la realización de este trabajo de investigación.

A CIATEQ, por la oportunidad de colaborar en el proyecto sobre el cual se realizó el presente trabajo de investigación.

Al asesor, Dr. Víctor López Garza, por el tiempo dedicado, sus enseñanzas, dirección y paciencia. Al coasesor, Dr. Gildardo Solorio Díaz, por sus conocimientos que enriquecieron este trabajo de investigación. A la mesa sinodal, por sus valiosos comentarios y orientación.

A Alexandra Elbakyan y su plataforma Sci-Hub, por eliminar las barreras al conocimiento científico.

A toda mi familia: a mi padre Gerardo, por inculcarme los valores de constancia, disciplina y trabajo duro sin los cuales no habría llegado tan lejos; a mi hermana Paulina, por su apoyo incondicional y conocimientos invaluable; a mi abuela Alicia, por siempre preocuparse por mí; a mi sobrina Elena, por alegrarme los días con una risa de bebé.

A mi mejor amigo Iván, por hacerme reír y distraerme, por dejarme usar su equipo para avanzar el trabajo y por siempre estar ahí.

A todos mis amigos, por sus invaluable consejos y ánimos, por aguantarme en mis momentos de estrés y desesperación, por preguntar siempre por la tesis, y no perder la esperanza de que me volverán a ver algún día al finalizarla.

Y finalmente, pero no menos importante, a mi Rox, mi compañera de vida, por su amor incondicional, su apoyo y motivación, por sus conocimientos y ayuda, por su paciencia, por alentarme a seguir adelante y por estar a mi lado en todo momento.



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Querétaro, Qro. a 25 de marzo de 2022

A QUIEN CORRESPONDA

El CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada hace constar que el **Ing. Gerardo Javier Marin Téllez** perteneciente al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo colaboró en el proyecto "Diseño y desarrollo de turbina eólica de eje vertical para ambientes urbanos". El proyecto se desarrolló en el marco de la convocatoria 2019 del Fondo de Desarrollo Científico de Jalisco (FODECIJAL) para Atender Problemas Estatales perteneciente al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL).

La colaboración consistió en la simulación numérica por medio de Dinámica de Fluidos Computacional CFD del rotor de la turbina eólica de eje vertical diseñada y manufacturada por CIATEQ, entregando como evidencia un reporte en extenso de la simulación correspondiente para la obtención del torque, potencia y C_p del rotor de la turbina eólica en su rango operativo (2.5m/s a 10m/s).

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora General de CIATEQ A.C.

C.c.p. Dr. Isaac Hernández Arriaga, Responsable Técnico del proyecto "Diseño y desarrollo de turbina eólica de eje vertical para ambientes urbanos" designado por CIATEQ A.C.

Resumen

La generación de energía eléctrica por medio de energía eólica ha tenido un gran crecimiento en los últimos años; resaltan las turbinas de viento de baja potencia que permiten aprovechar el potencial eólico en zonas con poco recurso, tal es el caso de los entornos urbanos.

El presente trabajo desarrolla la simulación numérica mediante software CFD (Computational Fluid Dynamics) para el rotor de una turbina eólica de eje vertical de baja capacidad, obteniendo la potencia generada y el coeficiente de potencia (C_p) de la turbina eólica. Se describe el proceso de simulación usando ANSYS Fluent mediante la técnica de Sliding Mesh. Así mismo, se estima mediante simulación la optimización de los concentradores eólicos de discos inductores, los cuales son una patente en trámite con número de expediente MX/a/2022/002284 ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual (IMPI). Los concentradores eólicos de discos inductores son concentradores de energía eólica que tienen por objetivo aumentar el rendimiento de la turbina eólica, mediante la implementación de una estructura no giratoria que producen una aceleración en la velocidad del flujo del viento hacia el rotor.

Palabras Clave: CFD, VAWT, Simulación, Energía eólica, Concentradores de viento.

Abstract

The generation of electrical power using wind energy has grown rapidly in the last years; low-power wind turbines stand out as they allow the exploitation of wind power in areas with little resources, such as urban environments.

The objective of the present work is to develop the numerical simulation by means of CFD (Computational Fluid Dynamics) software for a low-capacity vertical axis wind turbine rotor, obtaining its generated potency and C_p . The work shows the simulation process using ANSYS Fluent and the Sliding Mesh technique, as well as estimating through simulation the optimization of inductor disc wind concentrators, which are a pending patent with expedient number MX/a/2022/002284 before the Mexican Institute for Intellectual Property (IMPI). Inductor disc wind concentrators are wind energy concentrators that increase wind turbine performance through the implementation of a non-rotating structure that produces an acceleration in wind-flow speed towards the rotor.

Key words: CFD, VAWT, Simulation, Wind energy, Wind concentrators.

Índice de contenido

| | |
|--|-----|
| Dedicatoria | I |
| Agradecimientos..... | II |
| Resumen | IV |
| Abstract | V |
| Índice de contenido | VI |
| Índice de figuras..... | IX |
| Índice de tablas | XV |
| Nomenclatura..... | XVI |
| Capítulo I..... | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 2 |
| 1.3 Antecedentes y estado del arte | 3 |
| 1.4 Justificación..... | 8 |
| 1.5 Hipótesis | 8 |
| 1.6 Objetivos | 8 |
| 1.6.1 Objetivo general..... | 8 |
| 1.6.2 Objetivos específicos..... | 8 |
| 1.7 Metodología del proyecto de investigación | 9 |
| Capitulo II. Conceptos Básicos de Energía Eólica | 11 |
| 2.1 Energía eólica | 11 |
| 2.2 Clasificación de aerogeneradores..... | 12 |
| 2.2.1 Turbinas Eólicas de Eje Horizontal (HAWT) | 12 |
| 2.2.2 Turbinas Eólicas de Eje Vertical (VAWT) | 13 |
| 2.3 Eficiencia y relación de velocidad de punta..... | 14 |
| 2.4 VAWT Tipo Savonius | 16 |
| 2.5 VAWT Tipo Darrieus | 16 |
| 2.6 VAWT Híbridas Savonius-Darrieus | 19 |
| 2.7 Concentradores de energía eólica | 21 |
| Capitulo III. Conceptos Básicos de Dinámica de Fluidos Computacional | 24 |
| 3.1 Introducción a dinámica de fluidos computacional | 24 |
| 3.2 Estructura de CFD..... | 25 |
| 3.3 Resolución de problemas con CFD..... | 26 |
| 3.4 Flujo turbulento | 28 |

| | | |
|--------------|---|----|
| 3.4.1 | Modelos de turbulencia..... | 30 |
| 3.5 | Malla del dominio computacional. | 33 |
| 3.5.1 | Malla estructurada. | 33 |
| 3.5.2 | Malla no estructurada | 34 |
| 3.5.3 | Malla estructurada en bloques..... | 36 |
| 3.6 | Cálculos de capa limite | 38 |
| 3.7 | Flujo estacionario y no estacionario | 38 |
| 3.8 | Malla en movimiento | 39 |
| 3.8.1 | Modelado de flujos con marcos de referencia móviles | 40 |
| 3.8.2 | Modelado de flujos con malla deslizante | 41 |
| 3.8.3 | Modelado de flujos con mallas dinámicas. | 42 |
| Capítulo IV. | Procedimiento para simulación en CFD | 43 |
| 4.1 | Creación de la geometría | 43 |
| 4.2 | Generación de la malla | 53 |
| 4.3 | Selección de propiedades físicas y propiedades de los fluidos..... | 56 |
| 4.3.1 | Cálculo de densidad | 58 |
| 4.3.2 | Cálculo de la viscosidad | 61 |
| 4.3.3 | Modelo de turbulencia | 61 |
| 4.3.4 | Cálculo de velocidad angular..... | 61 |
| 4.3.5 | Cálculo del paso de tiempo (Time Step)..... | 62 |
| 4.4 | Especificación de condiciones de frontera | 63 |
| 4.5 | Inicialización y control de la solución | 65 |
| 4.6 | Supervisión de la convergencia | 65 |
| Capítulo V. | Resultados de simulación en software CFD | 67 |
| 5.1 | Comparación incremento azimutal..... | 68 |
| 5.2 | Análisis Rotor Savonius | 72 |
| 5.3 | Convergencia rotor..... | 76 |
| 5.4 | Comparación del torque del rotor H y del rotor H de la turbina híbrida. ... | 78 |
| 5.5 | Convergencia estator | 79 |
| 5.6 | Potencia y C_p de la turbina híbrida | 81 |
| 5.7 | Discos inductores | 85 |
| Capítulo VI. | | 91 |
| 6.1 | Conclusiones..... | 91 |
| 6.2 | Recomendaciones..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Referencias bibliográficas | 93 |
| Anexo A. Creación de la geometría..... | 100 |
| A.1 Construcción geométrica del rotor | 102 |
| A.1.1 Rotor H | 102 |
| A.1.2 Rotor Savonius | 110 |
| A.1.3 Dominio Computacional..... | 111 |
| A.2 Construcción geométrica del estator | 116 |
| Anexo B. Generación de la Malla | 119 |
| B.1 Malla rotor | 120 |
| B.2 Malla estator..... | 127 |
| Anexo C. Configuración CFD en ANSYS Fluent | 134 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1. Evolución de las adiciones de capacidad y la capacidad instalada de tecnología eólica, 2018-2032 [2]. | 1 |
| Fig. 1.2. a) Participación de las tecnologías renovables en la generación de energía eléctrica en 2032. b) porcentaje de las energías renovables en las adiciones de capacidad para 2032 [2]. | 1 |
| Fig. 1.3. Metodología para la realización del proyecto de investigación. | 9 |
| Fig. 2.1. Configuración típica de una turbina eólica moderna de eje horizontal HAWT. Obtenido de [20]. | 13 |
| Fig. 2.2. Tipos de rotor convencionales para turbinas de eje vertical. Modificado de [25]. | 14 |
| Fig. 2.3. Relación entre el coeficiente de potencia y la velocidad de punta para distintos rotores de turbinas eólicas. Obtenido de [25]. | 15 |
| Fig. 2.4. Figuras de la patente de Darrieus que explican la idea de una turbina eólica de eje vertical (VAWT) basada en elevación. Obtenido de [27]. | 17 |
| Fig. 2.5. Línea del tiempo del desarrollo de distintas configuraciones para VAWT. Obtenido de [15]. | 18 |
| Fig. 2.6. VAWT híbrida. Obtenida de [30]. | 20 |
| Fig. 2.7. Conceptos de turbinas eólicas de eje horizontal combinadas con concentradores de energía eólica. Obtenido de [25]. | 22 |
| Fig. 2.8. Concentrador de energía eólica para turbinas de eje vertical (VAWT). Obtenido de [34]. | 23 |
| Fig. 3.1. Los tres enfoques básicos para resolver problemas en dinámica de fluidos y transferencia de calor. Modificado de [40]. | 24 |
| Fig. 3.2. Las funciones de interconectividad de los tres elementos principales dentro de un marco de análisis CFD. Modificado de [40]. | 25 |
| Fig. 3.3. Metodología para la resolución de problemas con CFD. Elaboración propia con información de [40]. | 26 |
| Fig. 3.4. Diagrama de las características a tener en consideración de la física en una simulación en CFD. Modificado de [40]. | 28 |
| Fig. 3.5. Ejemplo de malla estructurada. Obtenido de [40]. | 33 |
| Fig. 3.6. Malla estructurada en H. Obtenida de [40]. | 34 |
| Fig. 3.7. Malla estructurada y no estructurada para un círculo. Obtenido de [40]. | 35 |
| Fig. 3.8. Malla estructurada en bloques con caras de elementos coincidentes y no coincidentes. Obtenido de [40]. | 36 |
| Fig. 3.9. Malla que consta de elementos estructurados cerca de las paredes y elementos no estructurados en la parte restante del dominio de flujo. Obtenida de [40]. | 37 |
| Fig. 4.1. Vista dimétrica del rotor de la turbina H-Savonius con los elementos de soporte y sujeción | 44 |
| Fig. 4.2. Vista dimétrica del rotor H-Savonius sin los elementos de soporte y sujeción. | 45 |
| Fig. 4.3. Planos perpendiculares al eje de rotación de la turbina híbrida. | 47 |
| Fig. 4.4. Proceso de simplificación para la simulación de la turbina híbrida en 2D. | 48 |

| | |
|---|----|
| Fig. 4.5. Geometría del rotor simplificado en 2D creada con ANSYS DesignModeler. | 49 |
| Fig. 4.6. Dominio computacional del rotor creada con ANSYS DesignModeler. ... | 49 |
| Fig. 4.7. Plano del dominio computacional del estator. | 50 |
| Fig. 4.8. Nomenclatura del dominio computacional del rotor..... | 50 |
| Fig. 4.9. Nomenclatura del dominio computacional del estator. | 51 |
| Fig. 4.10. Vista trasversal de los discos de inducción, el área sombreada en gris oscuro representa la reducción que sufre el viento al pasar por los discos. | 52 |
| Fig. 4.11. Figura representativa del porcentaje de reducción de área con los discos de inducción. | 52 |
| Fig. 4.12. Dominio computacional de los discos de inducción. | 52 |
| Fig. 4.13. Malla del estator con detalles del refinamiento de malla, malla E1. | 53 |
| Fig. 4.14. Malla del rotor con detalles del refinamiento de malla, versión R1..... | 54 |
| Fig. 4.15. Malla de los discos de inducción con detalle del refinamiento de malla. | 56 |
| Fig. 4.16. Ubicación de CIATEQ, Zapopan, Jalisco, obtenida de Google Earth [86]. | 57 |
| Fig. 4.17. Temperatura anual promedio en el sitio de instalación de la turbina eólica. | 60 |
| Fig. 4.18. Ubicación de CIATEQ, Zapopan y la estación meteorológica Guadalajara (DGE) con Id:14066, obtenida de Google Earth [86]. | 60 |
| Fig. 4.19. Condiciones de frontera. | 64 |
| Fig. 5.1. Torque simulado en 25 revoluciones con la malla 1 y con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s..... | 69 |
| Fig. 5.2. Torque simulado en 25 revoluciones con la malla 1 y con un incremento azimutal de 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s..... | 70 |
| Fig. 5.3. Comparación del torque del rotor híbrido con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s..... | 70 |
| Fig. 5.4. Comparación del torque del rotor H de la turbina híbrida con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 71 |
| Fig. 5.5. Comparación del torque del rotor Savonius con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s..... | 71 |
| Fig. 5.6. Comparación del torque en la vigésima quinta revolución con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 72 |
| Fig. 5.7. Torque del rotor Savonius de la turbina híbrida de la 21. ° a la 50.° revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 72 |
| Fig. 5.8. Torque de la turbina Savonius y sus rotores interior y exterior a 17.5rad/s en la 22.° a la 25.° revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s..... | 73 |
| Fig. 5.9. Torque de la turbina Savonius y sus rotores interior y exterior a 10rad/s en la 22.° a la 25.° revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s..... | 74 |
| Fig. 5.10. Torque de la turbina Savonius y sus rotores interior y exterior a 5rad/s en la 22.° a la 25.° revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s..... | 74 |
| Fig. 5.11. Comparativa del torque del rotor Savonius de la turbina híbrida a 17.5rad/s y de la turbina Savonius a 17.5rad/s, 10rad/s y 5rad/s en la 22.° a la 25.° revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 75 |
| Fig. 5.12. Comparativa del torque del rotor exterior de la turbina Savonius a 17.5rad/s, 10rad/s y 5rad/s en la 22.° a la 25.° revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 75 |

| | |
|--|----|
| Fig. 5.13. Comparativa del torque del rotor interior de la turbina Savonius a 17.5rad/s, 10rad/s y 5rad/s en la 22.° a la 25.° revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 75 |
| Fig. 5.14. Comparación torque del rotor híbrido con las mallas 1, 2 y 3 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 76 |
| Fig. 5.15. Comparación torque del rotor H con las mallas 1, 2 y 3 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 76 |
| Fig. 5.16. Comparación torque del rotor Savonius con las mallas 1, 2 y 3 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 77 |
| Fig. 5.17. Comparación torque con las mallas 1, 2 y 3 en la vigésima quinta revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 77 |
| Fig. 5.18. Comparación torque generado por la turbina H y por el rotor H de la turbina Híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5°..... | 78 |
| Fig. 5.19. Comparación torque de la turbina híbrida con las mallas 2, 4 y 5 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 79 |
| Fig. 5.20. Comparación torque del rotor H con las mallas 2, 4 y 5 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 79 |
| Fig. 5.21. Comparación torque del rotor Savonius con las mallas 2, 4 y 5 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. | 80 |
| Fig. 5.22. Comparación torque del rotor Savonius y sus rotores interior y exterior de la turbina híbrida con las mallas 4 y 5 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s. ... | 80 |
| Fig. 5.23. Comparación torque con las mallas 2, 4 y 5 en la vigésima quinta revolución con un incremento azimutal de 0.5°. | 81 |
| Fig. 5.24. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 2.5m/s. . | 82 |
| Fig. 5.25. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 4m/s. | 82 |
| Fig. 5.26. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 5.5m/s. . | 83 |
| Fig. 5.27. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de de viento de 7m/s. | 83 |
| Fig. 5.28. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 8.5m/s. . | 84 |
| Fig. 5.29. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 10m/s. ... | 84 |
| Fig. 5.30. Potencia generada por la turbina y potencia disponible a diferentes velocidades del viento. | 85 |
| Fig. 5.31. Vista transversal de los planos usados de referencia..... | 86 |
| Fig. 5.32. Vista superior de los planos usados de referencia. | 86 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 5.33. Contorno de la velocidad de viento centrada y perpendicular a la cara A. Velocidad de viento de entrada 12m/s | 87 |
| Fig. 5.34. Contorno de la velocidad de viento perpendicular a la cara superior. Velocidad de viento de entrada 12m/s | 87 |
| Fig. 5.35. Velocidades en los puntos de referencia para el plano superior. | 88 |
| Fig. 5.36. Velocidades en los puntos de referencia para el plano central. | 88 |
| Fig. 5.37. Velocidades en los puntos de referencia para el plano inferior. | 89 |
| Fig. 5.38. Comparativa del patrón de velocidad de viento para 12m/s en los planos superior, central e inferior. | 89 |
| Fig. A.1. Menú <i>Options</i> de <i>ANSYS Workbench</i> | 100 |
| Fig. A.2. Vista de inicio de ANSYS Workbench con dos módulos de <i>Geometry</i> | 101 |
| Fig. A.3. Proceso para iniciar DesignModeler. | 101 |
| Fig. A.4. Perfil NACA2415 en la página web Airfoil Tools. Obtenido de [106]. | 102 |
| Fig. A.5. Menú del asistente para convertir texto en columnas. | 103 |
| Fig. A.6. Configuración de los datos ordenados en Microsoft Excel de un perfil aerodinámico NACA simétrico para exportar a ANSYS DesignModeler. | 104 |
| Fig. A.7. Configuración del guardado del perfil aerodinámico para exportar a ANSYS DesignModeler. | 104 |
| Fig. A.8. Menú de la pestaña <i>Concept</i> | 105 |
| Fig. A.9. <i>Details View</i> del submenú <i>Concept</i> → <i>3D Curve</i> | 105 |
| Fig. A.10. Menú de la pestaña <i>Create</i> , con detalle del submenú <i>Delete</i> | 106 |
| Fig. A.11. <i>Details View</i> del submenú <i>Create</i> → <i>Point</i> | 106 |
| Fig. A.12. Barra de herramientas de <i>DesignModeler</i> | 106 |
| Fig. A.13. Vista del área de trabajo en <i>DesignModeler</i> para la creación de la línea de cierre del perfil aerodinámico. | 107 |
| Fig. A.14. Vista de la selección de <i>Line Body</i> en la sección de <i>Tree Outline</i> | 108 |
| Fig. A.15. <i>Details View</i> del submenú <i>Create</i> → <i>Pattern</i> | 108 |
| Fig. A.16. Vista del rotor H de la turbina eólica de eje vertical híbrida. | 109 |
| Fig. A.17. Vista de la sección de <i>Tree Outline</i> mostrando la nomenclatura usada. | 109 |
| Fig. A.18. <i>Sketchs</i> para la construcción del rotor Savonius. | 110 |
| Fig. A.19. <i>Details View</i> del submenú <i>Concept</i> → <i>Surface From Sketches</i> | 110 |
| Fig. A.20. Vista del rotor Savonius de la turbina eólica de eje vertical híbrida. ... | 111 |
| Fig. A.21. <i>Details View</i> del submenú <i>Concept</i> → <i>Surface From Sketches</i> para <i>SurfaceCircular</i> | 112 |
| Fig. A.22. Vista de la sección <i>Tree Outline</i> y <i>Graphics</i> antes de la operación <i>Booleana</i> | 112 |
| Fig. A.23. <i>Details View</i> del submenú <i>Create</i> → <i>Boolean</i> | 113 |
| Fig. A.24. Vista de la sección <i>Tree Outline</i> y <i>Graphics</i> antes de la operación <i>Booleana</i> | 113 |
| Fig. A.25. <i>Details View</i> de la selección de <i>DominioRotor</i> de la sección <i>Tree Outline</i> | 114 |
| Fig. A.26. Menu contextual de la sección de <i>Graphics</i> | 114 |
| Fig. A.27. <i>Details View</i> de la selección de <i>Named Selection</i> del menú contextual de la sección de <i>Graphics</i> | 115 |
| Fig. A.28. Nomenclatura con vista detallada de la geometría del rotor. | 115 |
| Fig. A.29. Plano de las divisiones para la geometría del estator. | 116 |

| | |
|---|-----|
| Fig. A.30. Menú de la pestaña <i>Tools</i> | 117 |
| Fig. A.31. <i>Details View</i> del submenú <i>Tools</i> → <i>Face Split</i> | 117 |
| Fig. A.32. Divisiones de la geometría del estator. | 117 |
| Fig. B.1. Selección y arrastre de los módulos de Mesh a la sección <i>Project Schematic</i> en <i>ANSYS Workbench</i> | 119 |
| Fig. B.2. Vista del proceso para compartir información entre módulo de <i>Geometry</i> y <i>Mesh</i> | 119 |
| Fig. B.3. Menú contextual de la selección de <i>Mesh</i> en la sección de <i>Outline</i> , con submenú <i>Insert</i> | 120 |
| Fig. B.4. <i>Details</i> de la selección <i>Mesh</i> del rotor de la sección <i>Outline</i> | 121 |
| Fig. B.5. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Method</i> → <i>All Triangles</i> | 121 |
| Fig. B.6. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Inflation H</i> | 122 |
| Fig. B.7. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Sizing</i> , para <i>Body Sizing</i> | 122 |
| Fig. B.8. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Sizing</i> , para <i>Edge Sizing Interface</i> | 123 |
| Fig. B.9. Línea curva y línea recta del álabe NACA2415. | 123 |
| Fig. B.10. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Sizing</i> , para <i>Edge Sizing NACA2415</i> . . | 124 |
| Fig. B.11. Líneas curvas y líneas rectas de los álabes de la turbina Savonius. ... | 125 |
| Fig. B.12. Nomenclatura empleada para las distintas herramientas de mallado aplicadas al rotor. | 125 |
| Fig. B.13. Malla del rotor, malla R2. | 127 |
| Fig. B.14. <i>Details</i> de la selección <i>Mesh</i> del estator de la sección <i>Outline</i> | 128 |
| Fig. B.15. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Method</i> → <i>MultiZone</i> | 128 |
| Fig. B.16. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Sizing</i> , para <i>Face Sizing Cuadrado</i> | 129 |
| Fig. B.17. Caras seleccionadas para la aplicación de la herramienta <i>Face Sizing</i> | 129 |
| Fig. B.18. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Sizing</i> , para <i>Edge Sizing 8.5D</i> | 130 |
| Fig. B.19. Líneas seleccionadas para <i>Edge Sizing 8.5D</i> | 130 |
| Fig. B.20. Líneas seleccionadas para <i>Edge Sizing 18.5D</i> | 131 |
| Fig. B.21. <i>Details</i> del submenú <i>Insert</i> → <i>Face Meshing</i> | 132 |
| Fig. B.22. Nomenclatura empleada para las distintas herramientas de mallado aplicadas al estator. | 132 |
| Fig. B.23. Malla del estator, malla E2. | 133 |
| Fig. C.1. Vista del proceso para compartir información entre módulo de <i>Mesh</i> y <i>Fluent</i> | 134 |
| Fig. C.2. Menú contextual para transferir la información del módulo de <i>Mesh</i> a <i>Fluent</i> | 135 |
| Fig. C.3. Task Page de <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>General</i> | 135 |
| Fig. C.4. Mesh Interfaces de <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>Mesh Interfaces</i> | 136 |
| Fig. C.5. Viscous Model de <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>Models</i> → <i>Viscous</i> | 136 |
| Fig. C.6. Create/Edit Materials de <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>Materials</i> → <i>Fluid</i> . . | 137 |
| Fig. C.7. <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>Cell Zone Conditions</i> → <i>Fluid</i> → <i>insideestator</i> | 138 |
| Fig. C.8. <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>Cell Zone Conditions</i> → <i>Fluid</i> → <i>insiderotor</i> . 138 | |
| Fig. C.9. <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>Boundary Conditions</i> → <i>inlet</i> | 139 |
| Fig. C.10. <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>Boundary Conditions</i> → <i>outlet</i> | 139 |
| Fig. C.11. Task Page de <i>Outline View</i> → <i>Setup</i> → <i>Boundary Conditions</i> , selección de <i>symmetry</i> para <i>outline</i> | 140 |

| | |
|--|-----|
| Fig. C.12. Outline View → Setup → Boundary Conditions → rotorh | 140 |
| Fig. C.13. Outline View → Setup → Reference Values..... | 141 |
| Fig. C.14. Task Page de Outline View → Solution → Methods..... | 141 |
| Fig. C.15. Menú contextual de Outline View → Solution → Report Definitions, con detalle en New → Force Report →Moment..... | 142 |
| Fig. C.16. Ventana para la configuración de reportes. | 142 |
| Fig. C.17. Outline View → Solution → Monitors → Residual. | 143 |
| Fig. C.18. Ventana para la configuración de los archivos de reportes. | 144 |
| Fig. C.19. Ventana para la configuración de los archivos de gráficas. | 144 |
| Fig. C.20. Task Page de Outline View → Solution → Initialization..... | 145 |
| Fig. C.21. Task Page de Outline View → Solution → Run Calculation. Simulación no transitoria..... | 146 |
| Fig. C.22. Vista de ANSYS Workbench al terminar el Setup del módulo Fluent “Inicialización Frame Motion”..... | 146 |
| Fig. C.23. Proceso de transferencia de datos de solución como datos de inicialización en Fluent. | 147 |
| Fig. C.24. Vista de las relaciones entre los diferentes módulos para realizar la simulación de Sliding Mesh. | 148 |
| Fig. C.25. Viscous Model de Outline View → Setup → Models → Viscous → Transition SST..... | 148 |
| Fig. C.26. Task Page de Outline View → Solution → Methods, para Sliding Mesh. | 149 |
| Fig. C.27. Outline View → Solution → Calculation Activities → Autosave (Every Time Steps)..... | 150 |
| Fig. C.28. Task Page de Outline View → Solution → Run Calculation. Simulación transitoria..... | 151 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.1. Número de elementos y nodos para cada malla del estator..... | 54 |
| Tabla 4.2. Número de elementos y nodos para cada malla del rotor | 55 |
| Tabla 4.3. Relación de velocidades del viento y velocidad angular del rotor. | 62 |
| Tabla 4.4. Relación entre el Incremento Azimutal y el número de pasos por revolución..... | 63 |
| Tabla 4.5. Relación entre la velocidad del viento, velocidad angular, incremento azimutal y paro de tiempo. | 63 |
| Tabla 5.1. Ejemplos de simulaciones de VAWT y número de revoluciones para alcanzar la convergencia..... | 67 |
| Tabla 5.2. Combinación de mallas de rotor y estator para la simulación de la turbina híbrida. | 68 |
| Tabla 5.3. Relación de velocidades del viento y potencia disponible | 85 |
| Tabla B.1. Relación de las mallas del rotor y sus valores para las técnicas de mallado..... | 126 |
| Tabla B.2. Tamaño de <i>First Layer Height</i> a las diferentes velocidades de viento para la técnica de <i>Inflation</i> aplicada a los álabes del rotor H..... | 126 |
| Tabla B.3. Relación de las mallas del estator y sus valores para las técnicas de mallado..... | 132 |
| Tabla C.1. Nombre de los reportes y zonas seleccionadas. | 143 |

Nomenclatura

| | | |
|--------------|---|-------------------------|
| P_{aire} | Energía cinética del viento | [kJ] |
| R_{aire} | Constante de los gases ideales para el aire | 286.9 kJ/kg · K |
| V_{∞} | Velocidad libre del viento | [m/s] |
| c_p | Calor específico a presión constante | [kJ/kg · K] |
| c_v | Calor específico a volumen constante | [kJ/kg · K] |
| \dot{m} | Flujo másico de aire | [kg/s] |
| τ_w | Esfuerzo cortante de pared | [N] |
| Δy_p | Espesor de la primera capa | [m] |
| A | Área de sección transversal | [m ²] |
| R | Constante de los gases ideales | [kJ/kg · K] |
| T | Temperatura | [K] |
| $d\theta$ | Incremento azimutal | [°] |
| p | Presión | kPa |
| r | Radio del rotor | [m] |
| t | Tiempo | [s] |
| z | Elevación sobre el nivel del mar | [m] |
| γ | Relación de calores específicos | adim |
| ρ | Densidad | [kg/m ³] |
| ν | Viscosidad cinemática | [N · s/m ²] |
| ω | Velocidad angular | [rad/s] |

Capítulo I

1.1 Introducción

Factores como: los bajos precios de costo debido a la continua innovación y escala tecnológica; las expectativas de avances tecnológicos continuos; la reducción de costos de financiamiento debido a un menor riesgo percibido y una mayor competencia en la industria; han hecho que la energía eólica se posicione como la energía renovable con más crecimiento en los últimos años[1].

De acuerdo con la Secretaria de Energía (SENER), en México la energía eólica presenta uno de los mayores niveles de crecimiento anual, para el periodo 2018-2032, tanto en capacidad instalada (10.2%) como en generación bruta (11.3%) [2]. Véase Fig. 1.1.

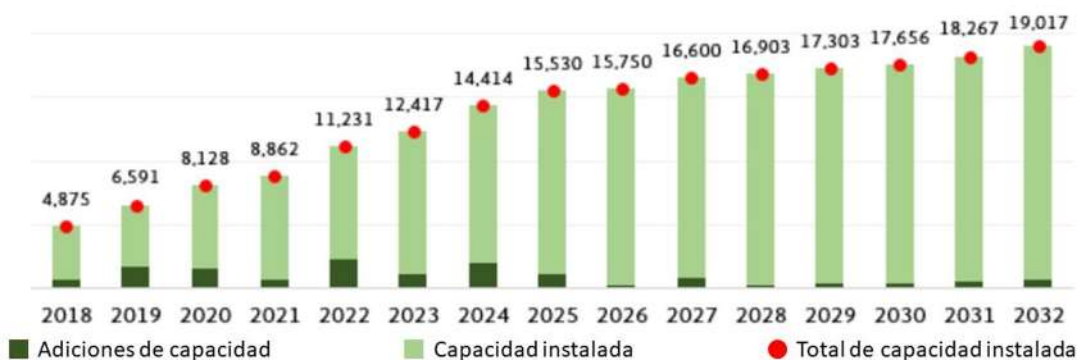


Fig. 1.1. Evolución de las adiciones de capacidad y la capacidad instalada de tecnología eólica, 2018-2032 [2].

Para el año 2032, la energía eólica concentrará el 12.8% del total de la generación, ocupando el primer lugar en generación, dentro de las energías renovables [2], véase Fig. 1.2.

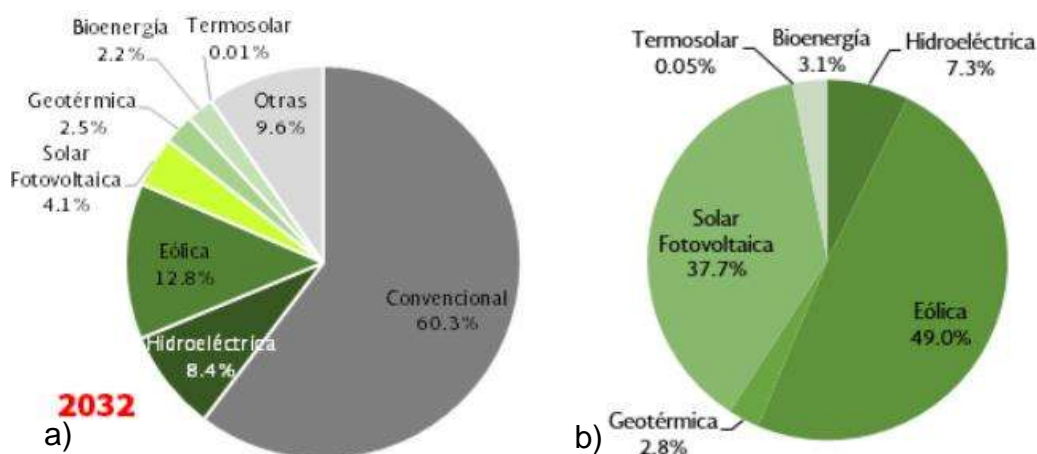


Fig. 1.2. a) Participación de las tecnologías renovables en la generación de energía eléctrica en 2032. b) porcentaje de las energías renovables en las adiciones de capacidad para 2032 [2].

Por otra parte, dentro de la Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026, realizada por la Secretaría de Energía (SENER), se estima una participación de pequeñas instalaciones (en baja y mediana tensión) de autoabastecimiento en el mismo sitio de consumo de 10.5% de la capacidad adicional instalada con energías renovables. Se estima que 21.4% (461 MW) provenga de aerogeneradores con conexión a red eléctrica o aisladamente [3].

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad uno de los retos tecnológicos es la obtención de energía eléctrica utilizando energías renovables, entre las que se destaca la energía eólica. El estado de Jalisco es territorio propicio para la producción de energía mediante fuentes renovables [4].

El potencial de capacidad de generación de energía eléctrica puede ser ampliado gracias a la mini eólica, que es el aprovechamiento de los recursos eólicos mediante la utilización de aerogeneradores de potencia inferior a los 100 kW [5,6], ya que estos aerogeneradores generan energía de manera distribuida y se pueden instalar en zonas con poco recurso eólico, como son los entornos urbanos y periurbanos [5].

Las condiciones para aprovechar la energía del viento en entornos urbanos son más complejas que en zonas abiertas, debido a la complejidad de la topografía lo que genera velocidades del viento más bajas y un flujo más turbulento [5].

México tiene un mercado emergente orientado a las turbinas de baja potencia [1]. Sin embargo, en nuestro país no existe fabricante alguno de turbinas eólicas de eje vertical.

Las problemáticas ligadas al calentamiento global y al cambio climático han dejado muy claro que no es posible alcanzar el progreso a expensas del deterioro del patrimonio natural, por lo que es necesario promover la generación y el uso de energías más limpias [4].

En Jalisco existen parques eólicos de gran capacidad que aprovechan zonas con altas velocidades del viento, como lo son “Palo Alto”, “Los Altos” y “Los Altos II” [7], todos ellos con aerogeneradores de eje horizontal. Desafortunadamente, no se cuenta con proyectos que aprovechen el potencial del viento en zonas con poco recurso eólico; tal es el caso de los entornos urbanos.

Las turbinas de viento de eje vertical son ideales para entornos urbanos ya que permiten generar electricidad al aprovechar las bajas velocidades del viento y no son afectadas por los cambios de dirección del viento [8]. Sin embargo, existen pocos trabajos de investigación en esta área ya que el esfuerzo se ha enfocado en las turbinas de eje horizontal que necesitan mayores velocidades de viento y pueden

producir por tanto una mayor cantidad de energía eléctrica pero que requieren una gran cantidad de terreno libre.

Los modelos comerciales de turbinas de eje vertical para parques eólicos son limitados y son aún más escasos para entornos urbanos, debido a que existe una baja eficiencia lo que dificulta la rentabilidad de estos equipos.

1.3 Antecedentes y estado del arte

M. Islam et al. [9] proporciona un resumen de los diferentes modelos aerodinámicos matemáticos computacionales para turbinas de eje vertical tipo Darrieus de álabe recto, con una explicación corta de su fundamento físico, ventajas y desventajas, así como una comparativa de los modelos.

R. Kumar et al. [10] hace una revisión de los principales desarrollos de aerogeneradores de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés) enfocándose en su aplicación en las zonas urbanas. Da recomendaciones basadas en información de vanguardia sobre el tema para futuros estudios y la aceptación de turbinas eólicas en las zonas urbanas. Define la situación de los aerogeneradores en zonas urbanas y proporciona una visión de las áreas de oportunidad para hacer viables a los aerogeneradores de eje vertical en las ciudades.

M. Islam et al. [11] establece un panorama más general sobre la energía eólica, abarcando tanto los aerogeneradores de eje horizontal como de los de eje vertical. Hace un recuento de su evolución, así como de la creciente importancia de la energía eólica para la producción de electricidad a nivel mundial. Aborda de forma más general el problema de la intermitencia de la producción debido al cambio en la dirección y velocidad del viento proponiendo los sistemas de baterías y sus diferentes tipos como un medio de solución.

M. Ghasemian et al. [12] recapitula los trabajos publicados sobre análisis de dinámica de fluido computacional para turbinas de eje vertical tipo Darrieus. Presenta recomendaciones, pautas para el modelado de la turbulencia, la discretización espacial y temporal, esquemas numéricos y algoritmos computacionales. Así mismo aborda parámetros operativos y geométricos de los aerogeneradores. Otorga información sobre los diferentes modelos CFD y los análisis de álabes con el propósito de abordar diferentes progresos en áreas de simulación como la modificación y optimización del perfil de la pala y el rendimiento de la turbina eólica.

X. Jin et al. [13] revisa y resume de forma concreta la investigación básica de los principales métodos y sus correspondientes aplicaciones en turbinas eólicas de eje vertical tipo Darrieus, ofrece modelos matemáticos, simulaciones en CFD y los resultados de medidas experimentales.

M. Aslam Bhutta et al. [14] y W. Tjiu et al. [15] revisan y resumen varias configuraciones de aerogeneradores de eje vertical, M. Aslam abraza turbinas de eje vertical de tipo Darrieus, tipo Savonius así como un híbridas, en cambio que W. Tjiu se centra en las de tipo Darrieus, haciendo un análisis más profundo. Exponen las ventajas y desventajas de cada configuración y abordan las técnicas de diseño empleadas con sus resultados. Comparan el coeficiente de potencia para varias configuraciones y muestra que puede optimizarse con referencia a la relación de velocidad de la punta. Expone los retos que enfrenta este tipo de aerogenerador para que pueda usarse más ampliamente.

N. Batista et al. [16] aborda el diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus para instalarse en un área urbana, que tiene la capacidad de autoarranque debido a un diseño de perfil innovador denominado EN0005, que evita la necesidad de componentes adicionales, ofrece todo el proceso desde diseño, simulación CFD, instalación y pruebas de campo. Expone una posible solución, mediante el diseño desde la forma del rotor hasta el diseño de un nuevo perfil aerodinámico, a una de las grandes problemáticas de los aerogeneradores Darrieus que es el autoarranque, en general este tipo de aerogenerador necesita un impulso externo proporcionada por un sistema mecánico o eléctrico para poder vencer la fuerza de inercia y poder empezar a girar. En este artículo lo tratan de resolver mediante el desarrollo de un nuevo tipo de álabe con ciertas propiedades aerodinámicas.

F. Toja-Silva et al. [17] refiere que el viento en las ciudades representa un gran recurso eólico que aún no ha empezado a explotarse para la generación de energía eléctrica. Los vientos urbanos tienen la característica de ser multidireccionales lo que representa un reto para las turbinas eólicas. Para explicar la influencia del viento multidireccional en la turbina, se simula el flujo de aire alrededor de una sección de un edificio, las secciones de varias turbinas eólicas se superpusieron en los campos de velocidad, y se analizó el comportamiento aerodinámico cualitativamente. Brinda ejemplos de aerogeneradores eólicos instalados en zonas urbanas y da una comparativa del comportamiento y rendimiento que podrían obtener una turbina de eje vertical y horizontal.

Los discos inductores que se analizarán en el presente trabajo son una patente en trámite que tiene como folio de recepción MX/E/2022/013115 y expediente MX/a/2022/002284, por lo que se hace la búsqueda de patentes orientadas a mejorar el rendimiento de las turbinas eólicas de eje vertical. A continuación, se mencionan las que tienen alguna relación con la patente en trámite del presente trabajo y las principales diferencias.

La patente MX/a/2020/006802, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que es una invención de un dispositivo eólico que describe un volumen de sección horizontal circular de desarrollo vertical que posee por lo menos dos turbinas VAWT dispuestas y selectivamente desplazables a lo largo del lateral del volumen central girando en el centro geométrico de la sección del volumen central, orientando las turbinas de manera óptima en la cercanía de la sección máxima del volumen que es donde el caudal de viento está

en su máxima velocidad. Cada estructura "sesten" de las turbinas aguas arriba sostiene sendos fuseladores que ocultan la zona de las turbinas que avanza en sentido contrario respecto de la dirección del viento y placas laterales que ocultan visual y auditivamente las turbinas capaces de acelerar el caudal en la zona de las turbinas por el efecto Venturi. Esta invención se diferencia en que no requiere de mínimo dos turbinas para su funcionamiento.

La patente MX/a/2016/015980, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que es un generador de conversión ciclónica o anticiclónica que comprende: una estructura hueca y rígida que en su extremo superior cuenta con unos deflectores difusores para producir un efecto Venturi, y con unos medios de conversión de la energía cinética del viento exterior en energía eléctrica, es de aplicación tanto para generación de ciclones como anticiclones, y para su uso con cualquier fluido, como viento y agua; permite aumentar la velocidad del fluido, concentrándolo en la periferia lo que redundaría en un mayor rendimiento y efectividad. Esta invención se diferencia en que aumenta la velocidad de viento, sin producir un flujo ciclónico o anticiclónico.

La patente MX/a/2016/001491, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que es una torre de generación de energía eólica. La torre de generación de energía eólica puede implementar la generación de energía eólica al acelerar la velocidad del viento aún para el viento de baja velocidad y simultáneamente incrementar la eficiencia de uso del viento que hace girar las paletas, mejorando mediante esto la eficiencia de generación de energía global. Además, la torre de generación de energía eólica puede incrementar la intensidad del viento por un efecto Venturi e incrementar simultáneamente la caída de presión del viento que escapa de la torre de generación de energía eólica al usar el vórtice generado en la superficie posterior de la torre de generación de energía eólica en una forma cilíndrica, mejorando mediante esto la rotación de las palas provistas al interior de la torre de generación de energía eólica. Esta invención se diferencia en que no requiere de una torre

La patente MX/a/2020/004614, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que es un sistema de guía de viento para guiar el viento por delante y/o por encima de una turbina eólica desde una primera dirección hasta una segunda dirección. La guía de viento está dispuesta y configurada para cambiar la dirección del viento de tal manera que el viento que sale de la guía de viento aumentaría la velocidad del viento de la estela detrás del rotor al agregar o conducir parte del viento circundante hacia la estela. Esta invención se diferencia en que no posee un sistema para guiar el viento.

La patente MX/a/2009/010236, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que es un sistema de turbina de viento con mezclador/eyector ("MEWT"). La MEWT incorpora avanzada tecnología de mezclado de flujo, tecnología de eyector, aerodinámica de aeronave y propulsión tecnologías de reducción de ruido de una manera única para mejorar en cuanto a la dinámica de fluido la efectividad y eficiencia operacional de las turbinas de viento

anteriores, de tal forma que su eficiencia operacional excede rutinariamente el límite de Betz. La MEWT presenta una envoltura de turbina con una entrada acampanada; álabes del anillo del estator; un anillo de paletas rotatorias en línea con los álabes del estator; y una bomba mezcladora/eyectora. Esta invención se diferencia en que no cuenta con un mezclador ni eyector.

La patente MX/a/2015/006190, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que es un método y un aparato pasivo integrado que capta y acumula energía solar potenciada con energía eólica y energía térmica captadas, inducidas y aceleradas actuando simultánea o independientemente para producir electricidad. El aparato consta de un captador y acelerador de viento exterior y de corriente de convección proveniente del interior del inmueble, carcasa y tobera de turbina de perfil aerodinámico acumuladoras de energía solar lo que le permite tener una mayor potencia en su rendimiento través de una turbina aerodinámica compuesta de estator integrado con álabes divergentes con perfil aerodinámico y colector integrado con álabes convergentes conectados por medio de un eje a un generador para producir electricidad permitiendo su operación de día y de noche en cualquier latitud y en forma permanente. Esta invención se diferencia en que no hace uso de la energía solar.

La patente MX/a/2020/000540, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que está constituida a partir de una torre soporte en la cual se implementa un rotor que comprende dos crucetas paralelas sobre las que se fijan en sus extremos exteriores dos anillos paralelos que sirven de soporte a los rodamientos que fijados a la carcasa exterior conforman el rotor, y dicha carcasa fija en su parte interior comprende una corona dentada que será la encargada de transmitir mediante tren epicicloide la fuerza del giro al seno de la torre que conforma un espacio propicio para alojar la transmisión que por necesidad será vertical e irá a buscar la caja multiplicadora. Las palas se materializan sobre dos vigas paralelas en horizontal unidas y compactadas entre ellas por cajas metálicas en cuyo interior se alojan los ejes y mecanismos de guiado, que dan sustento y orientación a las lamas. Esta invención se diferencia en que no cuenta con tantos componentes mecánicos ni requiere componentes dentados.

La patente US 9.284,943 B2, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que es una turbina eólica de eje vertical formada a partir de una disposición de palas de estator fijas para proporcionar aceleración del flujo de fluido en una disposición de palas giratorias aseguradas a un generador para invocar la generación de energía eléctrica. Las palas del estator se mantienen en posición mediante el uso de una placa de estator. Las palas del rotor están acopladas al generador. Las palas del estator están diseñadas para la deflexión del aire en una dirección para una rotación óptima de las palas del rotor acelerando el flujo de aire en un remolino previo antes de que el flujo entre en contacto con las palas del rotor. Cada pala de estator está orientada a un ángulo de escalonamiento suficiente para que un ángulo de la velocidad relativa no exceda el ángulo de pérdida de dicha pala de rotor. La invención involucra un estator con palas para

acelerar el flujo lo que la diferencia de la presente solicitud de patente que no involucra un estator.

La patente US 6,740,989 B2, protege un diseño similar a la presente invención, ya que en la descripción menciona que es una turbina eólica de eje vertical con un rotor de turbina con palas de rotor dispuestas para girar alrededor de un eje sustancialmente vertical. La turbina incluye múltiples álabes de estator que se extienden verticalmente y separados circunferencialmente alrededor del rotor en una disposición anular. Cada paleta tiene una superficie que mira radialmente hacia adentro, una superficie que mira radialmente hacia afuera y una pestaña en un borde exterior de cada paleta. La brida sirve para crear una capa límite de remolino turbulento en las superficies de las paletas que gira en una dirección que atrae y dirige el flujo de aire hacia los canales de flujo de aire definidos por las paletas del estator que luego se comprime por el estrechamiento de los canales y se dirige al rotor. palas para accionar la turbina. La invención involucra un estator con palas para redireccionar el flujo lo que la diferencia de la presente solicitud de patente que no involucra un estator.

La patente US 6,465,899 B2, protege un diseño similar a la presente invención ya que en la descripción menciona que es una turbina eólica omnidireccional de eje vertical que incluye una combinación de rotor / estator que maximiza la producción de energía al aumentar la velocidad y la presión del viento, además de eliminar la contrapresión. La sección de estator incluye una pluralidad de palas en forma de vórtice aseguradas entre velas cónicas superior e inferior. Las palas tienen un radio fundamentalmente igual al del rotor y una longitud de cuerda de aproximadamente 1,25 veces su radio. El rotor tiene un diámetro aproximadamente igual a la mitad del del estator y tiene una pluralidad de palas cóncavas aseguradas ay espaciadas de un eje vertical, estando dispuestas dichas palas en etapas dentro de la elevación vertical del rotor. Cada pala de rotor tiene una línea de cuerda igual al doble de sus radios y una longitud de cuerda que se aproxima a un tercio del diámetro del estator. La invención involucra un estator con palas en forma de vórtice para redireccionar el flujo lo que la diferencia de la presente solicitud de patente que no involucra un estator.

1.4 Justificación

El Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL) en conjunto con el Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro (CIATEQ) participó en la convocatoria 2019 del Fondo de Desarrollo Científico de Jalisco (FODECIJAL) para Atender Problemas Estatales con el proyecto “Diseño y desarrollo de turbina eólica de eje vertical para ambientes urbanos”, en la cual su proyecto fue seleccionado. Al programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica de la UMSNH se le hizo la invitación a colaborar con la simulación mediante software CFD de la turbina diseñada por el CIATEQ.

La colaboración del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica de la UMSNH tiene por objetivo proporcionar al CIATEQ los datos para que puedan corroborar el diseño de su turbina, mediante la simulación del rotor de la turbina eólica de eje vertical obteniendo de la simulación la potencia generada por el rotor y el cálculo del C_p de la turbina, para distintas velocidades de viento, que van de los 2.5 m/s hasta los 10m/s. Así mismo, se pretende estimar la optimización de los concentradores eólicos de discos inductores, los cuales son una patente en trámite con número de expediente MX/a/2022/002284 ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual (IMPI).

1.5 Hipótesis

Es posible realizar la simulación numérica del rotor de una turbina eólica de eje vertical de baja potencia y estimar la optimización de los concentradores eólicos de discos inductores.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Realizar la simulación numérica mediante software CFD (Computational Fluid Dynamics) de una turbina eólica de eje vertical y estimar la optimización de los concentradores eólicos de discos inductores.

1.6.2 Objetivos específicos

- 1.- Realizar un estudio del estado del arte de las turbinas de eje vertical.
- 2.- Realizar la simulación numérica mediante software CFD (Computational Fluid Dynamics) para evaluar el rendimiento a diferentes velocidades del rotor de una turbina eólica de eje vertical.

3.- Estimar por medio de la simulación numérica mediante software CFD (Computational Fluid Dynamics) la optimización de los concentradores eólicos de discos inductores.

1.7 Metodología del proyecto de investigación

El presente proyecto se hace en conjunto con el Centro de Investigación CIATEQ que forma parte de la coordinación de Materiales, Manufactura Avanzada y Procesos Industriales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) [18]. El CIATEQ proporciona el modelo geométrico de la turbina, algunos parámetros de diseño y la ubicación donde será instalada.

La metodología usada para las distintas simulaciones es la usada comúnmente para la resolución de problemas con CFD, representada en la Fig. 1.3.

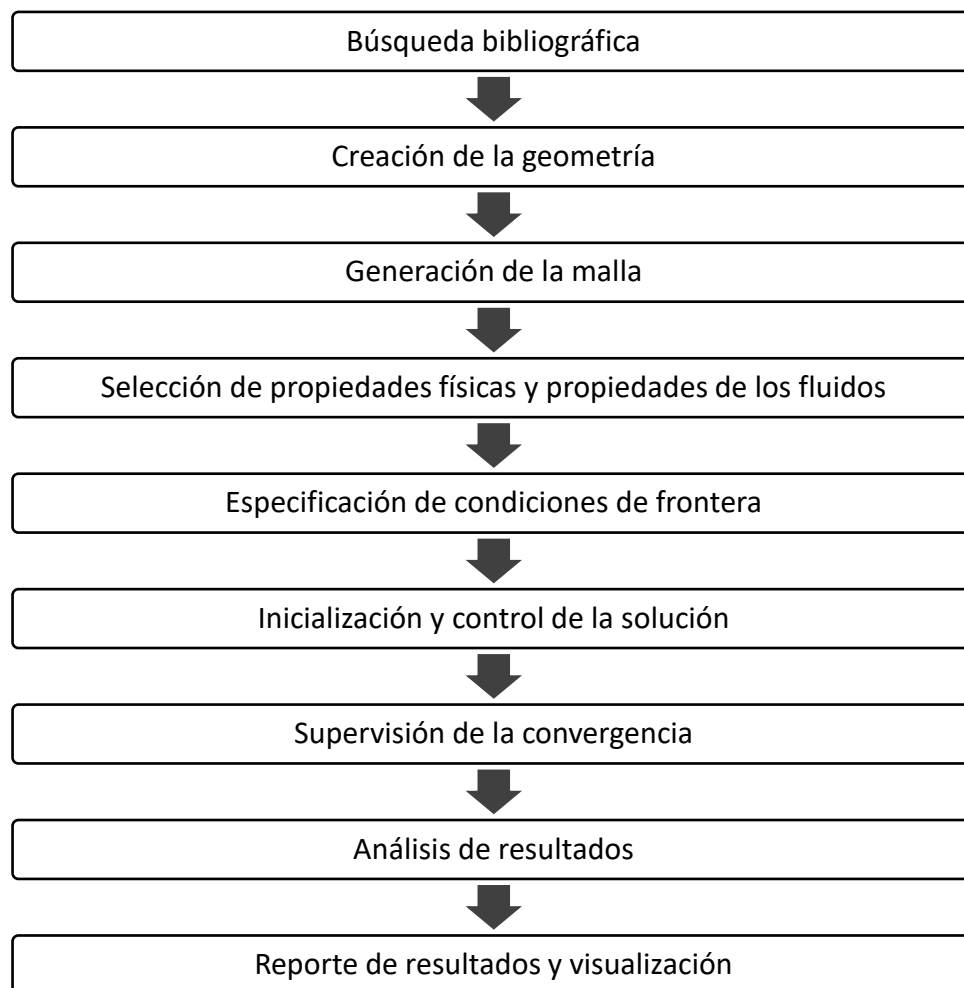


Fig. 1.3. Metodología para la realización del proyecto de investigación.

Al no tener datos experimentales del rendimiento y comportamiento del rotor la turbina eólica para la validación de la simulación hace obligatorio el apego a las

recomendaciones marcadas en la literatura y al uso de las buenas prácticas para simulaciones de fluidos computacionales.

Para evitar problemas de compatibilidad entre softwares se realizan todas las actividades con el software de ANSYS Workbench. Para el trazado y modelado de la geometría y volúmenes de control se utiliza ANSYS DesignModeler, para el mallado de los volúmenes de control ANSYS Meshing y para la simulación CFD se usa de ANSYS Fluent.

Con los datos proporcionados por CIATEQ se calculan los parámetros para definir las propiedades del fluido, así como otros datos necesarios para la simulación. Esta etapa también incluye la búsqueda bibliográfica.

Se realiza la modelación del rotor y los volúmenes de control (dominio computacional) en DesignModeler, posteriormente en ANSYS Meshing se realiza la malla, se traslada el archivo a Fluent para realizar la simulación, y finalmente se analizan los resultados obtenidos.

Capítulo II. Conceptos Básicos de Energía Eólica

2.1 Energía eólica

La energía renovable es una fuente de energía limpia que tiene un impacto ambiental menor que la tecnología de energía convencional [1]. Se identifica como una energía renovable a las energías obtenidas de las fuentes de la naturaleza como la luz solar, el viento, las olas, el agua, entre otras.

El viento es aire atmosférico en movimiento. La velocidad del movimiento del aire define la cantidad de energía en el viento, es decir, la energía cinética del viento. La fuente de esta energía es la radiación solar [19]. La energía disponible en el viento varía con el cubo de la velocidad del viento [20].

La radiación del Sol calienta de manera desigual la superficie de la Tierra, más fuerte en los trópicos y más débil en las latitudes altas. Además, como resultado de tasas diferentes de absorción de radiación solar por el suelo, las rocas, el agua y la vegetación, el aire en distintas regiones se calienta a diferentes velocidades. Este calentamiento desigual se convierte mediante procesos convectivos en el movimiento del aire [19]. Estos efectos térmicos combinados con los efectos dinámicos de la rotación de la Tierra producen el viento [21].

La energía del viento es básicamente la energía del aire que fluye de un lugar a otro sobre la superficie de la Tierra. El viento puede producir energía eléctrica o mecánica mediante el uso de una turbina eólica que comúnmente consta de hélices, álabes o palas. Una turbina eólica funciona de forma general cuando el rotor recibe energía cinética del aire, que luego se convierte en energía mecánica o eléctrica, según el uso final. La extracción de la energía del viento depende significativamente de la eficiencia del rotor y del diseño de los álabes de la turbina conectadas al sistema de generación de energía eólica [22].

La generación de energía eléctrica mediante energía eólica es un proceso de creación de electricidad utilizando la energía cinética del viento que se produce debido a su movimiento y masa [22]. La energía cinética por unidad de tiempo se conoce como potencia cinética (P), se puede expresar mediante la Ec. 2.1 [8].

$$P_{aire} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{\infty}^2 = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \quad \text{Ec. 2.1}$$

La mayoría de las turbinas eólicas actuales se utilizan para generar electricidad. La energía eólica es una fuente de energía alternativa prometedora no solo para aplicaciones a gran escala, sino también para aplicaciones de generación de energía distribuida y a pequeña escala [22].

2.2 Clasificación de aerogeneradores

Las turbinas eólicas se pueden clasificar con base en varios criterios como la posición del eje de rotación, la fuerza que origina la rotación, la solides, la potencia producida, entre otros criterios [19, 23].

Centrándonos en el criterio con base a la posición del eje de rotación, las turbinas eólicas se pueden clasificar en dos categorías que son turbinas eólicas de eje horizontal o HAWT, por sus siglas en inglés (*Horizontal Axis Wind Turbine*) y turbinas eólicas de eje vertical o VAWT, por sus siglas en inglés (*Vertical Axis Wind Turbine*).

Las HAWT parecen estar más avanzadas en sus aplicaciones durante la última década y están marcadas como la tecnología dominante en la industria moderna de la energía eólica. La mayor eficiencia de los HAWT ha llevado a su amplia aplicación [10]. Sin embargo, esta mayor eficiencia energética solo funciona con viento de alta velocidad con una dirección predominante. En contraste, para áreas de baja velocidad del viento donde la dirección del viento cambia regularmente, favorecen a las VAWT [10, 17].

2.2.1 Turbinas Eólicas de Eje Horizontal (HAWT)

Las turbinas eólicas de eje horizontal son turbinas cuyo eje de rotación es paralelo al suelo. Los HAWT generalmente están conectados al sistema de red debido a su mayor eficiencia. El rotor está diseñado de manera óptima con dos o tres álabes para captar la energía del viento [22].

Las principales ventajas de los HAWT son una mejor producción de energía, alta eficiencia y flexibilidad del sistema de control. No obstante, también se han observado algunos inconvenientes, como el alto requerimiento de la torre para asegurar una gran cantidad de energía eólica capturada, alta contaminación acústica y mortalidad de aves. Aparte de eso, las HAWT necesitan un mayor mantenimiento debido a algunas perturbaciones externas, como interferencias de radio, transmisión de televisión [8, 19, 20, 24, 25]. La Fig. 2.1 muestra una turbina eólica moderna de eje horizontal.



Fig. 2.1. Configuración típica de una turbina eólica moderna de eje horizontal HAWT. Obtenido de [20].

2.2.2 Turbinas Eólicas de Eje Vertical (VAWT)

La turbina eólica de eje vertical es una turbina cuyo eje de rotación es perpendicular al suelo. Las VAWT han superado a las HAWT en varias condiciones, especialmente cuando se trataba de un patrón de viento complejo (turbulento) y de baja velocidad. Además, proporciona un mejor aprovechamiento del espacio debido al diseño más pequeño y simple [19].

Otros méritos de las VAWT son un menor nivel de ruido, poder recibir viento de cualquier dirección y producir menores esfuerzos en la estructura de soporte debido a la ubicación cercana al suelo. Las VAWT requieren menos viento para generar energía, lo que las hace adecuadas para áreas de baja velocidad del viento, como ciudades y áreas urbanas. Este requisito de bajo nivel de viento las hace aptas para ser instalados en las áreas de baja velocidad del viento que están más cerca del suelo. A medida que se acercan al suelo, los procesos de control y mantenimiento se facilitan. Las VAWT muestran la principal ventaja de poder aprovechar el viento desde cualquier dirección en comparación con las HAWT que necesitan un sistema de control de guiñada [10, 17].

A pesar de todos los méritos de las VAWT, también se han identificado algunos inconvenientes. Los álabes de las VAWT son propensos a la fatiga debido a la gran

variación de las fuerzas aplicadas en cada rotación. Los álabes de las VAWT convencionales se doblaban con la rotación del rotor, lo que provocaba que se agrietaran. Desafortunadamente, estos factores llevaron a la baja confiabilidad de los VAWT [22].

Las VAWT se pueden dividir en dos tipos principales: tipo Savonius y tipo Darrieus. El tipo Savonius usa fuerzas de arrastre y funciona de manera similar a una rueda de agua. Por otro lado, el tipo Darrieus usa fuerzas de sustentación o elevación y emplea hojas similares a las que se usan en las HAWT [8, 26].

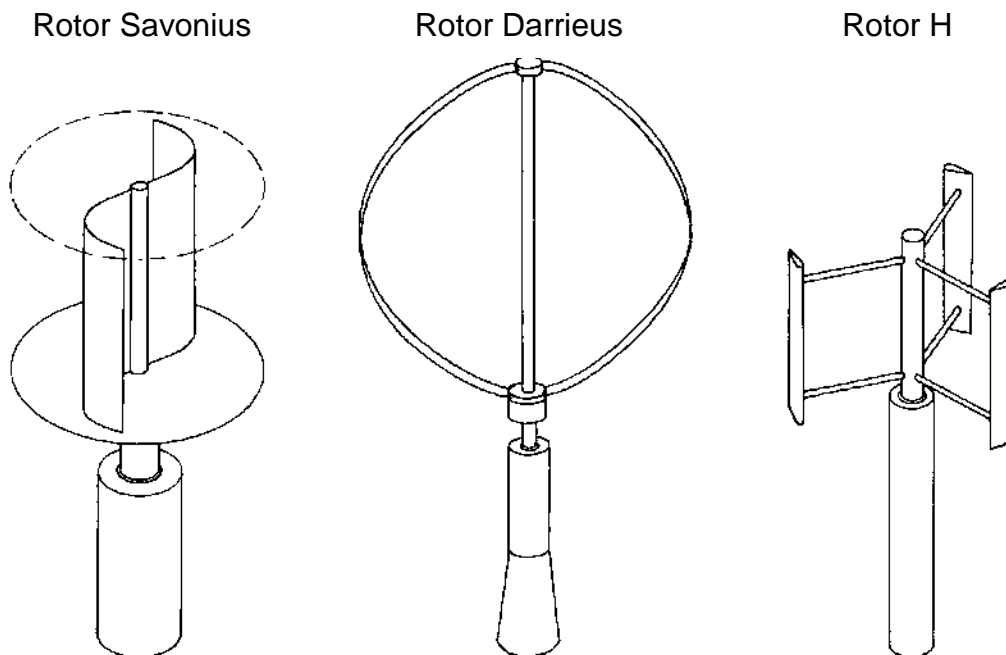


Fig. 2.2. Tipos de rotor convencionales para turbinas de eje vertical. Modificado de [25].

En términos de eficiencia, las turbinas que usan la sustentación son mejores que las turbinas que usan el arrastre. Por lo tanto, hoy en día muchas investigaciones se centran en las turbinas que usan principalmente fuerzas de sustentación (tipo Darrieus). El primer diseño de este tipo de turbina fue patentado en Estados Unidos en 1931 por G. J. M. Darrieus [22]. En la Fig. 2.2 muestra los tipos convencionales de VAWT.

2.3 Eficiencia y relación de velocidad de punta

La eficiencia de la turbina para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica o mecánica se conoce como coeficiente de potencia, C_p . Generalmente se describe como la relación entre la energía eléctrica producida por la turbina eólica y la energía del viento que ingresó a la turbina. El coeficiente de potencia está definido por la Ec. 2.2 [19].

$$C_p = \frac{P_{turbina}}{P_{aire}} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho AV_{\infty}^3} \quad \text{Ec. 2.2}$$

De acuerdo con la teoría del límite de Betz, las turbinas eólicas idealmente solo podrían alcanzar una eficiencia máxima de alrededor del 59% [25].

El límite de Betz es el mismo tanto para las turbinas de eje vertical como para las de eje horizontal y corresponde a la eficiencia máxima que una turbina eólica podría alcanzar que es $C_{p,max} = 16/27 = 0.5926$ [8].

Las turbinas eólicas alcanzan su máxima eficiencia con una óptima relación de velocidad de punta o TSR, por sus siglas en inglés (Tip Speed Ratio). El TSR se representa comúnmente con la letra griega λ (lambda), y está definido como la relación entre la velocidad del viento y la velocidad de las puntas de los álabes de las turbinas eólicas, como se representa en la Ec. 2.3 [8].

$$TSR = \lambda = \frac{\omega r}{V_{\infty}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

La relación entre la eficiencia del rotor y el TSR se muestra en la Fig. 2.3. Se puede observar que para diferentes diseños de turbinas eólicas la máxima eficiencia se produjo a diferentes valores de TSR.

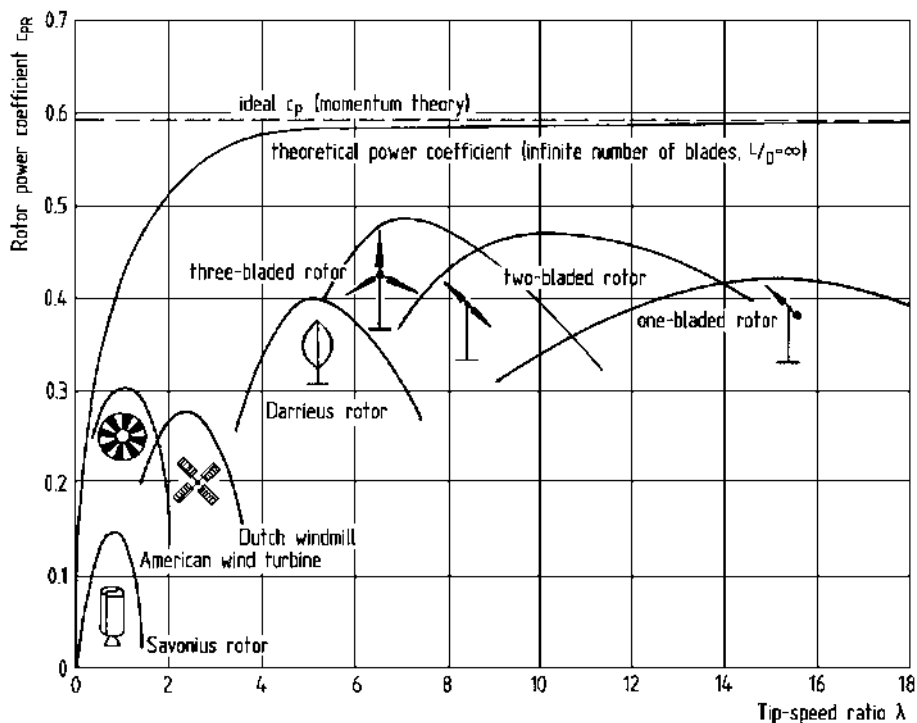


Fig. 2.3. Relación entre el coeficiente de potencia y la velocidad de punta para distintos rotores de turbinas eólicas. Obtenido de [25].

2.4 VAWT Tipo Savonius

El rotor Savonius es una turbina eólica de eje vertical con una sección transversal en forma de S, viéndose desde arriba. En la Fig. 2.2 se ilustra la forma del rotor tipo Savonius. Es principalmente un dispositivo que funciona con base en las fuerzas de arrastre que genera el viento en su paso por la turbina. Sin embargo, también puede haber cierta cantidad de sustentación que contribuya a la potencia [8].

Las turbinas eólicas que giran principalmente por fuerzas de arrastre tienden a producir un par de arranque alto, por lo que reduce la velocidad necesaria para el arranque de la turbina. Por lo tanto, se requiere una velocidad de viento baja para que la turbina comience a girar [22].

El argumento a favor de las turbinas tipo Savonius es que son relativamente económicas de construir. Al ser máquinas impulsada por arrastre, tienen coeficientes de potencia intrínsecamente bajos. Además, tienen una solidez cercana a 1.0, por lo que son muy pesados en relación con la potencia que producen. También son difíciles de proteger de daños en vientos fuertes [8].

La potencia del Savonius se basa en la diferencia de presión a través de la pala o álabe que se alejan del viento y la que avanza contra el viento. Esto a su vez está relacionado con la diferencia en los coeficientes de arrastre asociados con el lado convexo y el lado cóncavo de los álabes. Se puede encontrar una discusión detallada de la aerodinámica del rotor Savonius en [26].

El coeficiente de potencia máxima para cualquier rotor Savonius se produce en una relación de velocidad punta inferior a 1.0 [8].

Las turbinas Savonius convencionales no son adecuadas para la generación de electricidad debido a su incapacidad para girar más rápido que la velocidad del viento. Sin embargo, investigaciones previas verificaron que la rotación del generador se puede incrementar con el uso de caja de cambios. Como las VAWT tipo Savonius tiene un coeficiente de potencia más bajo, muchas investigaciones se han centrado en la mejora de la eficiencia de la turbina. Esto se debe al hecho de que las turbinas Savonius tienen una mejor capacidad de autoarranque que las otras VAWT [22].

2.5 VAWT Tipo Darrieus

A las turbinas eólicas de eje vertical que usan principalmente fuerzas de sustentación o elevación se les cataloga como VAWT tipo Darrieus, en honor a Georges Jean Marie Darrieus, quien patentó este tipo de diseño en los Estados Unidos en 1926 [27]. En la Fig. 2.4 se muestran las figuras que se presentaron para el trámite de patente de Darrieus. La patente cubría dos configuraciones principales: álabes curvos y álabes rectos [15, 27].

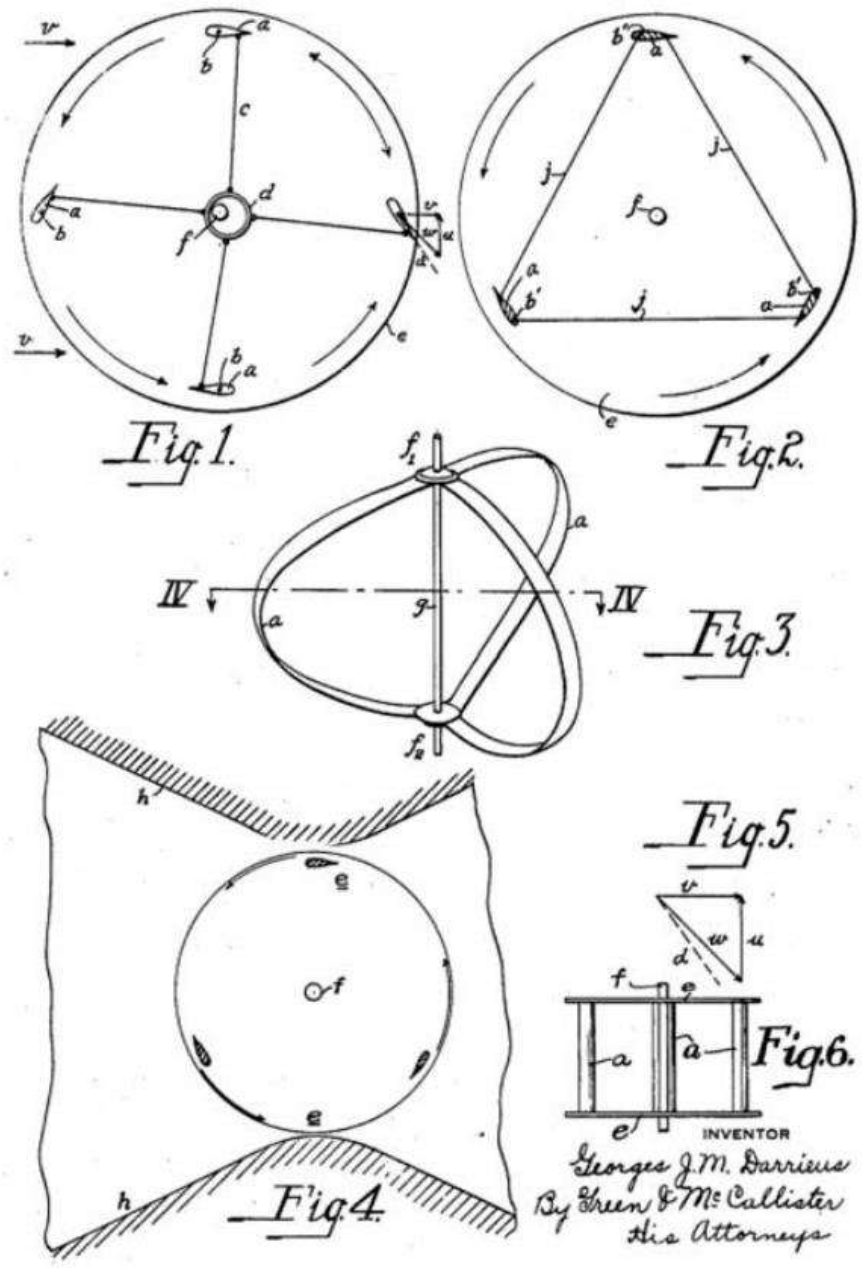


Fig. 2.4. Figuras de la patente de Darrieus que explican la idea de una turbina eólica de eje vertical (VAWT) basada en elevación. Obtenido de [27].

Considerando la forma de los álabes de la turbina, tienden a producir un par positivo en todos los ángulos cuando funcionan en condiciones óptimas. Como resultado, los VAWT basados en sustentación son más eficientes que los VAWT basados en arrastre. La mayoría de los nuevos VAWT disponibles en el mercado se basan en el concepto de sustentación aerodinámica para maximizar la producción de energía, pero utilizan formas aerodinámicas diferentes a las del tipo "Darrieus" [19]. Las configuraciones de álabes curvos y rectos se han investigado y desarrollado evolucionado en distintas configuraciones, como se muestra en la Fig. 2.5, con la intención de superar la deficiencia del autoarranque de las turbinas tipo Darrieus.

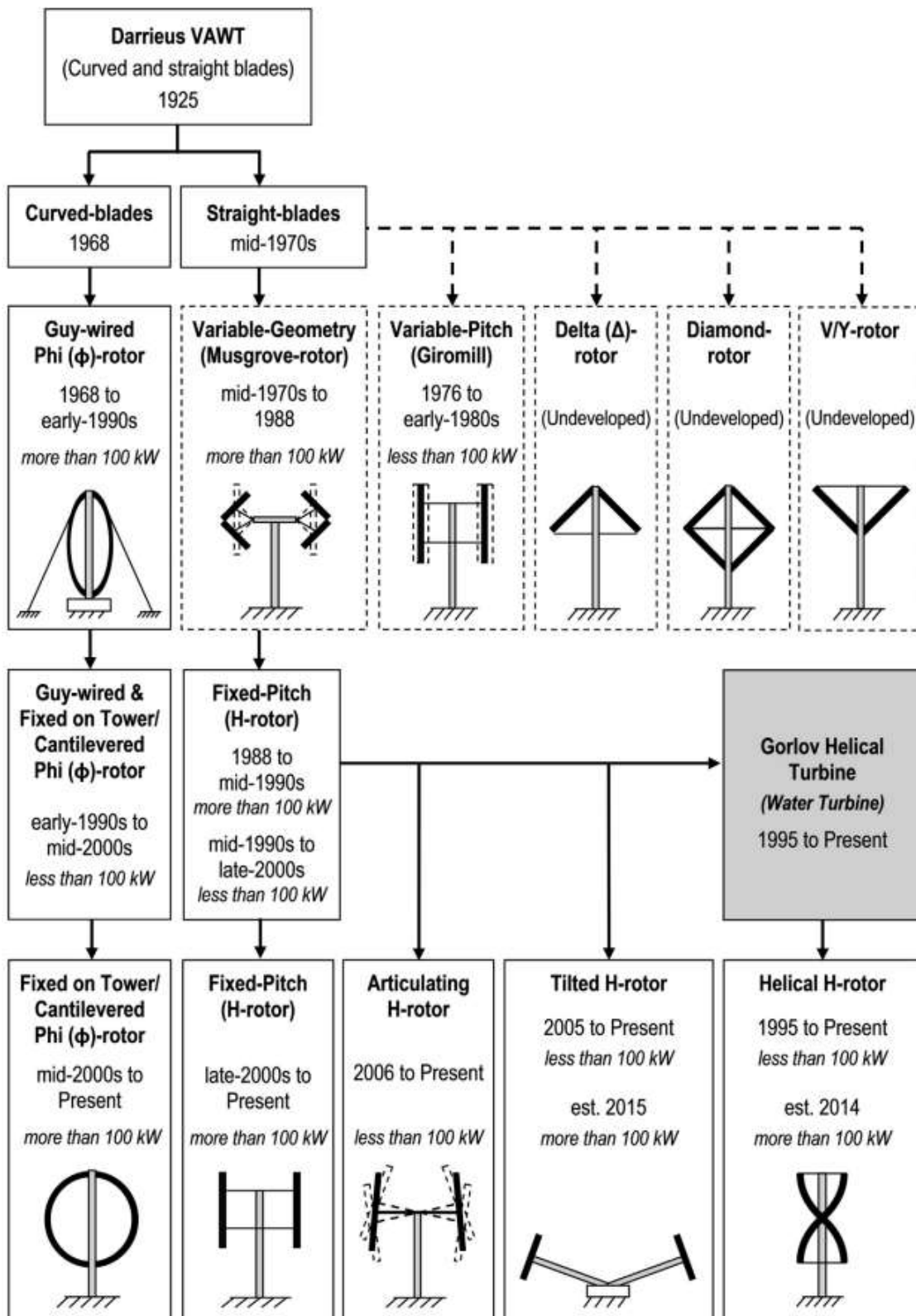


Fig. 2.5. Línea del tiempo del desarrollo de distintas configuraciones para VAWT. Obtenido de [15].

La configuración de álabes curvos se conoce como batidor de huevos o phi-rotor debido a su apariencia. Existen diversas variaciones del phi-rotor en lo referente a la sujeción como las versiones con cables de sujeción, fijas en la torre y en voladizo. De manera similar, la configuración de hojas rectas tiene varias configuraciones. Se han documentado variaciones de diamante, V/Y y delta (Δ) [8, 28].

Otra variación de las turbinas tipo Darrieus es la del rotor Musgrove que cuenta con una geometría variable; sin embargo, este ha sido reemplazado por un rotor H de paso fijo. Este tipo de turbinas tiene un mejor desempeño que el diseño convencional con un diseño y proceso de fabricación más simple. Actualmente, el rotor H se ha investigado activamente, incluido el rotor de varios megavatios para aplicaciones en alta mar. Además, las mejoras en el rotor H generaron otras tres variantes: rotor H articulado, rotor H helicoidal y rotor H inclinado [15]. Para una mejor comprensión del desarrollo de las VAWT a lo largo del tiempo se recomienda al lector remitirse a [15, 26, 28, 29].

En comparación con las turbinas tipo Savonius, las turbinas tipo Darrieus producen un par de arranque bajo, por lo que requieren de un sistema externo para comenzar a girar, pero cuando giran, son mucho más rápidas que las turbinas tipo Savonius. En términos de eficiencia, el tipo Darrieus se destaca con el coeficiente de potencia más alto que el tipo Savonius a alta velocidad del viento. Por lo tanto, las turbinas Darrieus son mucho más favorables para generar electricidad [22].

La velocidad de activación de la turbina Darrieus se mide entre 4 y 5 m/s, mientras que la turbina Savonius tiene una velocidad de activación menor de aproximadamente 1 m/s [22].

2.6 VAWT Híbridas Savonius-Darrieus

Las VAWT híbridas son una combinación de rotores basados en arrastre y sustentación, como las turbinas Savonius y Darrieus, respectivamente [30]. Las turbinas eólicas híbridas Savonius-Darrieus tiene por objetivo superar las limitaciones de cada tipo de VAWT, combinado turbinas de tipo Savonius y Darrieus, y se desarrolló con base en los diseños anteriores. En los desarrollos comerciales actuales de aerogeneradores pequeños, el diseño híbrido ha ganado mucha popularidad [22]. La Fig. 2.6 muestra un ejemplo de un VAWT híbrido.

Sin embargo, las VAWT híbridas enfrentan ciertos desafíos, como nuevas formas de desprendimiento de vórtices, la optimización de diseño de sistemas más complejos y un rendimiento relativamente más bajo debido a las fuerzas de arrastre creadas por la turbina Savonius a valores altos de λ [14].

Rassoulinejad-Mousavi et al. [31] probaron experimentalmente una VAWT híbrida que constaba de una turbina Savonius de 2 álabes y una turbina H de 3 álabes. Examinaron dos conjuntos de posiciones variando la posición de la turbina Savonius

en la parte inferior de la turbina H y en medio de la turbina H, con el fin de encontrar la configuración con el mayor rendimiento. La turbina Savonius ubicada en el centro del rotor H obtuvo el diseño óptimo. Bhuyan y Biswas [32] compararon los requisitos del par de arranque para un rotor H-Darrieus convencional contra un rotor VAWT híbrido con el rotor Savonius en el medio. Los resultados indicaron las capacidades de autoarranque de la turbina híbrida en cualquier ángulo de acimut y número de Reynolds. Sin embargo, la turbina Savonius actúa como un freno para la turbina híbrida a velocidades de viento más altas.

Liang et al. [33] realizaron un estudio para determinar los efectos de relación de radio y el ángulo de fijación sobre la eficiencia y el autoarranque mediante un enfoque de dinámica de fluidos computacional. Se analizaron varias configuraciones para el rotor híbrido. Utilizando aspas aerodinámicas NACA 0012, encontraron que una turbina híbrida con dos aspas en el rotor H y una relación de diámetro de 0.25 que proporcionaba el rendimiento óptimo del sistema. Los requisitos de par de arranque llegaron a ser tan bajos como 0,1 Nm con una velocidad del viento baja de 2 m/s y un C_p máximo de 0.363.

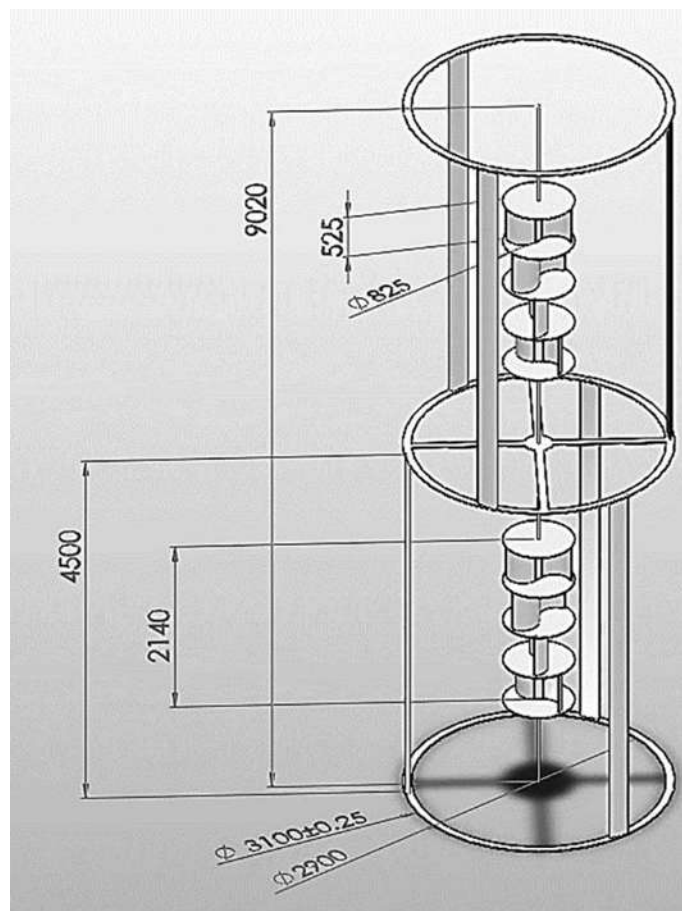


Fig. 2.6. VAWT híbrida. Obtenida de [30]

En otra investigación, se diseñó un VAWT híbrido innovador para un sistema más sostenible y robusto con una mejor característica de autoarranque [30]. La turbina

híbrida está estructurada con dos niveles; cada nivel tiene cuatro rotores Savonius de dos álabes y una turbina Darrieus de tres álabes, con la posición de Savonius dentro de la turbina Darrieus, ver Fig. 2.6. Se comparo el rendimiento de la turbina híbrida con la turbina H sola. Aunque el rotor H demostró mayor C_p en comparación con el tipo híbrido, el rotor H no puede arrancar de forma independiente debido al bajo par inicial. La turbina híbrida mostró una mejora en términos de eficiencia y rango operativo [30].

Estos estudios respaldan el desarrollo de una VAWT híbrida mediante el uso de una turbina tipo arrastre como la turbina Savonius en medio de un rotor H-Darrieus. Esta combinación aumenta el par de arranque y la eficiencia a valores de λ más bajos [30].

En resumen, a pesar de todos los inconvenientes y beneficios de las VAWT la aceptación depende en gran medida de su rentabilidad, fiabilidad y capacidad de autoarranque [22].

2.7 Concentradores de energía eólica

Dado que la potencia producida por una turbina eólica es proporcional a la potencia cúbica de la velocidad del viento, como se muestra en la Ec. 2.1, duplicar la velocidad del viento significaría un aumento de ocho veces en la producción de energía de la turbina eólica [34]. Así mismo, las bajas velocidades del viento dan como resultado menos energía por unidad de volumen de aire que pasa a través de una turbina.

La instalación de turbinas eólicas convencionales disponibles comercialmente en algunos países está limitada porque generalmente las turbinas eólicas diseñadas para velocidades de viento superiores a 5m/s. Esto limita la elección de ubicaciones donde se pueden implementar [35].

La idea básica de un concentrador de energía eólica es aumentar el rendimiento de la turbina eólica o aumentar el rendimiento energético en relación con el área de barrido del rotor, es decir, buscar una reducción drástica en el tamaño del rotor. Básicamente, esto se logra mediante dispositivos estáticos, que son estructuras no giratorias que producen una aceleración en la velocidad del flujo hacia el rotor o, en algunos casos, incluso generan vórtices de concentración [25].

Existe gran variedad de concentradores eólicos y su forma depende de para que tipo de turbina sea el concentrador. En la Fig. 2.7 se muestran algunos diseños conceptuales de concentrador para HAWT y en la Fig. 2.8 se muestra un ejemplo de concentrador para VAWT.

Con lo anterior ha surgido un nuevo concepto de turbina eólica que son las turbinas eólicas aumentadas por concentrador o CAWT por sus siglas en inglés

(Concentrator Augmented Wind Turbine) que buscan mejorar eficiencia de las turbinas eólicas al hacer uso de los concentradores de energía eólica [35]. Se recomienda al lector consultar [25, 35] para una explicación más detallada del tema.

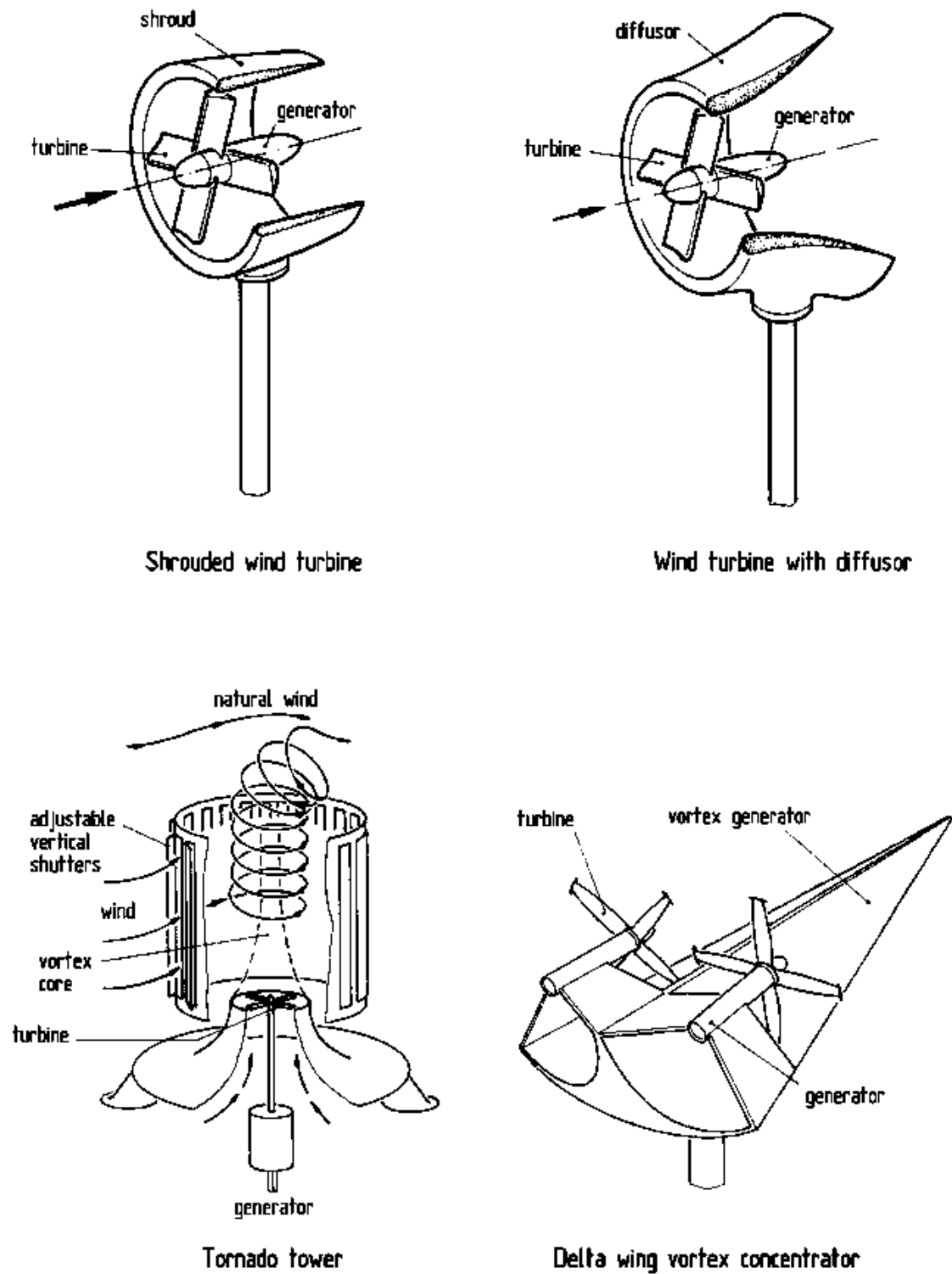


Fig. 2.7. Conceptos de turbinas eólicas de eje horizontal combinadas con concentradores de energía eólica. Obtenido de [25].

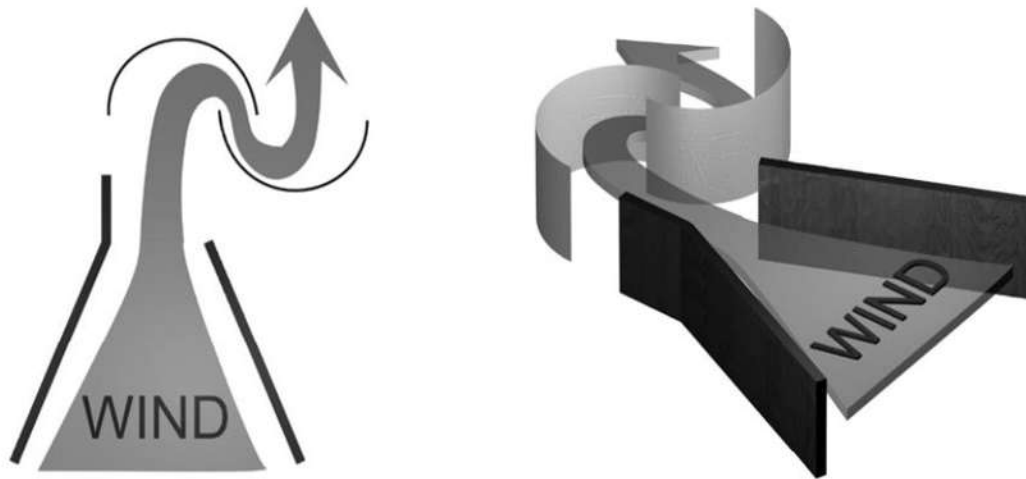


Fig. 2.8. Concentrador de energía eólica para turbinas de eje vertical (VAWT). Obtenido de [34].

Un aspecto para considerar es cuidar que la construcción adicional requerida para “pre-concentrar” la energía eólica no sea demasiado costosa, ya que generalmente el costo de construir un concentrador efectivo, que también pueda soportar vientos extremos ocasionales, siempre ha sido más de lo que vale el dispositivo [8]. Además, no se han realizado esfuerzos para comercializar este concepto porque se sabe poco sobre el comportamiento del flujo de viento en el CAWT, su influencia en la potencia de salida de la turbina y sobre los parámetros óptimos de diseño del concentrador [35].

A pesar de todo, se ha concluido que los CAWT son formas prometedoras de aumentar la producción de energía en áreas de baja velocidad del viento, pero su desarrollo se ve limitado por la escasa información disponible sobre su operación [35]. Thangavelu et al. [36] proponen y prueban por medio de CFD un diseño de concentrador para HAWT, Shikha et al. [37] evalúan un concentrador para amplificar la velocidad del viento para un pequeño rotor Savonius, y más recientemente Marin et al. [38] analizan por medio de CFD un innovador concentrador de energía eólica diseñado para cualquier tipo de VAWT. Trabajos de investigación como los anteriores y muchos otros más son invaluable para el desarrollo de esta tecnología.

Todavía se necesita realizar más investigación y experimentación para comprender las diversas características de flujo que pueden estar presentes en el sistema, como la turbulencia, las pérdidas por fricción del concentrador, los remolinos, los efectos de viraje y estela, y su influencia en la potencia de salida [35].

Capítulo III. Conceptos Básicos de Dinámica de Fluidos Computacional

3.1 Introducción a dinámica de fluidos computacional

Dinámica de Fluidos Computacional o CFD por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics) es el análisis por medio de simulaciones computacionales de sistemas que involucran el flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados, como reacciones químicas [39]. La CFD es una rama que integra la mecánica de fluidos, las matemáticas y las ciencias de la computación [40].

La dinámica de fluidos computacional ha llegado a la mayoría de las aplicaciones industriales y de la investigación académica. Al principio, este campo de estudio se limitaba principalmente a las áreas de ingeniería aeronáutica de alta tecnología; sin embargo, hoy en día es una metodología ampliamente utilizada [40]. La técnica es muy poderosa y abarca una amplia gama de áreas de aplicación industriales y no industriales [39].

La CFD se ha convertido en uno de los tres métodos o enfoques básicos empleados para resolver problemas de dinámica de fluidos y transferencia de calor, ver Fig. 3.1. Cada enfoque está fuertemente interrelacionado y no se encuentra aislado. Los enfoques son usados para estudiar los diversos aspectos de la dinámica de fluidos y para ayudar a los ingenieros en el diseño de equipos y procesos industriales relacionados con el flujo de fluidos y la transferencia de calor. La tendencia es hacia una mayor confianza y empleo del enfoque computacional, sobre todo cuando los flujos son muy complejos [40].

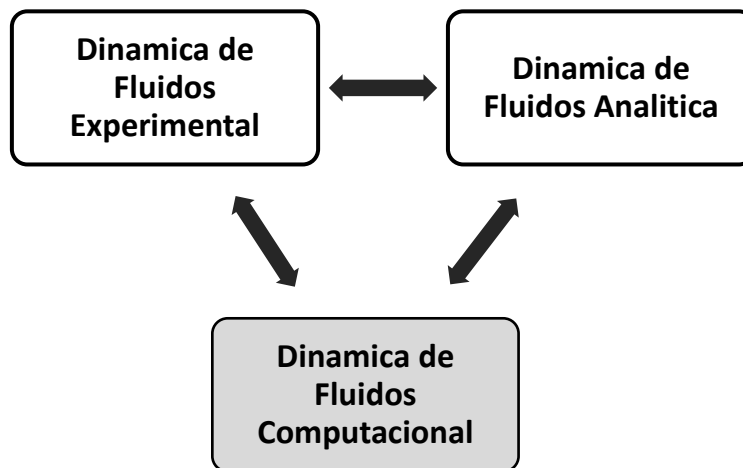


Fig. 3.1. Los tres enfoques básicos para resolver problemas en dinámica de fluidos y transferencia de calor. Modificado de [40].

Los flujos y los fenómenos relacionados al flujo de fluidos se pueden describir mediante ecuaciones diferenciales parciales (o integro-diferenciales), que no tienen

solución analíticamente, excepto en casos muy particulares y simples. Para obtener una solución aproximada de forma numérica, se usa un método de discretización que aproxima las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas, que posteriormente es resuelto en una computadora [41].

Así como la precisión de los datos experimentales depende de la calidad de las herramientas utilizadas, la precisión de las soluciones numéricas depende de la calidad de las discretizaciones utilizadas [41].

3.2 Estructura de CFD

Los códigos CFD están estructurados en torno a los algoritmos numéricos que pueden abordar los problemas de flujo de fluidos. Para proporcionar un fácil acceso a su poder de resolución, todos los paquetes comerciales de CFD incluyen interfaces de usuario. Todos los códigos contienen tres elementos principales [39]:

1. Pre-Processor
2. Solver
3. Post-Procesor

De forma concisa y esquemática se muestra la función de cada uno de estos elementos dentro del contexto de un código CFD en la Fig. 3.2; para una explicación más detallada se recomienda al lector consultar [39, 40].

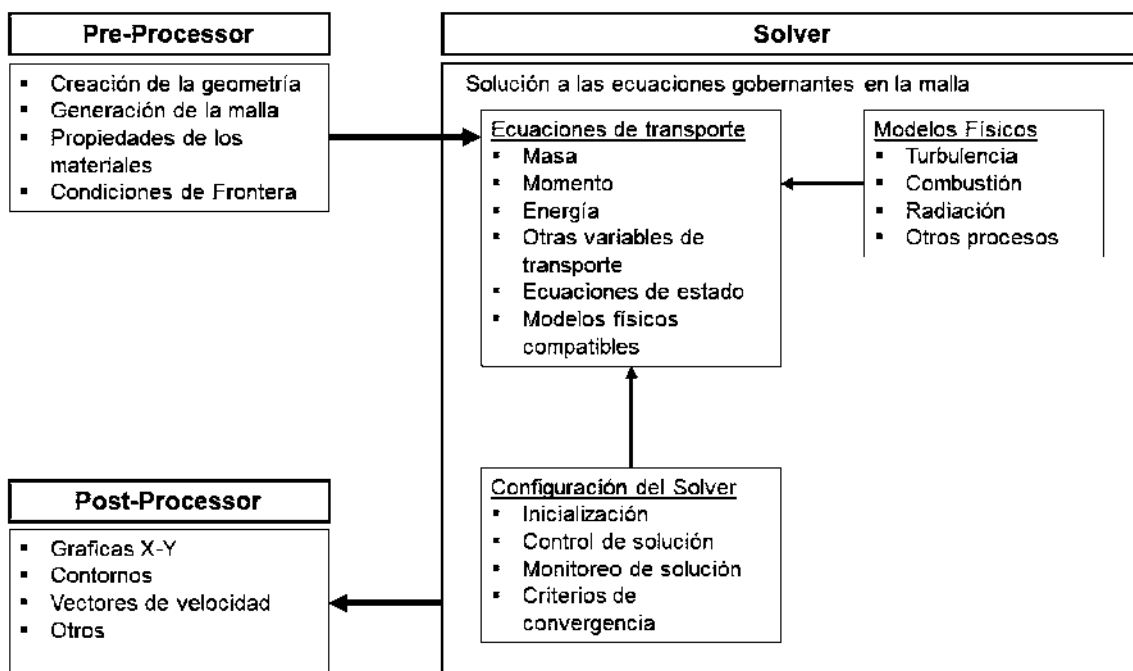


Fig. 3.2. Las funciones de interconectividad de los tres elementos principales dentro de un marco de análisis CFD. Modificado de [40].

3.3 Resolución de problemas con CFD

La física subyacente de los problemas de fluidodinámica es compleja, los resultados obtenidos por un código CFD son, en el mejor de los casos, tan buenos como la física y la química integrada en él y, en el peor de los casos, tan buenos como su operador [39].

Para la resolución de problemas con CFD se sigue la metodología representada en la Fig. 3.3. Existe una etapa previa a la configuración y ejecución de cualquier simulación en CFD, que consiste en la identificación y formulación del problema en términos de los fenómenos físicos y químicos que intervienen en el proceso y que por tanto deben considerarse [39, 40].

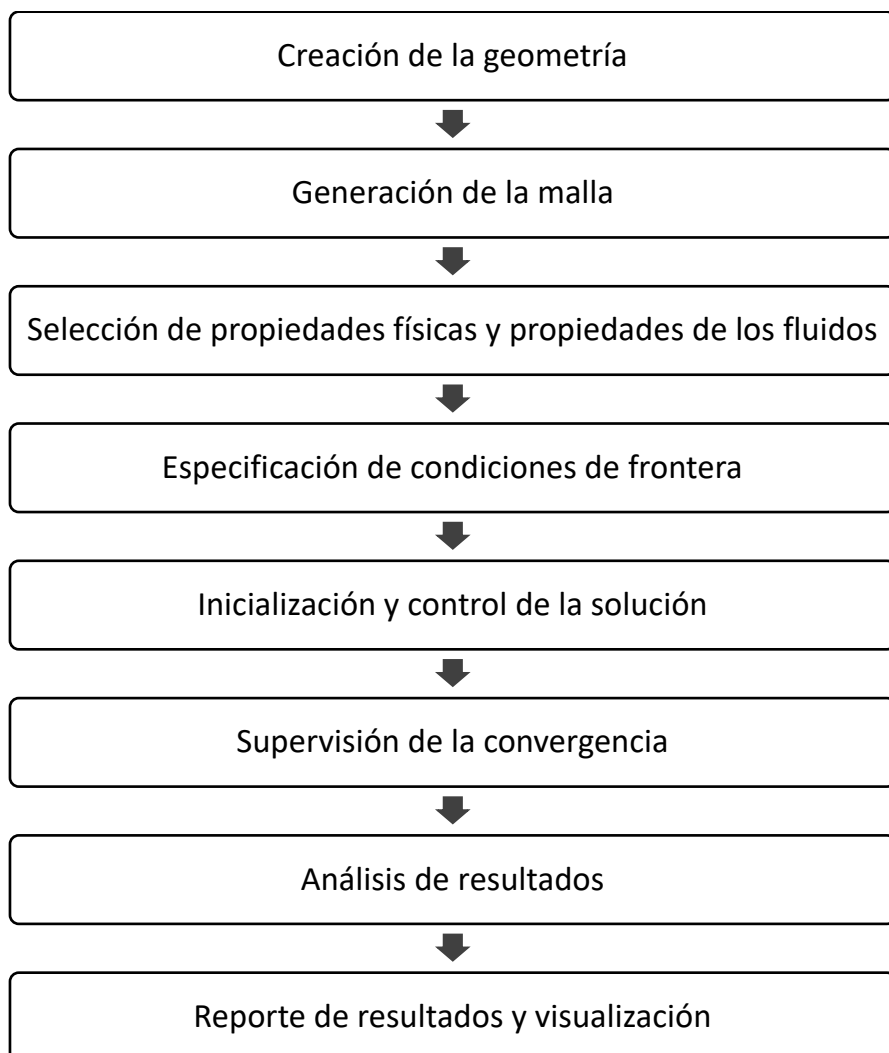


Fig. 3.3. Metodología para la resolución de problemas con CFD. Elaboración propia con información de [40].

En la mayoría de las simulaciones de CFD se necesitan hacer suposiciones y/o simplificaciones para reducir la complejidad a un nivel manejable y que al mismo

tiempo se conserven las características principales del problema. Un modelo ideal debe presentar la cantidad mínima de complejidad mientras captura la esencia de la física relevante [42]. Las decisiones típicas pueden ser modelar un problema en dos o tres dimensiones, excluir los efectos de la temperatura ambiente, excluir las variaciones de presión sobre la densidad de un flujo de aire, optar por resolver las ecuaciones de flujo turbulento, entre muchas otras. La idoneidad de las simplificaciones introducidas en esta etapa rige en gran medida la calidad de la información generada por la CFD, el usuario debe estar consiente de todas las simplificaciones efectuadas [39].

En las dos primeras etapas de la metodología para la resolución de problemas con CFD las tareas principales son el dimensionamiento y la construcción de la geometría del dominio computacional, así como el diseño de la malla. Posteriormente se ejecuta la simulación. Para determinar el fracaso o el éxito de la simulación hay muchos factores que deben considerarse; sin embargo, entre los más importantes están la convergencia y la independencia de la malla.

El algoritmo de solución en un software de CFD es de naturaleza iterativa. La convergencia generalmente se puede evaluar mediante el seguimiento progresivo de los desequilibrios que se acentúan por el avance de los cálculos numéricos de las ecuaciones algebraicas a través de cada paso de iteración. Estos desequilibrios miden la conservación global de las propiedades de flujo; también se les denomina comúnmente como los "residuales" [40].

Una solución convergente se logra cuando los residuos caen por debajo de algún criterio de convergencia o tolerancia. Además de examinar los residuales, se pueden usar otras variables de control para determinar la convergencia. La selección de otras variables de control dependerá en gran medida del problema a analizar y de los resultados que se pretenden obtener. Otras variables de control pueden ser la fuerza de sustentación, el arrastre, el momento, entre muchas otras [40]. En algunas ocasiones, para que una solución converja es necesario modificar los ajustes de varios factores de relajación y dispositivos de aceleración de solución. No existen pautas sencillas para tomar estas decisiones, ya que dependen del problema en particular [39].

No existe una manera formal de estimar los errores introducidos por un diseño de malla inadecuado para un flujo general. La única forma de eliminar errores debido a la tosquedad de una malla es realizar un estudio de independencia de malla, que es un procedimiento de refinamiento sucesivo de una cuadrícula inicialmente tosca hasta que ciertos resultados clave no cambian. Entonces la simulación es independiente de la malla. El estudio de la independencia de malla constituye una parte esencial de todos los estudios de CFD de alta calidad [39].

Al final de una simulación, se debe juzgar si los resultados son "suficientemente buenos". Es imposible evaluar la validez de los modelos de física y química integrados en un código CFD. La CFD no es un sustituto de la experimentación, sino una herramienta adicional muy poderosa para resolver problemas. La

validación de un código CFD requiere información muy detallada sobre las condiciones de contorno de un problema y genera un gran volumen de resultados. Para validarlos de manera significativa es necesario producir datos experimentales de alcance similar [39].

En ocasiones es posible que no existan los medios para realizar el trabajo experimental o no se cuenten con datos experimentales para validar el estudio en CFD, en cuyo caso el usuario debe confiar en la experiencia previa, las comparaciones con soluciones analíticas de flujos similares y con los con datos de alta calidad de problemas estrechamente relacionados e informados en la literatura. El objetivo principal de cualquier ejercicio de CFD es una mejor comprensión del comportamiento de un sistema, pero dado que no existen garantías absolutas con respecto a la precisión de una simulación, se deben validar los resultados con frecuencia y de manera estricta [39].

Es imprescindible que se identifique cuidadosamente la física de flujo subyacente al problema a resolver. Para mayor claridad y facilidad de referencia, en la Fig. 3.4 se presenta un diagrama que destaca las principales características de flujo que se pueden encontrar para la simulación en CFD [40].

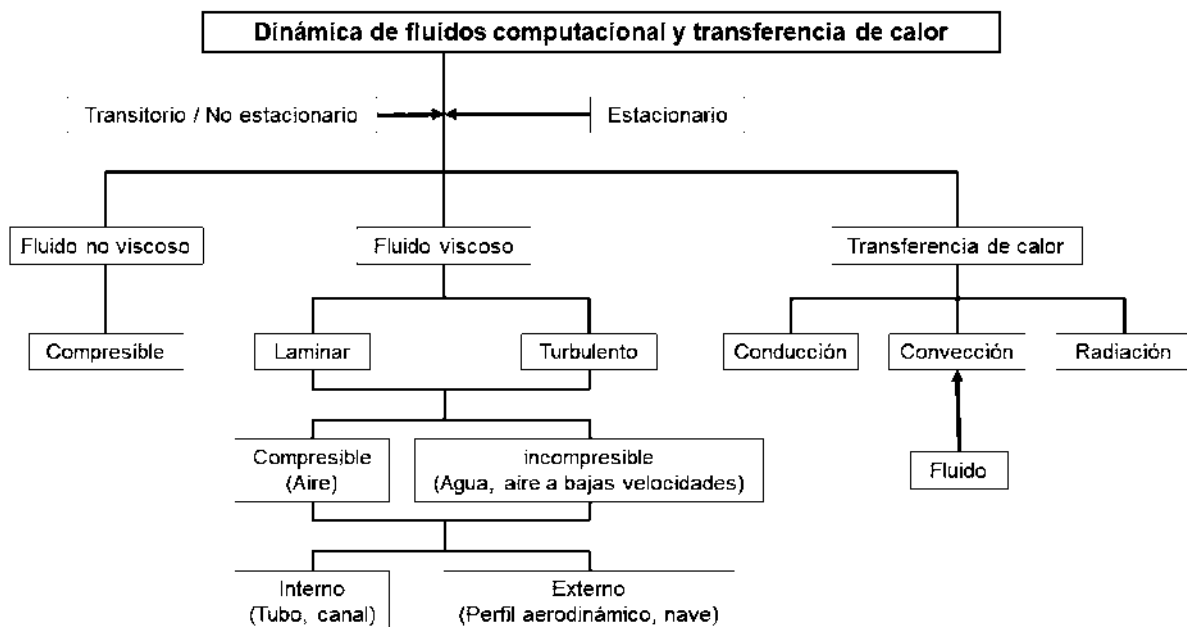


Fig. 3.4. Diagrama de las características a tener en consideración de la física en una simulación en CFD. Modificado de [40]

3.4 Flujo turbulento

Todos los flujos que se encuentran en la práctica de la ingeniería se vuelven inestables por encima de cierto número de Reynolds [43]. A números de Reynolds bajos, los flujos son laminares. A números de Reynolds más altos, se observa que

los flujos se vuelven turbulentos. La turbulencia desarrolla un estado de movimiento caótico y aleatorio en el que la velocidad y la presión cambian continuamente con el tiempo dentro de regiones sustanciales de flujo [39].

Los flujos en régimen laminar se describen mediante ecuaciones algebraicas; sin embargo, los flujos más complejos generalmente a excepción de casos muy simples de flujo solo se pueden abordar numéricamente con técnicas de CFD. Los cálculos de flujo para aplicaciones de ingeniería deben incluir descripciones generales y suficientemente precisas que capturen todos los efectos y las interacciones de la turbulencia [39]. La mayoría de los flujos de importancia para la ingeniería son turbulentos.

La turbulencia ocasiona la aparición de remolinos con una amplia gama de escalas de longitud y tiempo que interactúan de forma compleja y dinámica. Dada su importancia se dedica gran esfuerzo de investigación al desarrollo de métodos numéricos para capturar los efectos provocados por la turbulencia. Los métodos se pueden agrupar en las siguientes tres categorías [39]:

- **Modelos de turbulencia para ecuaciones de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS).** La atención se centra en el flujo promedio y los efectos de la turbulencia en las propiedades del flujo promedio. Antes de la aplicación de métodos numéricos, las ecuaciones de Navier-Stokes se promedian en el tiempo (o se promedian en conjunto en flujos con condiciones de contorno dependientes del tiempo). Aparecen términos adicionales en las ecuaciones de flujo promediadas en el tiempo debido a las interacciones entre varias fluctuaciones turbulentas. Estos términos adicionales se modelan con modelos de turbulencia. Los recursos informáticos requeridos para cálculos de flujo razonablemente precisos son modestos, por lo que este enfoque ha sido el pilar de los cálculos de flujo de ingeniería.
- **Large Eddy Simulation (LES).** Es una forma intermedia de cálculos de turbulencia que rastrea el comportamiento de los remolinos más grandes. El método implica el filtrado espacial de las ecuaciones inestables de Navier-Stokes antes de los cálculos, lo que pasa por los remolinos más grandes y rechaza los remolinos más pequeños. Los efectos sobre el flujo resuelto (flujo medio más grandes remolinos) debido a los remolinos más pequeños no resueltos se incluyen por medio del llamado modelo a escala de subcuadrícula. Las ecuaciones de flujo no estacionario deben resolverse, por lo que las demandas de recursos computacionales en términos de almacenamiento y volumen de cálculos son grandes.
- **Direct Numerical Simulation (DNS).** Las simulaciones calculan el flujo medio y todas las fluctuaciones de velocidad turbulenta. Las ecuaciones inestables de Navier-Stokes se resuelven en cuadrículas espaciales que son lo suficientemente finas como para resolver las escalas de longitud de Kolmogorov en las que tiene lugar la disipación de energía y con pasos de

tiempo lo suficientemente pequeños como para resolver el período de las fluctuaciones más rápidas. Estos cálculos son muy costosos en términos de recursos computacionales, por lo que el método no se utiliza para cálculos de flujo industrial.

Cada método tiene sus ventajas y desventajas, esta fuera del alcance de este trabajo analizarlas a detalle, se recomienda al lector remitirse a [39, 40].

3.4.1 Modelos de turbulencia

El modelado de la turbulencia es uno de los tres elementos clave en la Dinámica de Fluidos Computacional. Los otros dos elementos clave son la generación de malla y el desarrollo de algoritmos [42]. Modelar la turbulencia es una tarea ardua y delicada ya que se trata de un fenómeno extremadamente complicado.

Para poder calcular flujos turbulentos con las ecuaciones RANS es necesario usar modelos de turbulencia para predecir las tensiones de Reynolds y los términos de transporte escalar y cerrar el sistema de ecuaciones de flujo medio. Los modelos de turbulencia RANS más comunes se clasifican en función del número de ecuaciones de transporte adicionales que deben resolverse junto con las ecuaciones de flujo RANS [39].

Existe una gran cantidad de modelos de turbulencia, la elección de uno u otro dependerá en gran medida del problema a resolver en CFD. La gran mayoría de los estudios numéricos existentes sobre VAWT se basan en simulaciones Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS). Sin embargo, la precisión de las simulaciones de URANS depende en gran medida de la configuración computacional [44], entre los parámetros la elección del modelo de turbulencia.

- **Modelo de una ecuación Spalart-Allmaras (SA)** [45]. Se desarrolló originalmente para aplicaciones aeroespaciales de flujos limitados por paredes. Ha tenido éxito en el modelado de flujos sobre superficies aerodinámicas con gradientes de presión adversos. El modelo también se hizo popular para aplicaciones de turbo maquinaria. Resuelve una ecuación de transporte modelada para la viscosidad turbulenta cinemática, μ_t . La energía cinética turbulenta, k , se calcula indirectamente en función de una combinación de vorticidad y el tensor de velocidad de deformación.
- **Modelo de dos ecuaciones $k - \varepsilon$ RNG (RNG)** [46]. Tiene una forma similar al modelo $k - \varepsilon$ estándar, se deriva utilizando un método estadístico (teoría de renormalización de grupo) para mejorar las predicciones de flujo para flujos de remolino y deformación rápida. El modelo RNG calcula los números de Prandtl turbulentos de forma analítica, en lugar de utilizar valores constantes como en el modelo estándar. El modelo también tiene en cuenta

los efectos del número de Reynolds bajo en contraste con el modelo estándar, que es básicamente un modelo de número de Reynolds alto.

- **Modelo de dos ecuaciones $k - \varepsilon$ Realizable (RKE)** [47]. Está desarrollado para mejorar las predicciones de flujo del modelo $k - \varepsilon$ estándar para flujos con fuertes características de curvatura aerodinámica, rotación y vórtice. Incluye una ecuación de transporte modificada para la tasa de disipación, ε , y se deriva con base en la ecuación de transporte exacta de la fluctuación de vorticidad cuadrática media. La ecuación modificada hace que el modelo sea 'realizable', es decir, consistente con la física del flujo turbulento, lo que no es el caso para los modelos $k - \varepsilon$ estándar y $k - \varepsilon$ RNG. Además, se utiliza una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta.
- **Modelo de dos ecuaciones SST $k - \omega$ (SST)** [48]. A través de una función de mezcla, combina la precisión y robustez del modelo $k - \omega$ estándar [42] en la región cercana a la pared con la insensibilidad de flujo libre del modelo $k - \varepsilon$ estándar [49], en una formulación transformada, lejos de la pared. Además, el transporte del esfuerzo cortante turbulento se incluye en la formulación de la viscosidad turbulenta para mejorar las predicciones del inicio de la separación del flujo para flujos en superficies lisas con gradientes de presión adversos, como los flujos sobre superficies aerodinámicas.
- **Modelo de tres ecuaciones SST $k - \omega$ con modelo de transición de intermitencia adicional (SSTI)** [50]. Una ecuación de transporte adicional para la intermitencia, γ , se combina con las ecuaciones de transporte SST $k - \omega$ para predecir la transición del flujo de laminar a turbulento. El modelo SSTI es un modelo basado en correlación, lo que implica que se emplean correlaciones empíricas para el número de Reynolds de momento-espesor crítico, $Re_{\theta c}$, sensibilizarlo a la intensidad de turbulencia de corriente libre, Re , gradiente de presión, etc., para activar el modelo. De manera similar a los otros modelos de transición de ingeniería, el modelo solo es aplicable para el flujo limitado por la pared, por lo tanto, predecirá los flujos de corte libre como totalmente turbulentos.
- **Modelos de cuatro ecuaciones SST de transición (TSST)** [51, 52]. También conocido como modelo $\gamma - Re_{\theta}$, acopla dos ecuaciones de transporte adicionales, una para γ y otra para Re_{θ} , con las ecuaciones de transporte SST $k - \omega$ para permitir que el modelo SST $k - \omega$ prediga el inicio y la duración de la transición del flujo. La ecuación de intermitencia se usa para desencadenar la transición localmente, mientras que la ecuación de espesor de momento se emplea para capturar los efectos no locales del flujo para sensibilizar el modelo a la intensidad de la turbulencia de corriente libre y escala de longitud, Re , gradiente de presión, etc. El modelo de transición es un modelo basado en correlaciones, lo que implica que se emplean correlaciones empíricas para $Re_{\theta c}$ para activar el modelo o para reconocer los casos en los que la transición podría pasarse por alto u evitarse debido a

niveles de turbulencia muy altos o bajos. El modelo ha sido probado para muchas aplicaciones de ingeniería diferentes [53–56] y es capaz de predecir las transiciones naturales, inducidas por separación y de derivación para flujos delimitados por paredes. Similar a los otros modelos de transición de ingeniería, el modelo predecirá los flujos de corte libre como completamente turbulentos. Los limitadores de producción turbulenta se incluyen para evitar una predicción excesiva de energía cinética turbulenta en regiones de estancamiento.

Existen más modelos de turbulencia, de los presentados anteriormente; sin embargo, son algunos de los más populares empleados comúnmente en simulaciones de VAWT. Cada modelo de turbulencia tiene sus ventajas y desventajas, está fuera de este trabajo analizarlos a detalle, se recomienda al lector remitirse a [42, 57] para una descripción más detallada de la turbulencia y los modelos de turbulencia.

Ghasemian et al. [12], hacen una recapitulación de todos los aspectos a considerar en una simulación CFD para VAWT: modelos de turbulencia, tamaño del dominio, solidos del rotor, entre otros. Recapitulan 3 modelos turbulentos, sin hacer una comparación directa entre ellos.

Rezaeiha et al. [44] realizan un análisis comparativo de siete modelos de turbulencia (SA, RNG, RKA, SST, SSTI, KKL y TSST) de uso común para simulaciones CFD de VAWT. La validación de las pruebas se hace con base en tres conjuntos de experimentos para tres VAWT con diferentes características geométricas que operan en una amplia gama de condiciones operativas, desde pérdida dinámica hasta régimen óptimo y régimen de flujo altamente rotacional. Se centran en la estela de la turbina, el rendimiento de potencia de la turbina y la aerodinámica de los álabes. Se emplean simulaciones URANS de alta fidelidad con flujo incompresible. El extenso análisis revela una alta sensibilidad de los resultados de la simulación al modelo de turbulencia. Los resultados muestran que los modelos SA, RNG, RKA y KKL fallan reproduciendo el rendimiento aerodinámico de las VAWT. Solo los modelos, SST, SSTI y TSST son capaces de exhibir un acuerdo razonable con todos los conjuntos de datos experimentales. Recomiendan los modelos SSTI y TSST como modelos de elección, especialmente en el régimen de flujo de transición. Hasta el momento no hay otro trabajo aparte del de Rezaeiha et al. [44], que realicen una comparación tan extensa y directa de modelos de turbulencia para VAWT.

Para una comparación de modelos de turbulencia empleados en simulaciones de VAWT se recomienda ampliamente las referencias [12, 44].

3.5 Malla del dominio computacional.

La generación de la malla constituye uno de los pasos más importantes después de la creación de la geometría del dominio computacional [40]. Para realizar una simulación en CFD se requiere hacer una subdivisión del dominio en varios subdominios más pequeños que no se superpongan entre sí, esto da como resultado la generación de la malla o cuadrícula que está compuesta de celdas, elementos o volúmenes de control.

La malla es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico en el que se resolverá el problema [41]. El flujo del fluido se modela en cada una de las celdas, en donde se resuelve numéricamente para determinar los valores de las propiedades del flujo (velocidad, presión, temperatura y entre otros parámetros de transporte). Esto produce la solución CFD.

La precisión de una solución CFD se rige por el número de elementos en la malla. En general, un gran número de celdas conduce a una solución precisa; sin embargo, la precisión de una solución depende en gran medida por la calidad de los elementos y de las limitaciones impuestas por los costos computacionales y los tiempos de cálculo, que aumentan conforme aumenta el número de elementos [40]. Por lo anterior la malla debe generarse buscando la mejor relación entre precisión y el costo computacional (tiempo) de la solución.

3.5.1 Malla estructurada.

Las mallas regulares o mallas estructuradas (structured grid) consisten en familias de líneas de cuadrícula con la propiedad de que los miembros de una sola familia no se cruzan entre sí y se cruzan con cada miembro de las otras familias solo una vez, ver Fig. 3.5 y Fig. 3.6. Esto permite numerar consecutivamente las líneas de un determinado conjunto. La posición de cualquier punto de cuadrícula (o volumen de control) dentro del dominio se identifica de forma única mediante un conjunto de dos (en 2D) o tres (en 3D) índices, (i, j, k) [41].

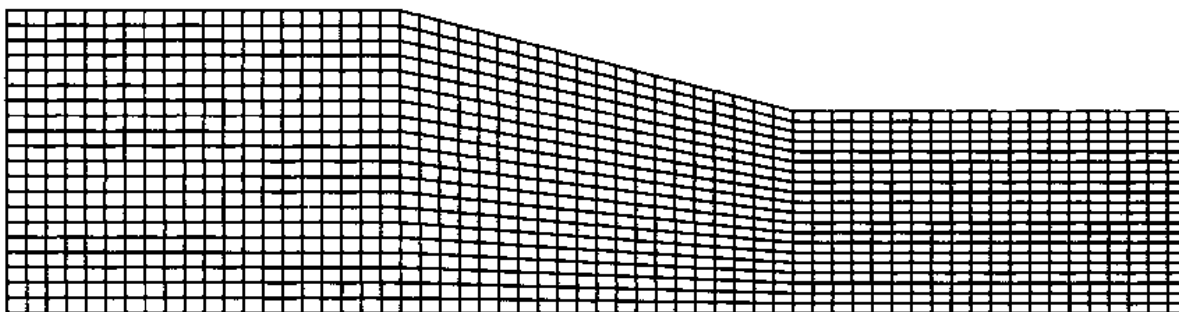


Fig. 3.5. Ejemplo de malla estructurada. Obtenido de [40].

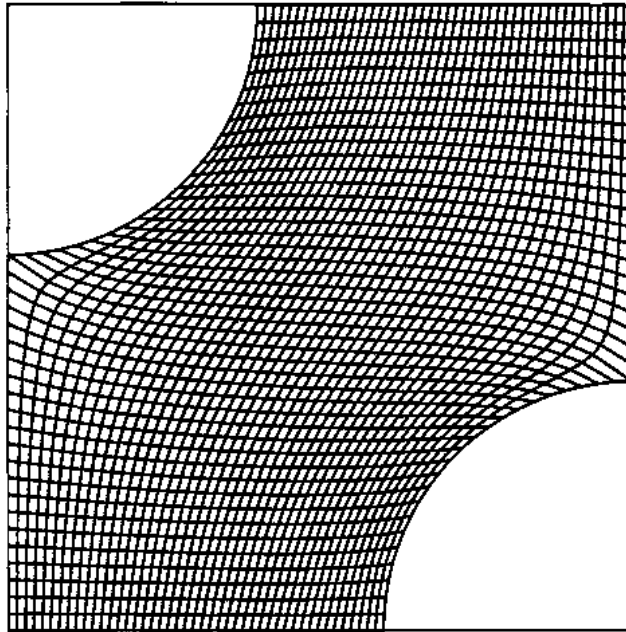


Fig. 3.6. Malla estructurada en H. Obtenida de [40].

La malla estructurada es la distribución más simple, ya que es equivalente a una cuadrícula cartesiana [40]. Cada punto tiene cuatro vecinos más cercanos en dos dimensiones y seis en tres dimensiones.

La conectividad de estas mallas simplifica la programación y la matriz del sistema de ecuaciones algebraicas. Al tener forma regular facilita la gestión de datos, que facilita la programación y el desarrollo de una técnica de solución.

La desventaja de las mallas estructuradas es que para geometrías más complejas aumenta la no ortogonalidad, disminuyendo la calidad de los elementos lo que puede causar soluciones. Por ello solo se pueden usar para dominios de solución geoméricamente simples [40]. Otra desventaja es que puede ser difícil controlar la distribución de los puntos de la cuadrícula: la concentración de puntos en una región por razones de precisión produce un espacio innecesariamente pequeño, ver Fig. 3.6 y Fig. 3.7, en otras partes del dominio de la solución y un desperdicio de recursos. Este problema se exagera en los problemas 3D. Las celdas largas y delgadas también pueden afectar negativamente a la convergencia [41].

3.5.2 Malla no estructurada

Es el tipo de malla más flexible, puede ajustarse a cualquier dominio de solución y son las más recomendadas para las geometrías complejas [41]. Los elementos pueden tener cualquier forma; sin embargo, las formas más típicas de un elemento no estructurado son el triángulo en dos dimensiones o el tetraedro en tres dimensiones [40]. No existe una restricción en el número de elementos vecinos o nodos.

Las mallas no estructuradas son adecuadas para manejar geometrías de formas arbitrarias, especialmente para dominios que tienen límites de alta curvatura [40, 41]. La Fig. 3.7 ilustra el interior de un cilindro circular que se ha llenado a través de las rejillas estructuradas y no estructuradas.

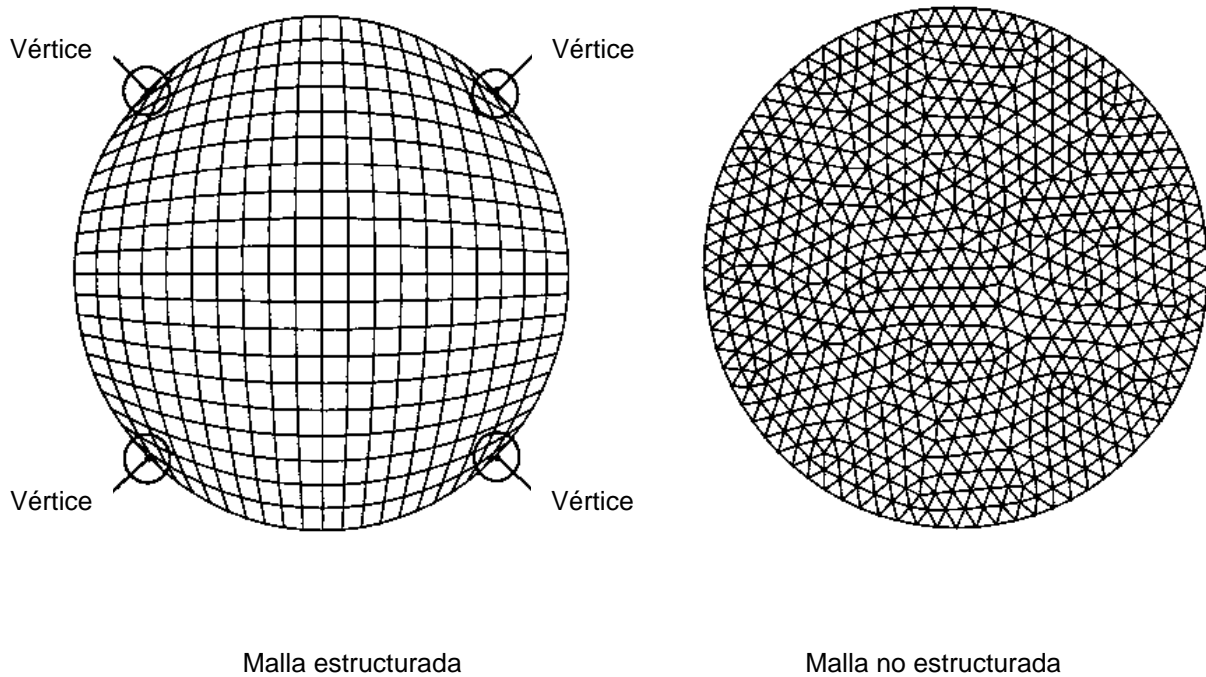


Fig. 3.7. Malla estructurada y no estructurada para un círculo. Obtenido de [40].

La ventaja de la flexibilidad se compensa con la desventaja de la irregularidad de la estructura de datos. Una celda elemental puede tener un número arbitrario de celdas vecinas adjuntas, lo que complica enormemente el tratamiento y la conexión de datos. La matriz del sistema de ecuaciones algebraicas ya no tiene una estructura diagonal [41].

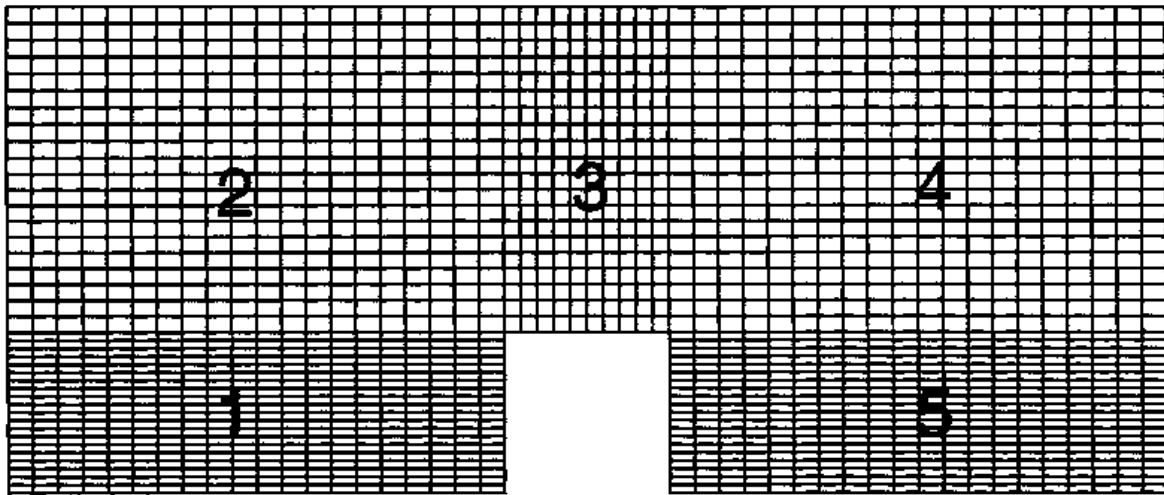
Las celdas triangulares (bidimensionales) o tetraédricas (tridimensionales) en comparación con las celdas cuadriláteras (bidimensionales) o hexaédricas (tridimensionales) generalmente son ineficaces para resolver las capas límite de la pared [40]. En la mayoría de los casos, la malla produce celdas muy largas, delgadas, triangulares o tetraédricas adyacentes a los límites de la pared, lo que crea problemas importantes en la aproximación de los flujos de difusión.

Otra desventaja en relación con el tratamiento de datos y la conectividad de las celdas elementales es el requisito de algoritmos de solución más complejos para resolver las variables del campo de flujo. Los solucionadores de los sistemas de ecuaciones algebraicas suelen ser más lentos que los de las cuadrículas estructuradas. Esto resulta en mayores tiempos computacionales para obtener una solución [40].

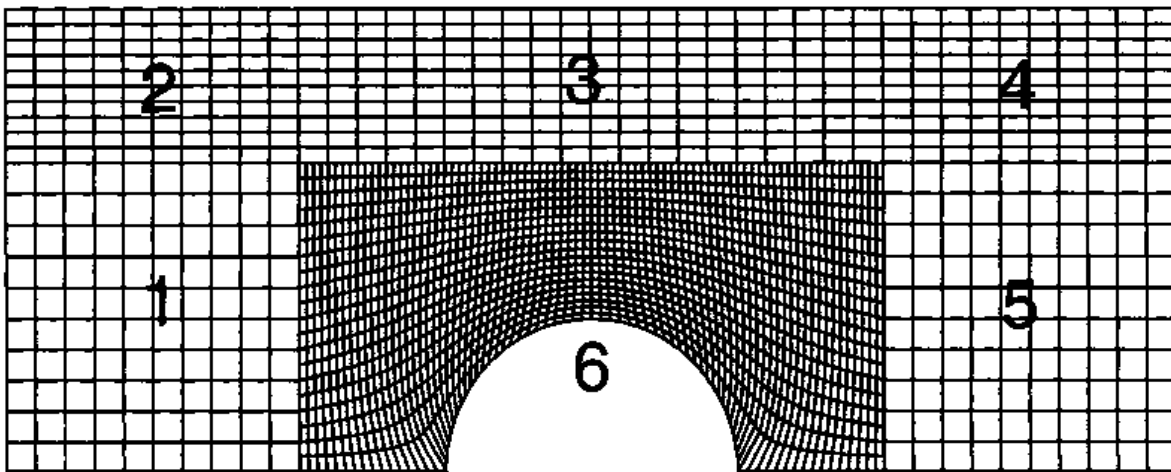
3.5.3 Malla estructurada en bloques

Las mallas estructuradas en bloques también son llamadas mallas compuestas o mallas multibloque (block-structured grids, composite o chimera grids) son un caso especial de las mallas estructuradas [40].

En una malla estructurada en bloques, hay una subdivisión de dos o más niveles del dominio de la solución, también puede verse como un ensamble de varios bloques de mallas unidos entre sí [41]. Las uniones de cada cara de bloques adyacentes pueden ser regulares, es decir, con caras de celda coincidentes o arbitrarias, es decir, con *interFaces* de celda que no coinciden [40], ver Fig. 3.8.



Caras de elementos coincidentes



Caras de elementos no coincidentes

Fig. 3.8. Malla estructurada en bloques con caras de elementos coincidentes y no coincidentes. Obtenido de [40].

La información entre los diferentes bloques se logra a través de la interpolación. Las ventajas de emplear dichas cuadrículas son que los dominios complejos se tratan con facilidad y pueden emplearse especialmente para seguir cuerpos en movimiento en entornos estáticos [41].

Las desventajas son que la conservación generalmente no se mantiene ni se aplica en los límites de los bloques, y el proceso de interpolación puede introducir errores o problemas de convergencia si la solución exhibe una fuerte variación cerca de la interfaz.

Como práctica común, la calidad de la cuadrícula generalmente se mejora mediante la colocación de elementos cuadriláteros o hexaédricos en la resolución de capas límite cerca de paredes sólidas, mientras que los elementos triangulares o tetraédricos se generan para el resto del dominio de flujo. Esto generalmente conduce tanto a soluciones precisas como a una mejor convergencia para los métodos de solución numérica [40]. La Fig. 3.9 ilustra un ejemplo de una cuadrícula que consta de elementos cuadriláteros cerca de las paredes y elementos triangulares para el resto del dominio.

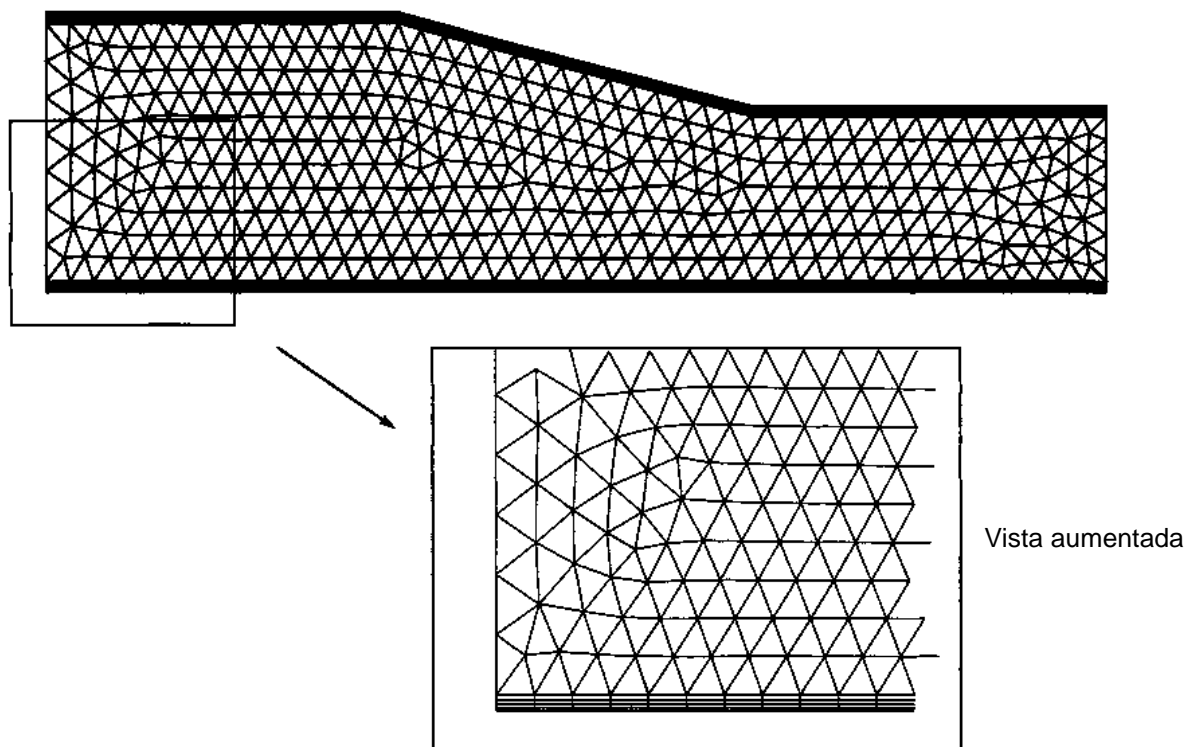


Fig. 3.9. Malla que consta de elementos estructurados cerca de las paredes y elementos no estructurados en la parte restante del dominio de flujo. Obtenida de [40].

3.6 Cálculos de capa límite

El estudio del rendimiento del rotor para las VAWT se basa en la obtención del valor del par, torque o momento en las paredes de los álabes del rotor, con lo cual se puede obtener el C_p de la turbina eólica. El valor del torque se calcula sobre la superficie del álabes del rotor. Se impone una condición de no deslizamiento (no slip condition) en las paredes de los álabes, lo que contribuye a la formación de una capa límite y crea la necesidad de un tratamiento preciso en la superficie de los álabes. Esto requiere un mallado lo suficientemente fino cerca de las paredes, también denominado mallado de capa límite [58].

La malla de la capa límite se puede preparar automáticamente mediante el software de mallado, la precisión depende de los valores de entrada proporcionados al software antes de ejecutar el proceso de mallado. La distancia del primer nodo de malla a la superficie del álabes del rotor es un valor de entrada importante, que se calcula cuidadosamente, ya que la idoneidad de la malla generada para la simulación depende de este parámetro. y^+ es un parámetro adecuado para estimar el valor correcto de la distancia del primer nodo a la pared del álabes [58]. La distancia del primer nodo a la pared, y^+ , es la proporción entre las influencia turbulenta y laminar en una celda [59].

No es posible conocer el valor exacto de y^+ antes de realizar la simulación, ya que depende del perfil de velocidad real sobre la pared, y este solo se conoce hasta finalizar la simulación. Debido a tal problemática el valor de la distancia del primer nodo se estima para una placa plana utilizando los parámetros de flujo. Los valores más bajos de y^+ indican que el primer nodo está en la subcapa laminar, lo que sugiere ajustar el perfil de velocidad lineal y los valores más altos de y^+ indican el uso de la ley logarítmica [58].

En el presente trabajo se aplica un $y^+ \approx 1$ para obtener mejores soluciones cercanas a la pared, como lo demuestran [40, 59–67]. La distancia del primer nodo desde la pared se calcular despejando Δy_p de la Ec. 3.1, obtenida de [39].

$$y^+ = \frac{\Delta y_p}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

3.7 Flujo estacionario y no estacionario

En CFD es común el uso de nomenclatura en idioma inglés para flujo estacionario el equivalente es Steady Flow y para flujo no estacionario el equivalente es Unsteady Flow. En los flujos estacionarios los parámetros de flujo, como la velocidad, la presión y la densidad para cualquier punto son independientes del tiempo, permaneciendo constantes. Aclarando que las propiedades pueden diferir

de un punto a otro, pero no cambian para un mismo punto con respecto al tiempo [68].

El flujo estacionario ideal solo se presenta en el flujo laminar. En la práctica siempre hay ligeras variaciones en las propiedades del flujo. En el flujo turbulento, hay fluctuaciones continuas en la velocidad y la presión en cada punto. Pero si esta tasa de cambio de presión y velocidad son iguales en ambos lados de un valor promedio constante, el flujo se puede considerar como estacionario. Se le denomina flujo estacionario medio.

En un flujo no estacionario o inestable los parámetros del flujo en cualquier punto dependen del tiempo, es decir, van cambiando [68]. El flujo inestable es un fenómeno transitorio. Puede ser que con el tiempo se convierta en flujo constante o cero. Por ejemplo, cuando se cierra una válvula en el extremo de descarga de la tubería, provocando que la velocidad en la tubería disminuya a cero; sin embargo, mientras tanto, habrá fluctuaciones tanto en la velocidad como en la presión dentro de la tubería.

El flujo inestable también puede incluir un movimiento periódico como el de las olas de las playas. La diferencia entre estos casos y el flujo estacionario medio es que hay mucha desviación de la media y la escala de tiempo también es mucho más larga [69].

En CFD al calcular flujos no estacionarios, se tiene una cuarta dirección de coordenadas a considerar: el tiempo. Al igual que con las coordenadas espaciales, el tiempo debe discretizarse. La principal diferencia entre las coordenadas de espacio y tiempo radica en la dirección de la influencia: mientras que una fuerza en cualquier lugar del espacio puede influir en el flujo en cualquier otro lugar, la fuerza en un instante dado afectará el flujo solo en el futuro; no hay influencia en el pasado [41].

En las simulaciones no estacionarias no se pueden imponer condiciones a la solución en ningún momento después del inicio del cálculo, únicamente se pueden imponer las condiciones de frontera [41]. Para ser fieles a la naturaleza del tiempo, esencialmente todos los métodos de solución avanzan en el tiempo paso a paso o en forma de "marcha".

3.8 Malla en movimiento

En los softwares CFD por defecto las ecuaciones de flujo de fluidos y transferencia de calor se resuelven en un marco de referencia estacionario (o inercial). Sin embargo, hay muchos problemas en los que es ventajoso resolver las ecuaciones en un marco de referencia móvil (o no inercial). Dichos problemas generalmente involucran partes móviles (como palas giratorias, impulsores, álabes, entre otros), y lo que interesa es el flujo alrededor de estas partes móviles. En la mayoría de los

casos, las partes móviles hacen que el problema sea inestable cuando se resuelve desde el marco estacionario. Sin embargo, con un marco de referencia móvil, el flujo alrededor de la parte móvil puede (con ciertas restricciones) modelarse como un problema de estado estacionario con respecto al marco móvil [70].

Muchas aplicaciones de ingeniería requieren el uso de mallas móviles. Un ejemplo importante es la interacción rotor-estator, que es bastante común en las turbomáquinas y las mezcladoras: Se trata de dos mallas (o más), una malla está unida al estator y no se mueve, mientras que la otra malla está unida al rotor y le permite moverse libremente en el tiempo [40]. Existe una interfaz entre ambas mallas.

Hay varios enfoques para las mallas en movimiento. Si las mallas coinciden en la interfaz en el momento inicial, se puede permitir que la parte giratoria de la rejilla se mueva mientras se mantienen los puntos límite "pegados" a la rejilla fija, hasta que la deformación se vuelve sustancial; luego, los puntos límite "saltan" una celda hacia adelante y permanecen pegados a la nueva ubicación por un tiempo. Este es un tipo de enfoque de malla tipo "*clic*" [41].

Otra posibilidad es dejar que la malla móvil se "deslice" a lo largo de la interfaz sin deformarse. En este caso, las cuadrículas no coinciden en la interfaz, por lo que algunos elementos tienen más vecinos que otros. Sin embargo, esta situación es completamente análoga a la que se encuentra en las redes estructuradas en bloques con caras que no coinciden; la única diferencia es que la conectividad de la celda cambia con el tiempo y debe restablecerse después de cada paso de tiempo [41].

Otra alternativa es que la región de superposición entre ambas mallas cambie con el tiempo y la relación entre ambas debe restablecerse después de cada paso de tiempo, es decir, después de cada paso de tiempo se realiza un nuevo mallado. La malla fija puede cubrir todo el "entorno" en el que se mueve el cuerpo [41].

Las mismas ecuaciones y métodos de discretización se aplican tanto a la malla fija como a la móvil. Las cuadrículas no tienen que coincidir en la interfaz; esto permite flexibilidad en el empleo de diferentes tipos de mallas y/o lograr la finura deseada en los dominios respectivos. Exceptuando las dificultades para asegurar la conservación exacta de las propiedades de flujo, no hay limitaciones en la aplicabilidad de las mallas móviles [40].

3.8.1 Modelado de flujos con marcos de referencia móviles

Cuando se activa un marco de referencia móvil, las ecuaciones de movimiento se modifican para incorporar los términos de aceleración adicionales que ocurren debido a la transformación del marco de referencia estacionario al móvil. Al resolver estas ecuaciones en estado estacionario, se puede modelar el flujo alrededor de las partes móviles [71].

Para muchos problemas, puede ser posible referenciar todo el dominio computacional a un solo marco de referencia en movimiento. Esto se conoce como el enfoque del marco de referencia único (o SRF, Single Reference Frame), también existen otros enfoques en los que se requieren múltiples marcos de referencia (o MRF, Multiple Reference Frame). Sin embargo, si la interacción no estacionaria del flujo entre las partes fijas y móviles es importante, puede emplear el enfoque de malla deslizante (sliding mesh) para capturar el comportamiento transitorio del flujo [72].

En la técnica de marco de referencia único, se cuentan con dos mallas unidas mediante una interfaz. Ambas mallas son estáticas, pero las ecuaciones gobernantes se modifican para simular el efecto del movimiento, otorgando una solución aproximada al comportamiento que tendría. Se puede utilizar la técnica de simulación SRF o MRF de estado estable para obtener una solución inicial para una simulación de malla deslizante transitoria en una turbomáquina [70].

3.8.2 Modelado de flujos con malla deslizante

La técnica de malla deslizante (o Sliding Mesh) permite configurar un problema en el que las zonas o mallas separadas se mueven entre sí. El movimiento puede ser de traslación o de rotación. El movimiento relativo de los componentes estacionarios y móviles (por ejemplo, en una máquina giratoria) dará lugar a interacciones transitorias [70].

En la técnica de malla deslizante, se cuenta con dos o más mallas, en la que todos los límites y las celdas de una zona de malla dada se mueven juntas en un movimiento de cuerpo rígido. En esta situación, los nodos de la malla se mueven en el espacio (en relación con las coordenadas globales fijas), pero las celdas definidas por los nodos no se deforman. Las zonas de malla que se mueven adyacentes entre sí se pueden vincular a través de una o más *interFaces*. Siempre que las *interFaces* permanezcan en contacto entre sí (es decir, se “deslicen” a lo largo de un límite de superposición común en la interfaz), las *interFaces* se pueden actualizar a medida que se mueven las mallas y el fluido puede pasar de una zona a otra [71].

La solución transitoria que se busca en una simulación de malla deslizante es periódica en el tiempo. Es decir, la solución transitoria se repite con un período relacionado con las velocidades de las mallas en movimiento [70].

Cuando se desea una solución precisa en el tiempo (en lugar de una solución promediada en el tiempo) para la interacción rotor-estator, se debe usar la malla deslizante para calcular el campo de flujo no estacionario, ya que es el método más preciso para simular flujos en múltiples marcos de referencia en movimiento, pero también es más exigente desde el punto de vista computacional que los marcos de referencia [70].

Para problemas en los que no se deforma el cuerpo o la malla, se recomienda el modelo de malla deslizante, ya que es más simple y eficiente [70].

3.8.3 Modelado de flujos con mallas dinámicas.

La técnica de malla dinámica se puede usar para modelar flujos donde la forma del dominio cambia con el tiempo debido al movimiento en los límites del dominio. La malla dinámica permite mover los límites de una zona de celda en relación con otros límites de la zona y ajustar la malla en consecuencia [71].

El movimiento de los límites puede ser rígido, como los pistones que se mueven dentro de un cilindro de motor o una aleta que se desvía en el ala de un avión, o deformables, como la pared elástica de un globo durante el inflado o una pared arterial flexible que responde al pulso de presión del corazón [70]. En cualquier caso, los nodos que definen las celdas en el dominio deben actualizarse en función del tiempo y, por lo tanto, las soluciones de malla dinámica son inherentemente inestables. Las ecuaciones gobernantes que describen el movimiento del fluido son diferentes de las que se usan para mover marcos de referencia [71].

La malla dinámica debe usarse si la malla se está deformando o si el movimiento de la malla es una función de la solución, también es mucho más demandante en términos computacionales en comparación con las técnicas de marcos de referencia móviles y la técnica de malla deslizante [70].

Capítulo IV. Procedimiento para simulación en CFD

En el presente capítulo se describe a grandes rasgos el proceso de trabajo. Se aplica la metodología presentada en el Capítulo III, para la solución de problemas con CFD esquematizada en la Fig. 3.3. Para mayores detalles en algunos aspectos como la construcción del rotor, el mallado y la configuración del solucionador se pueden consultar el Anexo A, Anexo B y Anexo C.

Los temas que se abordan en el capítulo son: creación de la geometría; generación de la malla; selección de propiedades físicas y propiedades de los fluidos; especificación de condiciones de frontera e inicialización, control de la solución y supervisión de la convergencia.

El rango de operación de la turbina es de 2.5m/s a 10m/s, se realizan 6 simulaciones usando la técnica de Sliding Mesh a diferentes velocidades para abarcar el rango operativo (2.5m/s, 4m/s, 5.5m/s, 7m/s, 8.5m/s y 10m/s) y poder estimar el C_p y potencia generada por la turbina. En la técnica de simulación empleada se usan dos mallas “rotor” y “estator”. En la malla del rotor se encuentra la geometría del rotor de la turbina eólica y es la que tendrá movimiento a una determinada velocidad angular en función de la velocidad del viento. La malla del estator es estática.

Se elaboran tres mallas para el rotor, tres mallas para el estator y se evalúan distintas combinaciones para realizar el estudio de independencia de malla para la velocidad de 7m/s, la combinación de malla obtenida a partir del estudio se emplea para el resto de las simulaciones de las velocidades faltantes. Primeramente, se evalúa la combinación de las tres mallas del rotor con la malla más densa y con mejor calidad del estator. Habiendo seleccionado la malla del rotor se procede a combinar y evaluar con el resto de las mallas del estator. Finalmente, se selecciona la combinación óptima de malla de estator y rotor.

Debido a la falta de datos experimentales con los cuales poder comparar los resultados de la simulación, el proceso de trabajo se respalda con base en la literatura especializada, para temas referentes al uso del software se consultaron los manuales de usuario [70–76] y material elaborado por la empresa del software para el empleo de Moving Reference Frames y Sliding Mesh [77]. Así mismo, se añade al proceso de trabajo la validación de la configuración del solucionador de CFD mediante la simulación de una turbina eólica reportada en la literatura que contara con simulación [66] y datos experimentales [78].

4.1 Creación de la geometría

CIATEQ diseñó y proporcionó la geometría en formato IGS de la turbina eólica de eje vertical, así como algunos parámetros de diseño. La turbina consta de dos rotores: un rotor H y un rotor Savonius, se trata de un diseño de turbina híbrida H-Savonius, la Fig. 4.1 muestra la geometría recibida con todos los detalles.

El rotor H está compuesto por tres álabes rectos con un perfil asimétrico NACA2415 distribuidos uniformemente, tiene una altura de 2m y un diámetro de 2.4m. El rotor tipo Savonius cuenta con un total de 12 álabes semicirculares, distribuidos en dos niveles, cada nivel tiene 6 álabes, ver Fig. 4.1, está ubicado en el centro del rotor, tiene una altura de 1m y un diámetro de 96cm.

En el Capítulo III se mencionó que en la mayoría de las simulaciones de CFD se necesitan hacer suposiciones y/o simplificaciones para reducir la complejidad a un nivel manejable y que al mismo tiempo se conserven las características principales del problema. En las simulaciones de VAWT con CFD, es una práctica habitual realizar una primera simplificación quitando todos los elementos de soporte que no contribuyen o afectan en gran medida a la aerodinámica del rotor de la turbina; ejemplos de esto se puede encontrar en la literatura [12, 30, 33, 44, 59, 65, 66, 79-83]. A la geometría de la turbina eólica facilitada por CIATEQ se realiza la simplificación anteriormente mencionada, dejando únicamente los 12 álabes de la turbina Savonius y los 3 álabes de la turbina Darrieus.

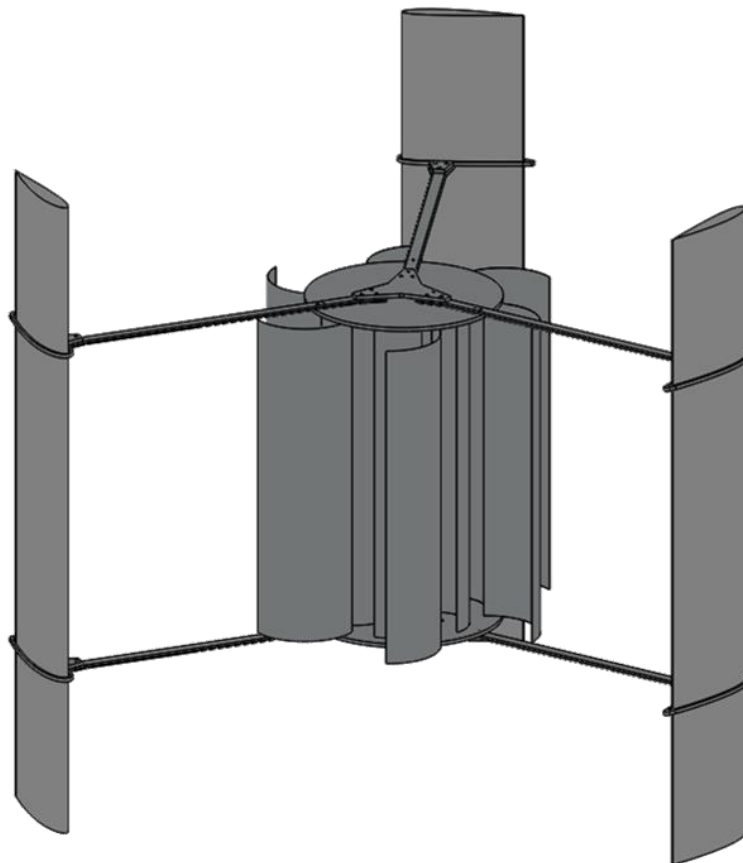


Fig. 4.1. Vista dimétrica del rotor de la turbina H-Savonius con los elementos de soporte y sujeción

La simplificación se realiza para ahorrar recursos computacionales ya que los detalles innecesarios de la geometría como los pernos, tuercas y elementos de soporte, dificultan la simulación al exigir mayor capacidad de cómputo tanto para el

proceso de simulación como para el proceso de mallado, complicando los cálculos y aumentando el tiempo de simulación. La simplificación realizada al rotor se muestra en la Fig. 4.2.

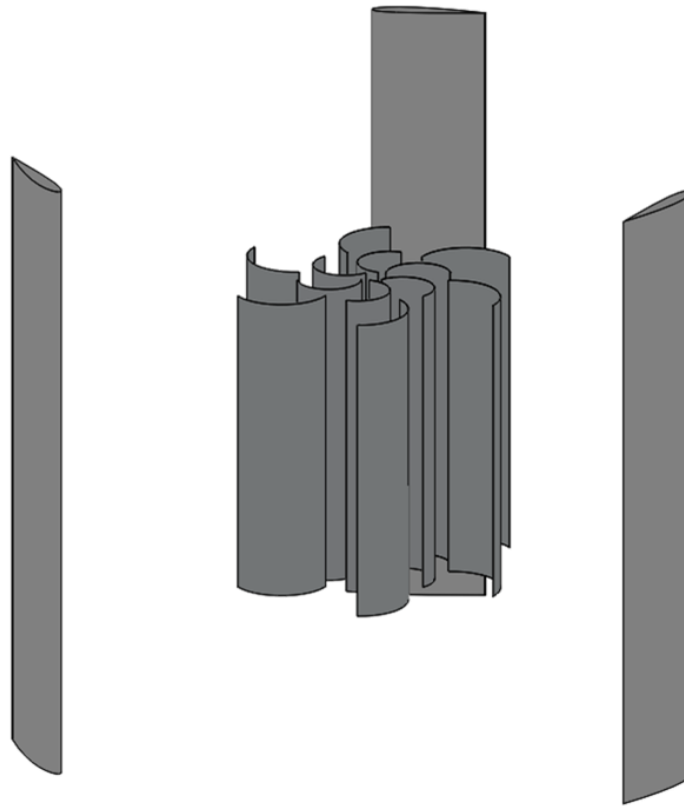


Fig. 4.2. Vista dimétrica del rotor H-Savonius sin los elementos de soporte y sujeción.

Es necesario decidir si el modelado y simulación de la turbina se realiza en dos o tres dimensiones. En cualquiera de los dos escenarios, 3D o 2D, es necesario tener en consideración los factores más importantes para una simulación de VAWT en los que se encuentran la discretización del espacio, la extensión del dominio computacional, las condiciones de frontera y el modelado de turbulencia. El tamaño del paso de tiempo es otro parámetro crucial en los flujos no estacionarios y es de particular relevancia para el análisis VAWT, debido a su aerodinámica no estacionaria inherente [67].

El modelado en 3D demanda una gran cantidad de recursos computacionales y tiempo de simulación que hace que estos modelos sean casi prohibitivos para fines de diseño e históricamente ha llevado a los investigadores a emplear modelos de 2D [67].

Desde la perspectiva técnica, los modelos 2D permiten capturar los efectos físicos relevantes de la dinámica de fluidos; sin embargo, estos modelos tienden a sobrestimar la potencia generada por la turbina y su coeficiente de potencia, C_p [67]. Esto se debe a diversos factores como vórtices de arrastre, pérdidas de punta,

divergencia de flujo a lo largo del tramo debido al efecto de ducto, entre muchos otros.

Se han publicado pocos estudios en 3D en comparación con 2D sobre simulaciones de VAWT. Construir un modelo de flujo 3D factible y confiable de VAWT requiere considerar varios parámetros numéricos. Así mismo, las mallas computacionales empleadas en la mayoría de los estudios en 3D parecen bastante toscas si se comparan con sus contrapartes en 2D, esto debido a las restricciones por el costo computacional.

Por ejemplo, la malla empleada por Untaroiu et al. [83] para simular una turbina H de dos álabes es de casi 8 millones de elementos (7.9×10^6 elementos) con un $y^+ \approx 6$, la turbina que analizaron fue una H-Darrieus de 2 álabes con perfil NACA0018 con una cuerda de 6cm, altura de 1m y diámetro de 1m. . En las simulaciones de VAWT de 2D se tiende a emplear una malla con un y^+ que varía entre 1 y 2 [40, 59–67].

Otro ejemplo lo proporciona Balduzzi et al. [84] al emplear una malla con un $y^+ \approx 1$ de 64 millones de elementos para simular la mitad de un solo álabe de una turbina H-Darrieus utilizando más de 16 000 núcleos de procesador en un clúster IBM BG/Q. La simulación constó de 12 revoluciones y duró 653 horas (27.2 días). Así mismo estiman que para asegurar un nivel adecuado de refinamiento espacial se necesitaría una malla con más de 100 millones de elementos para modelar el rotor de la turbina completa. La turbina que analizaron fue una H-Darrieus de 3 álabes con perfil NACA0021 con una cuerda de 8.58cm, altura de 1.5m y diámetro de 1.03m.

Por lo anterior y para poder proporcionar datos confiables a CIATEQ que le permitan corroborar el diseño de su turbina se decide hacer la simulación en 2D. Sin embargo, la turbina híbrida no mantiene la misma sección a lo largo del eje de rotación, debido a las distintas alturas de los rotores, en el rotor H la altura es de 2m mientras que en el rotor Savonius es de 1m. Tomando un plano perpendicular al eje de rotación y moviéndolo de abajo hacia arriba, se observa que al inicio en el plano solo se encuentran los tres álabes de la turbina H, conforme se avanza aparecen los 12 álabes de la turbina Savonius, teniendo en este punto los álabes de la turbina H y la turbina Savonius, conforme se sigue avanzando desaparecen los álabes de la turbina Savonius quedando únicamente los álabes de la turbina H, ver Fig. 4.3.

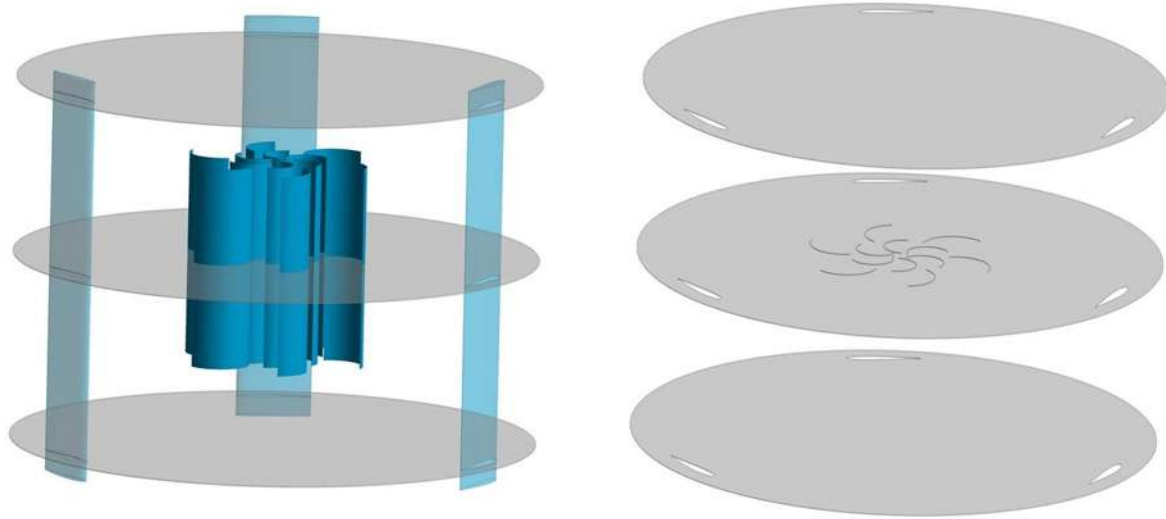


Fig. 4.3. Planos perpendiculares al eje de rotación de la turbina híbrida.

El plano superior e inferior que aparecen en la Fig. 4.3 son iguales, corresponden a la turbina H, el plano central corresponde a la turbina híbrida. Para calcular la potencia y el C_p de la turbina híbrida se emplearán dos simulaciones. La primera simula la turbina híbrida, sección central, en 2D bajo la suposición de que la altura de ambos rotores (H y Savonius) es de 1m. La segunda simulación correspondiente a la parte restante de la turbina (0.5m del rotor H superior a la sección de la turbina híbrida y 0.5m del rotor H inferior a la sección de la turbina híbrida) se aproxima mediante la simulación en 2D de un rotor H con una altura de 1m, ver Fig. 4.4.

A la geometría simplificada de la Fig. 4.2, se le realiza ingeniería inversa para determinar las medidas de sus componentes y posteriormente se modela en dos dimensiones en ANSYS DesignModeler.

Los dominios computacionales se realizan en dos archivos independientes, uno para el rotor y otro para el estator. Para construir el dominio del rotor, se trazan los álabes del rotor tipo Savonius y después se hace uso de la herramienta “*Surfaces From Sketch*”, para el rotor H se importa el perfil NACA2415 y se usa la herramienta “*Surface From Edges*”. Ver Fig. 4.5. Se hace un nuevo *Sketch* con la geometría de una circunferencia con centro en el origen y después se hace uso de la herramienta “*Surfaces From Sketch*”. Finalmente se usan operaciones booleanas para obtener el dominio computacional final del rotor, restándole a la circunferencia los álabes de la turbina híbrida. Todo con la finalidad de no tener espesor y poder realizar la simulación en 2D, ver Fig. 4.6.

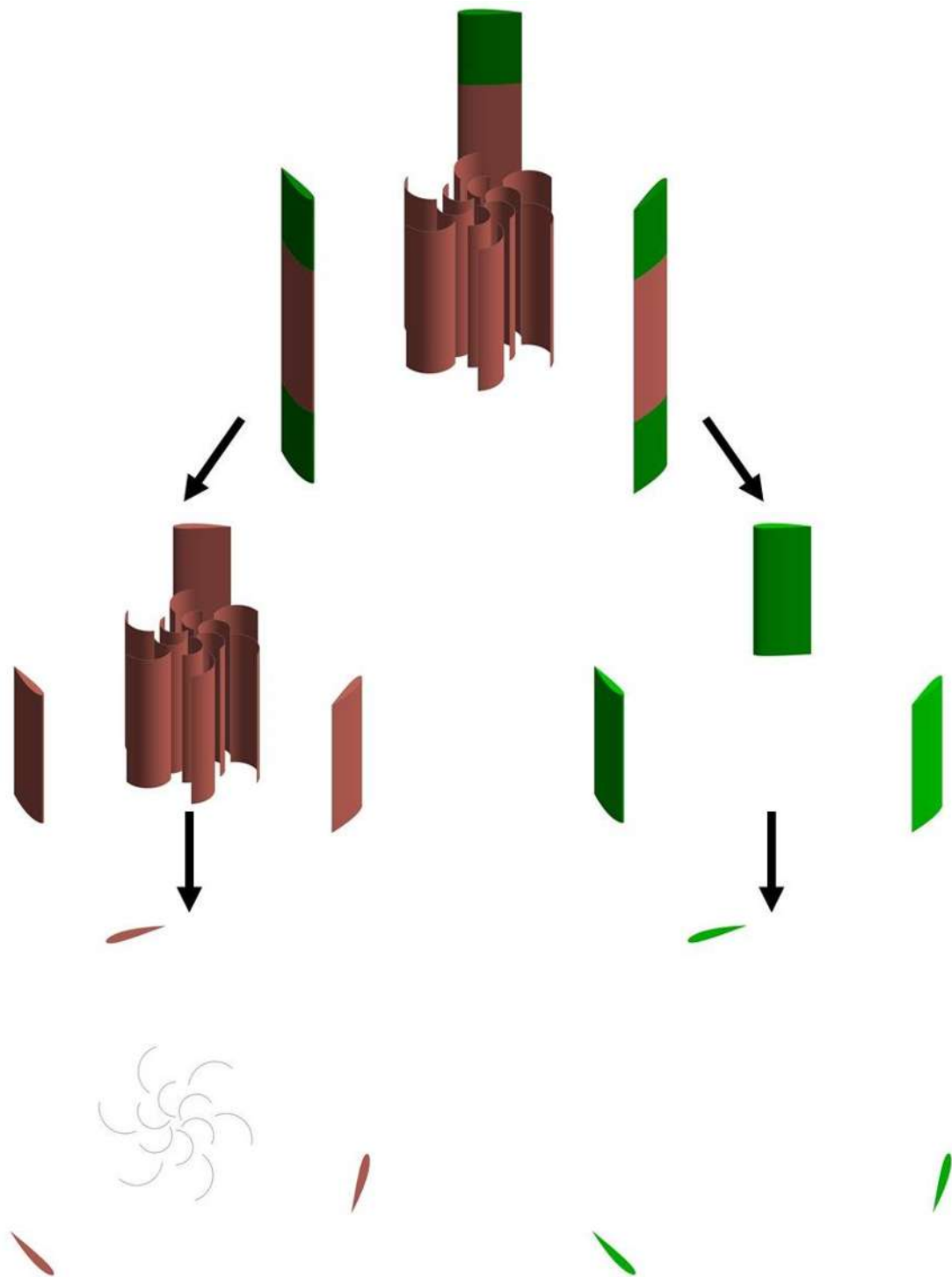


Fig. 4.4. Proceso de simplificación para la simulación de la turbina híbrida en 2D.

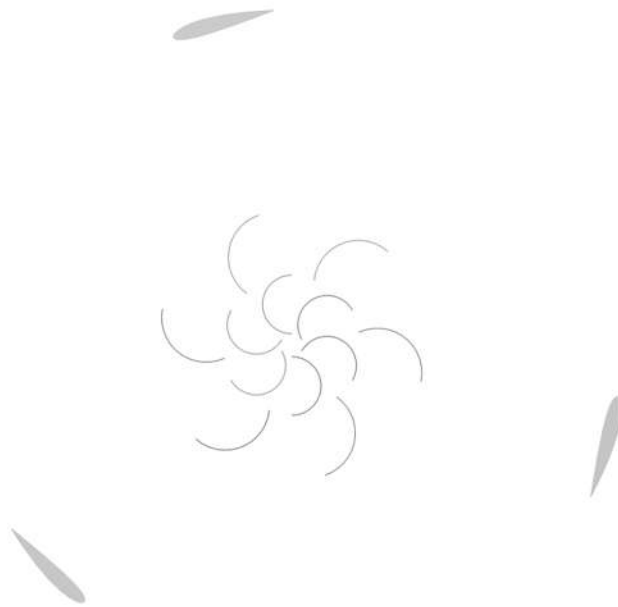


Fig. 4.5. Geometría del rotor simplificado en 2D creada con ANSYS DesignModeler.

Para el estator se hace un rectángulo con un hueco circular. En lo referente al dimensionamiento de los volúmenes se realizó una amplia búsqueda en la literatura [12, 30, 33, 44, 59, 65, 66, 79–83], y con base en las recomendaciones de Rezaeiha et al. [66] se dimensionan los volúmenes.



Fig. 4.6. Dominio computacional del rotor creada con ANSYS DesignModeler.

El diámetro del dominio para el rotor es de $1.5D$, ver Fig. 4.6, siendo D el diámetro del rotor, para el estator tiene dimensiones de $20D \times 30D$, el centro del hueco circular de $1.5D$ para el rotor se encuentra a $10D$ respecto del frente, a $20D$ respecto

del reverso y centrado respecto de los laterales (a $10D$ de cada lateral), como se muestra en la Fig. 4.7.

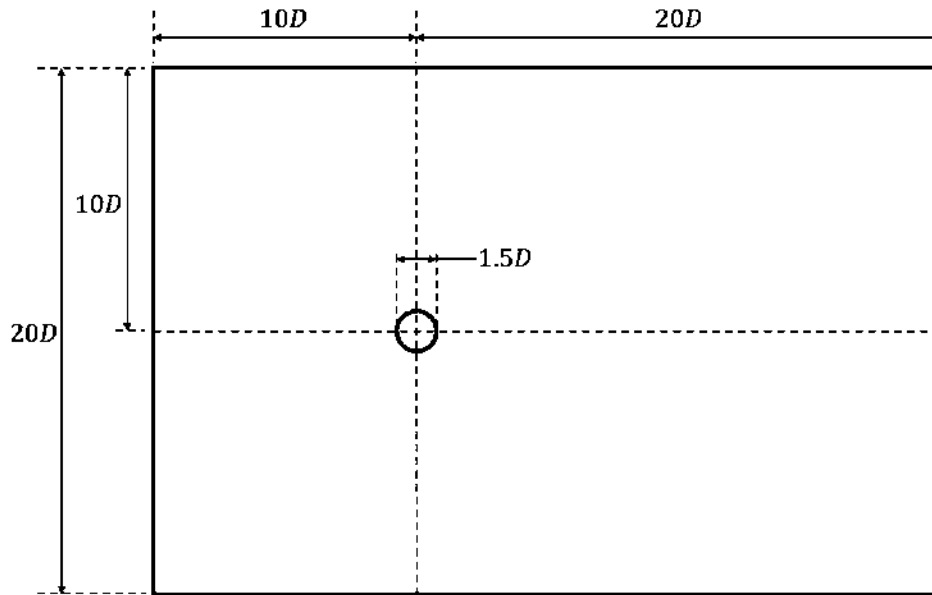


Fig. 4.7. Plano del dominio computacional del estator.

Se nombran las diferentes partes del dominio del rotor y del estator como se muestra en la Fig. 4.8 y Fig. 4.9, respectivamente. Para mayor detalle del dominio del rotor se puede consultar la Fig. A.28.

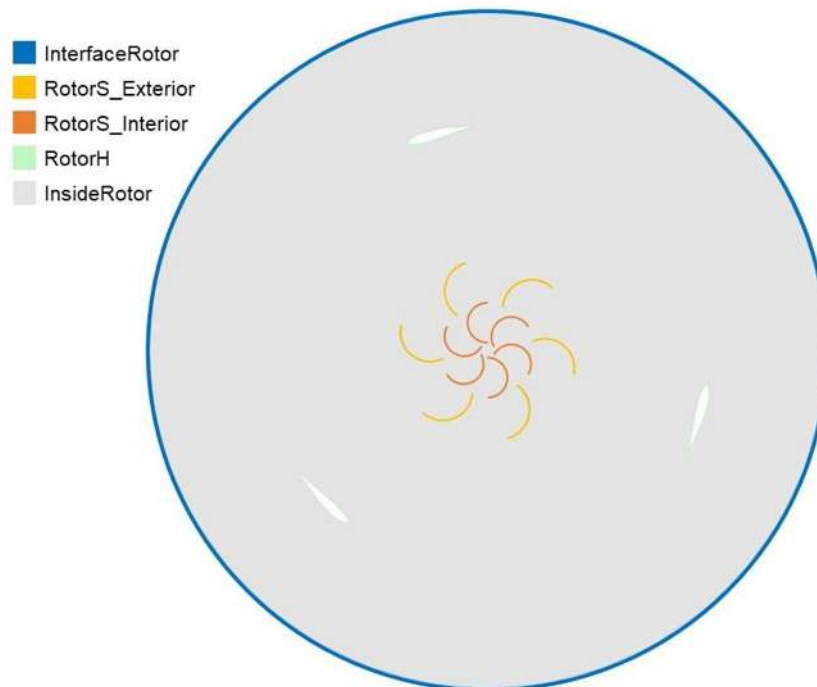


Fig. 4.8. Nomenclatura del dominio computacional del rotor.

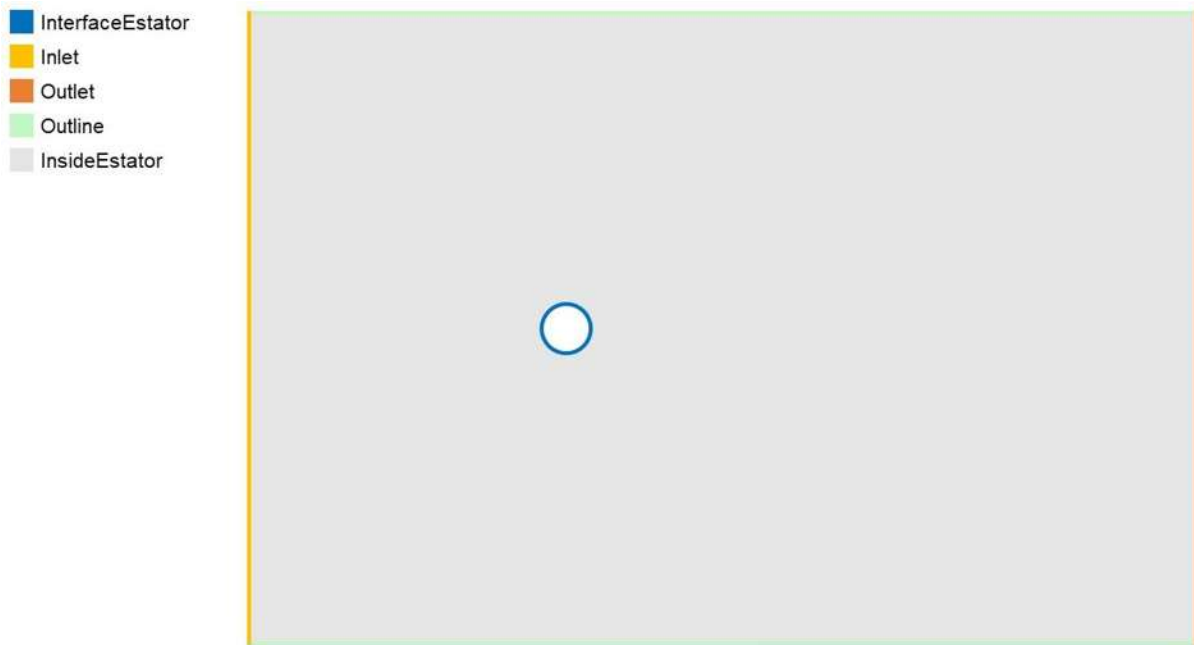


Fig. 4.9. Nomenclatura del dominio computacional del estator.

En el caso de la geometría de los discos de inducción, igualmente, fue realizada en ANSYS DesignModeler en un *Skech* se traza el perfil elíptico de los discos y se usa la operación de *Revolve* para crear los discos en 3D. Los discos tienen un diámetro de 6.5m, la separación entre discos es de 1.6m que es la sección más estrecha del área sombreada de la Fig. 4.10, el espesor de los discos es de 0.9m. Los discos fueron diseñados para una turbina de eje vertical con un diámetro de 2.3m y una altura de 1.5m.

Se empleó un dominio computacional lo bastante grande para evitar que las paredes estuvieran cerca de los discos e influyeran en el desarrollo del flujo del viento. Descontando el área transversal de los discos al área de la cara frontal del volumen de control el porcentaje de área libre para que circule el viento es de 97.9%, que es el área sombreada de la Fig. 4.11.

Se modeló un volumen de control de un prisma rectangular de 22m de ancho por 20m alto por 30m de largo, el centro de los discos se encuentra a 10m de la Cara A y 20m de la Cara B, ver Fig. 4.12. Se nombran las diferentes partes del dominio, para las superficies u áreas que son la Cara A se nombra como Inlet, la Cara B como Outlet, las 4 caras iguales restantes del prisma rectangular se nombran como Outline y la superficie de los discos inductores como Disc, el interior del dominio computacional, que es un volumen, se nombra como Inside.

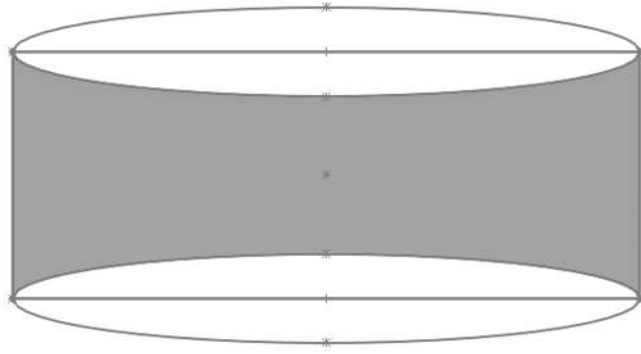


Fig. 4.10. Vista trasversal de los discos de inducción, el área sombreada en gris oscuro representa la reducción que sufre el viento al pasar por los discos.

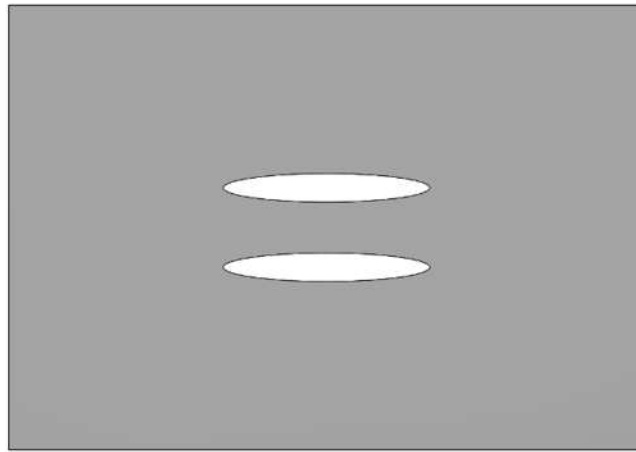


Fig. 4.11. Figura representativa del porcentaje de reducción de área con los discos de inducción.

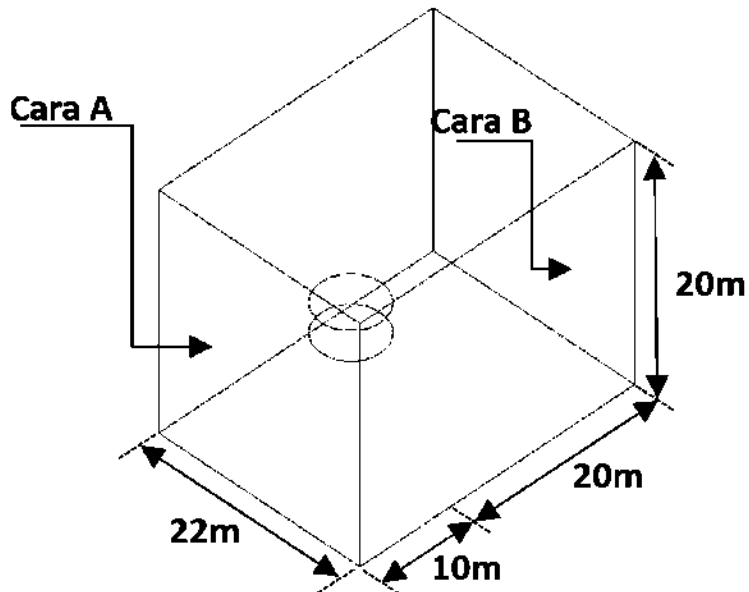


Fig. 4.12. Dominio computacional de los discos de inducción.

4.2 Generación de la malla

El diseño de la malla para el dominio computacional del estator usa una malla estructurada con elementos cuadráticos, refinando en la zona próxima a InterfaceEstator que es donde se ubicaría el dominio del rotor, ver Fig. 4.13. La utilización de las herramientas y las técnicas de mallado se explica a detalle en el Anexo B. Se realizaron tres mallas el número de elementos y nodos de encuentran en la Tabla 4.1.

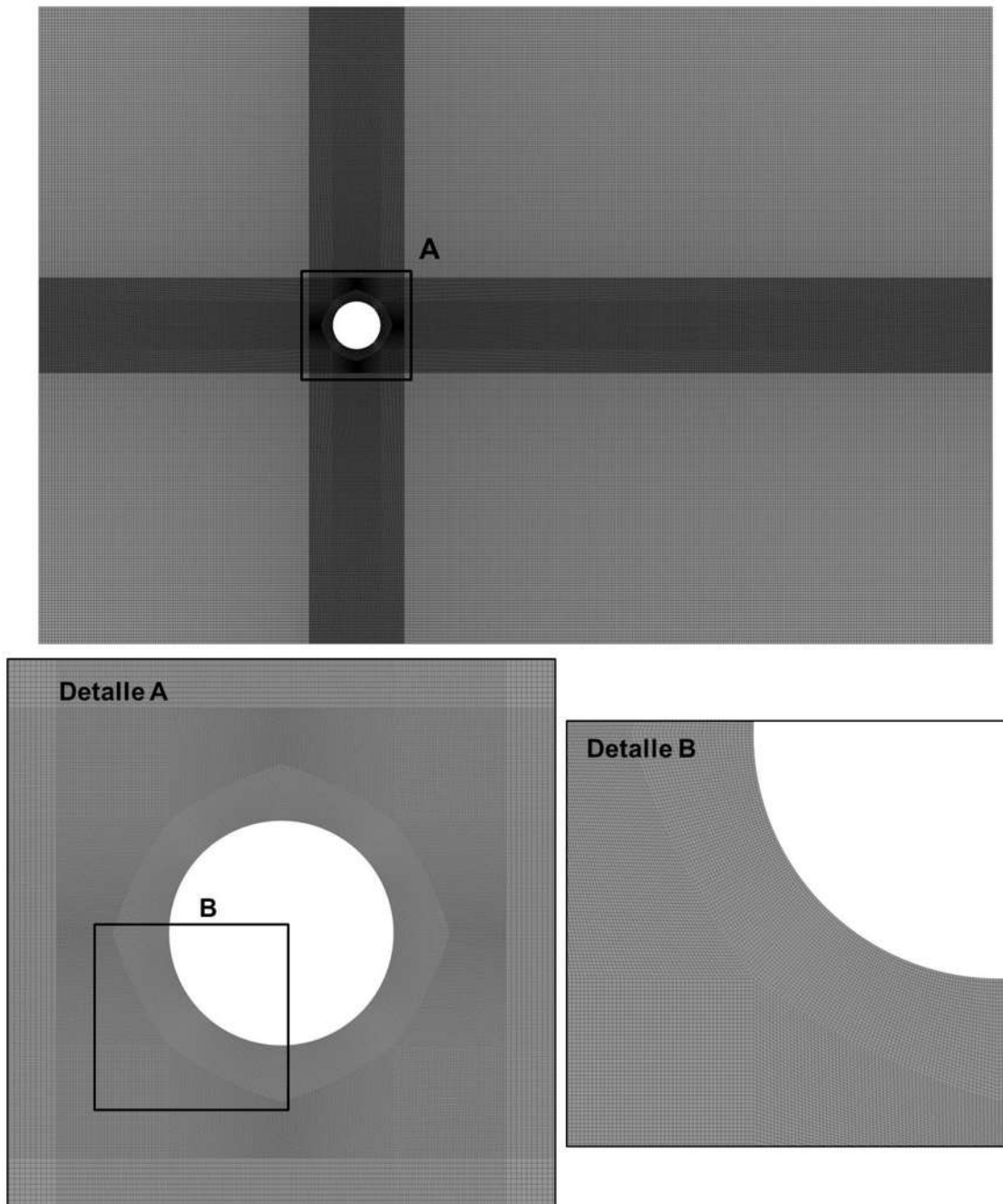


Fig. 4.13. Malla del estator con detalles del refinamiento de malla, malla E1.

Tabla 4.1. Número de elementos y nodos para cada malla del estator.

| Malla | E1 | E2 | E3 |
|---------------------|---------|---------|--------|
| Número de elementos | 364,068 | 151,364 | 62,664 |
| Numero de nodos | 365,560 | 152,288 | 63,256 |

El diseño de la malla para el dominio computacional del rotor usa una malla no estructurada con elementos triangulares y rectangulares. Los elementos triangulares son los predominantes, se refina la malla cerca de los álabes (RotorH, RotorS_Interior y RotorS_Exterior) y en el límite del dominio (InterfaceRotor), ver Fig. 4.14. Se emplea una inflación con los elementos rectangulares en las paredes de los álabes, con la finalidad de mejorar la calidad de la malla, obtener un mayor detalle de la capa límite, buscar una solución más precisa y una mejor convergencia. La utilización de las herramientas y las técnicas de mallado se explica a detalle en el Anexo B. Se realizaron tres mallas el número de elementos y nodos de encuentran en la Tabla 4.2.

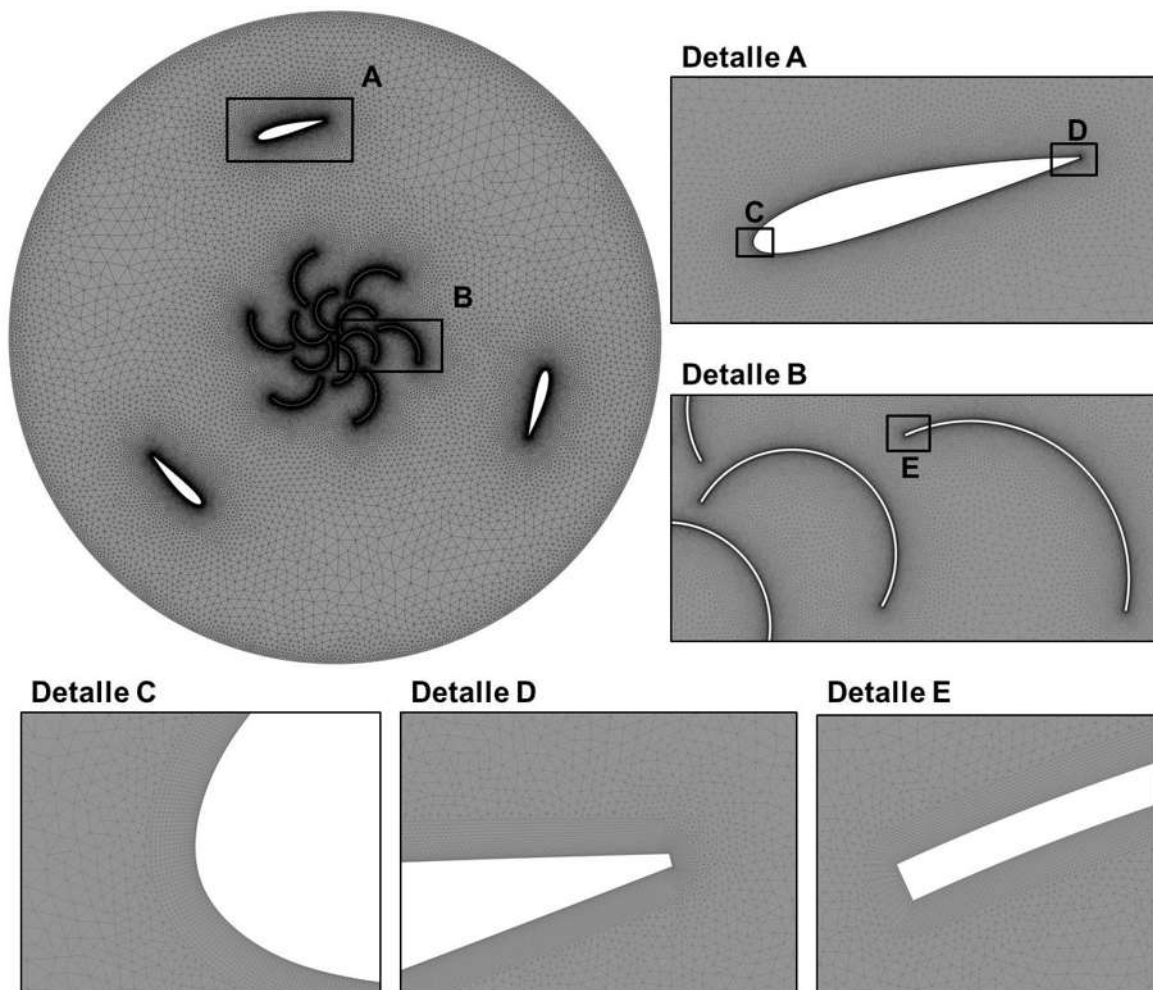


Fig. 4.14. Malla del rotor con detalles del refinamiento de malla, versión R1.

Tabla 4.2. Número de elementos y nodos para cada malla del rotor

| Malla | R1 | R2 | R3 |
|---------------------|-----------|---------|---------|
| Número de elementos | 1,051,697 | 585,542 | 487,467 |
| Numero de nodos | 830,219 | 517,202 | 428,569 |

Un parámetro fundamental para la simulación de VAWT, y que forma parte de la etapa de mallado para poder aplicar la herramienta de inflación correctamente, es el cálculo del grosor del primer estrato de la malla de la capa limite. Es imposible calcular este valor de forma exacta, ya que está relacionado de forma directamente proporcional al valor de y^+ , ver Ec. 3.1. El valor de y^+ se conoce únicamente al finalizar la simulación para una malla específica. Para lidiar con esta problemática, en la práctica, se despeja Δy_p de la Ec. 3.1 y con un valor de y^+ deseado, los parámetros geométricos del dominio computacional y los parámetros de flujo para la simulación, se calcula un aproximado. Existen herramientas online que facilitan el cálculo anterior, como la ofrecida por la empresa Cadence® en su sitio web oficial [85]. Para las simulaciones del rotor de la turbina eólica se usa un $y^+ \approx 1$.

Dado que el valor del grosor del primer estrato de la malla de la capa limite depende de la velocidad del flujo, esta cambiara en el rango de velocidades para las que se realizara las simulaciones, los valores para cada velocidad se pueden consultar en la Tabla B.2 para el rotor H y en el anexo B para el rotor Savonius. Igualmente, al cambiar el grosor de la primera capa de la inflación, cambia el número de elementos en la malla; sin embargo, este cambio es despreciable y se toman como referente los valores presentados en la Tabla 4.2.

En los discos de inducción se utilizó una malla no estructurada con elementos tetraédricos y prismas triangulares. Los elementos tetraédricos predominan y se empleó una inflación con los elementos primas triangulares alrededor de la zona de los discos de inducción como se muestra en la Fig. 4.15.

Se usó un refinamiento de la malla en el área de los discos de inducción por el método de esfera de influencia, el centro de la esfera corresponde al centro de los discos de inducción a la mitad de la altura que los separa. La malla para la geometría elíptica cuenta con aproximadamente de 3.7 millones de elementos.

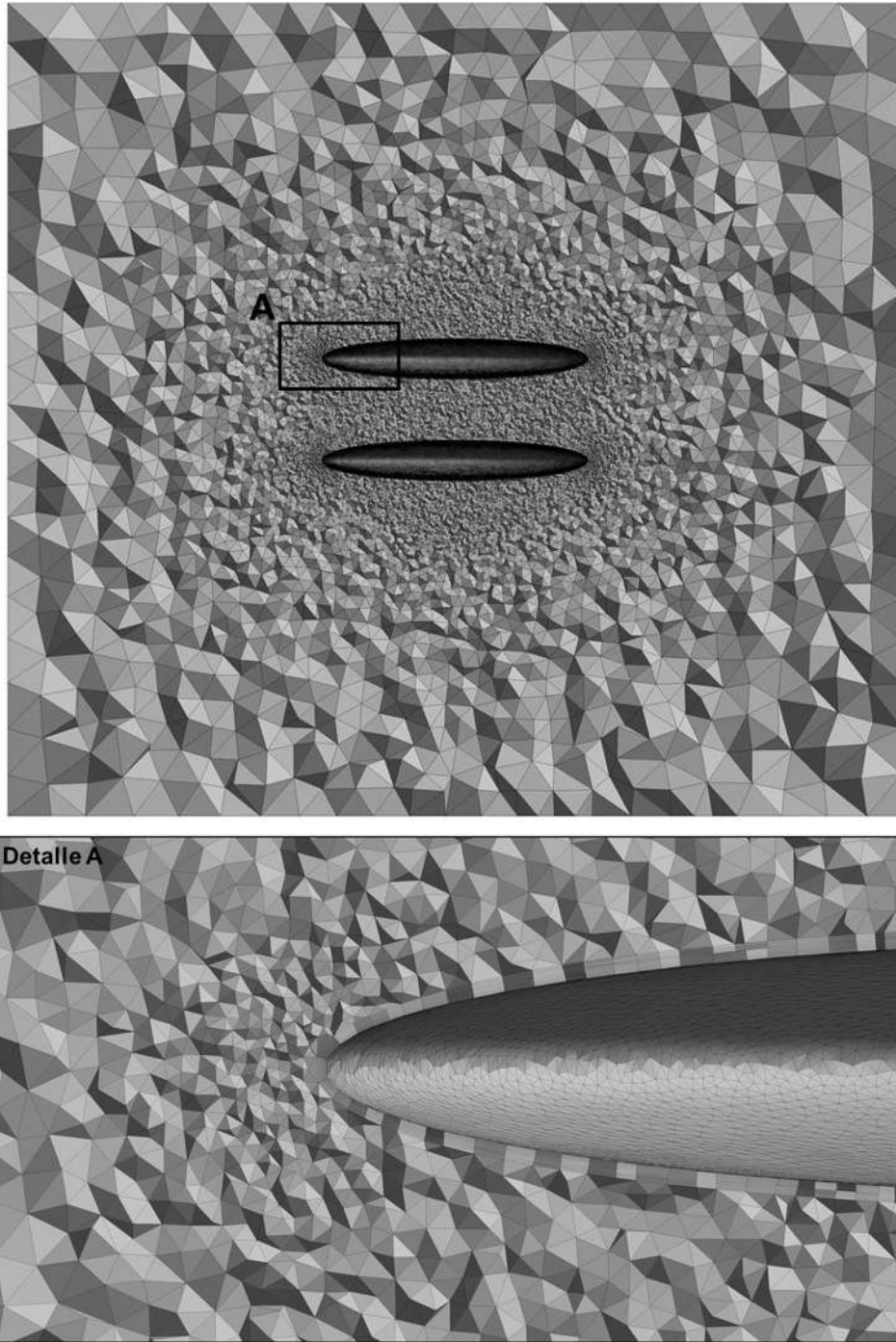


Fig. 4.15. Malla de los discos de inducción con detalle del refinamiento de malla.

4.3 Selección de propiedades físicas y propiedades de los fluidos

Para el rotor, con los datos proporcionados por CIATEQ son la ubicación de la instalación, el TSR de la turbina H, siendo este de 3 y el rango de velocidades de viento a las que opera la turbina, desde 2.5m/s a la velocidad de corte de 10m/s. La

ubicación de la turbina eólica será en una de las instalaciones con las que cuenta de CIATEQ, en la sede de CIATEQ Zapopan, Jalisco, México. Ver Fig. 4.16.



Fig. 4.16. Ubicación de CIATEQ, Zapopan, Jalisco, obtenida de Google Earth [86].

El fluido de trabajo para las simulaciones CFD presentadas en este trabajo es el aire, el cual puede modelarse como compresible (densidad variable) o incompresible (densidad constante).

Las propiedades más importantes de los fluidos simples son la densidad y la viscosidad [41]. La velocidad de un flujo afecta sus propiedades de varias formas. La relación entre la velocidad del flujo y la velocidad del sonido en el fluido (el número de Mach) determina si es necesario considerar el intercambio entre la energía cinética del movimiento y los grados internos de libertad en una simulación CFD. Para números de Mach pequeños, $Ma < 0.3$, el flujo puede considerarse incompresible [41]. Literatura más especializada para simulaciones de turbinas eólicas de eje vertical de baja potencia indican que el aire se modela en régimen turbulento e incompresible siempre que el número de Mach sea menor que 0.1 [67].

Se denomina al flujo compresible o incompresible según el número de Mach, aunque la compresibilidad es una propiedad del fluido. Esta es solo una terminología común, ya que el flujo de un fluido compresible con un número de Mach bajo es esencialmente incompresible.

El número de Mach está definido como la relación entre la velocidad del cuerpo o del viento y la velocidad del sonido [87], matemáticamente se expresa en la Ec. 4.1.

$$Ma = \frac{V_{\infty}}{a} = \frac{V_{\infty}}{\sqrt{\gamma RT}} = \frac{V_{\infty}}{\sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}} = \frac{V_{\infty}}{\sqrt{\frac{c_p p}{c_v \rho}}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Cabe señalar que la relación $RT = p/\rho$ es válida para gases ideales. Procedemos a calcular el número de Mach máximo que podremos obtener en nuestras simulaciones. Para las simulaciones utilizaremos velocidades desde los 2.5m/s hasta los 10m/s; sin embargo, como también analizaremos los discos inductores con los que se espera que exista un aumento de velocidad que se espera que sea menor de 1.5 veces U_∞ , la mayor velocidad que podríamos obtener sería de 15m/s. Para evitar cualquier posible inconveniente se evalúa con 20m/s.

La densidad del aire es $\rho = 1.225\text{kg}/\text{m}^3$ a condiciones estándar 15 °C y a nivel del mar ($p = 101.325\text{KPa} = 1\text{atm}$) de acuerdo a la norma ISO 2533:1975 [88].

Del libro Termodinámica [89] de la Tabla A-2, titulada Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes se obtienen los valores de $c_p = 1.005\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ y $c_v = 0.718\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$. Se calcula el número de Mach con la Ec. 4.1.

$$\text{Ma} = \frac{20\text{m/s}}{\sqrt{\frac{(1.005\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})(101325\text{Pa})}{(0.718\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})(1.225\text{kg}/\text{m}^3)}}} \approx 0.05878$$

Al obtener un número de Mach menor de 0.1 se puede modelar el aire como incompresible, es decir, con densidad constante.

4.3.1 Cálculo de densidad

Manwell et al. [8], calculan la densidad del aire con la ecuación de los gases ideales, despejando la densidad como se muestra en la Ec. 4.2.

$$\rho = \frac{p}{R_{\text{aire}}T} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Es necesario conocer entonces la temperatura y la presión del aire en el lugar de instalación de la turbina. La presión disminuye con la elevación sobre el nivel del mar. Para determinar la presión en la atmósfera en el lugar de instalación de la turbina se precisa conocer la altura sobre el nivel del mar a la altura del centro del rotor de la turbina. La presión en la atmósfera estándar internacional hasta una altura de 5000m se puede aproximar mediante la Ec. 4.3 [8], como nota aclaratoria la presión obtenida por la ecuación se encuentra en unidades de kPa.

$$p = 101.29 - (0.011837)z + (4.793 \times 10^{-7})z^2 \quad \text{Ec. 4.3}$$

De Google Earth [86] se obtiene la altura sobre el nivel del mar que es aproximadamente de 1600m. Al desconocer si la turbina será instalada encima de

alguno de los edificios o si será a nivel de piso de las instalaciones de CIATEQ se toma el valor de $z = 1600m$ como una buena aproximación, sustituyendo en la Ec. 4.3 para estimar la presión.

$$p = 101.29 - (0.011837)1600 + (4.793 \times 10^{-7})1600^2 = 83.578kPa$$

En la práctica, en cualquier lugar, las fluctuaciones de temperatura diarias y estacionales tienen un efecto mucho mayor en la densidad del aire que los cambios diarios y estacionales en la presión y la humedad del aire [8]. Por tanto, la temperatura necesaria es la temperatura anual promedio.

El Sistema CLICOM es una base de datos de estaciones climáticas superficiales de México del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en la que se pueden obtener datos de temperaturas, precipitación, evaporación y unidades de calor [90].

Se descargan los datos de temperatura promedio de la estación meteorológica más cercana al lugar de instalación y que cuente con varios años de mediciones. La estación seleccionada es Guadalajara (DGE) con Id:14066, ver Fig. 4.18, con los datos de la temperatura diaria promedio se calcula el promedio de la temperatura anual para los años 2000 al 2014, ver Fig. 4.17.

Se obtiene una temperatura promedio para el rango de tiempo del año 2000 al 2014, siendo de $T_{promedio} = T = 20.99^{\circ}C \approx 21^{\circ}C$. Finalmente, se sustituye el valor de la temperatura $T = 21 + 273.15 = 294.15 K$ y la presión $p = 83.577kPa$ en la Ec. 4.2, obteniéndose la densidad del aire en el sitio de instalación.

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{83.578kPa}{(294.15 K)(286.9N \cdot m/kg \cdot K)} = 0.99036 kg/m^3$$

En el caso de los discos de inducción se usará la densidad del aire a condiciones estándar de temperatura y presión, que es $\rho = 1.225kg/m^3$ de acuerdo a la norma ISO 2533:1975 [88].

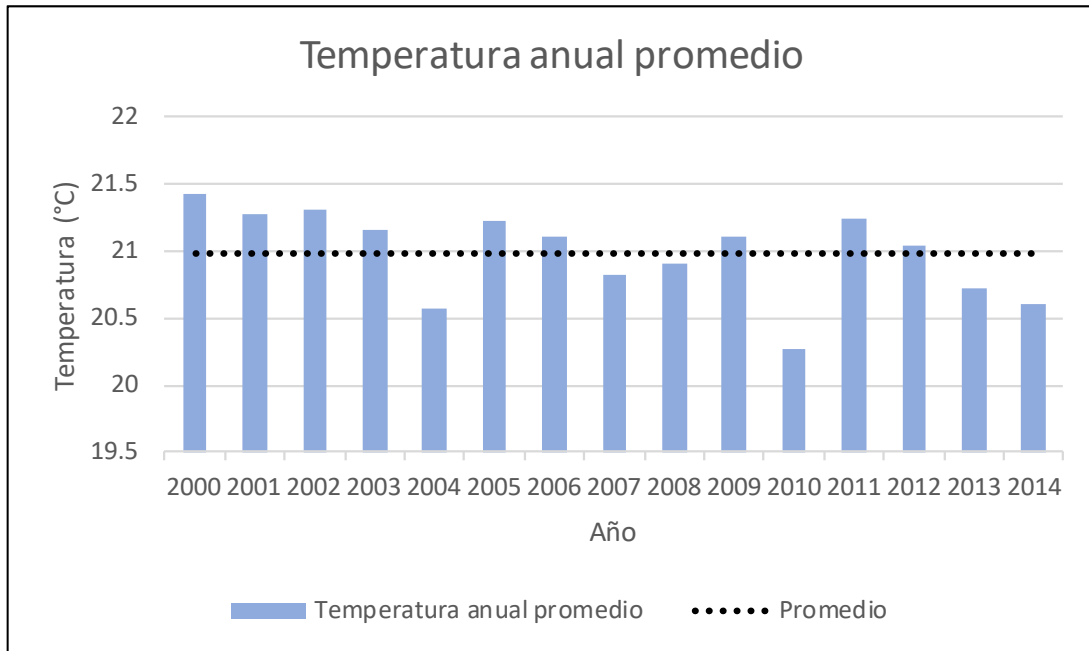


Fig. 4.17. Temperatura anual promedio en el sitio de instalación de la turbina eólica.

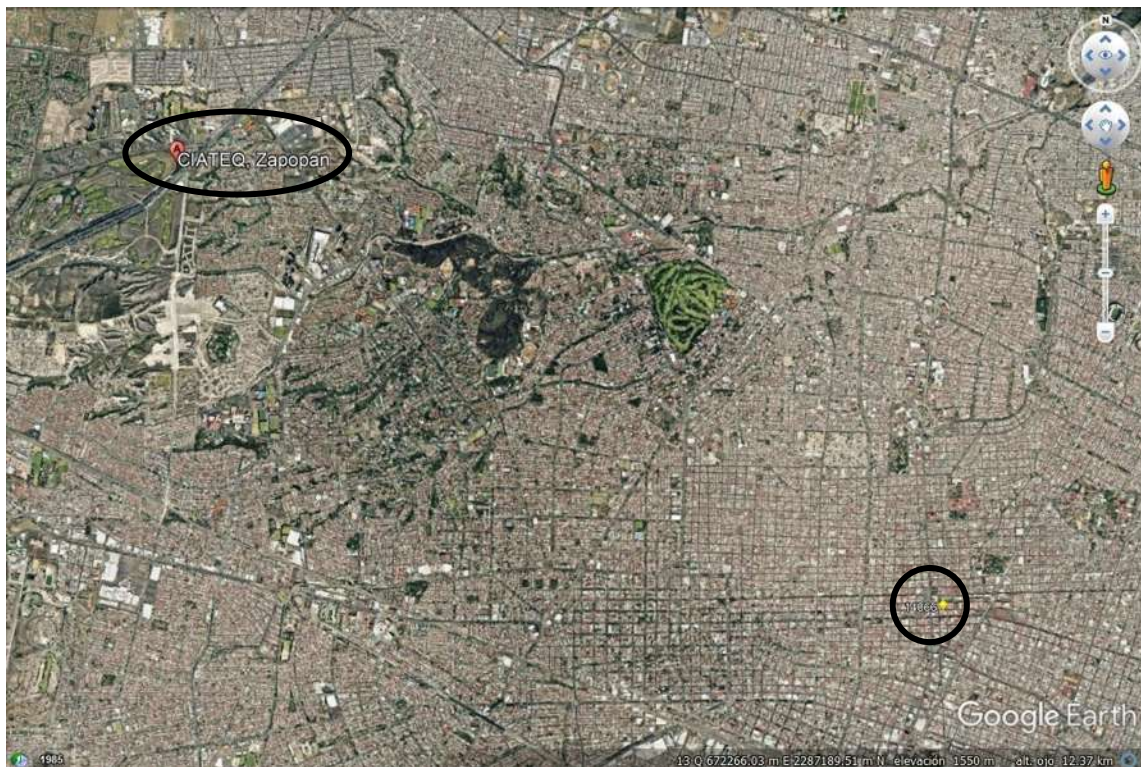


Fig. 4.18. Ubicación de CIATEQ, Zapopan y la estación meteorológica Guadalajara (DGE) con Id:14066, obtenida de Google Earth [86].

4.3.2 Cálculo de la viscosidad

La variación de la viscosidad con la presión es pequeña para la mayor parte de los gases. Del libro Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías [91] apéndice A-4a, titulado: Viscosidades de gases y vapores de hidrocarburos, para los gases dados en A-4a la corrección de la viscosidad debida a la presión es inferior al 10% para presiones de hasta 34 atm. Se emplea la ley de Sutherland [91].

Teniendo como dato la temperatura anual promedio del aire $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ se obtiene:

$$\mu = 0.000018188\text{ kg/m}\cdot\text{s} = 1.8188 \times 10^{-5}\text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

Para corroborar el resultado se puede utilizar The Engineering ToolBox [92], donde a 21°C obtenemos una viscosidad de $\mu = 0.00001817$, entre ambas viscosidades hay una diferencia menor al 0.2%. Se toma el valor de $\mu = 0.000018188\text{ kg/m}\cdot\text{s}$ para realizar la simulación de la turbina. En el caso de la simulación de los discos de inducción se usa la viscosidad del aire a condiciones estándar de temperatura y presión.

4.3.3 Modelo de turbulencia

Con base en lo explicado anteriormente en la sección 2.4.1.- Modelos de turbulencia del Capítulo III y a lo expuesto en la literatura [12, 44], de la gran variedad de modelos de turbulencia, para la inicialización de la simulación RANS del rotor con la técnica de Frame Motion y para la simulación RANS de los discos de inducción se usa el modelo $k - \omega$ SST de dos ecuaciones (SST).

Para la simulación URANS del rotor con la técnica de Sliding Mesh se usa el modelo de 4 ecuaciones SSt de transición (TSST). Se emplean los modelos anteriormente mencionados debido a que son modelos robustos que son ampliamente utilizados en simulaciones de VAWT y a las recomendaciones de trabajos especializados como el de Rezaeiha et al. [44].

4.3.4 Cálculo de velocidad angular

Con los datos proporcionados por CIATEQ para el rotor H ($TSR = 3$ y $r = D/2 = 1.2\text{m}$), las diferentes velocidades del viento a evaluar y usando la definición de TSR expresada en términos matemáticos en la Ec. 2.3, se puede calcular la velocidad angular a la cual giraría la turbina eólica H-Savonius, despejando la velocidad angular de la definición de TSR, obteniendo la Ec. 4.4.

$$\omega = \frac{TSR * V_{\infty}}{r} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Al ser un cuerpo sólido toda la turbina debe girar a la misma velocidad angular. La relación para las distintas velocidades de viento y su correspondiente velocidad angular se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Relación de velocidades del viento y velocidad angular del rotor.

| | | | | | | |
|--------------------|------|----|-------|------|-------|----|
| V_{∞} (m/s) | 2.5 | 4 | 5.5 | 7 | 8.5 | 10 |
| ω (rad/s) | 6.25 | 10 | 13.75 | 17.5 | 21.25 | 25 |

4.3.5 Cálculo del paso de tiempo (Time Step)

La simulación del rotor de la turbina eólica con la técnica de Sliding Mesh es en estado no estacionario, en otras palabras, es dependiente del tiempo. El valor del paso de tiempo es un parámetro necesario para el software CFD como parte de la configuración.

El paso de tiempo mínimo requerido de las simulaciones URANS está determinado por las escalas de tiempo de los fenómenos inestables y complejos que ocurren en el flujo. Para el caso de turbinas eólicas, se tiende a correlacionar el paso de tiempo con la revolución de la turbina y expresarlo como incremento azimutal, $d\theta$. El incremento azimutal se define entonces como el número de grados que gira la turbina por paso de tiempo [65].

Estudios han demostrado la importancia significativa de la elección correcta del incremento azimutal en la precisión y confiabilidad de las simulaciones CFD de VAWT [65, 66, 93–97]. La complejidad del flujo en los VAWT varía con las condiciones de operación y los parámetros geométricos de cada turbina en particular.

Rezaeiha et al. [66] recomienda un incremento azimutal de 0.5° para minimizar el efecto de la resolución temporal en el rendimiento de la turbina; sin embargo, también advierte que la introducción de ángulos de inclinación en los álabes o la aplicación de perfiles aerodinámicos más gruesos o asimétricos posiblemente requiera un $d\theta$ más pequeño para predecir con precisión la aerodinámica. Hosseini et al. [30] simulan en 2D usando un incremento azimutal de 1° , una turbina híbrida H-Savonius estructurada con dos niveles; cada nivel tiene cuatro rotores Savonius de dos álabes y una turbina Darrieus de tres álabes, ver Fig. 2.6. Por lo anterior, se realiza el estudio comparativo del rendimiento de la turbina híbrida diseñada por CIATEQ con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° , para una velocidad de 7m/s.

Un incremento azimutal más pequeño demanda un mayor tiempo de simulación, ya que por cada revolución se requiere un mayor número de pasos de tiempo. Para calcular el número de pasos por revolución se dividen los 360° de una revolución entre el valor del incremento azimutal en grados. Para un incremento azimutal de

0.5° se requieren 720 pasos de tiempo por revolución y para 0.25° se requieren 1440.

El número de pasos requeridos para la simulación corresponde al *Number of Time Steps* requerido en la configuración de Fluent, se obtiene multiplicando el número de revoluciones por el número de pasos por revolución, ver Tabla 4.4

Tabla 4.4. Relación entre el Incremento Azimutal y el número de pasos por revolución

| Incremento Azimutal | 0.5° | 0.25° |
|---|--------|--------|
| Número de pasos por revolución | 720 | 1440 |
| Número de pasos para 25 revoluciones | 18,000 | 36,000 |

Para calcular el tiempo de paso se necesita definir el incremento azimutal y el dato de la velocidad angular de la turbina, para el cálculo se hace uso de la Ec. 4.5, obtenida de [59]. La Ec. 4.5 puede deducirse a partir de la definición velocidad angular establecida en cualquier libro de Dinámica, para usarla es necesario ser congruente con las unidades empleadas para cada termino.

$$t = \frac{d\theta}{\omega} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Tabla 4.5. Relación entre la velocidad del viento, velocidad angular, incremento azimutal y paro de tiempo.

| V_{∞} (m/s) | ω (rad/s) | $d\theta$ | t (s) |
|--------------------|------------------|-----------|------------|
| 2.5 | 6.25 | 0.5° | 0.00139626 |
| 4 | 10 | 0.5° | 0.00087266 |
| 5.5 | 13.75 | 0.5° | 0.00063467 |
| 7 | 17.5 | 0.5° | 0.00049867 |
| 7 | 17.5 | 0.25° | 0.00024934 |
| 8.5 | 21.25 | 0.5° | 0.00041067 |
| 10 | 25 | 0.5° | 0.00034907 |

4.4 Especificación de condiciones de frontera

La elección de las condiciones de frontera es uno de los factores más importantes para la simulación de VAWT [67]. Las simulaciones de VAWT mediante la técnica de Sliding Mesh reportadas en la literatura definen las condiciones de frontera para la superficie de los álabes (RotorH, RotorS_Interior y RotorS_Exterior) y para la entrada del fluido (Inlet) como condiciones pared antideslizante (no-slip wall condition) y velocidad uniforme de entrada (uniform velocity inlet), respectivamente

[30, 33, 59, 60, 65–67, 79, 80, 82, 84, 98–104]. La nomenclatura usada para referirse a las zonas puede consultarse en la Fig. 4.8 y Fig. 4.9.

La condición para la zona de la salida del fluido (Outlet), en la mayoría de los casos, es una presión estática manométrica de cero (zero gauge static pressure) [30, 44, 59, 60, 65, 66, 80, 98, 100–104]; no obstante, existe en la literatura otras condiciones. Lam et al. [82] impone una condición de flujo de difusión cero para todas las variables de flujo y aplica una corrección general del balance de masa. Durrani et al. [79], usan la condición de presión de campo lejano (pressure farfield) tanto para la zona de Outlet como la de Outline. Liang et al. [33], de forma similar para las zonas de Outlet y Outline usa condición de frontera abierta (open boundary condition).

Sin embargo, donde se encuentra una mayor variedad en la aplicación de condición de frontera es en la zona Outline. La tendencia es la imposición de la condición de simetría (symmetry) [30, 44, 66, 80, 98–100]. Qin et al. [101] y Lositaño et al. [102] usan la condición de campo lejano (farfield), Ostos et al. [59] y Mauro et al. [103] imponen la condición de pared (wall), Kacprzak et al. [60] usa una pared libre (free-slip wall) y Dobrev et al. [104] utiliza la dirección, magnitud y sentido de la velocidad de entrada.

Para la simulación del rotor de la turbina eólica se crea una interface en las zonas denominadas InterfaceRotor e InterfaceEstator, para la transferencia de información entre la malla del estator y la malla del rotor. Con base en la literatura, en las zonas nombradas como RotorH, RotorS_Interior y RotorS_Exterior, correspondientes a los álabes de la turbina se impone una condición de paredes antideslizantes (no-slip wall condition). Para Inlet se impone una velocidad uniforme de entrada (uniform velocity inlet), para Outlet una presión estática manométrica de cero (zero gauge static pressure) y para Outline la condición de simetría (symmetry), ver Fig. 4.19.

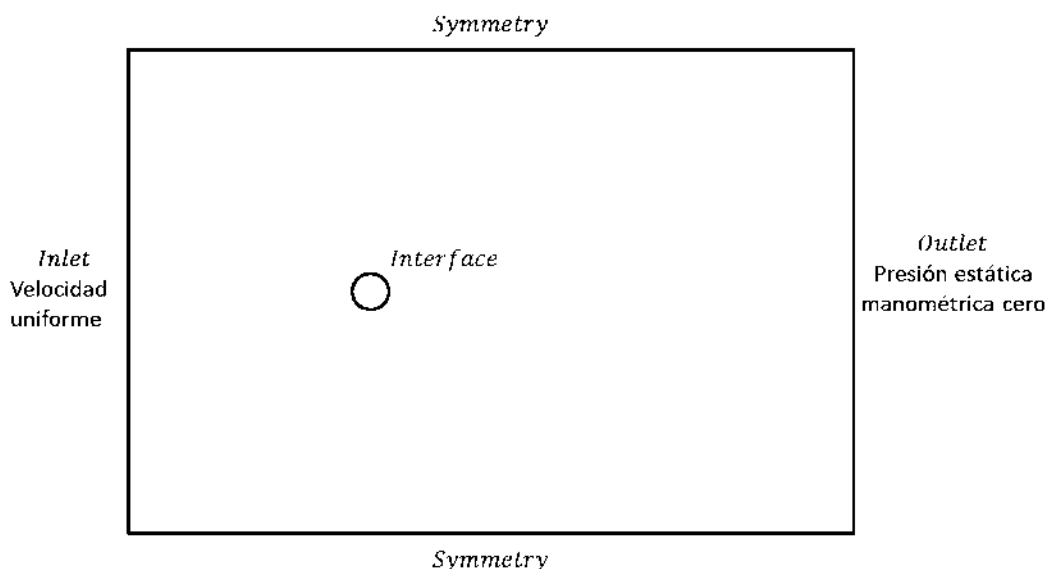


Fig. 4.19. Condiciones de frontera.

Para los discos de inducción, ver Fig. 4.12, se define la cara A como entrada del flujo del viento con una velocidad constante y uniforme; la cara B como salida del flujo del viento a presión atmosférica, la velocidad del viento en las caras adyacentes se definen de forma idéntica en magnitud y dirección a la velocidad de entrada y para los discos se definen como pared.

4.5 Inicialización y control de la solución

La simulación del rotor de la turbina eólica se realiza en dos simulaciones. La primera es una simulación de flujo en estado estacionario con la técnica de Single Reference Frame (Frame Motion), esta sirve como inicialización para la segunda simulación. La segunda es una simulación de flujo en estado no estacionario, por lo que es dependiente del tiempo, y se efectúa con la técnica de Sliding Mesh.

El esquema numérico usado en la primera simulación es Coupled, para la segunda simulación el esquema numérico usado es el SIMPLE. El solucionador utilizado es pressure-based con una discretización de segundo orden tanto para el esquema espacial como para el temporal.

En la simulación en estado estacionario se establecen 15000 iteraciones, para asegurar la convergencia. Se utiliza un límite de 40 iteraciones por paso de tiempo, en el caso de la segunda simulación y se establece un criterio mínimo de convergencia de 1×10^{-5} para todos los residuales.

4.6 Supervisión de la convergencia

La convergencia generalmente se evalúa mediante el seguimiento progresivo de los residuales [40]. Además de examinar los residuales, se pueden usar otras variables de control para determinar la convergencia.

En la simulación de flujo en estado estacionario se considera solamente los residuales. Estos deben caer por debajo del límite de tolerancia (1×10^{-5}) para determinar la convergencia. La supervisión se realiza con la observación de la gráfica de residuales y con la consola de Fluent en la que se muestra el valor de cada residual.

En la simulación en estado no estacionario, la convergencia se define con base en el número de revoluciones de la turbina antes de alcanzar una condición estadística de estado estable, generalmente se evalúa el torque promedio por revolución o coeficiente de torque por revolución [96].

Se monitorea el torque instantáneo producido por la turbina en cada paso de tiempo hasta completar una revolución, se promedia y posteriormente se compara con sus

revoluciones anteriores hasta lograr la condición estadística de estado estable. En cada paso de tiempo se monitorean los residuales, los cuales deben de caer debajo del límite de tolerancia para considerar que el valor de torque instantáneo ha convergido. La supervisión se realiza con la observación de la gráfica de residuales, la consola de Fluent en la que se muestra el valor de cada residual y con gráficas de torque.

Capítulo V. Resultados de simulación en software CFD

En las simulaciones en estado no estacionario, es importante iniciar el muestreo de datos solo después de que la solución haya alcanzado una condición estadística de estado estable. Para el caso de las turbinas eólicas, se suele correlacionar la convergencia de la simulación URANS con la revolución de la turbina y expresarla como el número mínimo de revoluciones que se necesitan antes de alcanzar la condición estadística de estado estable [65].

La complejidad del flujo para los VAWT varía en función de las condiciones geométricas y de funcionamiento del rotor para cada turbina (solides y TSR), por lo que no existe un número de revoluciones en particular para alcanzar la solución. El criterio de convergencia más usado en la literatura es comparar el valor promedio del torque de una revolución completa entre dos revoluciones sucesivas. En la mayoría de los trabajos, las simulaciones se detienen cuando esta diferencia es inferior al 1% [96]. En la Tabla 5.1 se describen algunos ejemplos de trabajos de simulación de VAWT y el número de revoluciones que necesito la simulación para alcanzar la convergencia.

Tabla 5.1. Ejemplos de simulaciones de VAWT y número de revoluciones para alcanzar la convergencia.

| Autor principal | Núm. de revoluciones para convergencia |
|--------------------------|---|
| Durrani et al. [79] | 7 |
| Lopez Mejia et al. [105] | 10 |
| Shahizare et al. [97] | 10 |
| Balduzzi et al. [84] | 12 |
| Hosseini et al. [30] | 10 |
| Dobrev et al. [104] | 3 |
| Mauro et al. [103] | 3-5 |
| Kacprzak et al. [60] | 6-8 |
| Lositaño et al. [102] | 10 |
| Lam et al. [82] | 29 |

Rezaeiha et al. [65] establece un mínimo de 20 revoluciones como requisito de criterio de convergencia, independientemente de la solidez y la relación de velocidad de la punta, para garantizar que la simulación haya alcanzado una condición estadística de estado estable, usando el criterio en la literatura se encuentran estudios en los que se reporta los resultados de los valores obtenidos en la vigésima primera revolución [44, 98, 100].

Balduzzi et al. [96] sugiere que el margen del 1 % no es adecuado en determinadas simulaciones de turbinas, ya que una tendencia de convergencia muy plana puede introducir variaciones significativas en el valor del torque final. Existen simulaciones reportadas en la literatura que usan el valor de 0.1% como criterio de convergencia [84, 96, 105].

Considerando lo anterior, se usa como criterio de convergencia el valor de 0.5% de diferencia entre el valor promedio del torque de una revolución y sus dos revoluciones sucesivas. El criterio se cumple entre la décima séptima y decima novena revolución, dependiendo de la simulación. Los valores reportados corresponden a la vigésima quinta revolución.

Se elaboran 5 combinaciones de malla a partir de las tres mallas para el rotor y las tres mallas para el estator, ver Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Combinación de mallas de rotor y estator para la simulación de la turbina híbrida.

| Malla | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Malla Rotor | R1 | R2 | R3 | R2 | R2 |
| Malla Estator | E1 | E1 | E1 | E2 | E3 |
| Núm. de elementos | 1,415,765 | 949,610 | 851,535 | 736,906 | 645,206 |

Para comprender todos los gráficos presentados a continuación es necesario tener presente que durante una revolución del álabe, el ángulo de ataque y la velocidad relativa percibida por el perfil cambian continuamente, dando como resultado una fluctuación instantánea de las fuerzas y el par que actúan sobre la turbina [67].

5.1 Comparación incremento azimutal

Se realiza el estudio comparativo del rendimiento de la turbina híbrida con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° , para una velocidad de 7m/s y utilizando la malla 1, que es la malla con mayor cantidad de elementos, ver Tabla 5.2. En la Fig. 5.1 y la Fig. 5.2 se muestran el torque de la turbina desde el inicio de la simulación con la técnica de Sliding Mesh hasta finalizar las 25 revoluciones. En las gráficas se muestran tres líneas, correspondientes al torque generado por el rotor H, el torque del rotor Savonius y el torque del rotor híbrido que corresponde al torque de toda la turbina. El torque del rotor híbrido es la suma del torque del rotor H y el rotor Savonius.

La Fig. 5.3, Fig. 5.4 y Fig. 5.5 son comparativas del torque con incremento azimutal de 0.5° y 0.25° del rotor híbrido, el rotor H y el rotor Savonius, respectivamente. No existe una gran diferencia entre el incremento azimutal de 0.5° y 0.25° en el torque del rotor híbrido y el rotor H (Fig. 5.3 y Fig. 5.4).

En la Fig. 5.4 se observa que a partir de la tercera revolución se repite un comportamiento sinusoidal. En la Fig. 5.6 se representa el torque de cada rotor en la vigésima quinta revolución y se observa claramente que el rotor H genera tres ondas sinusoidales por revolución, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura [25, 30, 97, 102, 105].

En la Fig. 5.5 no se presenta un comportamiento repetitivo, después de la tercera revolución solamente se observa que el torque permanece en un determinado rango. En la Fig. 5.5 y Fig. 5.6 se observa que el torque generado es siempre negativo, es decir, el rotor Savonius actúa como un freno para la turbina híbrida, concordando con lo reportado en la literatura [32]; sin embargo no existe un rotor similar reportado en la literatura por lo que no se cuenta con una gráfica de torque esperada con la cual comparar. El comportamiento del rotor Savonius será analizado de forma más detallada en la siguiente sección.

La diferencia porcentual entre el torque promedio de la turbina híbrida en la vigésima quinta revolución entre el incremento azimutal de 0.5° y 0.25° es 1.5%; sin embargo, el tiempo de simulación se duplica. Por lo anterior se opta por realizar las simulaciones faltantes con un incremento azimutal de 0.5°

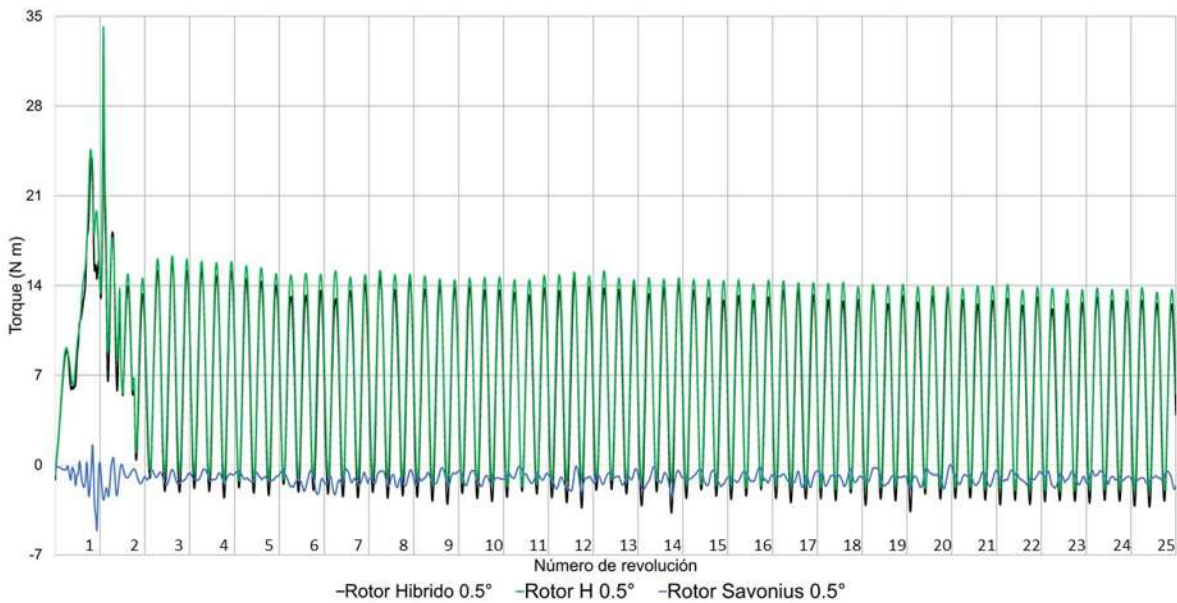


Fig. 5.1. Torque simulado en 25 revoluciones con la malla 1 y con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

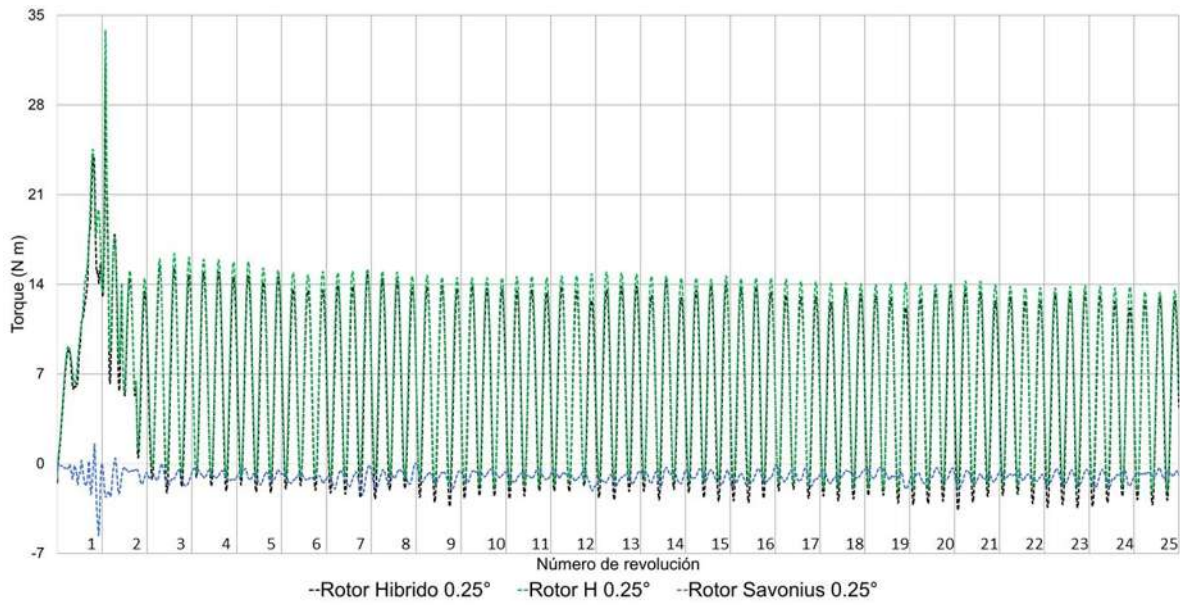


Fig. 5.2. Torque simulado en 25 revoluciones con la malla 1 y con un incremento azimutal de 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

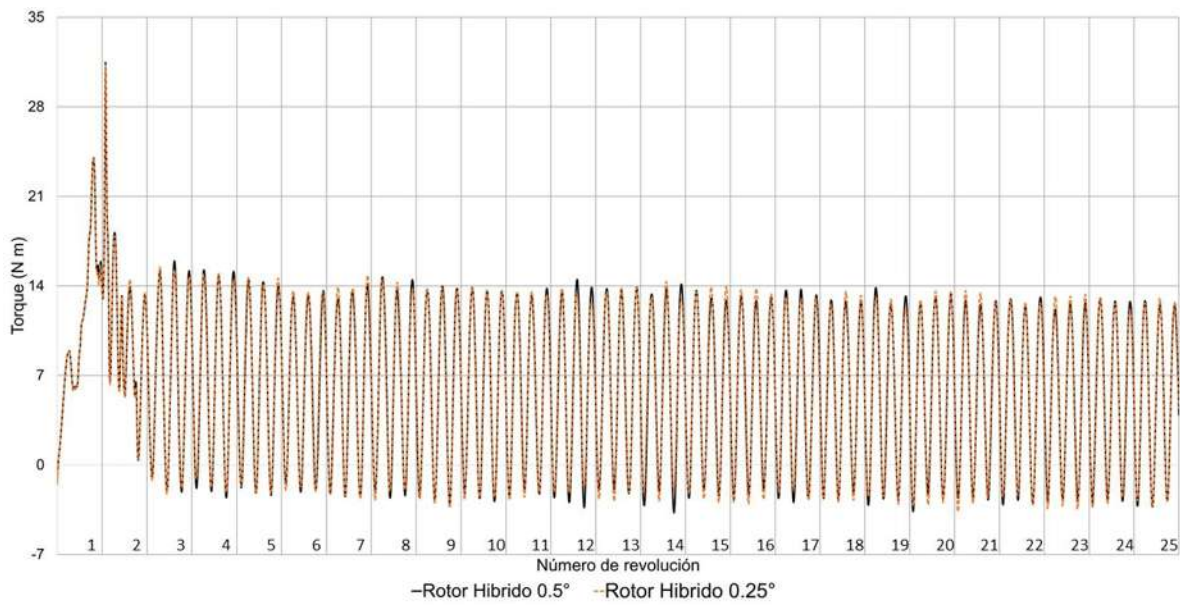


Fig. 5.3. Comparación del torque del rotor híbrido con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

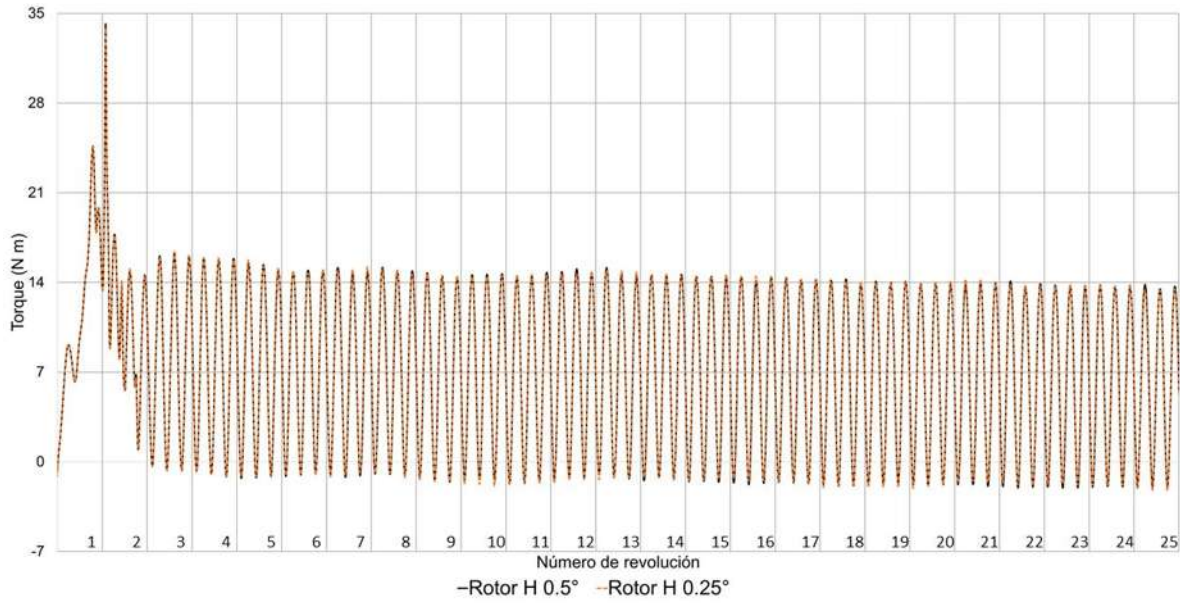


Fig. 5.4. Comparación del torque del rotor H de la turbina híbrida con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

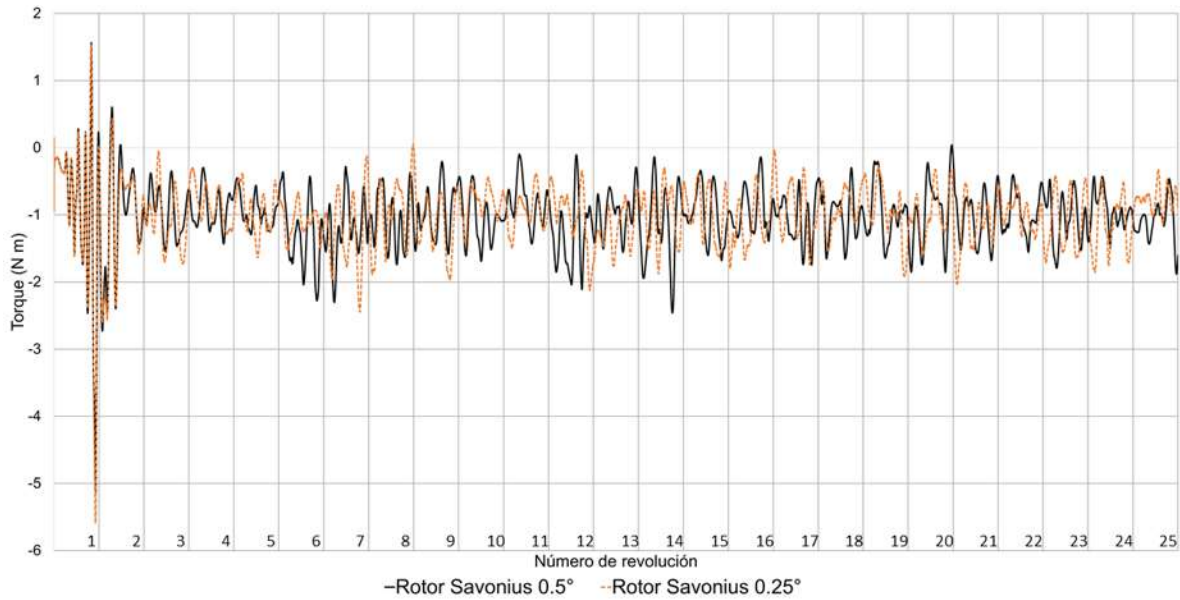


Fig. 5.5. Comparación del torque del rotor Savonius con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

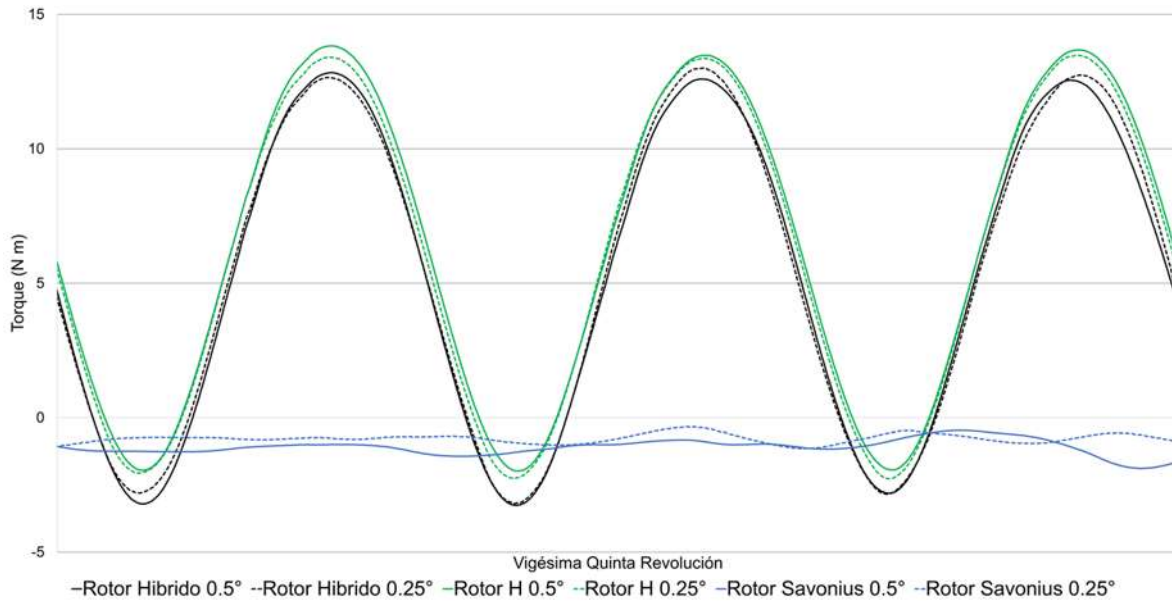


Fig. 5.6. Comparación del torque en la vigésima quinta revolución con un incremento azimutal de 0.5° y 0.25° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

5.2 Análisis Rotor Savonius

Para descartar la falta de tiempo (revoluciones) para que el rotor logre un estado estable en la que se pudieran observar patrones de torque se simulan 25 revoluciones más de la turbina híbrida. En el Fig. 5.7 se muestra el torque del rotor Savonius de la vigésima a la quincuagésima revolución. No se aprecia un patrón, el torque es siempre permanece negativo y oscila entre los valores de 0 y -2 N m.

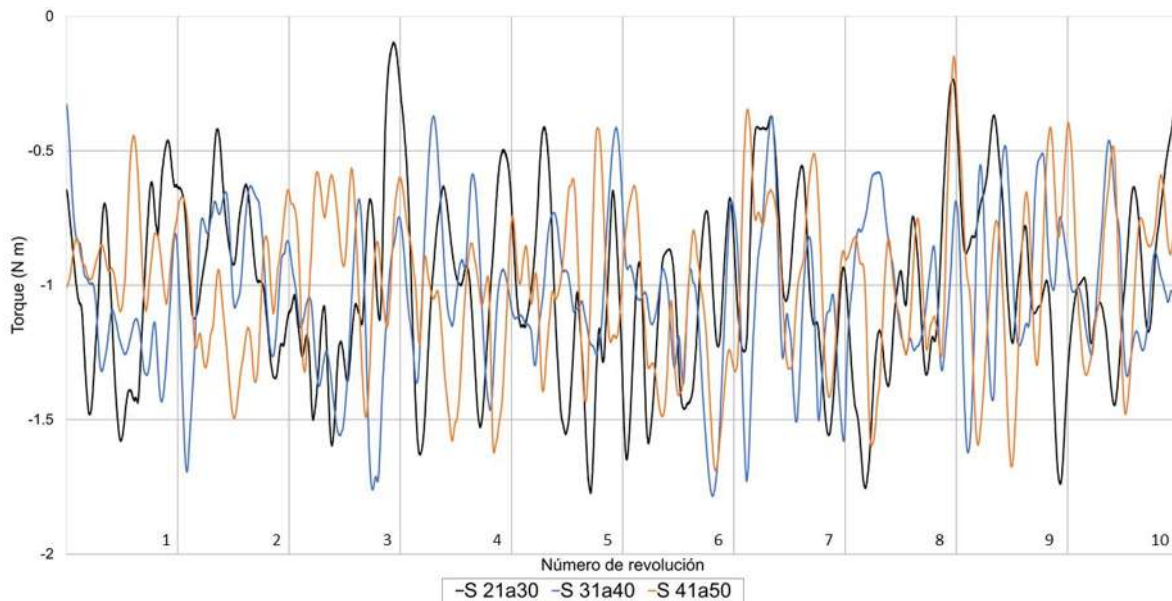


Fig. 5.7. Torque del rotor Savonius de la turbina híbrida de la 21. ° a la 50. ° revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

Para analizar a detalle el funcionamiento del rotor Savonius de la turbina híbrida, se simuló únicamente el rotor Savonius a diferentes velocidades angulares (17.5rad/s, 10rad/s y 5rad/s) y con una velocidad del viento de entrada de 7m/s. Se referirá como “rotor Savonius” al rotor Savonius de la turbina híbrida, simulada en conjunto al rotor H de la turbina híbrida y como “turbina Savonius” al rotor Savonius simulado de forma aislada, sin el rotor H. Además, se analiza el torque producido por cada nivel de la turbina Savonius, cada nivel contiene 6 álabes semicirculares. La nomenclatura usada para diferenciar cada nivel es Savonius Interior y Savonius Exterior, ver Fig. 4.8.

Los resultados del torque para la turbina Savonius a diferentes velocidades angulares se encuentran en la Fig. 5.8, Fig. 5.9 y Fig. 5.10 para 17.5rad/s, 10rad/s y 5rad/s respectivamente, se presentan las últimas 4 revoluciones de la simulación. El torque de la turbina Savonius es la suma del torque del rotor Savonius Interior y Savonius Exterior. En las tres gráficas se aprecia que el torque del Savonius Interior es siempre positivo y tiene menor variación comparada con el rotor Savonius Exterior.

El torque del rotor Savonius Exterior tiende a desplazarse de forma vertical hacia arriba conforme disminuye la velocidad angular, es decir, tiende a dar un torque positivo a velocidades angulares bajas.

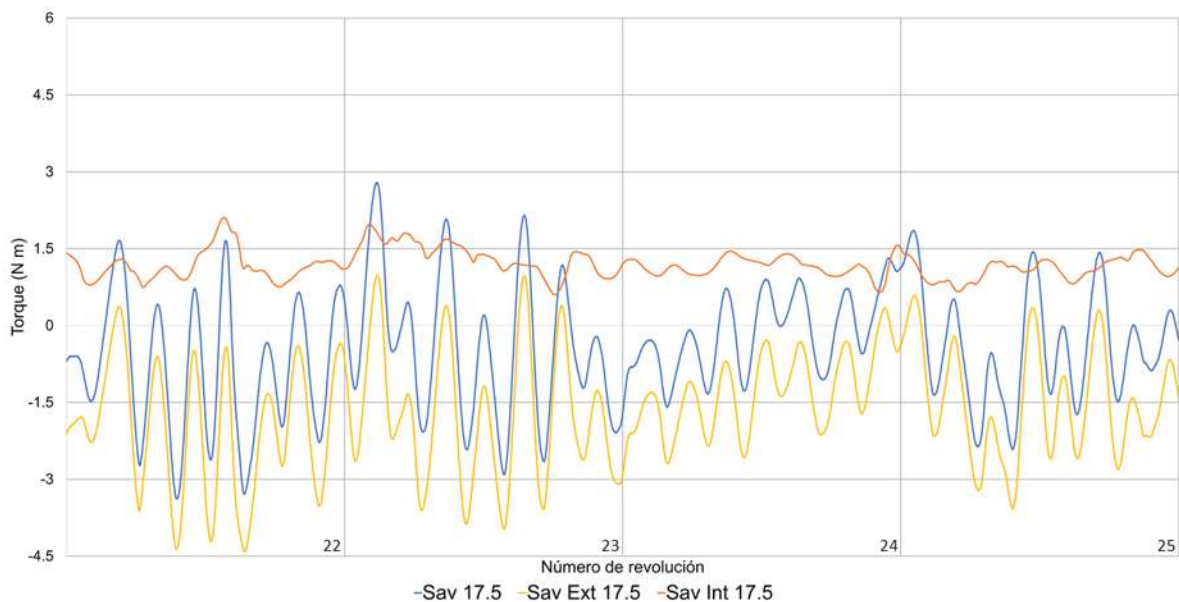


Fig. 5.8. Torque de la turbina Savonius y sus rotores interior y exterior a 17.5rad/s en la 22.º a la 25.º revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

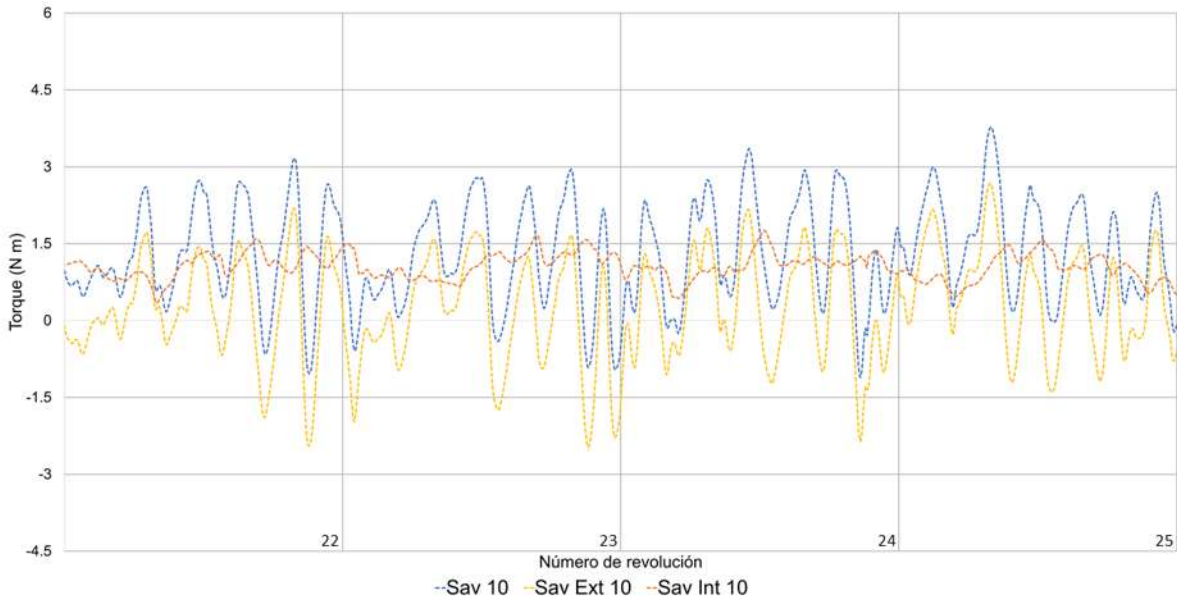


Fig. 5.9. Torque de la turbina Savonius y sus rotores interior y exterior a 10rad/s en la 22.º a la 25.º revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

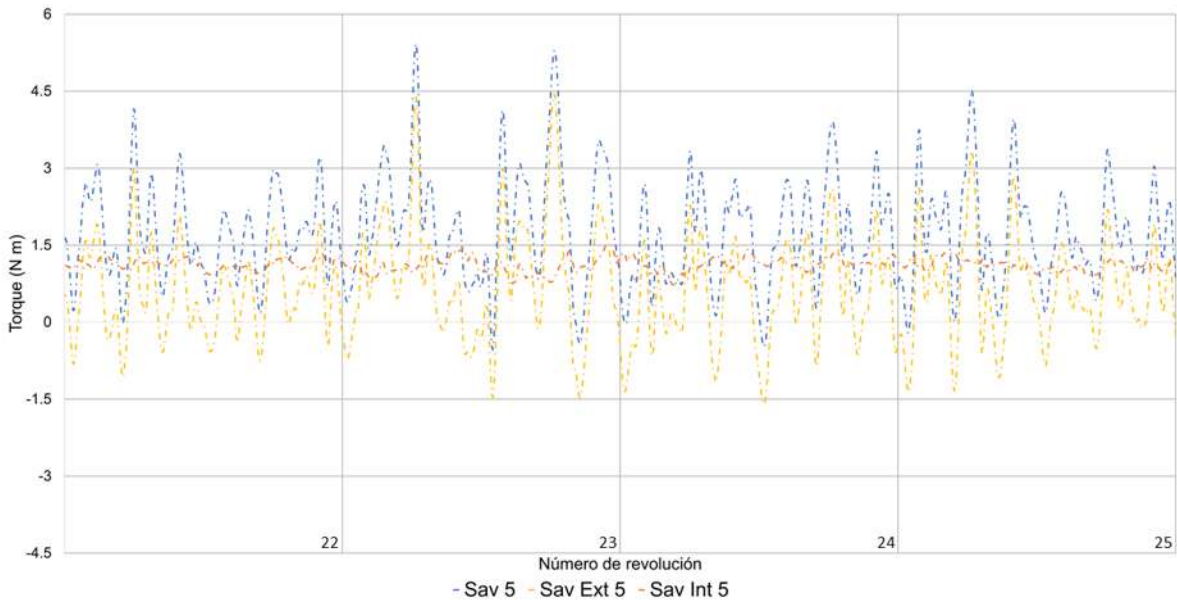


Fig. 5.10. Torque de la turbina Savonius y sus rotores interior y exterior a 5rad/s en la 22.º a la 25.º revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

En la Fig. 5.11 se presenta la comparativa del torque del rotor Savonius de la turbina híbrida a 17.5rad/s y el torque de la turbina Savonius a distintas velocidades angulares. Si observamos el torque del rotor Savonius y la turbina Savonius ambos a 17.5rad/s se puede apreciar que la del rotor Savonius es menor, esto debido probablemente a que el rotor H absorbe parte de la energía cinética del viento. En la Fig. 5.12 y Fig. 5.13 se compara el torque del rotor Savonius Exterior y Savonius Interior a diferentes velocidades angulares.

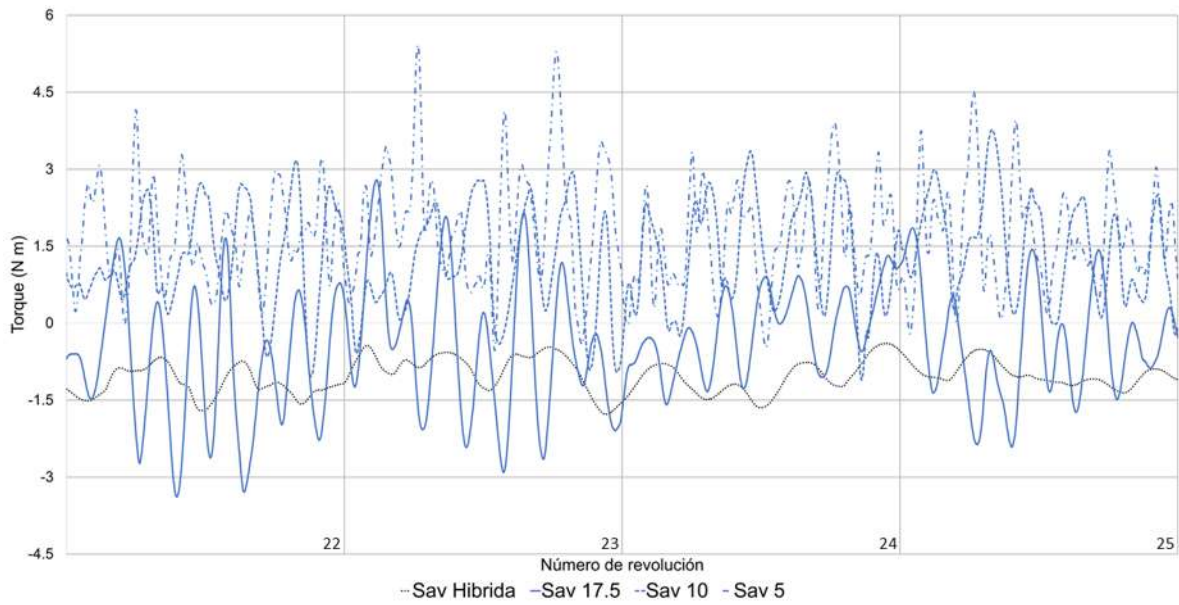


Fig. 5.11. Comparativa del torque del rotor Savonius de la turbina híbrida a 17.5rad/s y de la turbina Savonius a 17.5rad/s, 10rad/s y 5rad/s en la 22.º a la 25.º revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

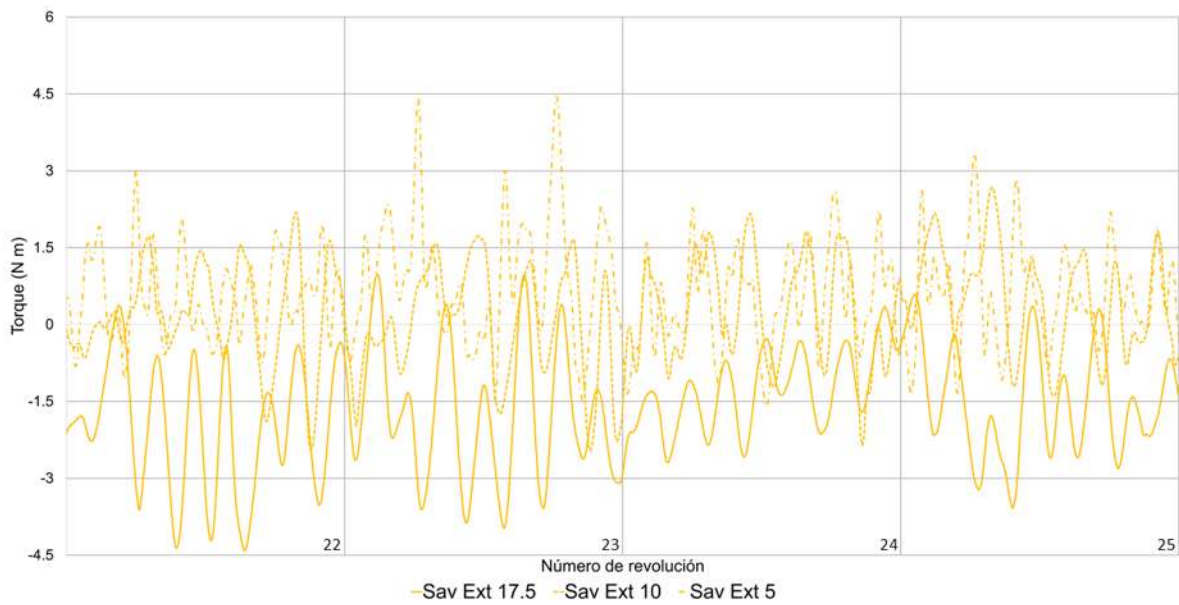


Fig. 5.12. Comparativa del torque del rotor exterior de la turbina Savonius a 17.5rad/s, 10rad/s y 5rad/s en la 22.º a la 25.º revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

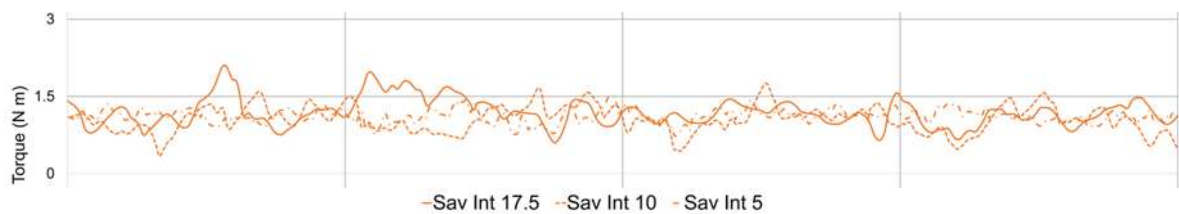


Fig. 5.13. Comparativa del torque del rotor interior de la turbina Savonius a 17.5rad/s, 10rad/s y 5rad/s en la 22.º a la 25.º revolución con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

5.3 Convergencia rotor

Se realiza un estudio de independencia de malla con un incremento azimutal de 0.5° para la malla del rotor, usando la malla E1 para el estator, ver Tabla 5.2. En la Fig. 5.14, Fig. 5.15 y Fig. 5.16 se muestra la comparativa del torque generado en las últimas tres revoluciones con las mallas 1, 2 y 3 de la turbina híbrida, el torque del rotor H y el rotor Savonius, respectivamente.

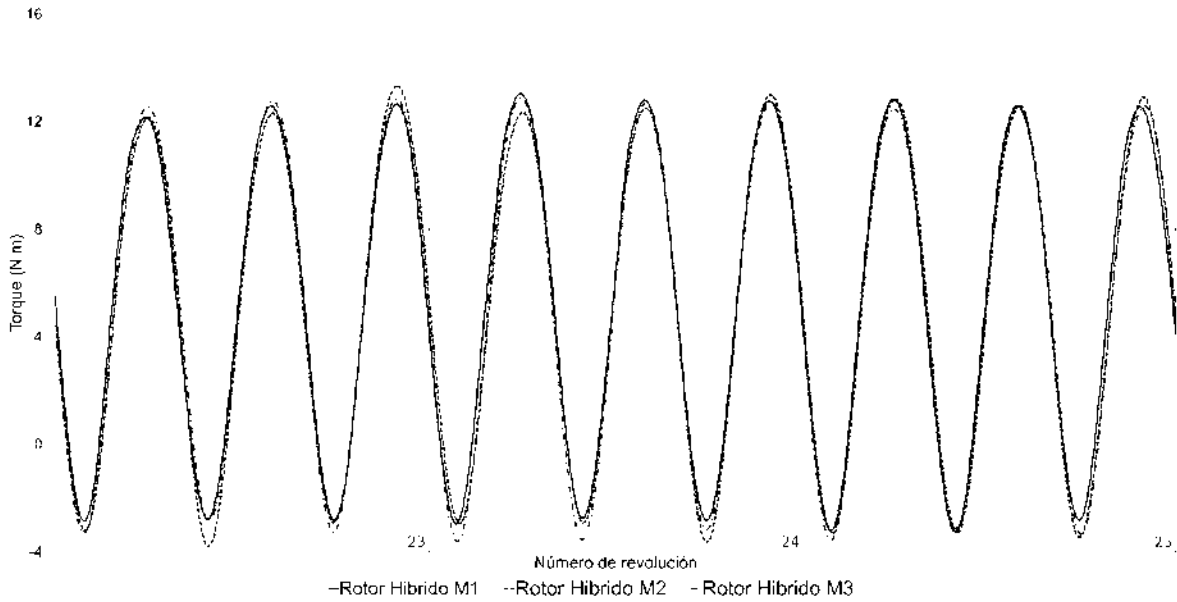


Fig. 5.14. Comparación torque del rotor híbrido con las mallas 1, 2 y 3 en la $23.^\circ$, $24.^\circ$ y $25.^\circ$ revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

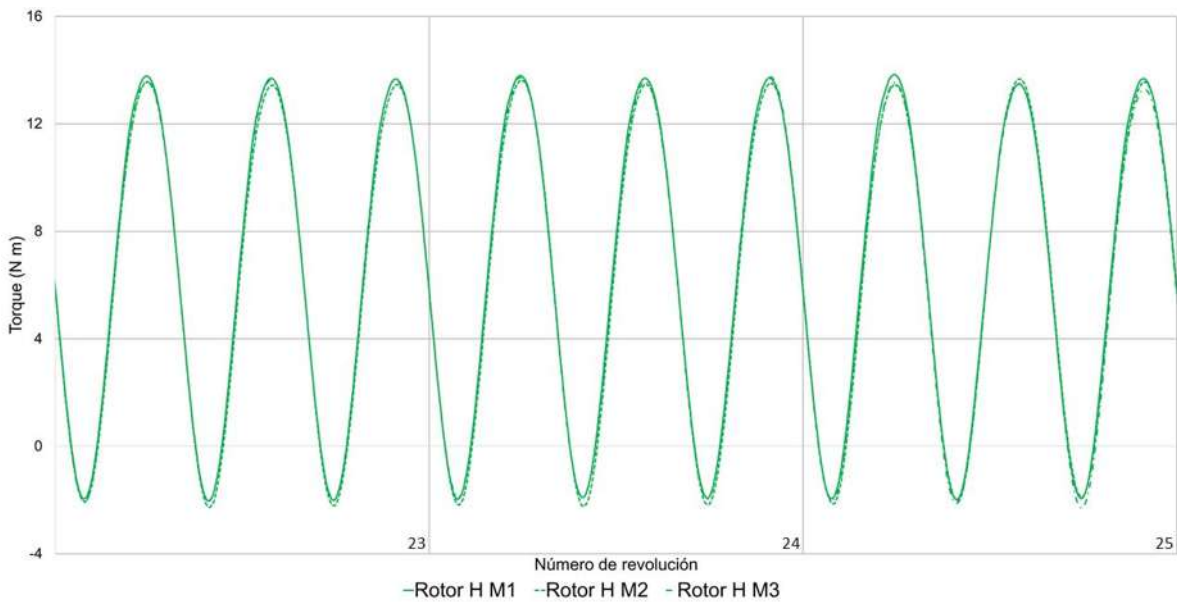


Fig. 5.15. Comparación torque del rotor H con las mallas 1, 2 y 3 en la $23.^\circ$, $24.^\circ$ y $25.^\circ$ revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

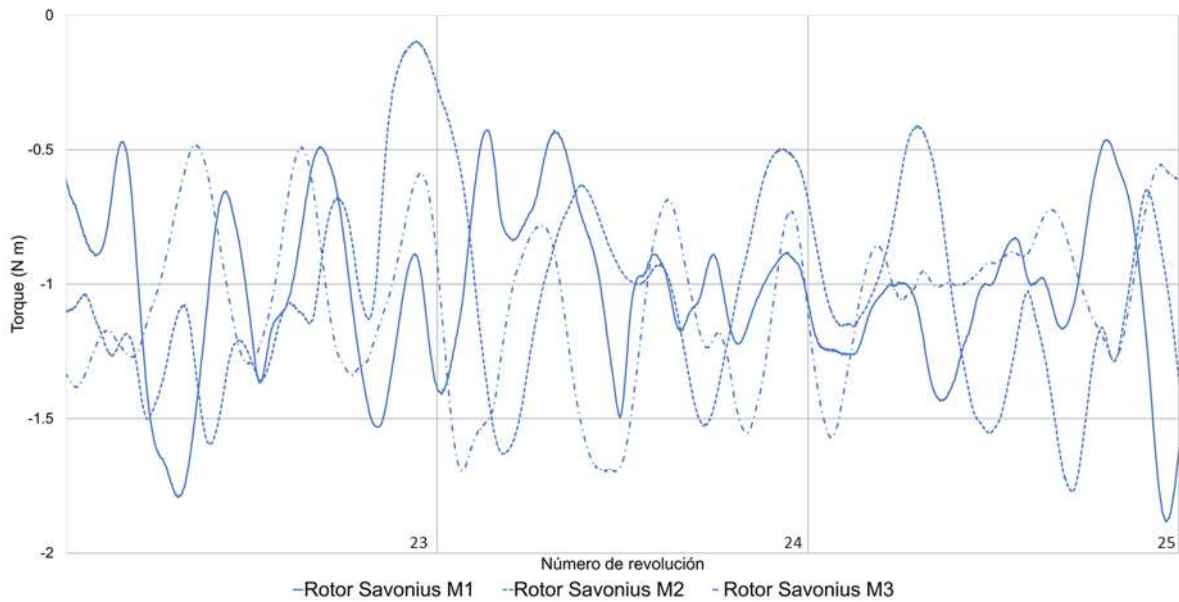


Fig. 5.16. Comparación torque del rotor Savonius con las mallas 1, 2 y 3 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

La Fig. 5.17 muestra a detalle el torque generado con las mallas 1, 2 y 3 de cada rotor y de la turbina híbrida en su vigésima quinta revolución.

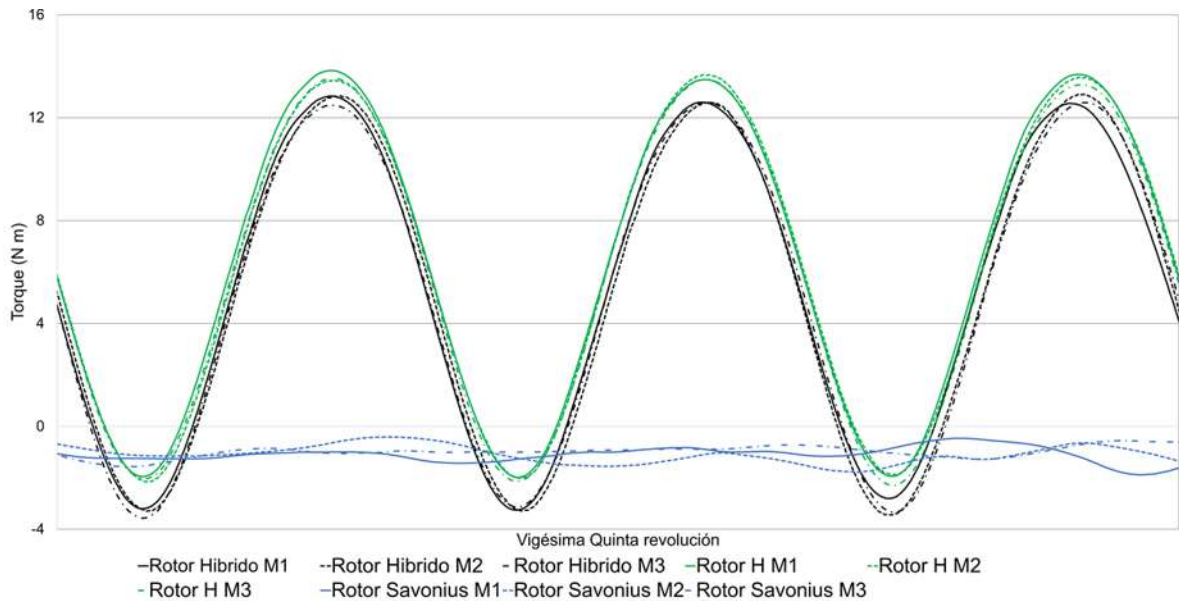


Fig. 5.17. Comparación torque con las mallas 1, 2 y 3 en la vigésima quinta revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

Debido a la falta de un valor experimental con el cual comparar los valores obtenidos en las simulaciones y con base en la premisa de que la precisión de una solución CFD se rige por el número de elementos en la malla, un gran número de celdas conduce a una solución precisa [40], se comparan los valores de torque promedio

de la vigésima quinta revolución obtenidos con las mallas 1, 2 y 3 contra el torque obtenido con un incremento azimutal de 0.25° , siendo la diferencia de 1.5%, 3.9% y 4.2%.

Las diferencias porcentuales son menores al 5%, se elige entonces la malla R2 como la malla para el rotor debido a que se considera optimo el equilibrio entre número de elementos y demanda de recursos computacionales.

5.4 Comparación del torque del rotor H y del rotor H de la turbina híbrida.

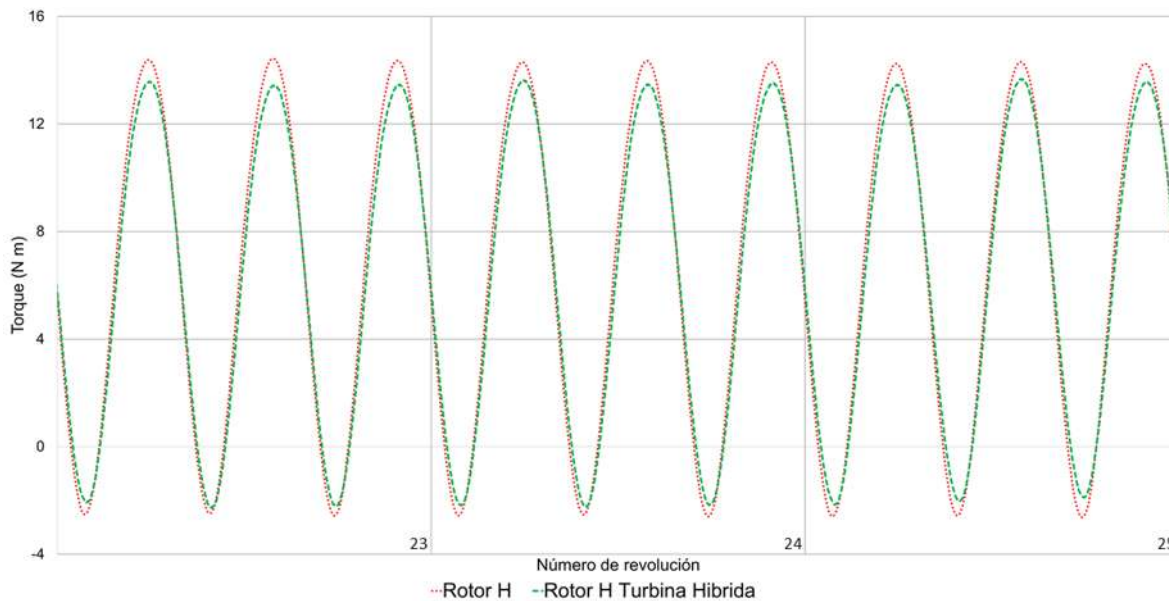


Fig. 5.18. Comparación torque generado por la turbina H y por el rotor H de la turbina Híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° .

La propuesta de trabajo para calcular la potencia y el C_p de la turbina híbrida es usar dos simulaciones 2D; una simula la sección de la turbina híbrida que cuenta con una altura de 1m y la otra simulación corresponde a la parte restante de la turbina H, 1m de altura, ver Fig. 4.4. Los resultados de ambas simulaciones para el rotor H de la turbina híbrida y para la turbina H con un incremento azimutal de 0.5° y en la vigésima quinta revolución se muestran en la Fig. 5.18. No se aprecia mucha diferencia en el torque producido, la diferencia más clara es en referente a los máximos y mínimos del torque. La diferencia porcentual del torque entre el rotor H de la turbina híbrida y la turbina H es de 2.09%, por ello para calcular el torque total de la turbina híbrida completa se aproximará mediante la suma del torque de la turbina híbrida y el torque del rotor H, ya que no existe una diferencia significativa que amerite realizar la simulación y el gasto computacional para simular la turbina H únicamente.

5.5 Convergencia estator

Se realiza un estudio de independencia de malla con un incremento azimutal de 0.5° para la malla del estator, usando la malla R2 para el rotor, ver Tabla 5.2. En la Fig. 5.19, Fig. 5.20 y Fig. 5.21 se muestra la comparativa del torque generado en las últimas tres revoluciones con las mallas 2, 4 y 5 de la turbina híbrida, el torque del rotor H y el rotor Savonius, respectivamente.

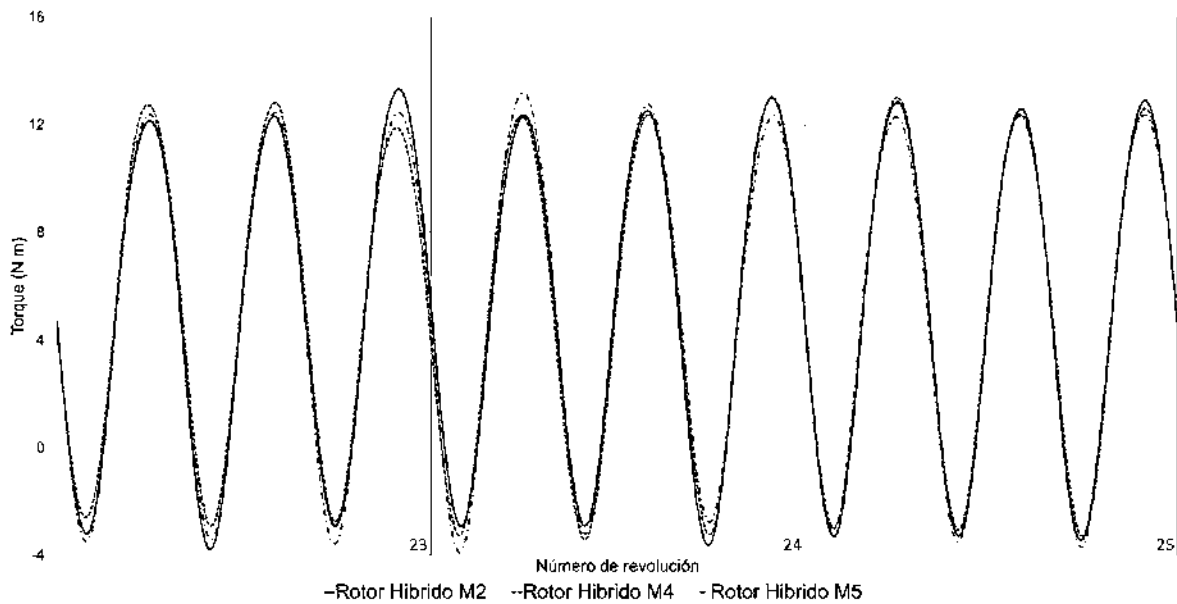


Fig. 5.19. Comparación torque de la turbina híbrida con las mallas 2, 4 y 5 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

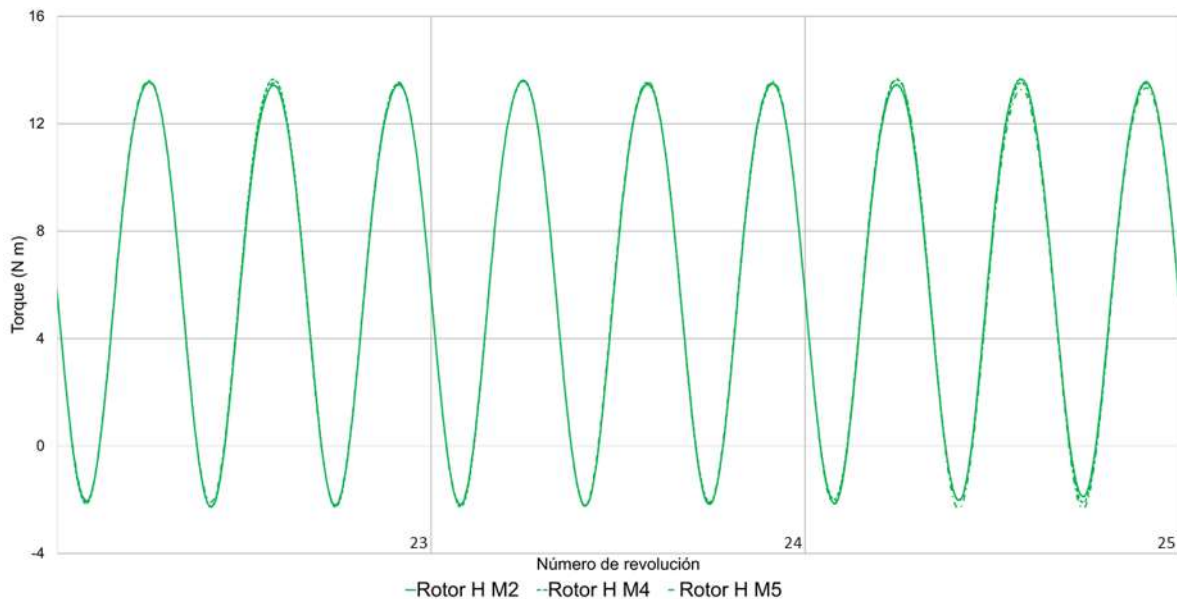


Fig. 5.20. Comparación torque del rotor H con las mallas 2, 4 y 5 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

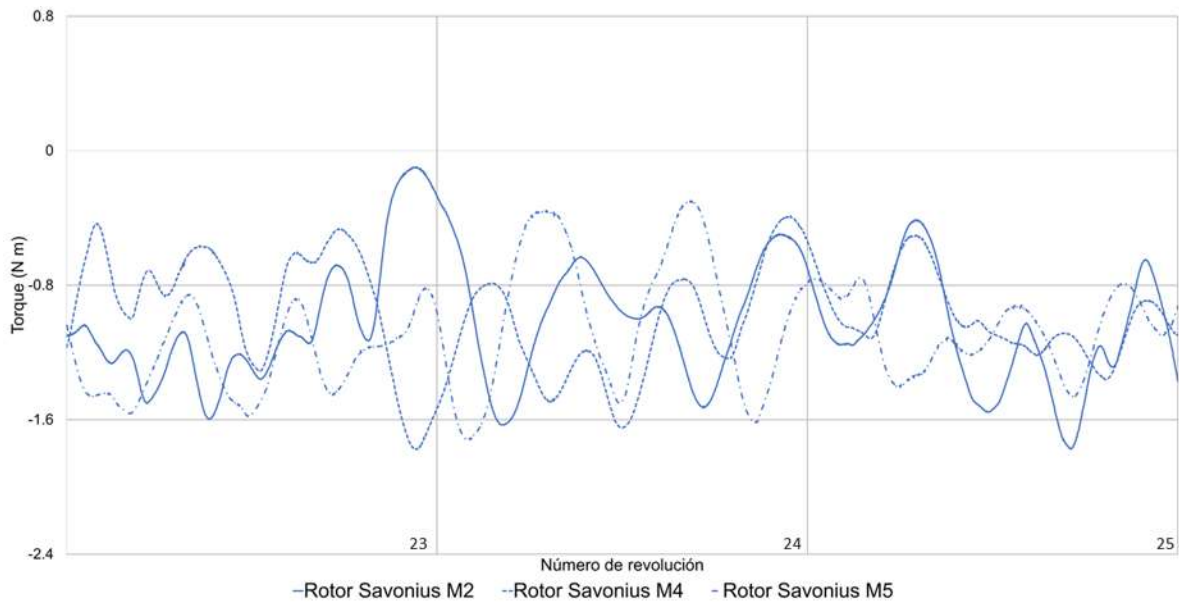


Fig. 5.21. Comparación torque del rotor Savonius con las mallas 2, 4 y 5 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

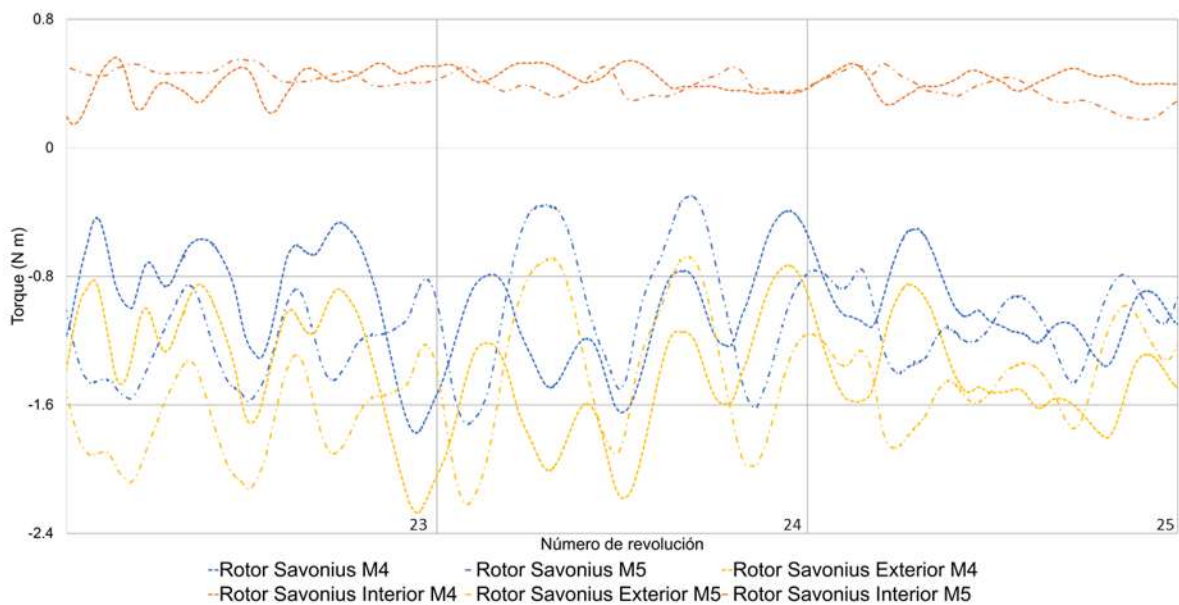


Fig. 5.22. Comparación torque del rotor Savonius y sus rotores interior y exterior de la turbina híbrida con las mallas 4 y 5 en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 7 m/s.

La Fig. 5.22 muestra de forma comparativa el torque por el rotor Savonius Interior y Savonius Exterior con las mallas 2, 4 y 5. La Fig. 5.23 muestra a detalle el torque generado con las mallas 2, 4 y 5 de cada rotor y de la turbina híbrida en su vigésima quinta revolución.

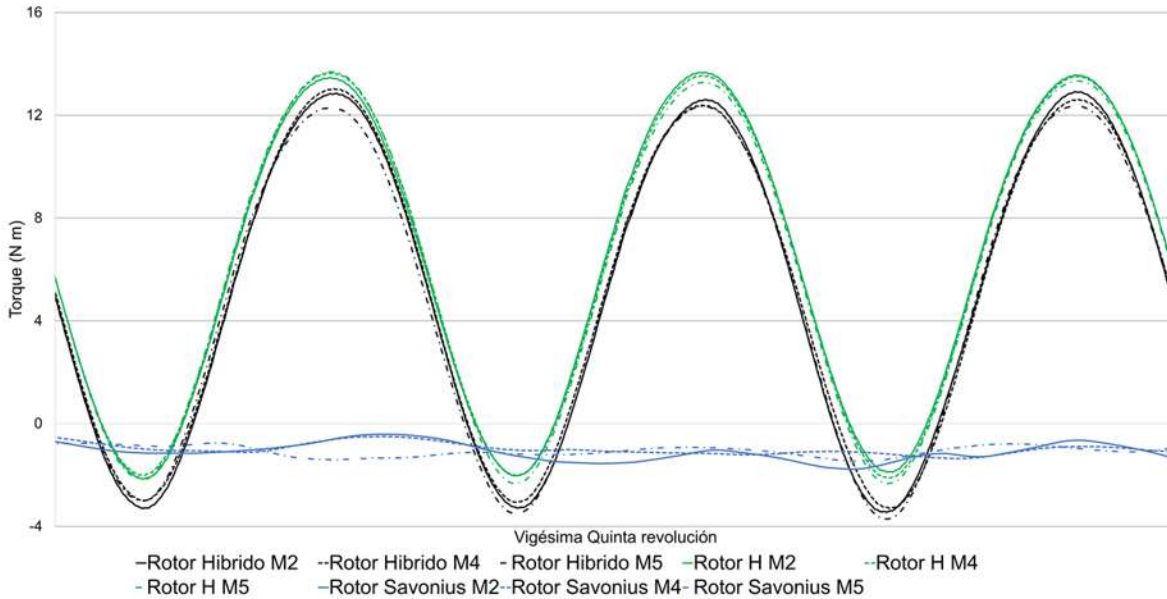


Fig. 5.23. Comparación torque con las mallas 2, 4 y 5 en la vigésima quinta revolución con un incremento azimutal de 0.5° .

De igual forma debido a la falta de un valor experimental con el cual comparar los valores obtenidos en las simulaciones, se comparan los valores de torque promedio de la vigésima quinta revolución obtenidos con las mallas 2, 4 y 5 contra el torque obtenido con un incremento siendo la diferencia de 3.9%, 2.2% y 5.8%, se elige combinación de malla 4 (malla R2 y malla E2) como la malla para realizar el resto de las simulaciones con diferente velocidad de viento debido a que se considera óptimo el equilibrio entre número de elementos, tiempo y demanda de recursos computacionales.

5.6 Potencia y C_p de la turbina híbrida

La Fig. 5.24, Fig. 5.25, Fig. 5.26, Fig. 5.27, Fig. 5.28 y Fig. 5.29 muestran el torque de la turbina híbrida y sus rotores en las última tres revoluciones simuladas con la malla 4 y un incremento azimutal de 0.5° . Se observa un comportamiento predominante sinusoidal de la turbina híbrida debido a que predomina el comportamiento sinusoidal del rotor H. El torque de la turbina híbrida varía ligeramente en sus picos máximos y mínimos debido a las fluctuaciones del rotor Savonius. El rotor Savonius proporciona un torque neto negativo, que es la suma del Savonius Interior y el Savonius Exterior. El torque del Savonius Interior es positivo y tiende a tener un valor prácticamente constante en cada revolución en comparación con el torque generado por el Savonius Exterior que es negativo y fluctúa en mayor medida.

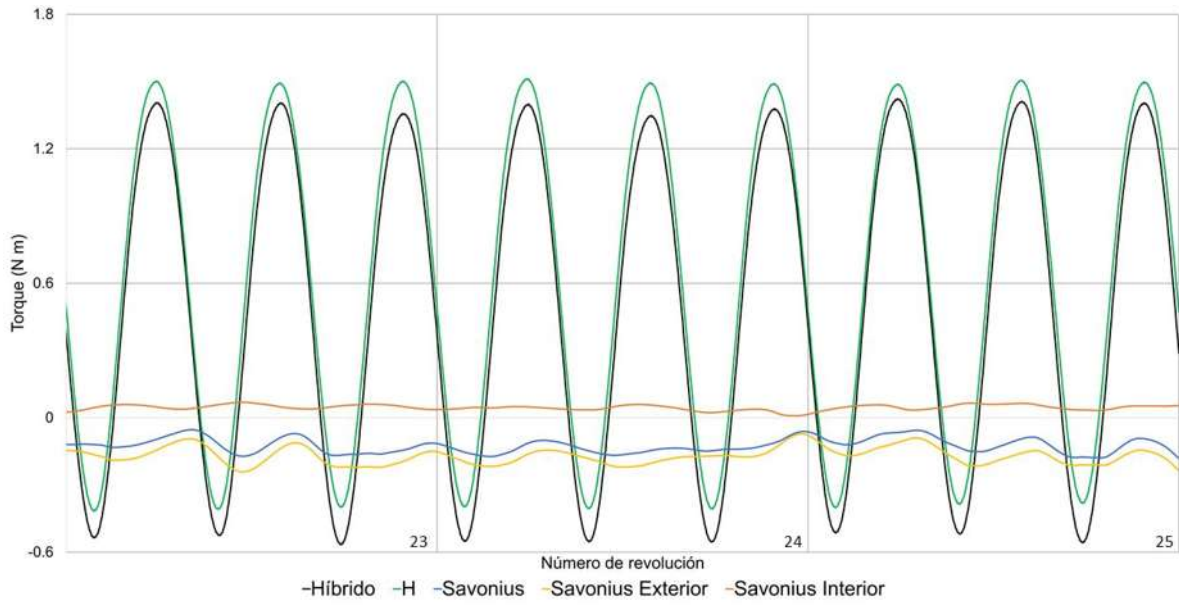


Fig. 5.24. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 2.5m/s.

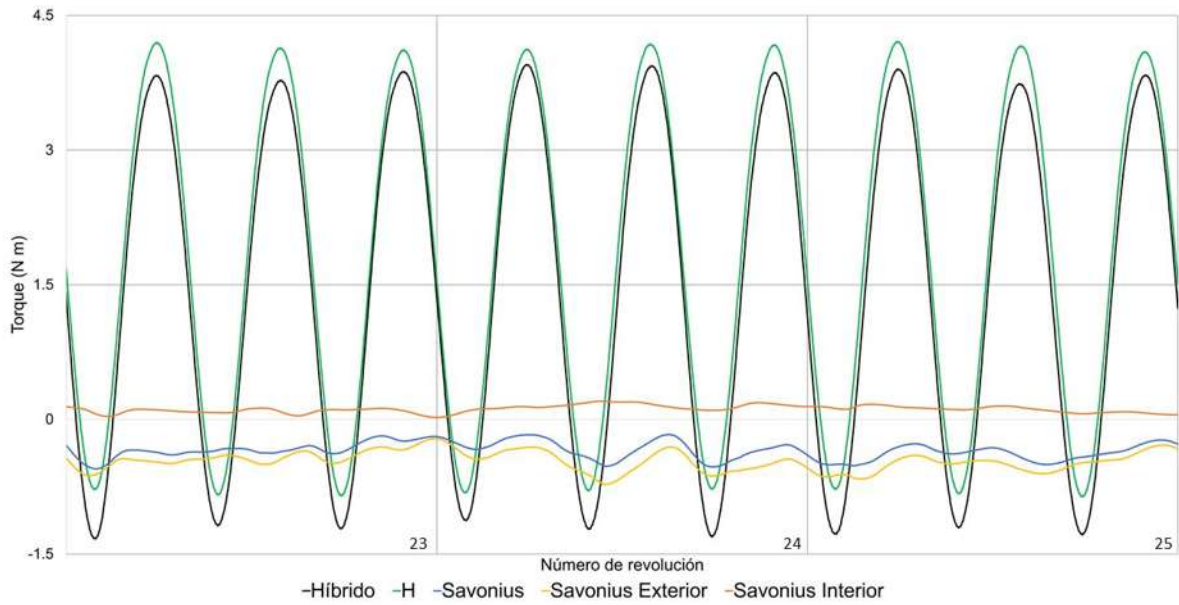


Fig. 5.25. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 4m/s.

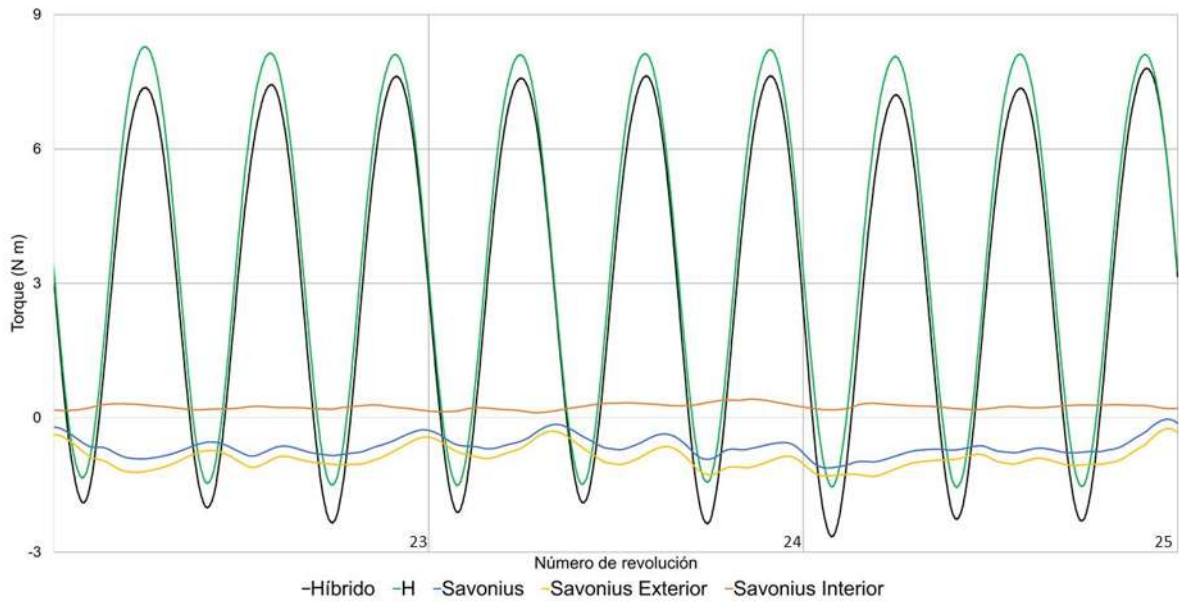


Fig. 5.26. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 5.5m/s.

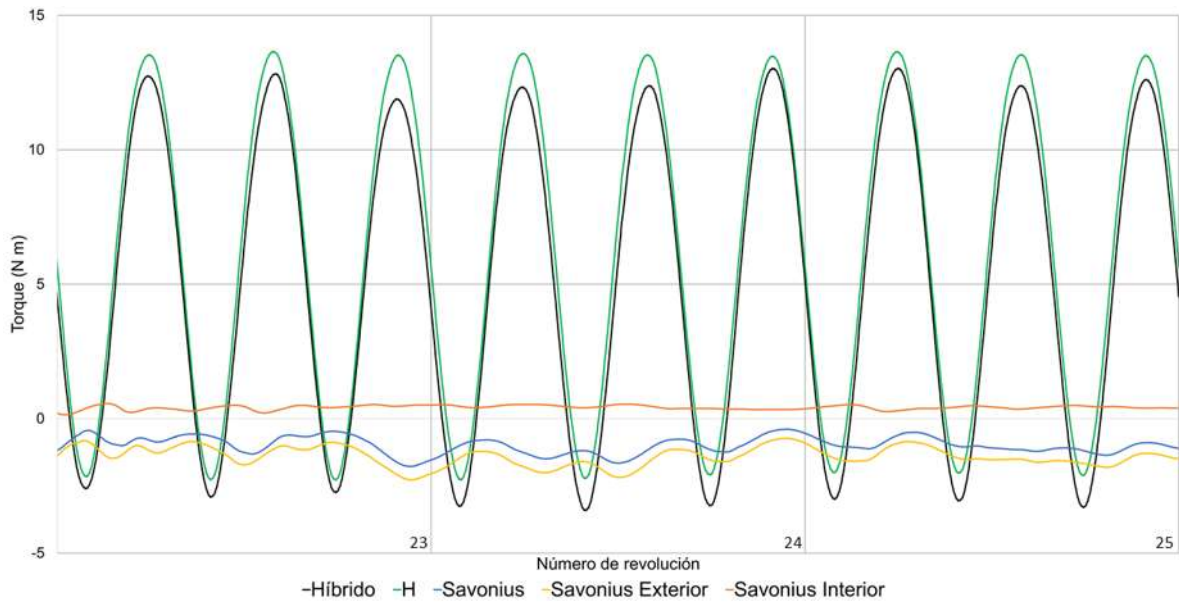


Fig. 5.27. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de de viento de 7m/s.

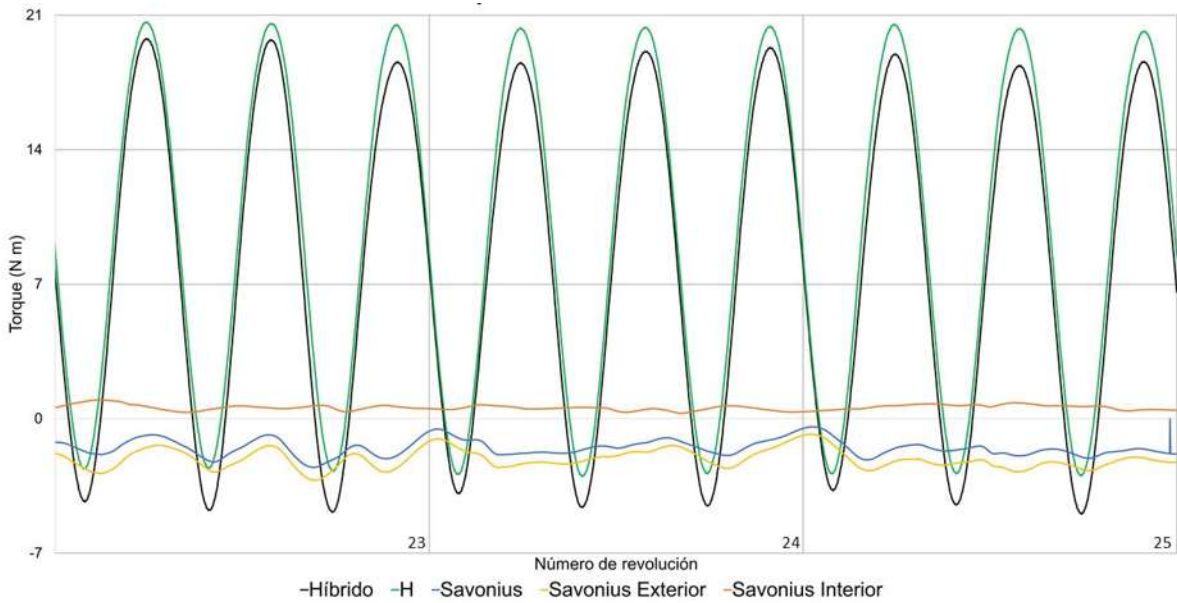


Fig. 5.28. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 8.5m/s.

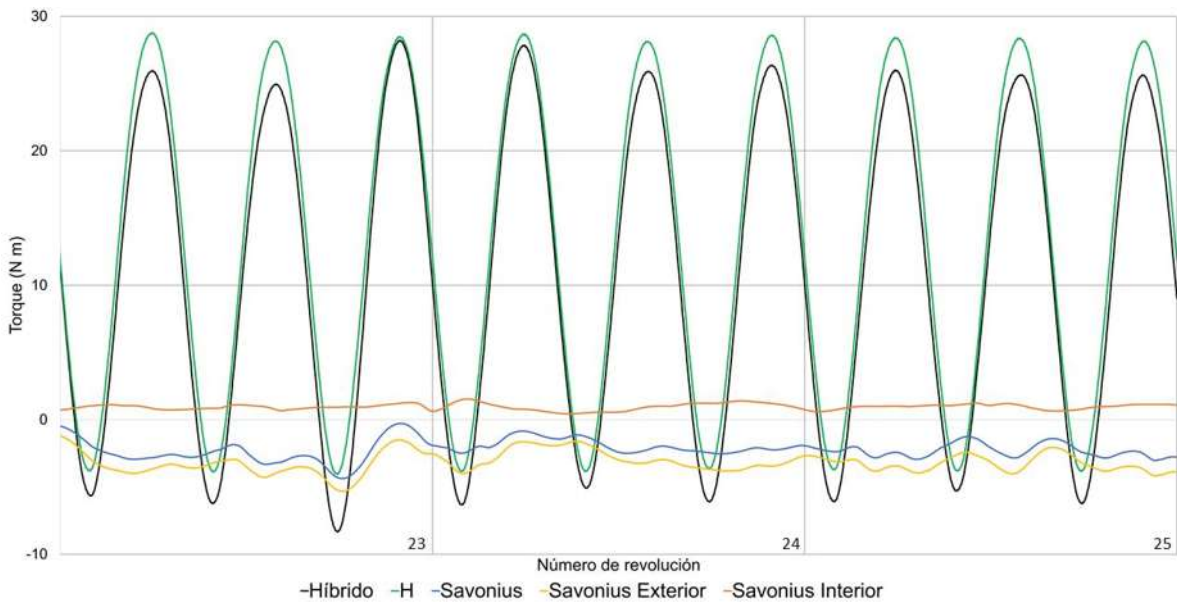


Fig. 5.29. Torque de la turbina híbrida en la 23.°, 24.° y 25.° revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad de entrada de viento de 10m/s.

Para calcular la potencia de la turbina híbrida se obtiene el torque total que es la suma del torque de la turbina híbrida y del rotor H, y posteriormente se multiplica por su velocidad angular. El coeficiente de potencia, C_p se calcula usando la Ec. 2.2. Los resultados se presentan en la Tabla 5.3 y en el Fig. 5.30.

Tabla 5.3. Relación de velocidades del viento y potencia disponible

| V_{∞} (m/s) | ω (rad/s) | $P_{turbina}$ (W) | P_{aire} (W) | C_p |
|--------------------|------------------|-------------------|----------------|-------|
| 2.5 | 6.25 | 7.0 | 37.1 | 0.189 |
| 4 | 10 | 32.6 | 152.1 | 0.214 |
| 5.5 | 13.75 | 88.9 | 395.5 | 0.225 |
| 7 | 17.5 | 200.1 | 815.3 | 0.245 |
| 8.5 | 21.25 | 365.3 | 1459.7 | 0.250 |
| 10 | 25 | 602.9 | 2376.9 | 0.254 |

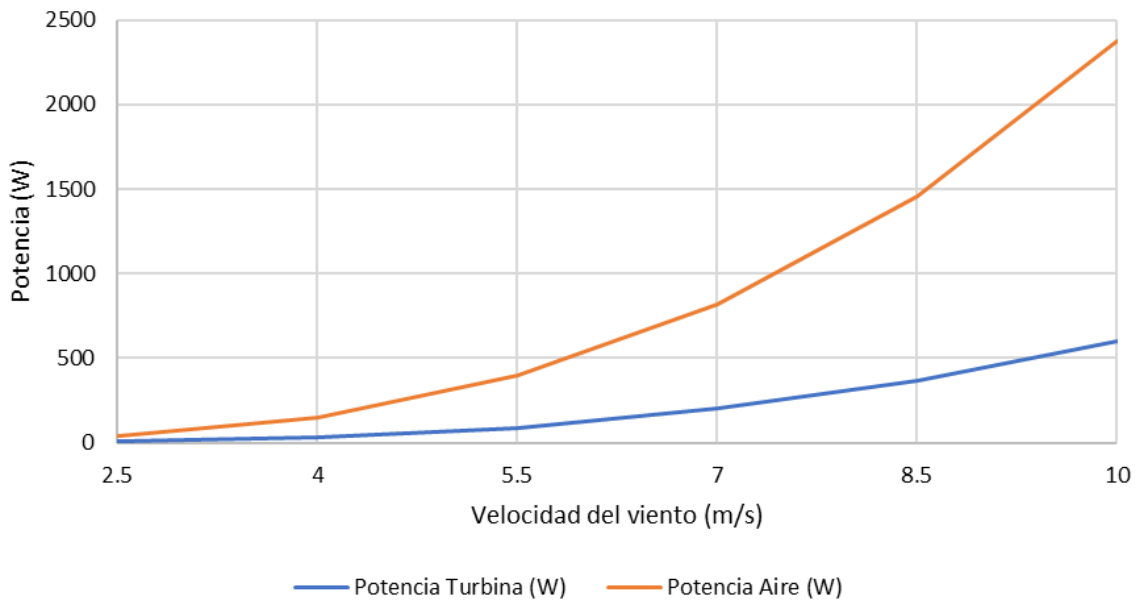


Fig. 5.30. Potencia generada por la turbina y potencia disponible a diferentes velocidades del viento.

5.7 Discos inductores

En la simulación el viento ingresa por Inlet (Cara A) y fluye a través del prisma hasta la salida Outlet (Cara B), ver Fig. 4.12. Los datos obtenidos de las simulaciones son el aumento de la velocidad de viento debido a los discos de inducción. Se tomaron 21 puntos representativos en 3 planos, es decir 7 puntos por plano: Disco Frontal (DF), Disco Posterior (DP), Rotor Frontal (RF), Rotor Posterior (RP), Rotor Izquierdo (RI), Rotor Derecho (RD) y Centro (C).

El plano central se ubica a la mitad de la distancia entre los discos inductores; el plano superior se encuentra ubicado en el espacio que separa el disco de inducción y la parte superior del rotor de la turbina eólica; el plano inferior se encuentra ubicado en el espacio que separa el disco de inducción y la parte inferior del rotor de la turbina eólica. Ver Fig. 5.31 y Fig. 5.32.

En la Fig. 5.33 y Fig. 5.34 se muestran los contornos de velocidades para los discos de inducción elípticos, para una velocidad de entrada de 12m/s. Se observa que el viento efectivamente se acelera de forma homogénea en el interior entre los discos inductores elípticos.

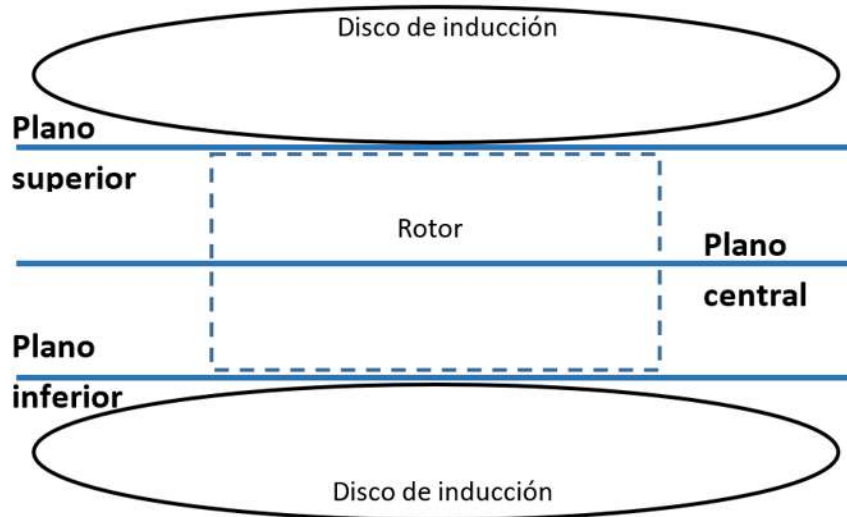


Fig. 5.31. Vista transversal de los planos usados de referencia.

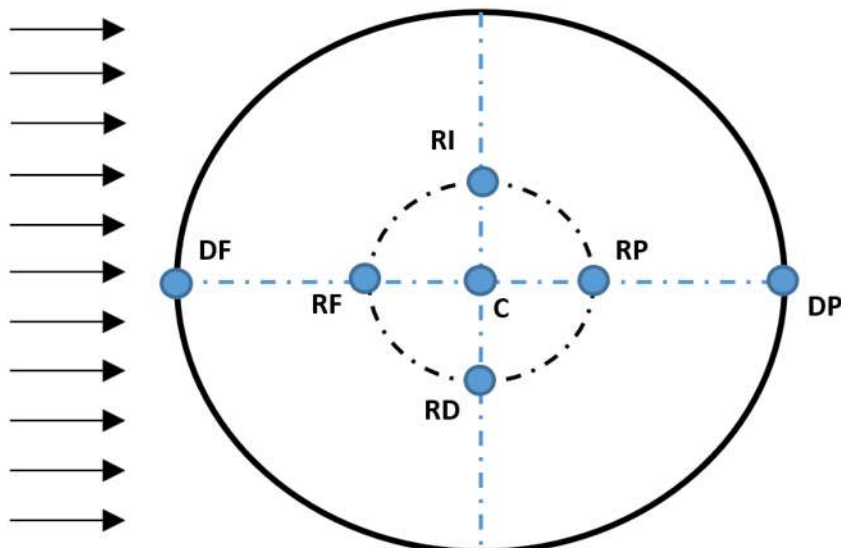


Fig. 5.32. Vista superior de los planos usados de referencia.

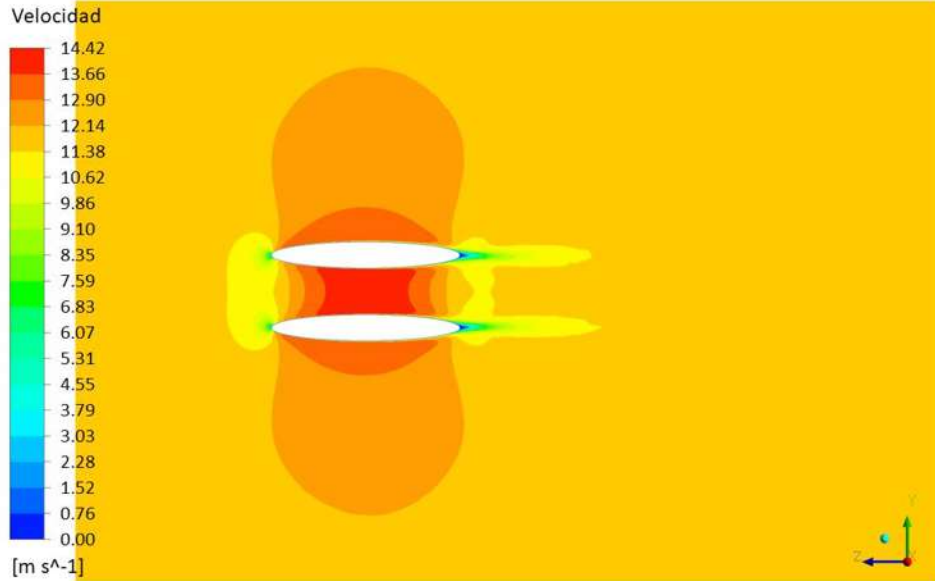


Fig. 5.33. Contorno de la velocidad de viento centrada y perpendicular a la cara A. Velocidad de viento de entrada 12m/s

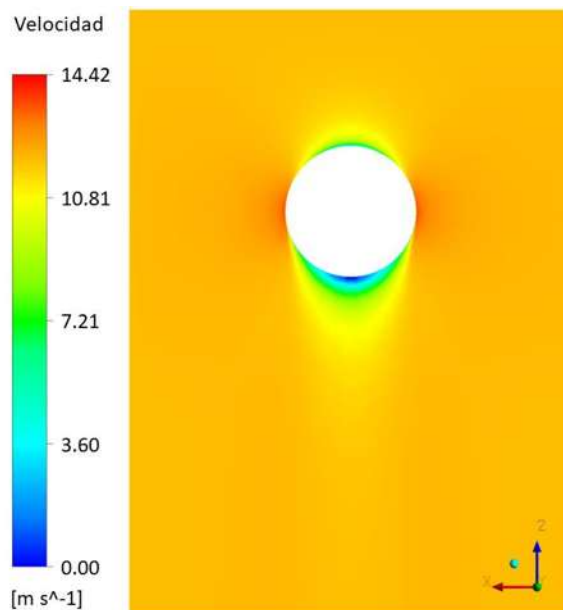


Fig. 5.34. Contorno de la velocidad de viento perpendicular a la cara superior. Velocidad de viento de entrada 12m/s

En la Fig. 5.35, Fig. 5.36 y Fig. 5.37 se presentan los resultados de la velocidad del viento en 5 puntos de cada plano (superior, central o inferior) para todo el rango de velocidades de entrada de 3m/s a 12 m/s. Los puntos que son DF, RF, C, RP y DP están ordenados para que se pueda seguir el cambio de la velocidad en un mismo sentido, ya que los puntos se encuentran en el plano perpendicular a la cara del viento, ver Fig. 5.33.

Los valores de la velocidad para los puntos restantes que son RI y RD, ver Fig. 5.32, no se encuentran graficados ya que la diferencia porcentual con el valor del punto

C que se encuentre en el mismo plano (central, superior o inferior) es menor al 1.5% por lo que no se apreciaría significativamente en las gráficas.

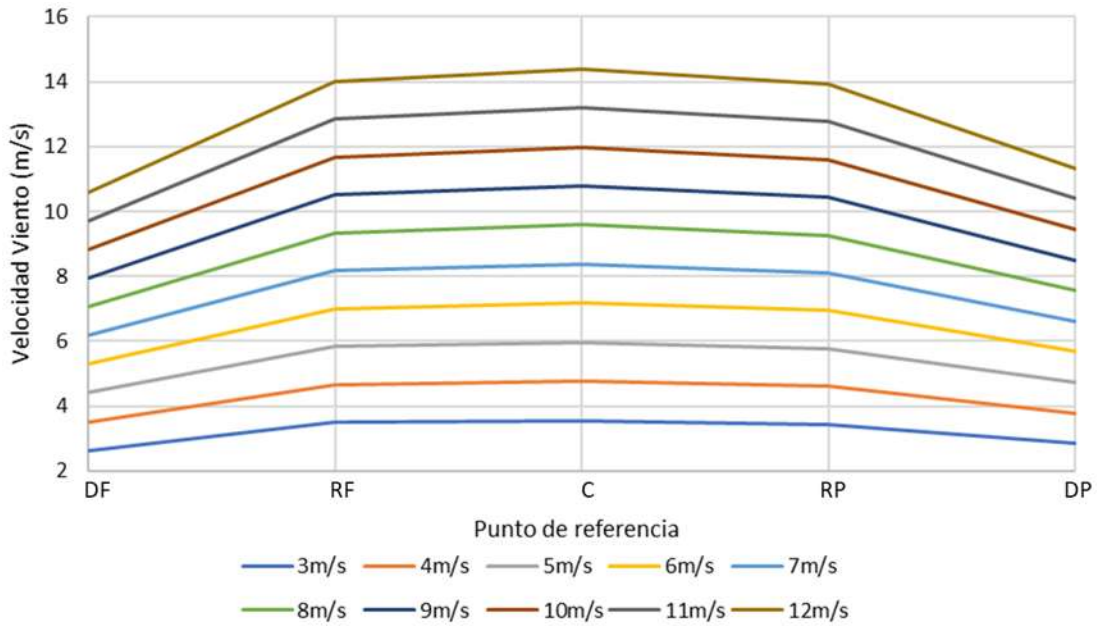


Fig. 5.35. Velocidades en los puntos de referencia para el plano superior.

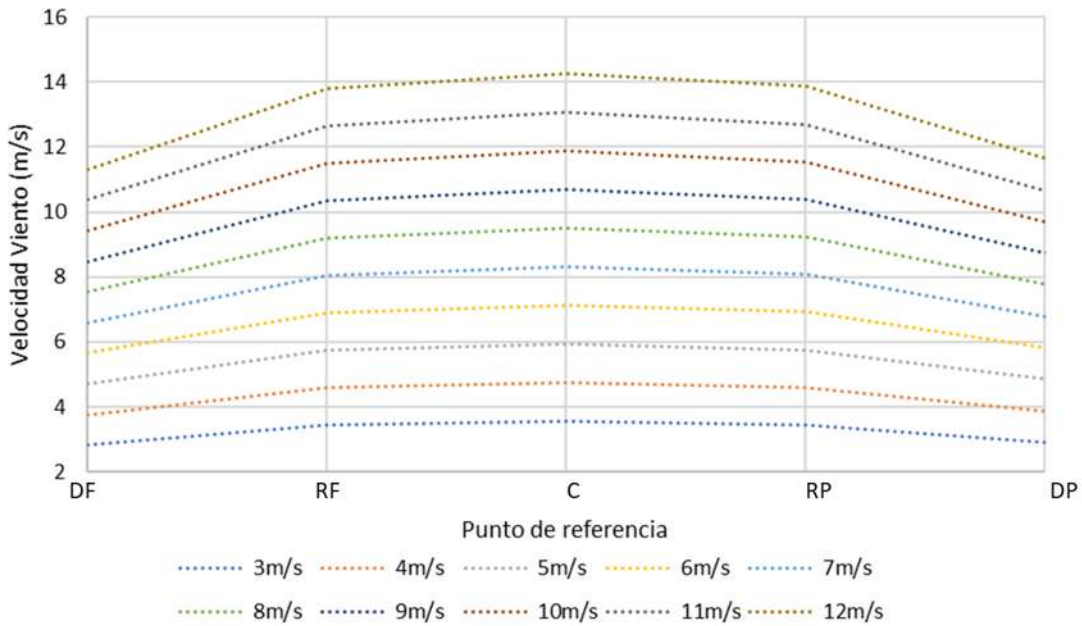


Fig. 5.36. Velocidades en los puntos de referencia para el plano central.

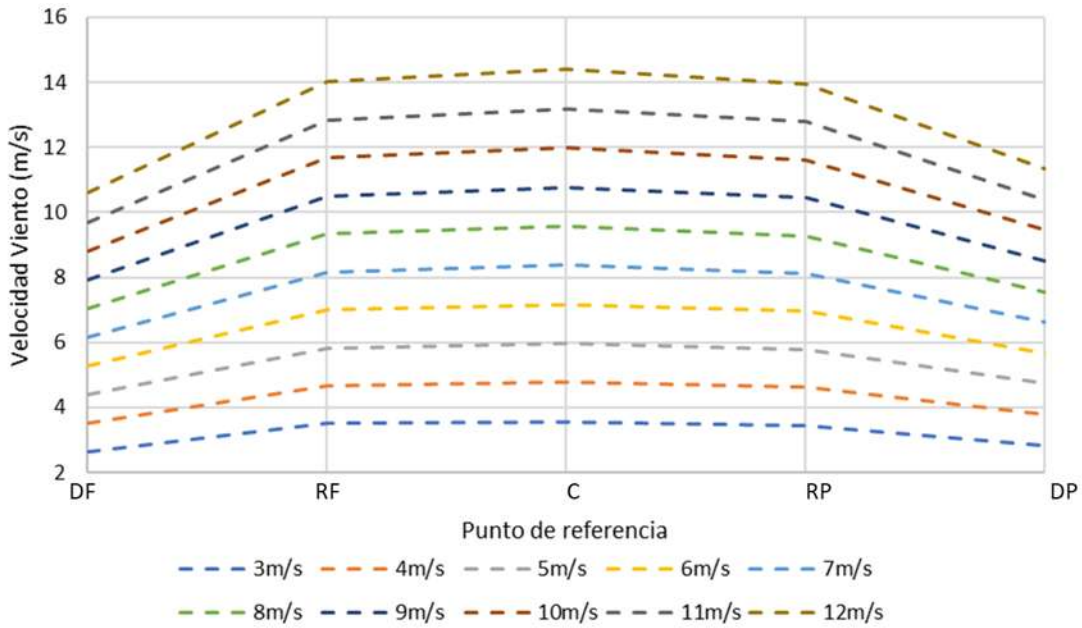


Fig. 5.37. Velocidades en los puntos de referencia para el plano inferior.

En la Fig. 5.38 se analiza más a detalle el comportamiento de la velocidad del viento en su paso por los discos, en forma comparativa para los tres planos (superior, central e inferior). La Fig. 5.38 es representativa del modelo, ya que el patrón se repite para las otras velocidades, se tomó la velocidad de 12m/s para que coincidieran con la velocidad de las Fig. 5.33 y Fig. 5.34. Se observa que la tendencia de velocidades de viento es idéntica en los planos superior e inferior en sus respectivos puntos. Esto es de esperarse por la simetría geométrica de los discos respecto del plano central y a la velocidad constante y uniforme de entrada. También se observa que el patrón es ligeramente diferente en el plano central.

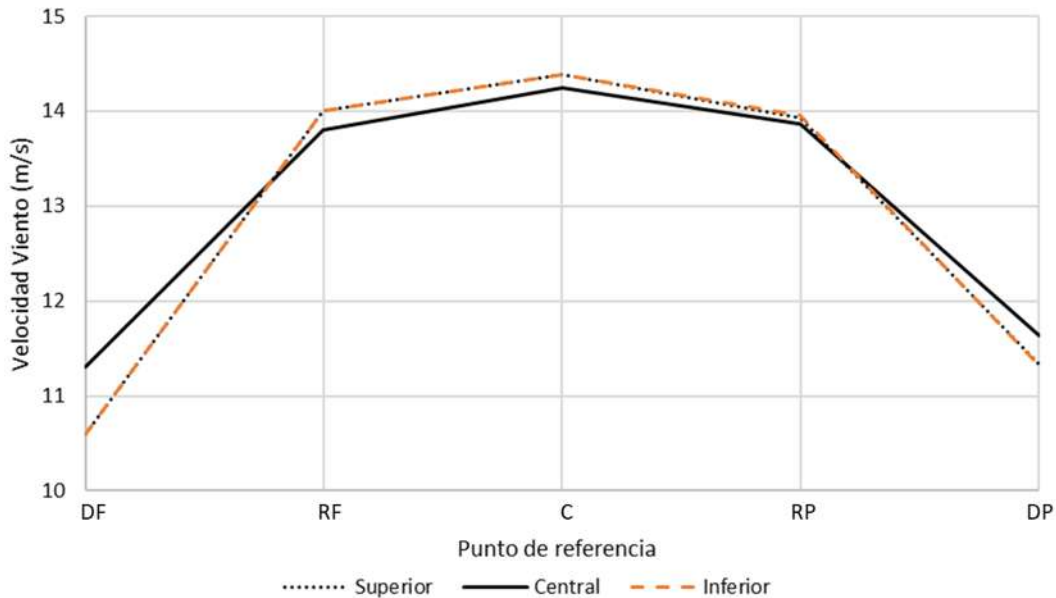


Fig. 5.38. Comparativa del patrón de velocidad de viento para 12m/s en los planos superior, central e inferior.

Los discos inductores elípticos siguen el mismo patrón de cambio en la velocidad del viento en sus tres planos (superior, central e inferior) aumentando hasta el punto central (C) y posteriormente disminuyendo hasta la salida del disco (DP). Haciendo un promedio con los valores de los puntos RF, RP, RD, RI y C en los tres planos, que son los puntos donde se encontraría el rotor de la turbina eólica, y comparándolo con el de la velocidad de entrada se observa un aumento del 15%.

Lo anterior concuerda con la finalidad de los discos inductores que es mejorar el rendimiento del rotor de una turbina eólica de eje vertical.

Capítulo VI

6.1 Conclusiones

El estudio del estado del arte de las turbinas eólicas de eje vertical muestra las ventajas de desempeño sobre las turbinas eólicas de eje horizontal al no necesitar sistema de guiñada, tener un mantenimiento más sencillo, funcionar a velocidades de viento menores y flujos complejos y turbulentos sobre todo para zonas urbanas.

La simulación numérica con software CFD representa una alternativa confiable para la evaluación del desempeño del diseño de una turbina eólica de eje vertical. Existen muchos aspectos a considerar para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos entre los más importantes: la malla del dominio computacional, el modelo de turbulencia, el tipo de simulación (dependiente del tiempo o no dependiente del tiempo) y la técnica de simulación (Sliding Mesh, Dynamic Mesh, Single Reference Frame). Preferentemente se debería validar la simulación con datos experimentales. Ante la falta de datos experimentales la simulación realizada se respalda fuertemente en la literatura. Los resultados presentados concuerdan con lo reportado, la forma sinusoidal del torque del rotor H y la negatividad del torque del rotor Savonius operando como un freno para la turbina híbrida. La potencia generada permanece debajo del límite de Betz y el C_p de la turbina se encuentra dentro de los rangos para turbinas eólicas de eje vertical.

Los discos inductores elípticos aumentan la velocidad del viento de forma homogénea en la zona del rotor alrededor de un 15% respecto de la velocidad de entrada al producirse un efecto Venturi. Este incremento del 15% podría aprovecharse para las turbinas eólicas de eje vertical y aumentar la potencia generada de la turbina en aproximadamente un 50%

6.2 Recomendaciones

Las simulaciones son una aproximación de la realidad, que permiten una mejor comprensión de los fenómenos físicos al ofrecer más datos y una gran facilidad para visualizarlos en comparación con la experimentación. La técnica de Sliding Mesh fuerza al rotor a girar a la velocidad angular programada y ofrece resultados confiables cuando la velocidad angular introducida en el software es idéntica o próxima a la velocidad angular real. La finalidad del presente trabajo es obtener resultados que permitan corroborar el diseño de la turbina, por lo que la técnica de Sliding Mesh cumple con el cometido. Sin embargo, se recomienda el uso de otra técnica de simulación como las mallas dinámicas para predecir con certeza el desempeño de la turbina y se puedan obtener mayor variedad de datos como la velocidad angular de la turbina para determinada velocidad de viento.

Se estimó por medio de la simulación RANS y sin turbina la optimización de los concentradores eólicos de discos inductores. Evaluar de forma experimental la optimización de los concentradores eólicos de discos inductores usando una turbina eólica sería lo ideal. Para predecir mediante simulación la optimización de los concentradores eólicos de discos inductores es necesario realizar estudios en 2D para obtener perfiles de velocidad y realizar un dimensionamiento óptimo del dominio computacional para una posterior simulación en 3D. En la simulación en 3D lo idóneo es probar los discos con una turbina eólica usando mallas dinámicas.

Referencias bibliográficas

- [1] J. Salgado y M. A. Borjas, “Energía del viento”, *Energías Altern.*, pp. 18–29, 2010.
- [2] Sener, “Prospectivas de Energías Renovables (2018-2032)”, *Secretaría de Energía*. p. 73, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener>.
- [3] Sener, “Prospectivas de Energías Renovables (2012-2026)”. 1369.
- [4] Gobierno del Estado de Jalisco, “Plan Estatal de Desarrollo Jalisco (PED) 2013-2033”, p. 484, 2016.
- [5] Cabildo de Tenerife y Banco de Ideas de Negocios Ambientales Sostenibles BINAS, “Instalación de energía minieólica en viviendas unifamiliares”. .
- [6] Fundación de la Energía de la Comunidad de la Madrid y Consejería de Economía y Hacienda de la Comunidad de Madrid, “Guía sobre Tecnología Minieólica”. Madrid.
- [7] “The Wind Power”, 2021. https://www.thewindpower.net/windfarms_list_es.php (consultado sep. 03, 2020).
- [8] J. F. Manwell, J. G. McGowan, y A. L. Rogers, *WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application Second Edition*, Second Edi. 2009.
- [9] M. Islam, D. S. K. Ting, y A. Fartaj, “Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, núm. 4, pp. 1087–1109, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.10.023.
- [10] R. Kumar, K. Raahemifar, y A. S. Fung, “A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, núm. February, pp. 281–291, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.033.
- [11] M. R. Islam, S. Mekhilef, y R. Saidur, “Progress and recent trends of wind energy technology”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 456–468, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.007.
- [12] M. Ghasemian, Z. N. Ashrafi, y A. Sedaghat, “A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 149, pp. 87–100, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.016.
- [13] X. Jin, G. Zhao, K. Gao, y W. Ju, “Darrieus vertical axis wind turbine: Basic research methods”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 212–225, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.021.
- [14] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, y Z. Hussain, “Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, núm. 4, pp. 1926–1939, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.12.004.
- [15] W. Tjiu, T. Marnoto, S. Mat, M. H. Ruslan, y K. Sopian, “Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations”, *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 50–67, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.09.038.
- [16] N. C. Batista, R. Melício, V. M. F. Mendes, M. Calderón, y A. Ramiro, “On a self-start Darrieus wind turbine: Blade design and field tests”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 508–522, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.147.
- [17] F. Toja-Silva, A. Colmenar-Santos, y M. Castro-Gil, “Urban wind energy

- exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions - Opportunities and challenges”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 364–378, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.052.
- [18] CIATEQ, “CIATEQ Bienvenidos”, 2020. <https://www.ciateq.mx/index.php/conoce-ciateq.html> (consultado jul. 21, 2020).
- [19] T. M. Letcher, *Wind Energy Engineering A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. .
- [20] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, y E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. WILEY, 2001.
- [21] K. Ptasinski, “Renewable energy resources, vol 89”. 2015.
- [22] A. Yusof y M. R. Mohamed, “Vertical Axis Wind Turbines: An Overview”, *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 632, pp. 821–835, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-2317-5_68.
- [23] J. D. Jiménez Licea, “ANÁLISIS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA MÁQUINA EÓLICA PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA CASA HABITACIÓN”, Instituto Politecnico nacional, Unidad Azcapotzalco, 2016.
- [24] D. Wood, *Small Wind Turbines Analysis, Design and Application*. Springer, 2012.
- [25] E. Hau, *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Second Edi. Springer.
- [26] I. Paraschivoiu, *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. POLYTECHNIC INTERNATIONAL PRESS, 2002.
- [27] J. M. Darrieus Georges, “Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current”, US1835018A, 1926.
- [28] H. J. Sutherland, D. E. Berg, y T. D. Ashwill, “SANDIA REPORT, SAND2012-0304, A Retrospective of VAWT Technology”, 2012.
- [29] W. Tjiu, T. Marnoto, S. Mat, M. H. Ruslan, y K. Sopian, “Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: Challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development”, *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 560–571, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.10.039.
- [30] A. Hosseini y N. Goudarzi, “Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 189, núm. March, pp. 49–59, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.03.068.
- [31] S. M. Rassoulinejad-Mousavi, M. Jamil, y M. Layeghi, “Experimental study of a combined three bucket H-rotor with savonius wind turbine”, *World Appl. Sci. J.*, vol. 28, núm. 2, pp. 205–211, 2013, doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.28.02.1429.
- [32] S. Bhuyan y A. Biswas, “Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 859–867, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.056.
- [33] X. Liang, S. Fu, B. Ou, C. Wu, C. Y. H. Chao, y K. Pi, “A computational study of the effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a Darrieus-Savonius combined wind turbine”, *Renew. Energy*, vol. 113, pp.

- 329–334, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.071.
- [34] S. Shikha, T. S. Bhatti, y D. P. Kothari, “Air concentrating nozzles: A promising option for wind turbines”, *Int. J. Energy Technol. Policy*, vol. 3, núm. 4, pp. 394–412, 2005, doi: 10.1504/IJETP.2005.008403.
- [35] C. Shonhiwa y G. Makaka, “Concentrator Augmented Wind Turbines: A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1415–1418, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.067.
- [36] S. K. Thangavelu, C. Y. Goh, y C. V. Sia, “Design and Flow Simulation of Concentrator Augmented Wind Turbine”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 501, núm. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/501/1/012041.
- [37] Shikha, T. S. Bhatti, y D. P. Kothari, “A new vertical axis wind rotor using convergent nozzles”, *LESCOPE 2003 - 2003 Large Eng. Syst. Conf. Power Eng. Energy Futur. Conf. Proc.*, vol. 110016, pp. 177–181, 2003, doi: 10.1109/LESCPE.2003.1204700.
- [38] G. J. Marin Tellez, V. Lopez Garza, P. Marin Tellez, y A. Santibañez Maldonado, “Inductor Disc CFD Analysis for VAWT”, *J. Technol. Eng.*, vol. 5, núm. 16, pp. 1–11, 2021, doi: 10.35429/JTEN.2021.16.5.1.11.
- [39] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Second Edi. 2007.
- [40] J. Tu, G. Heng Yeoh, y C. Liu, *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*. 1995.
- [41] M. Peric y J. H. Ferziger, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd Editio. .
- [42] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, vol. 3035, núm. September. DCW Industries, 2016.
- [43] T. Petrilă y D. Trif, *Basics of Fluid Mechanics and Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Springer.
- [44] A. Rezaeiha, H. Montazeri, y B. Blocken, “On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines”, *Energy*, vol. 180, pp. 838–857, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.053.
- [45] P. R. Spalart y S. R. Allmaras, “One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows”, en *30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 1992, p. 23, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1992-439>.
- [46] V. Yakhot y S. A. Orszag, “Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory”, *J. Sci. Comput.*, vol. 1, núm. 1, pp. 3–51, 1986, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01061452>.
- [47] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, y J. Zhu, “A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows”, *Notes Numer. Fluid Mech. Multidiscip. Des.*, vol. 133, núm. 3, pp. 105–116, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T).
- [48] F. R. Menter, “Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows”, 1993, doi: 10.1142/9789812774071_0006.
- [49] B. E. Launder y D. B. Spalding, *Lectures in mathematical models of turbulence*. London, England: Academic Press, 1972.
- [50] ANSYS Inc., “ANSYS Fluent theory guide 16.1”. 2015.
- [51] F. R. Menter, R. B. Langtry, S. R. Likki, Y. B. Suzen, P. G. Huang, y S. Völker, “A correlation-based transition model using local variables - Part I: Model

- formulation”, *J. Turbomach.*, vol. 128, núm. 3, pp. 413–422, 2006, doi: 10.1115/1.2184352.
- [52] R. B. Langtry y F. R. Menter, “Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes”, *AIAA J.*, vol. 47, núm. 12, pp. 2894–2906, 2009, doi: 10.2514/1.42362.
- [53] B. Blocken *et al.*, “Aerodynamic drag in cycling pelotons: New insights by CFD simulation and wind tunnel testing”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 179, pp. 319–337, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.011>.
- [54] B. Blocken, T. van Druenen, Y. Toparlar, y T. Andrianne, “Aerodynamic analysis of different cyclist hill descent positions”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 181, pp. 27–45, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.08.010>.
- [55] F. R. Menter, R. Langtry, y S. Völker, “Transition Modelling for General Purpose CFD Codes”, *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 77, núm. 1, pp. 277–303, 2006, doi: 10.1007/s10494-006-9047-1.
- [56] R. B. Langtry, F. R. Menter, S. R. Likki, Y. B. Suzen, P. G. Huang, y S. Völker, “A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables—Part II: Test Cases and Industrial Applications”, *J. Turbomach.*, vol. 128, núm. 3, pp. 423–434, mar. 2004, doi: 10.1115/1.2184353.
- [57] D. Lars, *An introduction to Turbulence Models*, vol. 756. 2009.
- [58] S. Sharma y R. K. Sharma, “Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 127, pp. 43–54, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.087>.
- [59] I. Ostos, I. Ruiz, M. Gajic, W. Gómez, A. Bonilla, y C. Collazos, “A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 180, núm. August 2018, pp. 733–746, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.025>.
- [60] K. Kacprzak y K. Sobczak, “Numerical analysis of the flow around the Bach-type Savonius wind turbine”, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 530, núm. 1, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/530/1/012063.
- [61] M. Shaheen, M. El-Sayed, y S. Abdallah, “Numerical study of two-bucket Savonius wind turbine cluster”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 137, pp. 78–89, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.002>.
- [62] G. Ferrari, D. Federici, P. Schito, F. Inzoli, y R. Mereu, “CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis”, *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 722–734, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.077>.
- [63] M. Tahani, A. Rabbani, A. Kasaeian, M. Mehrpooya, y M. Mirhosseini, “Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability”, *Energy*, vol. 130, pp. 327–338, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.125>.
- [64] H. Yu y J. Thé, “Validation and optimization of SST k- ω turbulence model for pollutant dispersion within a building array”, *Atmos. Environ.*, vol. 145, pp. 225–238, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.043>.
- [65] A. Rezaeiha, H. Montazeri, y B. Blocken, “Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence”, *Energy*

- Convers. Manag.*, vol. 156, núm. September 2017, pp. 301–316, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.11.026.
- [66] A. Rezaeiha, I. Kalkman, y B. Blocken, “CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment”, *Renew. Energy*, vol. 107, pp. 373–385, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.02.006.
- [67] N. Franchina, G. Persico, y M. Savini, “2D-3D Computations of a Vertical Axis Wind Turbine Flow Field: Modeling Issues and Physical Interpretations”, *Renew. Energy*, pp. 1170–1189, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.086.
- [68] J.-M. Chapallaz, P. Eichenberger, y G. Fischer, *Manual on Pumps Used as Turbines*. Vieweg, 1992.
- [69] P. C. Swain, “CE 15008 Fluid Mechanics. LECTURE NOTES Module-II”. 2016.
- [70] ANSYS Inc., “ANSYS FLUENT User’s Guide”, *Knowledge Creation Diffusion Utilization*, vol. 15317, núm. July. pp. 724–746.
- [71] ANSYS Inc., “ANSYS FLUENT Theory Guide”, núm. July, p. 1068.
- [72] ANSYS Inc., “ANSYS FLUENT Tutorial Guide”. .
- [73] ANSYS Inc., “ANSYS FLUENT Workbench Tutorial Guide”. .
- [74] ANSYS Inc., “ANSYS Meshing Tutorial Guide”. .
- [75] ANSYS Inc., “ANSYS Meshing User’s Guide”. .
- [76] ANSYS Inc., “DesignModeler User’s Guide”. .
- [77] ANSYS Inc., “Introduction to ANSYS FLUENT. Workshop 5. Using Moving Reference Frames and Sliding Meshes”, 2010, núm. December, pp. 1–35.
- [78] G. Tescione, D. Ragni, C. He, C. J. Simão Ferreira, y G. J. W. van Bussel, “Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry”, *Renew. Energy*, vol. 70, pp. 47–61, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.042>.
- [79] N. Durrani, H. Hameed, H. Rahman, y S. Chaudhry, “A Detailed Aerodynamic Design and Analysis of a 2-D Vertical Axis Wind Turbine Using Sliding Mesh in CFD”, núm. January, pp. 1–16, 2011, doi: 10.2514/6.2011-541.
- [80] J. Zhu, H. Huang, y H. Shen, “Self-starting aerodynamics analysis of vertical axis wind turbine”, *Adv. Mech. Eng.*, vol. 7, núm. 12, pp. 1–12, 2015, doi: 10.1177/1687814015620968.
- [81] A. Orlandi, M. Collu, S. Zanforlin, y A. Shires, “3D URANS analysis of a vertical axis wind turbine in skewed flows”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 147, pp. 77–84, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.09.010>.
- [82] H. F. Lam y H. Y. Peng, “Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two- and three-dimensional computational fluid dynamics simulations”, *Renew. Energy*, vol. 90, pp. 386–398, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.011>.
- [83] A. Untaroiu, H. G. Wood, P. E. Allaire, y R. J. Ribando, “Investigation of Self-Starting Capability of Vertical Axis Wind Turbines Using a Computational Fluid Dynamics Approach”, *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 133, núm. 4, oct. 2011, doi: 10.1115/1.4004705.
- [84] F. Balduzzi, J. Drofelnik, A. Bianchini, G. Ferrara, L. Ferrari, y M. S. Campobasso, “Darrieus wind turbine blade unsteady aerodynamics: a three-dimensional Navier-Stokes CFD assessment”, *Energy*, vol. 128, pp. 550–563, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.017>.

- [85] Cadence, “Compute Grid Spacing for a Given Y+”. <http://www.pointwise.com/yplus/index.html> (consultado ene. 05, 2021).
- [86] “Google Earth”. <https://earth.google.com/web/> (consultado ago. 13, 2020).
- [87] J. J. Chattot y M. M. Hafez, *Theoretical and Applied Aerodynamics and Related Numerical Methods*. .
- [88] International Standard Organisation, “ISO 2533:1975 Standard Atmosphere”.
- [89] Y. A. Çengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, Séptima Ed. Mc Graw Hill.
- [90] CICESE, “CLICOM”, 2021. <http://clicom-mex.cicese.mx/>.
- [91] CRANE, *Flujos de Fluidos en Válvulas Accesorios y Tuberías*. McGRAW HILL.
- [92] “The Engineering ToolBox”. https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html (consultado dic. 07, 2020).
- [93] C. J. Simão Ferreira, A. van Zuijlen, H. Bijl, G. van Bussel, y G. van Kuik, “Simulating dynamic stall in a two-dimensional vertical-axis wind turbine: verification and validation with particle image velocimetry data”, *Wind Energy*, vol. 13, núm. 1, pp. 1–17, ene. 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/we.330>.
- [94] F. Trivellato y M. Raciti Castelli, “On the Courant–Friedrichs–Lewy criterion of rotating grids in 2D vertical-axis wind turbine analysis”, *Renew. Energy*, vol. 62, pp. 53–62, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.022>.
- [95] M. Elkhoury, T. Kiwata, y E. Aoun, “Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 139, pp. 111–123, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.004>.
- [96] F. Balduzzi, A. Bianchini, R. Maleci, G. Ferrara, y L. Ferrari, “Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines”, *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 419–435, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.048>.
- [97] B. Shahizare, N. Nazri Bin Nik Ghazali, W. T. Chong, S. S. Tabatabaeikia, y N. Izadyar, “Investigation of the Optimal Omni-Direction-Guide-Vane Design for Vertical Axis Wind Turbines Based on Unsteady Flow CFD Simulation”, *Energies*, vol. 9, núm. 3. 2016, doi: 10.3390/en9030146.
- [98] M. R. Tirandaz y A. Rezaeiha, “Effect of airfoil shape on power performance of vertical axis wind turbines in dynamic stall: Symmetric Airfoils”, *Renew. Energy*, vol. 173, pp. 422–441, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.142>.
- [99] S. ed-Dîn Fertahi *et al.*, “CFD performance enhancement of a low cut-in speed current Vertical Tidal Turbine through the nested hybridization of Savonius and Darrieus”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 169, pp. 266–278, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.027>.
- [100] A. Rezaeiha, H. Montazeri, y B. Blocken, “Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 169, pp. 45–77, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.042>.
- [101] N. Qin, R. Howell, N. Durrani, K. Hamada, y T. Smith, “Unsteady flow simulation and dynamic stall behaviour of vertical axis wind turbine blades”, *Wind Eng.*, vol. 35, núm. 4, pp. 511–527, 2011, doi: 10.1260/0309-524X.35.4.511.

- [102] I. C. M. Lositaño y L. A. M. Danao, “Steady wind performance of a 5 kW three-bladed H-rotor Darrieus Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) with cambered tubercle leading edge (TLE) blades”, *Energy*, vol. 175, pp. 278–291, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.033>.
- [103] S. Mauro, S. Brusca, R. Lanzafame, y M. Messina, “CFD modeling of a ducted Savonius wind turbine for the evaluation of the blockage effects on rotor performance”, *Renew. Energy*, vol. 141, pp. 28–39, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.125>.
- [104] I. Dobrev y F. Massouh, “CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine”, *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 711–720, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.081>.
- [105] O. D. Lopez Mejia, O. E. Mejia, K. M. Escorcía, F. Suarez, y S. Laín, “Comparison of Sliding and Overset Mesh Techniques in the Simulation of a Vertical Axis Turbine for Hydrokinetic Applications”, *Processes*, vol. 9, núm. 11. 2021, doi: 10.3390/pr9111933.
- [106] “Airfoil Tools”. <http://airfoiltools.com/index>.
- [107] G. T. Mase, R. E. Smelser, y G. E. Mase, *CONTINUUM MECHANICS FOR ENGINEERS*, Third Edit. CRC Press.

Anexo A. Creación de la geometría

En cualquier simulación por medio de CFD se requiere definir el dominio computacional. Para evitar errores de compatibilidad se realiza la creación de la geometría desde cero en ANSYS.

Para trabajar de forma limpia, ordenada y cómoda, se recomienda cambiar el color del fondo. En *Ansys Workbench* en el menú superior se selecciona *Tools* y *Options*. En la nueva ventana emergente en el menú izquierdo seleccionar *Appearance*. Escoger *Uniform* para *Background Style*, color blanco para *Background Color* y *Background Color 2*, y *Off* para *ANSYS Logo*. Posteriormente dar *OK* para guardar los cambios. Ver Fig. A.1.

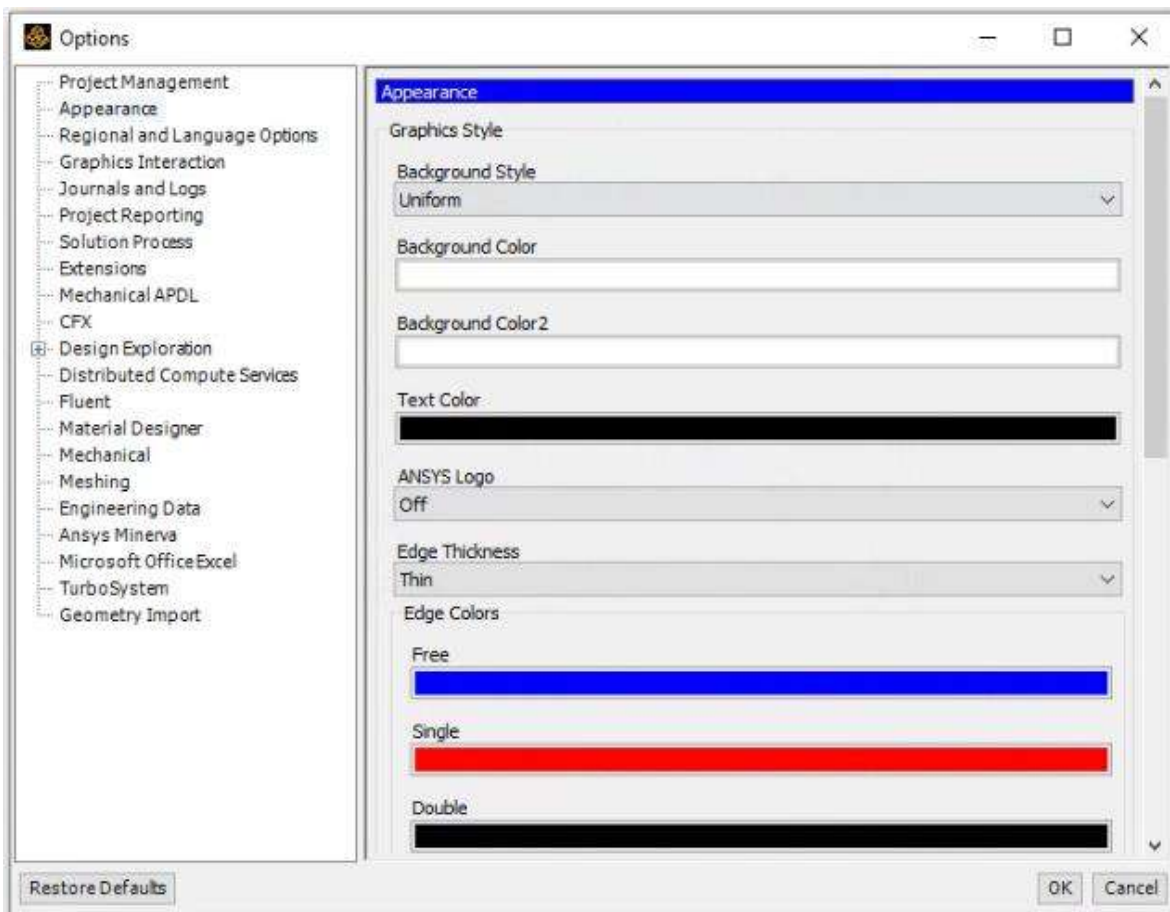


Fig. A.1. Menú *Options* de *ANSYS Workbench*.

Se inicia el programa de *ANSYS Workbench*, en la sección de *Toolbox* (sección izquierda, en el panel de trabajo que se muestra por defecto), en el submenú *Component Systems*, se selecciona y se arrastra dos veces el módulo de *Geometry* a la sección de *Project Schematic*. Se renombran los módulos como "Rotor" y "Estator". Ver Fig. A.2.

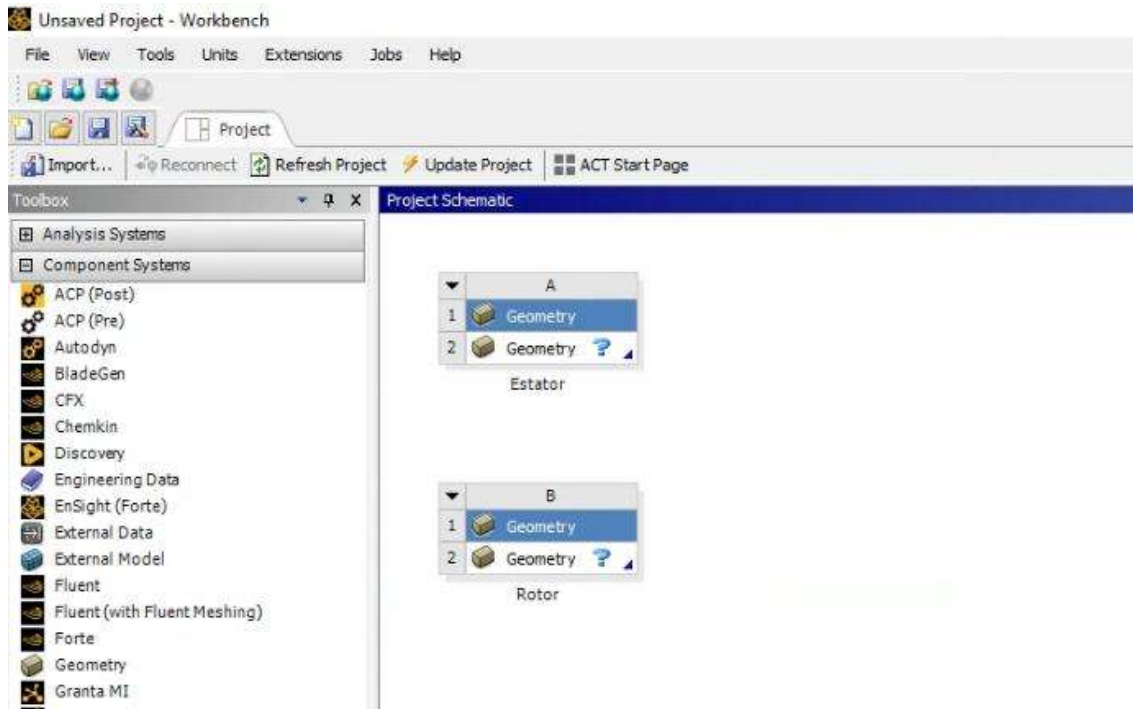


Fig. A.2. Vista de inicio de ANSYS Workbench con dos módulos de *Geometry*.

Para iniciar *DesignModeler*, en los módulos de *Geometry* que se arrastraron previamente a la sección de *Project Schematic*, dar un *clic* en *Geometry* del segundo renglón, a continuación, *clic* derecho para mostrar un nuevo menú contextual y seleccionar la opción *New DesignModeler Geometry...* (segunda opción del menú contextual). Ver Fig. A.3.

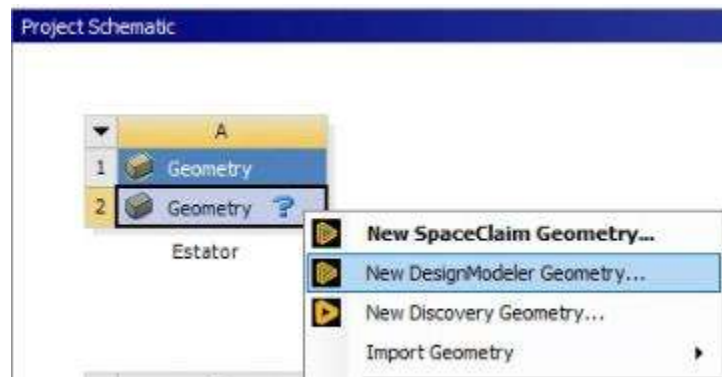


Fig. A.3. Proceso para iniciar *DesignModeler*.

A.1 Construcción geométrica del rotor

A.1.1 Rotor H

Es necesario obtener el perfil aerodinámico de los álabes de la turbina eólica, para el caso en particular es un perfil asimétrico NACA2415. De Airfoil Tools [106] se busca el perfil deseado y se selecciona la opción *Source dat file*, ver Fig. A.4. Se abre una nueva pestaña en el navegador en la que se muestra las coordenadas de los puntos que forman el perfil aerodinámico, la primera columna son las coordenadas en el eje horizontal o eje X y la segunda columna son las coordenadas en el eje vertical o eje Y. Se selecciona y copian las coordenadas del perfil aerodinámico.

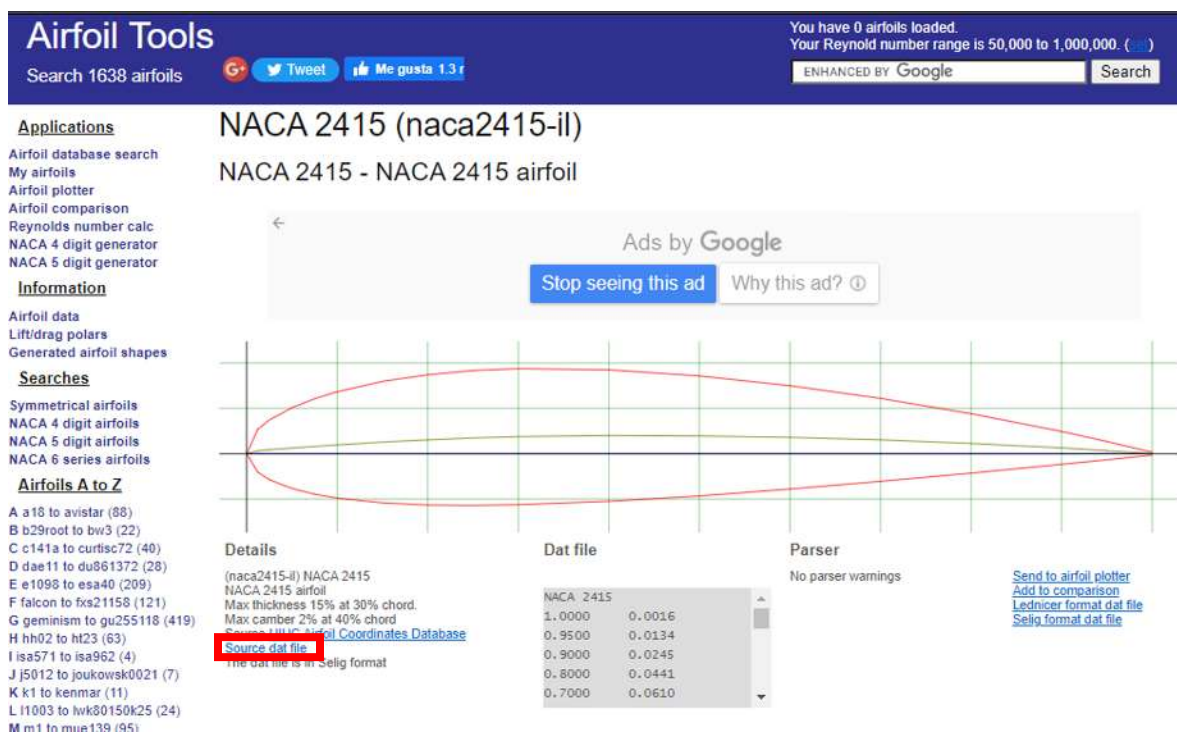


Fig. A.4. Perfil NACA2415 en la página web Airfoil Tools. Obtenido de [106].

En una hoja de cálculo se pega la información para poder modificarla, la hoja de cálculo a usar es Microsoft Excel. Se selecciona toda la columna donde se pegó las coordenadas, en el menú superior se selecciona la pestaña *Datos* y la opción *Texto en columnas*. En la nueva pestaña emergente, se da clic en *Siguiente*, en la sección de *Separadores*, se selecciona *Espacio* y se da clic en *Finalizar*. Ver Fig. A.5.

Con la hoja de cálculo se realizan todas las operaciones para tener como resultado las coordenadas de la ubicación del perfil aerodinámico respecto del origen de coordenadas de la turbina. El orden para realizar las operaciones sobre las coordenadas del perfil aerodinámico es el siguiente:

- 1) Redimensionamiento.
- 2) Traslación horizontal.
- 3) Traslación vertical.
- 4) Rotación.

Se gráfica el perfil aerodinámico en Microsoft Excel usando un gráfico de dispersión con líneas rectas y marcadores para verificar el cambio en cada paso.

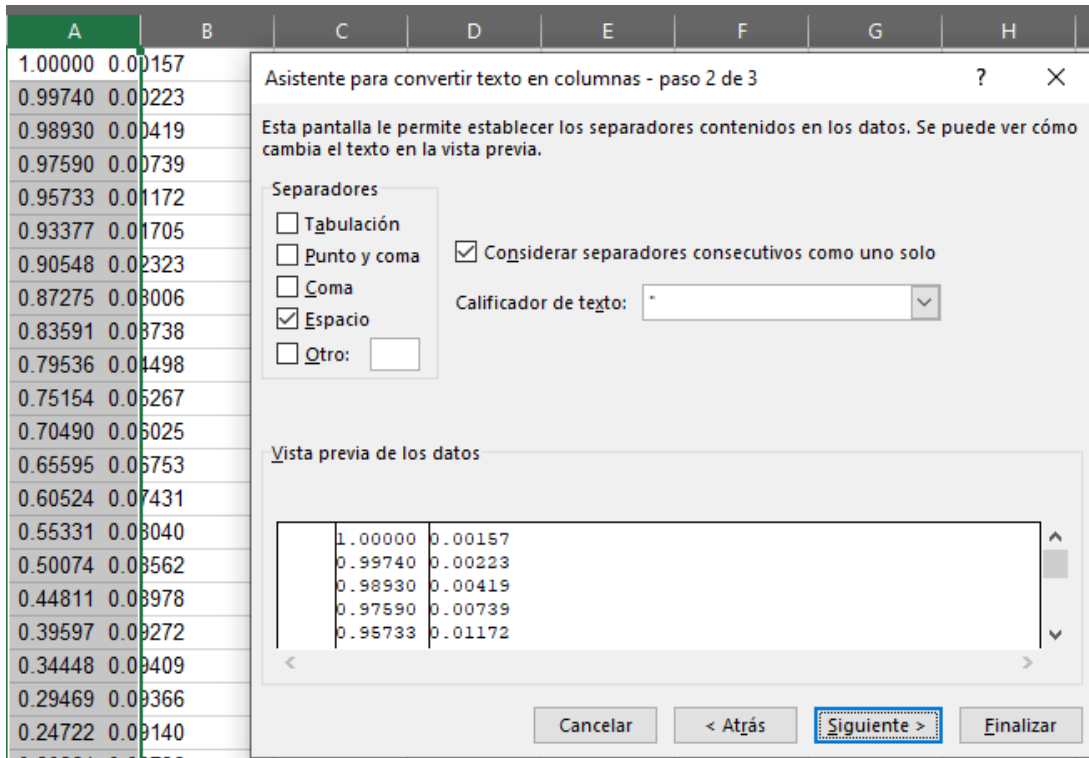


Fig. A.5. Menú del asistente para convertir texto en columnas.

Para el redimensionamiento del perfil se multiplican todas las coordenadas por el valor de la cuerda del álabe. Para la traslación horizontal se resta un determinado valor a las coordenadas en el eje X menor a la longitud de la cuerda del álabe, para la traslación vertical se suma un determinado valor a las coordenadas en el eje Y cercano al radio de la turbina H. Finalmente, para la rotación se hace uso de la Matriz de Rotación [107] para cada punto del perfil aerodinámico. Los valores de traslación horizontal, vertical y rotación no se pueden compartir por razones de confidencialidad del diseño de la turbina eólica híbrida.

Se seleccionan y copian el valor de las coordenadas finales del perfil aerodinámico. En un libro nuevo de Excel, en la columna C se pegan los valores del perfil aerodinámico. En la columna A se rellena con el número 1 hasta la última fila que tenga valores del perfil, en la columna B se enumera del 1 hasta la enésima posición con un incremento de 1 hasta la última fila que tenga valores del perfil que tenga algún valor en la columna C. En la columna E se rellena con el número 0 hasta la última fila que tenga valores del perfil. Se seleccionan las coordenadas del perfil

aerodinámico y se le aplica el formato de *Número*, se configura para cinco decimales. En la Fig. A.6 se muestra el resultado final con un perfil aerodinámico diferente para otra turbina eólica.

| | A | B | C | D | E | F |
|----|---|----|----------|-----------|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 0.04000 | 0.50011 | 0 | |
| 2 | 1 | 2 | 0.03700 | 0.50073 | 0 | |
| 3 | 1 | 3 | 0.03400 | 0.50130 | 0 | |
| 4 | 1 | 4 | 0.02800 | 0.50236 | 0 | |
| 5 | 1 | 5 | 0.02200 | 0.50330 | 0 | |
| 6 | 1 | 6 | 0.01600 | 0.50411 | 0 | |
| 7 | 1 | 7 | 0.01000 | 0.50476 | 0 | |
| 8 | 1 | 8 | 0.00400 | 0.50522 | 0 | |
| 9 | 1 | 9 | -0.00200 | 0.50540 | 0 | |
| 10 | 1 | 10 | -0.00500 | 0.50535 | 0 | |
| 11 | 1 | 11 | -0.00800 | 0.50516 | 0 | |
| 12 | 1 | 12 | -0.01100 | 0.50481 | 0 | |
| 13 | 1 | 13 | -0.01400 | 0.50421 | 0 | |
| 14 | 1 | 14 | -0.01550 | 0.50378 | 0 | |
| 15 | 1 | 15 | -0.01700 | 0.50320 | 0 | |
| 16 | 1 | 16 | -0.01850 | 0.50235 | 0 | |
| 17 | 1 | 17 | -0.01925 | 0.50170 | 0 | |
| 18 | 1 | 18 | -0.02000 | 0.50000 | 0 | |
| 19 | 1 | 19 | -0.01925 | 0.49830 | 0 | |
| 20 | 1 | 20 | -0.01850 | 0.49765 | 0 | |
| 21 | 1 | 21 | -0.01700 | 0.49680 | 0 | |
| 22 | 1 | 22 | -0.01550 | 0.49622 | 0 | |
| 23 | 1 | 23 | -0.01400 | 0.49579 | 0 | |
| 24 | 1 | 24 | -0.01100 | 0.49519 | 0 | |
| 25 | 1 | 25 | -0.00800 | 0.49484 | 0 | |
| 26 | 1 | 26 | -0.00500 | 0.49465 | 0 | |
| 27 | 1 | 27 | -0.00200 | 0.49460 | 0 | |
| 28 | 1 | 28 | 0.00400 | 0.49478 | 0 | |
| 29 | 1 | 29 | 0.01000 | 0.49524 | 0 | |
| 30 | 1 | 30 | 0.01600 | 0.49589 | 0 | |
| 31 | 1 | 31 | 0.02200 | 0.49670 | 0 | |
| 32 | 1 | 32 | 0.02800 | 0.49764 | 0 | |
| 33 | 1 | 33 | 0.03400 | 0.49870 | 0 | |
| 34 | 1 | 34 | 0.03700 | 0.49927 | 0 | |
| 35 | 1 | 35 | 0.04 | 0.4998866 | 0 | |
| 36 | | | | | | |

Fig. A.6. Configuración de los datos ordenados en Microsoft Excel de un perfil aerodinámico NACA simétrico para exportar a ANSYS DesignModeler.

Se selecciona en el menú superior, la pestaña de *Archivo*, posteriormente *Guardar como*, nombramos el archivo, escogemos *Texto (delimitado por tabulaciones) (*.txt)* y se da *clic* en *Guardar*. Ver Fig. A.7.

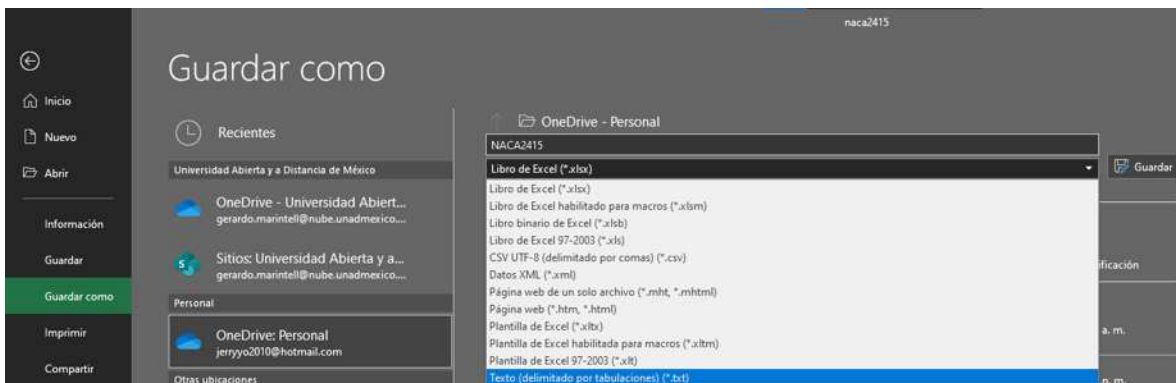


Fig. A.7. Configuración del guardado del perfil aerodinámico para exportar a ANSYS DesignModeler.

En *DesignModeler* en el menú superior en la pestaña de *Units* se verifica que estén seleccionadas las unidades con las que se trabajara. En el menú superior en la pestaña *Concept*, se selecciona *3D Curve*, ver Fig. A.8, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.9, en *Curve* renombrar como *CurveNACA2415*, en *Definition* seleccionar *From Coordinates File*, en *Coordinates File* seleccionar el archivo creado previamente con las coordenadas del perfil aerodinámico con extensión *.txt*, en *Coordinates Unit* seleccionar las unidades con las que se trabajó el perfil en Microsoft Exel, en este caso *Millimeter*, en *Base Plane* seleccionar *XYPlane*, finalmente en el menú superior en la barra de herramientas seleccionamos *Generate*, ver Fig. A.12.

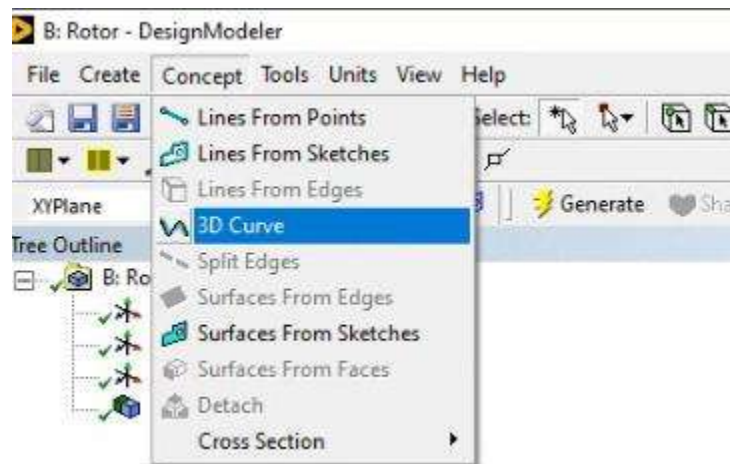


Fig. A.8. Menú de la pestaña *Concept*.

| Details View | |
|--------------------------|---|
| Details of CurveNACA2415 | |
| Curve | CurveNACA2415 |
| Definition | From Coordinates File |
| Coordinates File | C:\Users\prop\Downloads\ANSYS NACA2415 Sin cerrar.txt |
| Coordinates Unit | Millimeter |
| Base Plane | XYPlane |
| Operation | Add Material |
| Refresh | No |
| Merge Topology? | No |

Fig. A.9. *Details View* del submenú *Concept* → *3D Curve*

En el menú superior en la pestaña *Create* se selecciona *Point*, ver Fig. A.10, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.11, en *Point* renombrar como *PointNACA2415*, en *Type* seleccionar *Construction Point*, en *Definition* seleccionar *From Coordinates File*, en *Coordinates File* seleccionar el archivo creado previamente con las coordenadas del perfil aerodinámico con extensión *.txt*, en *Coordinates Unit* seleccionar las unidades con las que se trabajó el perfil, en este caso *Millimeter*, en *Base Plane* seleccionar *XYPlane*, finalmente en el menú superior en la barra de herramientas seleccionamos *Generate*.

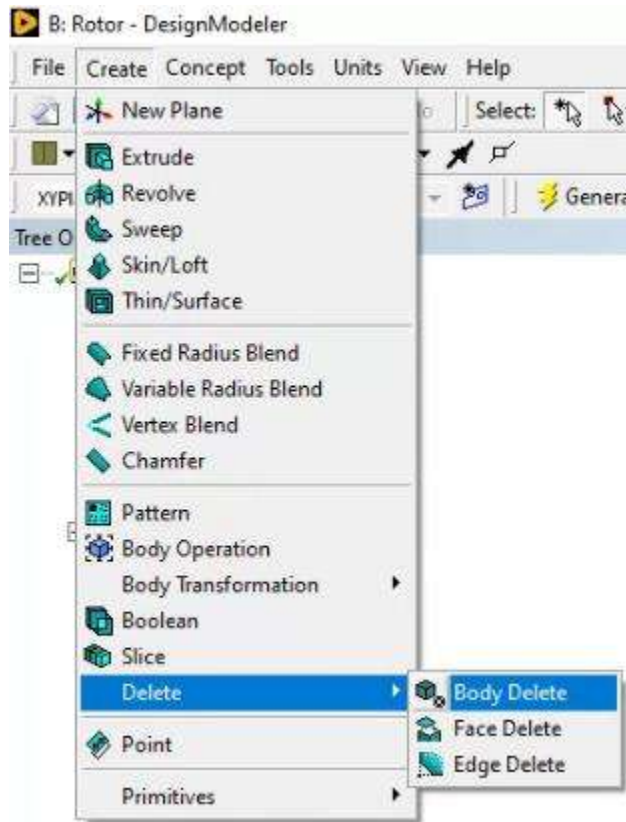


Fig. A.10. Menú de la pestaña *Create*, con detalle del submenú *Delete*.

| Details View | |
|--------------------------|---|
| Details of PointNACA2415 | |
| Point | PointNACA2415 |
| Type | Construction Point |
| Definition | From Coordinates File |
| Coordinates File | C:\Users\prop\Downloads\ANSYS NACA2415 Sin cerrar.txt |
| Coordinates Unit | Millimeter |
| Base Plane | XYPlane |
| Tolerance | Normal |
| Refresh | No |
| # Points generated | 35 |

Fig. A.11. *Details View* del submenú *Create* → *Point*

En el menú superior en la barra de herramientas seleccionar *Zoom to Fit*, posteriormente *Box Zoom*, ver Fig. A.12, para hacer un acercamiento a los últimos puntos del perfil aerodinámico

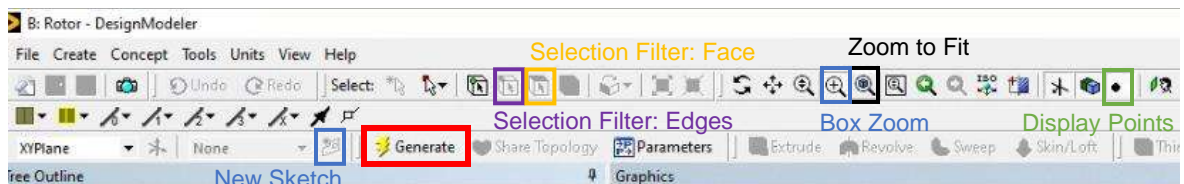


Fig. A.12. Barra de herramientas de *DesignModeler*

En el menú superior en la pestaña *Concept*, se selecciona *Lines From Points*, ver Fig. A.8, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, en *Lines From Points* renombrar como *LineCierreNACA2415*, en la sección *Graphics* seleccionar los últimos dos puntos del perfil aerodinámico con el *mouse* y manteniendo presionada la tecla *Ctrl*, dar *clic* en *Apply* de *Point Segments* de la sección *Details View*, ver Fig. A.13, y *clic* en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas.

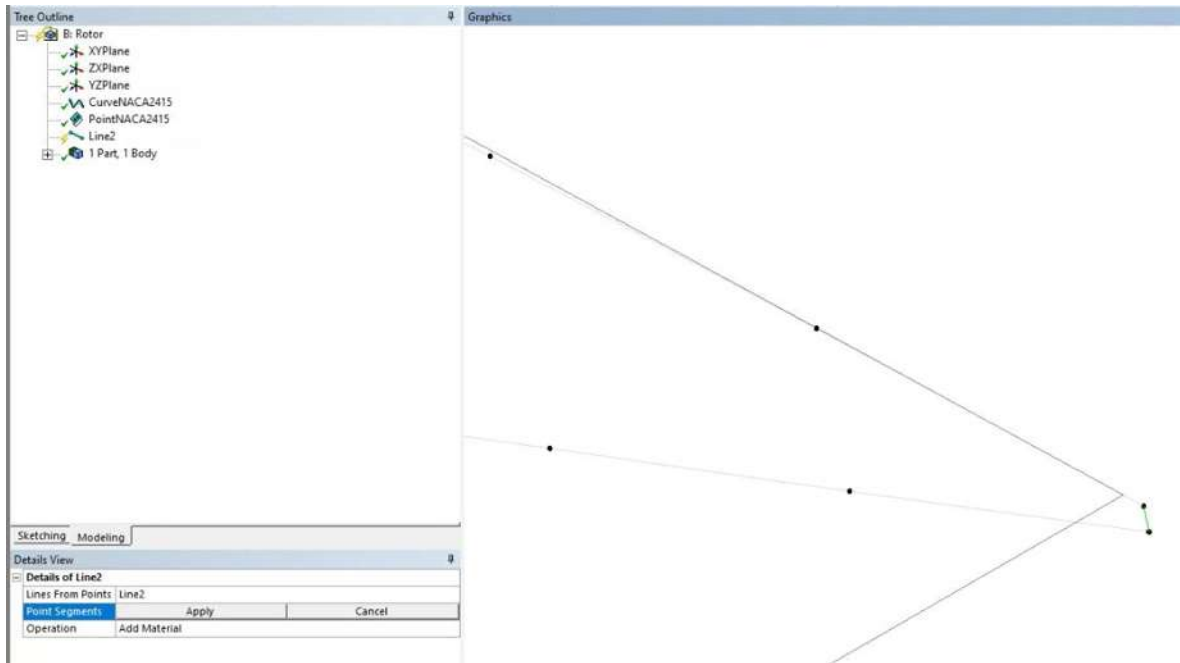


Fig. A.13. Vista del área de trabajo en *DesignModeler* para la creación de la línea de cierre del perfil aerodinámico.

En el menú superior en la pestaña *Concept*, se selecciona *Surface From Edges*, ver Fig. A.8, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, en *Line-Body Tool* renombrar como *NACA2415*, en la sección *Graphics* seleccionar la curva del perfil y la línea de cierre con el *mouse* y manteniendo presionada la tecla *Ctrl*, dar *clic* en *Apply* de *Edges* en la sección *Details View*, y *clic* en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas.

En el menú superior en la pestaña *Create* se selecciona *Delete* y *Body Delete*, ver Fig. A.10, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, en *BodyDelete* renombrar como *BDeleteLineBody*, seleccionar en *Line Body* de la sección de *Tree Outline*, ver Fig. A.14, dar *clic* en *Apply* en la sección *Details View*, y *clic* en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas. Para dejar de visualizar los puntos de construcción del perfil NACA2415, se deselecciona *Display Points* de la barra de herramientas, ver Fig. A.12.



Fig. A.14. Vista de la selección de *Line Body* en la sección de *Tree Outline*.

En el menú superior en la pestaña *Create* se selecciona *Pattern*, ver Fig. A.10, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.15, en *Pattern* renombrar como *PatternAlabe*, en *Pattern Type* seleccionar *Circular*, en *Geometry* seleccionar *Surface Body* de la sección de *Tree Outline*, en *Axis* seleccionar *XYPlane* de la sección de *Tree Outline*, en *FD2, Angle* seleccionar *Evenly Spaced*, en *FD3, Copies* (≥ 0) especificar 2, y clic en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas.

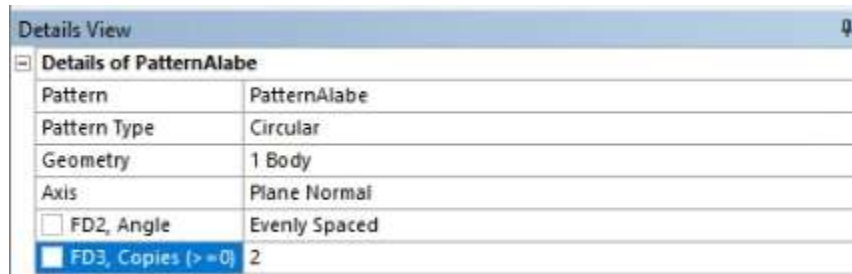


Fig. A.15. *Details View* del submenú *Create* → *Pattern*.

Con el procedimiento anterior se construye los tres álabes del rotor H, ver Fig. A.16. En la sección de *Tree Outline*, renombramos los cuerpos solidos que se han formado como se muestra en la Fig. A.17.

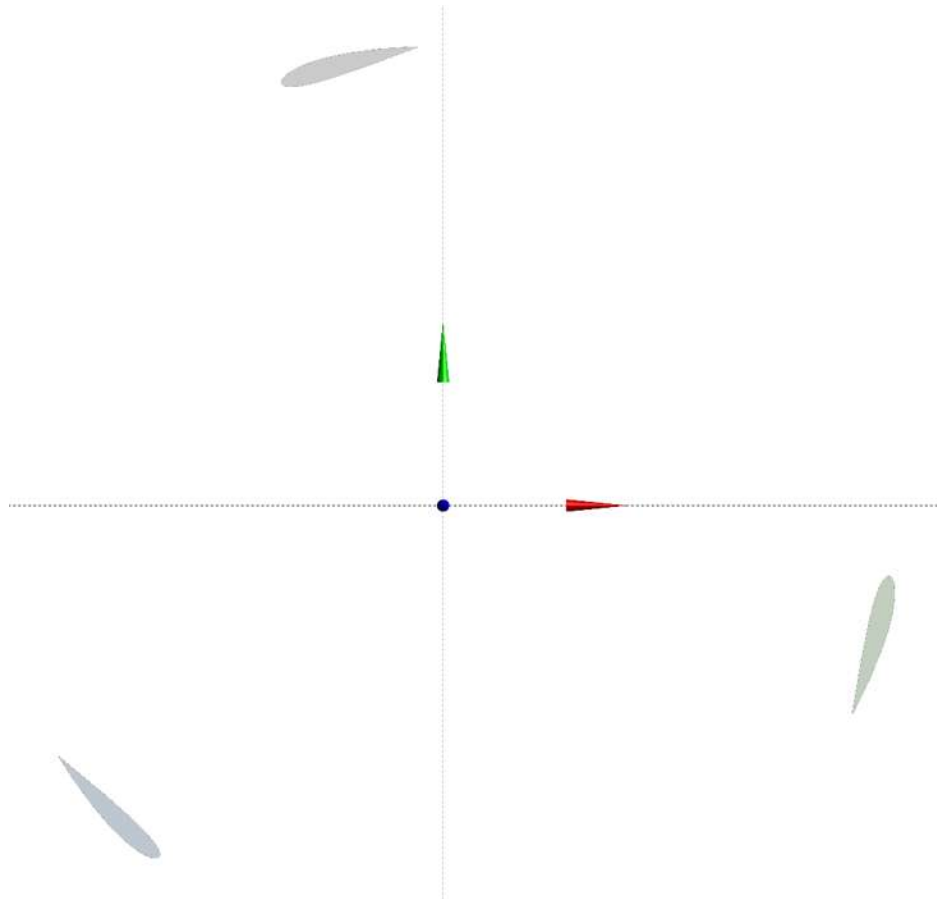


Fig. A.16. Vista del rotor H de la turbina eólica de eje vertical híbrida.

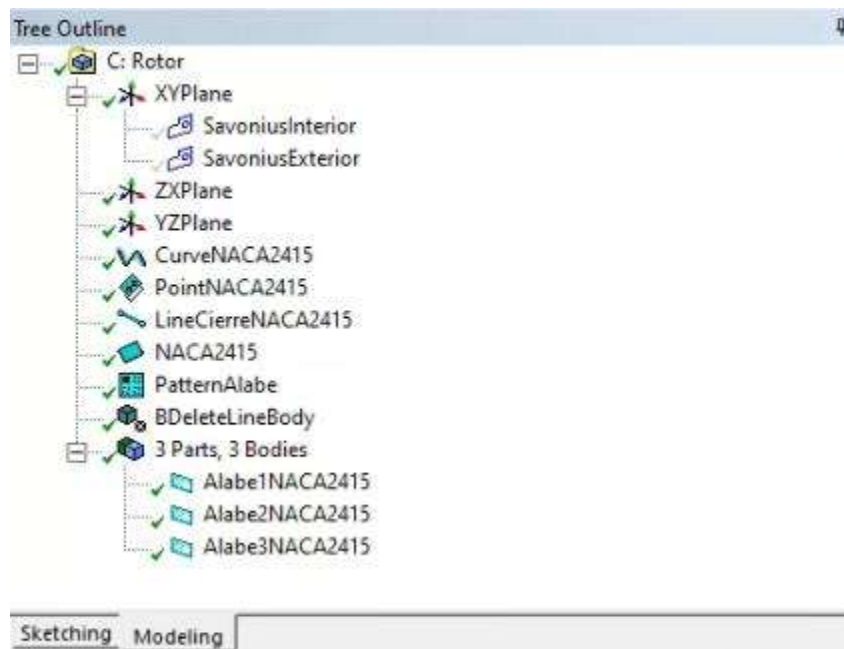


Fig. A.17. Vista de la sección de *Tree Outline* mostrando la nomenclatura usada.

A.1.2 Rotor Savonius

Para la construcción del rotor Savonius, se selecciona *XYPlane* en la sección del *Tree Outline*, se da clic en *New Sketch* en la barra de herramientas, ver Fig. A.12. Se crea la geometría del rotor Savonius en dos *Sketchs*, uno para el rotor interno y otro para el rotor externo. Se usan las diversas herramientas que aparecen en la pestaña *Sketching* en la sección inferior izquierda del *Tree Outline*, ver Fig. A.17, para trazar la geometría como en cualquier otro programa CAD, las dimensiones no se pueden compartir por razones de confidencialidad del diseño de la turbina eólica. Los *Sketchs* quedan como se muestra en la Fig. A.18.

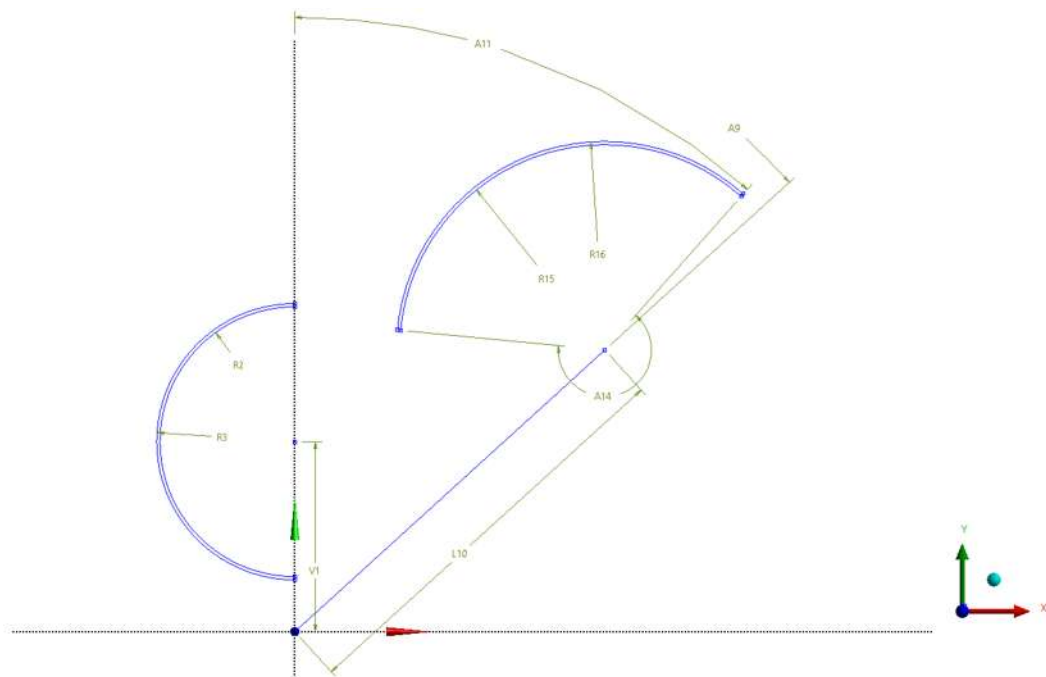


Fig. A.18. *Sketchs* para la construcción del rotor Savonius.

En el menú superior en la pestaña *Concept*, se selecciona *Surface From Sketches*, ver Fig. A.8, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.19, en *Surface From Sketches* renombrar como *SurfaceSavonius*, seccionar los dos *Sketchs* creados para la geometría del rotor Savonius con el *mouse* y manteniendo presionada la tecla *Ctrl* en la sección de *Tree Outline*, dar clic en *Apply* de *Base Objects* en la sección *Details View*, y clic en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas.

| Details View | |
|----------------------------|-----------------|
| Details of SurfaceSavonius | |
| Surface From Sketches | SurfaceSavonius |
| Base Objects | 2 Sketches |
| Operation | Add Material |
| Orient With Plane Normal? | Yes |
| Thickness (>= 0) | 0 mm |

Fig. A.19. *Details View* del submenú *Concept* → *Surface From Sketches*.

En el menú superior en la pestaña *Create* se selecciona *Pattern*, ver Fig. A.10, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.15, en *Pattern* renombrar como *PatternSavonius*, en *Pattern Type* seleccionar *Circular*, en *Geometry* seleccionar los dos *Surface Body* de la sección de *Tree Outline*, en *Axis* seleccionar *XYPlane* de la sección de *Tree Outline*, en *FD2*, *Angle* seleccionar *Evenly Spaced*, en *FD3*, *Copies* (≥ 0) especificar 5, y clic en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas. Con lo cual se genera el rotor Savonius, ver Fig. A.20

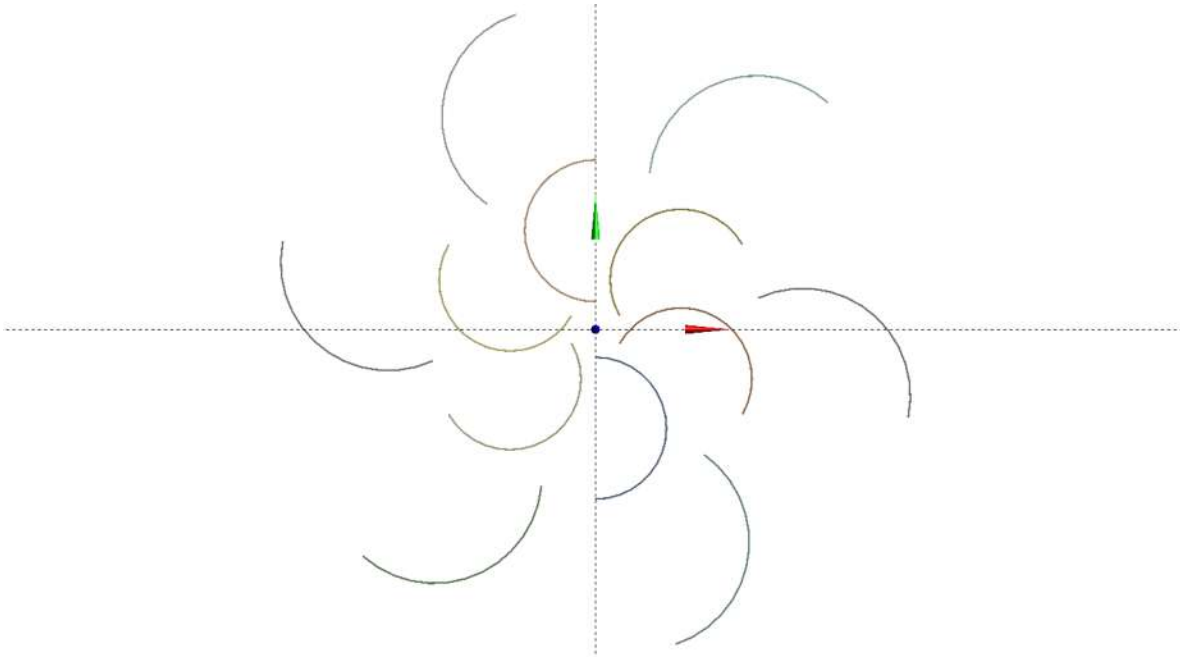


Fig. A.20. Vista del rotor Savonius de la turbina eólica de eje vertical híbrida.

A.1.3 Dominio Computacional

Se procede a crear el dominio computacional para la simulación. Para el rotor se selecciona *XYPlane* en la sección del *Tree Outline*, se da clic en *New Sketch* en la barra de herramientas. Se crea un círculo con centro en el origen de coordenadas y con diámetro de 1.5 veces el diámetro de la turbina eólica, usando las herramientas de la pestaña de *Sketching* en la sección inferior izquierda del *Tree Outline*. En el menú superior en la pestaña *Concept*, se selecciona *Surface From Sketches*, ver Fig. A.8, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.21, en *Surface From Sketches* renombrar como *SurfaceCircular*, seleccionar con el mouse el *Sketch* del círculo creado anteriormente en la sección de *Tree Outline*, dar clic en *Apply* de *Base Objects* en la sección *Details View*, en *Operation* seleccionar *Add Frozen* y clic en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas.

| Details View | |
|----------------------------|-----------------|
| Details of SurfaceCircular | |
| Surface From Sketches | SurfaceCircular |
| Base Objects | 1 Sketch |
| Operation | Add Frozen |
| Orient With Plane Normal? | Yes |
| Thickness (>=0) | 0 mm |

Fig. A.21. *Details View* del submenú *Concept* → *Surface From Sketches* para *SurfaceCircular*.

En la sección del *Tree Outline* renombramos el ultimo *Surface Body* creado que se muestra en un azul más claro como *DominioRotor*, ver Fig. A.22.

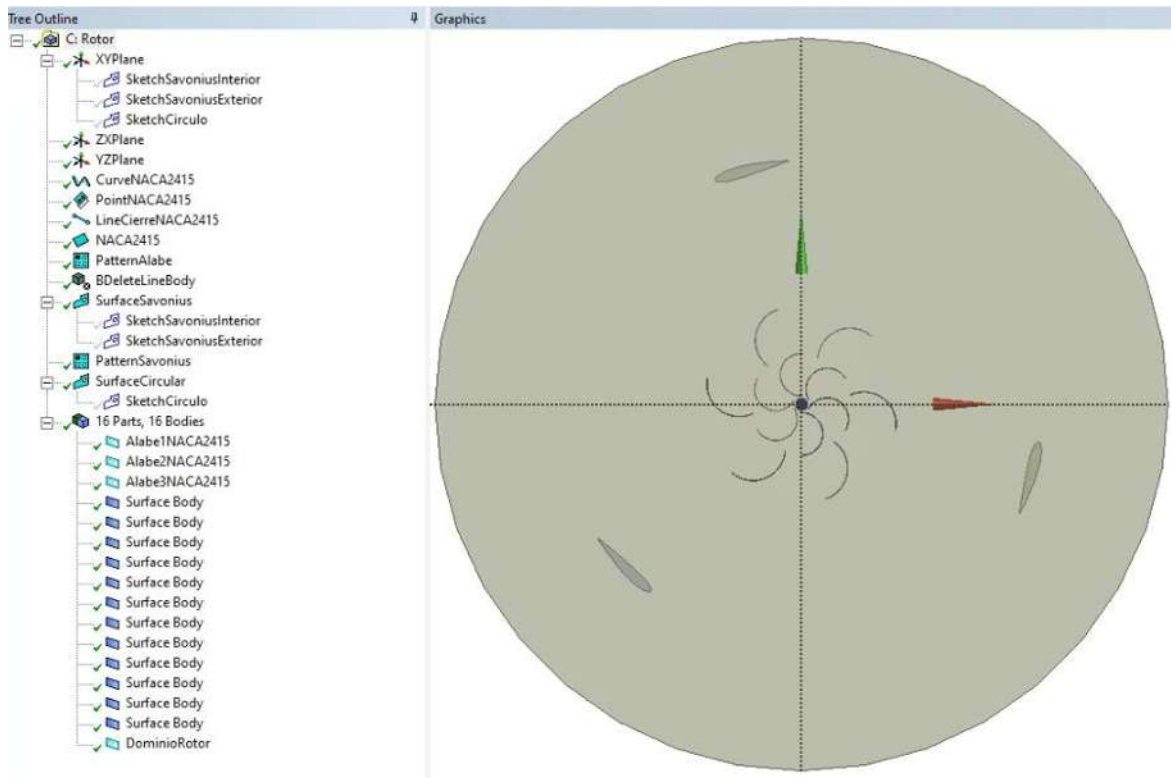


Fig. A.22. Vista de la sección *Tree Outline* y *Graphics* antes de la operación *Booleana*.

En el menú superior en la pestaña *Create* se selecciona *Boolean*, ver Fig. A.10, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.23, en *Operation* seleccionar *Subtract*, en *Target Bodies* seleccionar *DominioRotor* de la sección *Tree Outline*, en *Tool Bodies* seleccionar con el *mouse* presionando la tecla *Ctrl* *Alabe1NACA2415*, *Alabe2NACA2415*, *Alabe3NACA2415* y todos los *Surface Body* de la sección *Tree Outline*, ver Fig. A.22, y *clic* en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas. Con lo anterior se genera el dominio computacional del rotor para la simulación, ver Fig. A.24.

| Details View | |
|------------------------|-----------|
| Details of Boolean1 | |
| Boolean: | Boolean1 |
| Operation: | Subtract |
| Target Bodies: | 1 Body |
| Tool Bodies: | 15 Bodies |
| Preserve Tool Bodies?: | No |

Fig. A.23. *Details View* del submenú *Create* → *Boolean*.

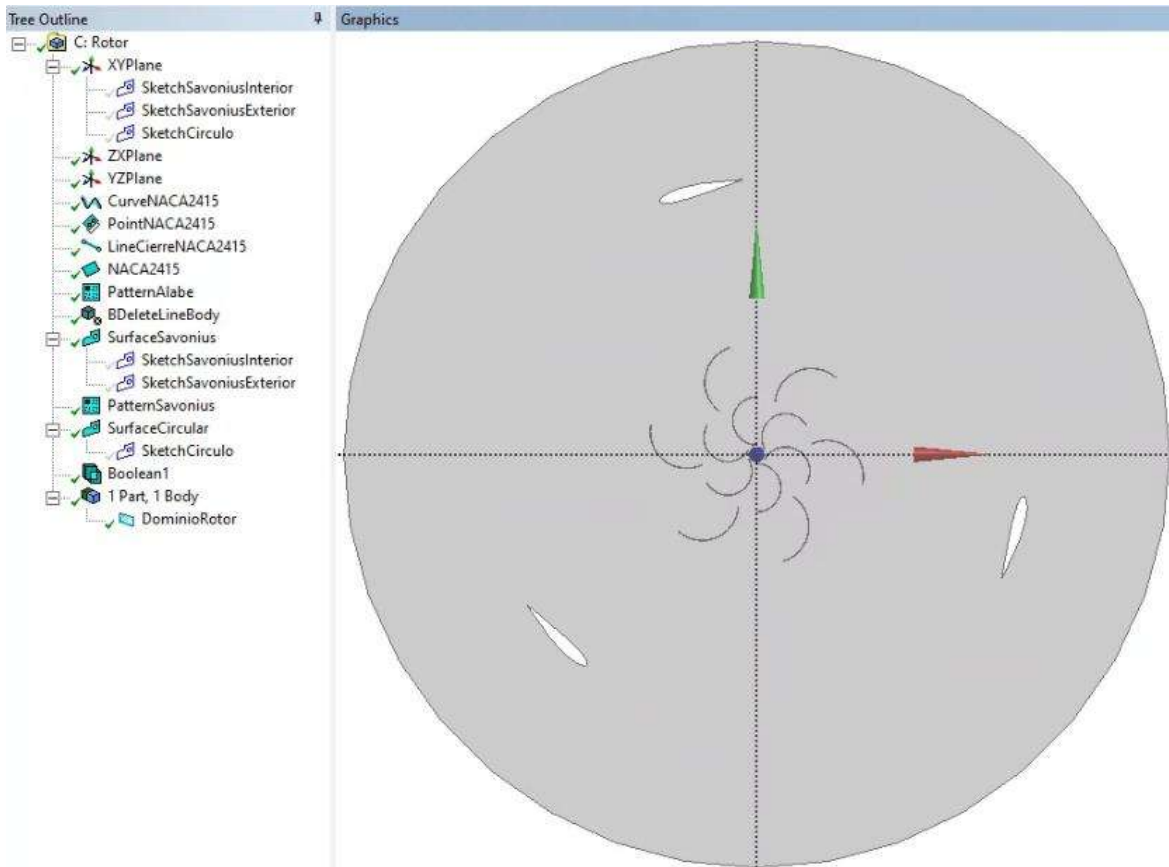


Fig. A.24. Vista de la sección *Tree Outline* y *Graphics* antes de la operación *Booleana*.

En la sección *Tree Outline* seleccionar *DomioRotor* con el *mouse*, en la sección *Details View*, ver Fig. A.25, en *Fluid/Solid* seleccionar *Fluid*.

| Details View | |
|-------------------------|----------------------------|
| Details of Surface Body | |
| Body | DominioRotor |
| Thickness Mode | Inherited |
| Thickness (>=0) | 0 mm |
| Surface Area | 1.0126e+07 mm ² |
| Faces | 1 |
| Edges | 55 |
| Vertices | 54 |
| Fluid/Solid | Fluid |
| Shared Topology Method | Automatic |
| Geometry Type | DesignModeler |

Fig. A.25. *Details View* de la selección de *DominioRotor* de la sección *Tree Outline*.

Se procede a nombrar las diferentes partes del dominio. En la sección de *Graphics* se selecciona usando los filtros de selección *Faces* y *Edges*, según corresponda, ubicados en barra de herramientas en el menú superior, ver Fig. A.12, usando el *mouse* y manteniendo presionada la tecla *Ctrl* para selecciones múltiples.

Con la selección hecha, se da *clic* derecho y se escoge *Named Selection*, ver Fig. A.26, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.27, en *Named Selection* se nombra según sea el caso, ver Fig. A.28, en *Geometry clic* en *Apply* y *clic* en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas.

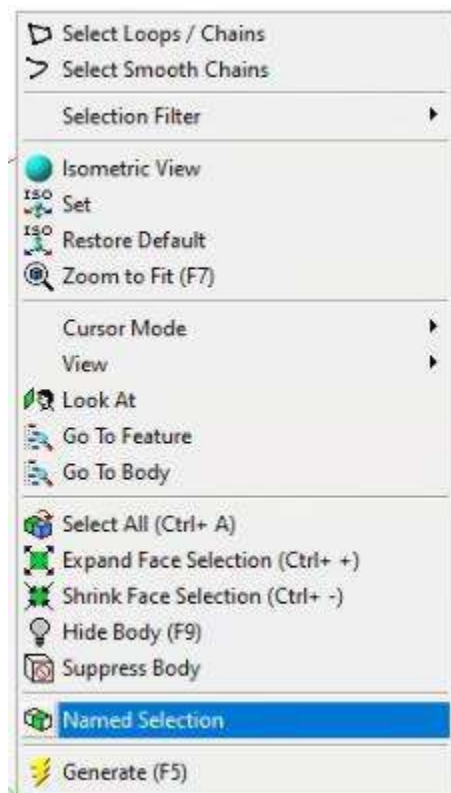


Fig. A.26. Menú contextual de la sección de *Graphics*.

| Details View | |
|---------------------|--------------|
| Details of RotorH | |
| Named Selection | RotorH |
| Geometry | Apply Cancel |
| Propagate Selection | Yes |
| Export Selection | Yes |
| Include In Legend | Yes |

Fig. A.27. *Details View* de la selección de *Named Selection* del menú contextual de la sección de *Graphics*.

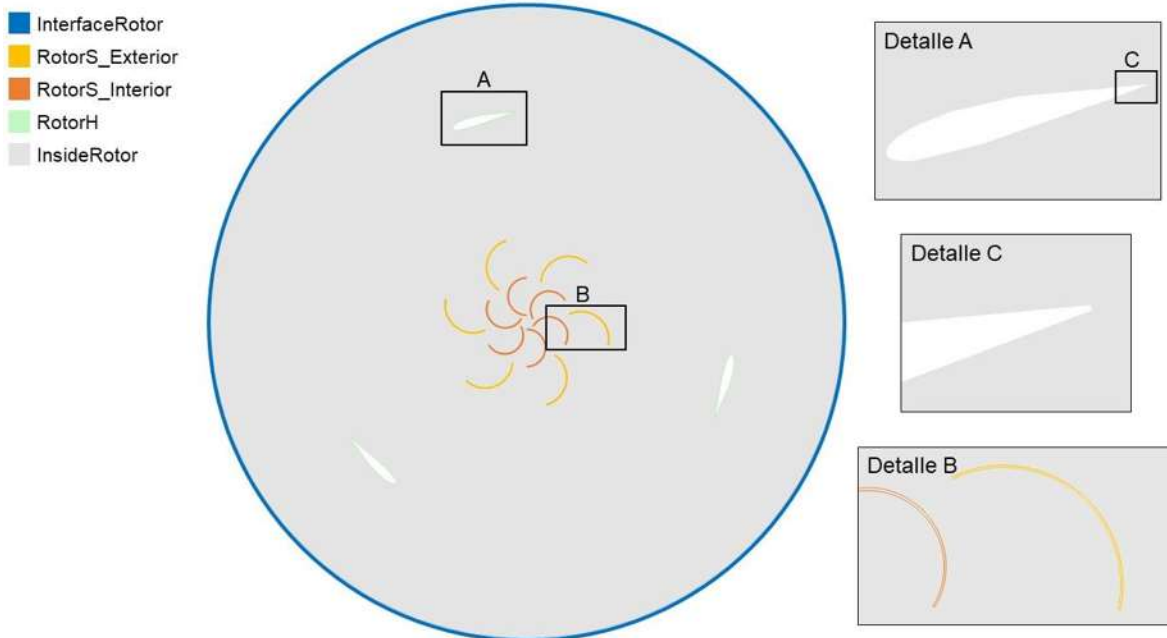


Fig. A.28. Nomenclatura con vista detallada de la geometría del rotor.

Se usa el filtro de *Face* para nombrar *InsideRotor*, que es la superficie que del círculo menos la superficie de los álabes de la turbina H y de la turbina Savonius. Se usa el filtro de *Edge* para *InterfaceRotor*, *RotorS_Exterior*, *RotorS_Interior* y *RotorH*. Para *RotorH* se seleccionan las 3 curvas NACA2415 y las 3 líneas rectas que cierran el perfil aerodinámico, para *InterfaceRotor* se selecciona la curva cilíndrica, para el *RotorS_Interno* se seleccionan las cuatro líneas (dos curvas y dos rectas) de los seis perfiles semicirculares ubicados más al centro de la turbina, para *RotorS_Externo* se seleccionan las cuatro líneas (dos curvas y dos rectas) de los seis perfiles semicirculares ubicados más al exterior de la turbina, como se muestra en detalle en la Fig. A.28.

Las superficies nombradas aparecen en el *Tree Outline*. Finalmente se guarda el avance con *Save Project* y se cierra *DesignModeler*

A.2 Construcción geométrica del estator

En *Workbench* se abre *DesignModeler* en el módulo de *Geometry* correspondiente al estator. Se selecciona *XYPlane* en la sección del *Tree Outline*, se da clic en *New Sketch* en la barra de herramientas. Se crea la geometría del estator usando las diversas herramientas que aparecen en la pestaña *Sketching* en la sección inferior izquierda del *Tree Outline* siguiendo el plano de la Fig. 4.7. El centro del círculo es el origen de coordenadas.

En el menú superior en la pestaña *Concept*, se selecciona *Surface From Sketches*, ver Fig. A.8, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, en *Surface From Sketches* renombrar como *SurfaceEstator*, seccionar el *Sketch* creado en la sección de *Tree Outline*, dar clic en *Apply* de *Base Objects* en la sección *Details View*, y clic en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas.

Se selecciona *XYPlane* en la sección del *Tree Outline*, se da clic en *New Sketch* en la barra de herramientas. Se trazan las líneas azules siguiendo el plano de la Fig. A.29.

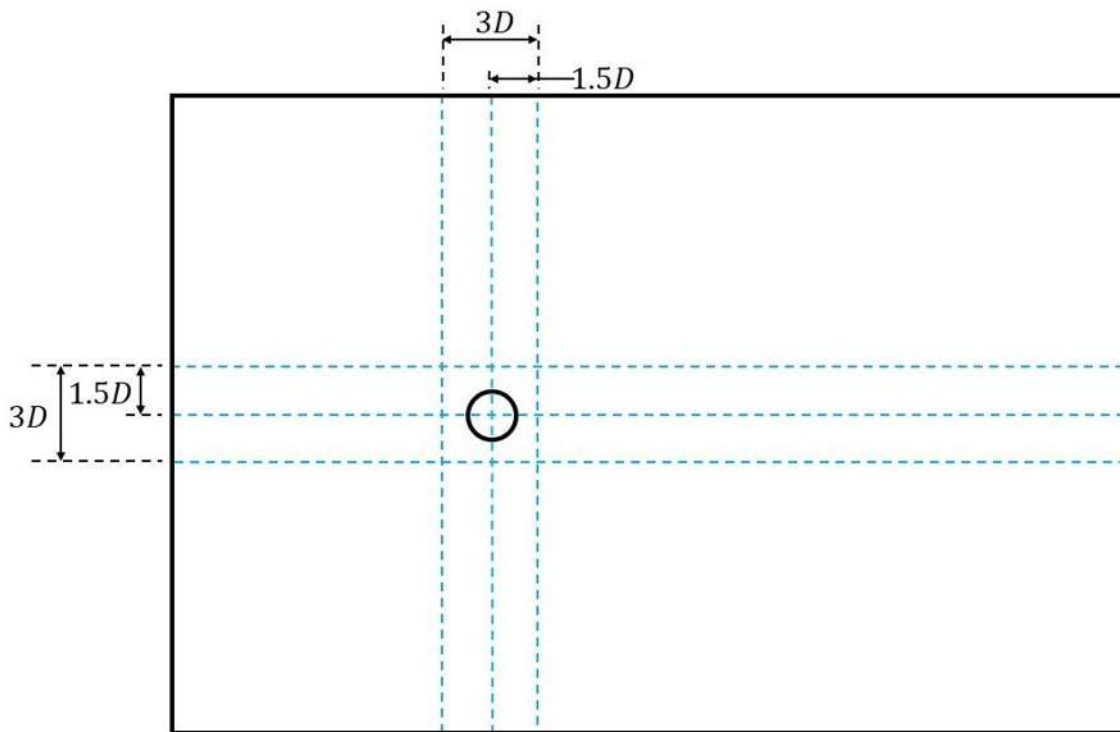


Fig. A.29. Plano de las divisiones para la geometría del estator.

En el menú superior en la pestaña *Tools* se selecciona *Face Split*, ver Fig. A.30, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, ver Fig. A.31, en *Face Split Type* seleccionar *By Points and Edges*, en *Target Face* seleccionar *Surface Body* de la sección de *Tree Outline*, en *Tool Geometry* usando el filtro de selección *Edges* en la sección de *Graphics* se selecciona una de las líneas azules de la Fig. A.29

trazadas anteriormente, y *clic* en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas. Se repite el procedimiento anterior hasta dividir la superficie en 12 partes como se muestra en la Fig. A.32.

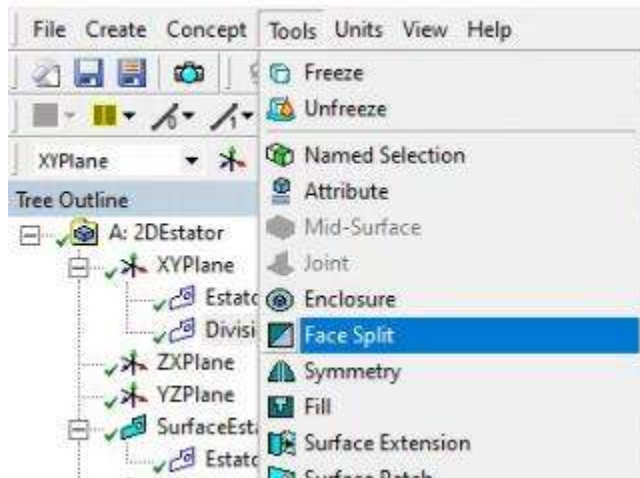


Fig. A.30. Menú de la pestaña *Tools*.

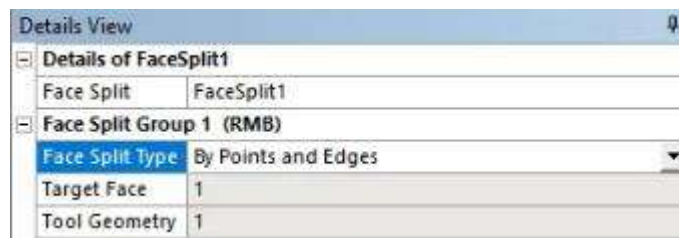


Fig. A.31. *Details View* del submenú *Tools* → *Face Split*

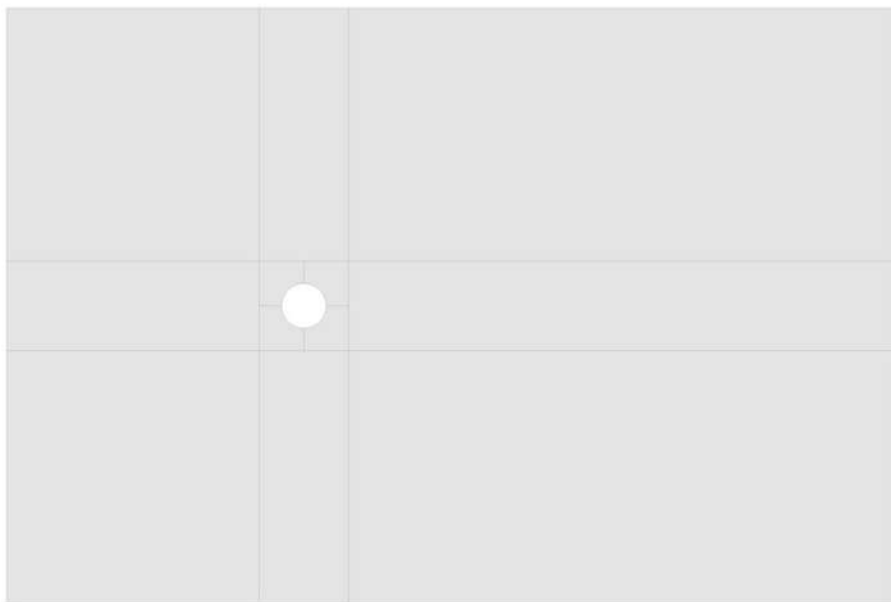


Fig. A.32. Divisiones de la geometría del estator.

En la sección del *Tree Outline* se renombra *Surface Body* como *DominioEstatador*, seleccionar *DomioEstatador* con el *mouse*, en la sección *Details View* en *Fluid/Solid* seleccionar *Fluid*.

Se procede a nombrar las diferentes partes del dominio. En la sección de *Graphics* se selecciona usando los filtros de selección *Faces* y *Edges*, según corresponda, ubicados en barra de herramientas en el menú superior, usando el *mouse* y manteniendo presionada la tecla *Ctrl* para selecciones múltiples. Con la selección hecha, se da *clic* derecho y se escoge *Named Selection*, se abre un nuevo menú en la sección *Details View*, en *Named Selection* se nombra según sea el caso, ver Fig. 4.9, en *Geometry clic* en *Apply* y *clic* en *Generate* del menú superior en la barra de herramientas.

Anexo B. Generación de la Malla

En el programa de *ANSYS Workbench*, en la sección de *Toolbox* (sección izquierda, en el panel de trabajo que se muestra por defecto), en el submenú *Component Systems*, se selecciona y se arrastra dos veces el módulo de *Mesh* a la sección de *Project Schematic* colocando el módulo enfrente del módulo de *Geometry*, ver Fig. B.1. Se renombran los módulos como “MallaR”, para el rotor y “MallaE” para el estator.

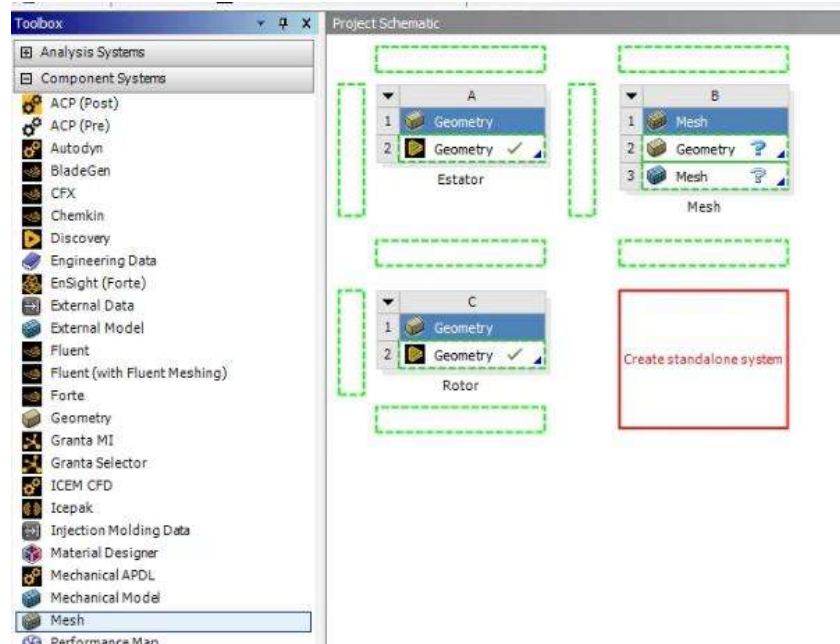


Fig. B.1. Selección y arrastre de los módulos de *Mesh* a la sección *Project Schematic* en *ANSYS Workbench*.

Seleccionar y mantener presionado con *click* izquierdo del *mouse* la segunda fila del módulo de *Geometry*, arrastrarlo hasta la fila *Geometry* del módulo *Mesh* y dejar de presionar el *click* izquierdo del *mouse*, ver Fig. B.2. Para iniciar *ANSYS Meshing* dar doble *click* sobre *Mesh*, ubicada en la tercera fila del módulo *Mesh*.

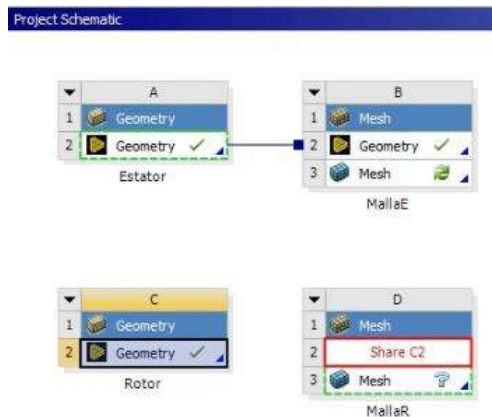


Fig. B.2. Vista del proceso para compartir información entre módulo de *Geometry* y *Mesh*.

B.1 Malla rotor

Se abre *ANSYS Meshing* del módulo *MallaR* en *ANSYS Workbench*. En *ANSYS Meshing* en la sección de *Outline* se selecciona *Mesh*, ver Fig. B.3, en la sección *Details* (ubicada en la esquina inferior izquierda de la pantalla), ver Fig. B.4, en el apartado *Defaults*, en *Physics Preference* seleccionar *CFD*, en *Solver Preference* seleccionar *Fluent*. En el apartado *Sizing* en *Use Adaptive Sizing* seleccionar *No*, en *Mesh Defeaturing* seleccionar *No*, en *Capture Curvature* seleccionar *No*. En el apartado *Quality* en *Smoothing* seleccionar *High*.

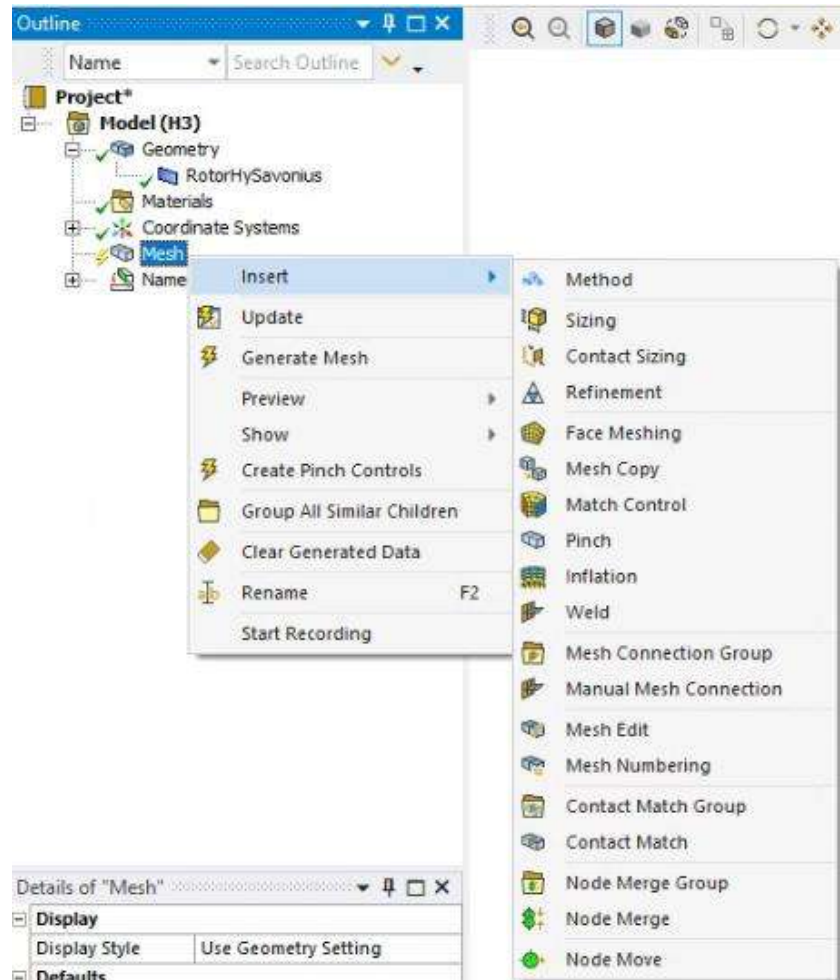


Fig. B.3. Menú contextual de la selección de *Mesh* en la sección de *Outline*, con submenú *Insert*

| Details of "Mesh" | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Display | |
| Display Style | Use Geometry Setting |
| Defaults | |
| Physics Preference | CFD |
| Solver Preference | Fluent |
| Element Order | Linear |
| Element Size | Default (0.25456 m) |
| Export Format | Standard |
| Export Preview Surface Mesh | No |
| Sizing | |
| Use Adaptive Sizing | No |
| Growth Rate | 1.2 |
| Mesh Defeaturing | No |
| Capture Curvature | No |
| Capture Proximity | No |
| Enable Washers | No |
| Bounding Box Diagonal | 5.0912 m |
| Average Surface Area | 10.077 m ² |
| Minimum Edge Length | 1.1839e-005 m |
| Quality | |
| Check Mesh Quality | Yes, Errors |
| Target Skewness | Default (0.900000) |
| Smoothing | High |
| Mesh Metric | None |
| Inflation | |
| Batch Connections | |
| Advanced | |
| Statistics | |

Fig. B.4. *Details* de la selección *Mesh* del rotor de la sección *Outline*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Method*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.5, en *Geometry* seleccionar la geometría del dominio computacional en la sección gráfica, en *Method* seleccionar *Triangles*.

| Details of "All Triangles Method" - Method | |
|--|--------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Method | Triangles |
| Element Order | Use Global Setting |

Fig. B.5. *Details* del submenú *Insert* → *Method* → *All Triangles*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Inflation*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.6, en *Geometry* seleccionar la geometría del dominio computacional en la sección gráfica, en

Boundary Scoping Method seleccionar *Named Selections*, en *Boundary* seleccionar *RotorH*, en *Inflation Option* seleccionar *First Layer Thickness*, en *First Layer Height*, especificar el valor según corresponda en la Tabla B.2, en *Maximum Layer* y en *Growth Rate* indicar el según corresponda en la Tabla B.1. Renombrar *Inflation* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Inflation H*, ver Fig. B.12.

| Details of "Inflation H" - Inflation | |
|---|-----------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Face |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Boundary Scoping Method | Named Selections |
| Boundary | RotorH |
| Inflation Option | First Layer Thickness |
| <input type="checkbox"/> First Layer Height | 3.e-005 m |
| <input type="checkbox"/> Maximum Layers | 15 |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | 1.2 |
| Inflation Algorithm | Pre |

Fig. B.6. *Details* del submenú *Insert* → *Inflation H*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Inflation*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.6 como referencia, en *Geometry* seleccionar la geometría del dominio computacional en la sección gráfica, en *Boundary Scoping Method* seleccionar *Named Selections*, en *Boundary* seleccionar *RotorS_Interior* y *RotorS_Exterior* manteniendo presionada la tecla *Ctrl*, en *Inflation Option* seleccionar *First Layer Thickness*, en *First Layer Height*, especificar el valor 5.5×10^{-5} , en *Maximum Layer* y en *Growth Rate* indicar el según corresponda en la Tabla B.1. Renombrar *Inflation* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Inflation Savonius*, ver Fig. B.12.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.7, en *Geometry* seleccionar la geometría del dominio computacional en la sección gráfica, en *Type* seleccionar *Element Size*, en *Element Size* especificar el valor de *0.1m*.

| Details of "Body Sizing" - Sizing | |
|-----------------------------------|--------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Type | Element Size |
| Element Size | 0.1 m |
| Advanced | |
| Behavior | Soft |
| Growth Rate | Default (1.2) |
| Capture Curvature | No |
| Capture Proximity | No |

Fig. B.7. *Details* del submenú *Insert* → *Sizing*, para *Body Sizing*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.8, en *Geometry* usando el filtro de selección *Edge* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) se selecciona en la sección gráfica la circunferencia de la figura que corresponde a la parte del dominio nombrada como *InterfaceRotor*, ver Fig. A.28, en *Type* seleccionar *Number of Divisions*, en *Number of Divisions* y en *Growth Rate* indicar el según corresponda en la Tabla B.1. Renombrar *Edge Sizing* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Edge Sizing Interface*, ver Fig. B.12.

Details of "Edge Sizing Interface" - Sizing : ▾ □ ✕

| Scope | |
|---------------------|---------------------|
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Edge |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Type | Number of Divisions |
| Number of Divisions | 540 |
| Advanced | |
| Behavior | Soft |
| Growth Rate | 1,2 |
| Capture Curvature | No |
| Capture Proximity | No |
| Bias Type | No Bias |

Fig. B.8. *Details* del submenú *Insert* → *Sizing*, para *Edge Sizing Interface*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.10, en *Geometry* usando el filtro de selección *Edge* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) y presionando la tecla *Ctrl* se selecciona en la sección gráfica las tres líneas curvas correspondientes a los álabes NACA2415 del rotor H, ver Fig. B.9, en *Type* seleccionar *Number of Divisions*, en *Number of Divisions* y en *Growth Rate* indicar el según corresponda en la Tabla B.1, en *Capture Curvature* seleccionar *Yes*, en *Curvature Normal Angle* especificar 0.5° . Renombrar *Edge Sizing* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Edge Sizing NACA2415*, ver Fig. B.12.

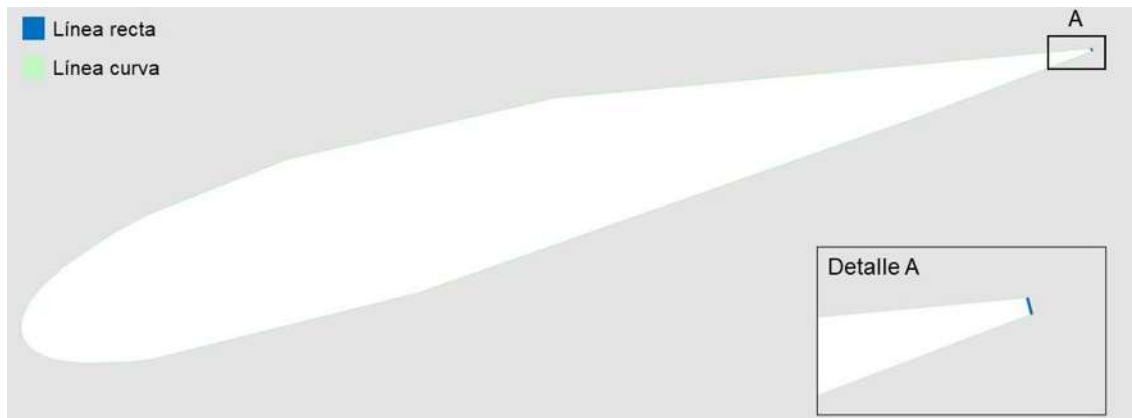


Fig. B.9. Línea curva y línea recta del álabes NACA2415.

| Details of "Edge Sizing NACA2415" - Sizing | |
|--|---------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 3 Edges |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Type | Number of Divisions |
| Number of Divisions | 2000 |
| Advanced | |
| Growth Rate | 1.2 |
| Capture Curvature | Yes |
| Curvature Normal Angle | 0.5° |
| Local Min Size | Default (1.e-002 m) |
| Capture Proximity | No |
| Bias Type | No Bias |

Fig. B.10. *Details* del submenú *Insert* → *Sizing*, para *Edge Sizing NACA2415*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.8 como referencia, en *Geometry* usando el filtro de selección *Edge* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) y presionando la tecla *Ctrl* se selecciona en la sección gráfica las tres líneas rectas correspondientes a los álabes NACA2415 del rotor H, ver Fig. B.9, en *Type* seleccionar *Number of Divisions*, en *Number of Divisions* y en *Growth Rate* indicar el según corresponda en la Tabla B.1. Renombrar *Edge Sizing* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Edge Sizing NACA2415 Recta*, ver Fig. B.12.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.10 como referencia, en *Geometry* usando el filtro de selección *Edge* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) y presionando la tecla *Ctrl* se selecciona en la sección gráfica las dos líneas curvas de cada uno de los álabes del rotor Savonius, ver Fig. B.11, en *Type* seleccionar *Number of Divisions*, en *Number of Divisions* y en *Growth Rate* indicar el según corresponda en la Tabla B.1, en *Capture Curvature* seleccionar *Yes*, en *Curvature Normal Angle* especificar 0.5° . Renombrar *Edge Sizing* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Edge Sizing Savonius*, ver Fig. B.12.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.8 como referencia, en *Geometry* usando el filtro de selección *Edge* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) y presionando la tecla *Ctrl* se selecciona en la sección gráfica las dos líneas rectas de cada uno de los álabes del rotor Savonius, ver Fig. B.11, en *Type* seleccionar *Number of Divisions*, en *Number of Divisions* y en *Growth Rate* indicar el según corresponda en la Tabla B.1. Renombrar *Edge Sizing* de la sección

Outline, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Edge Sizing Savonius Recta*, ver Fig. B.12.

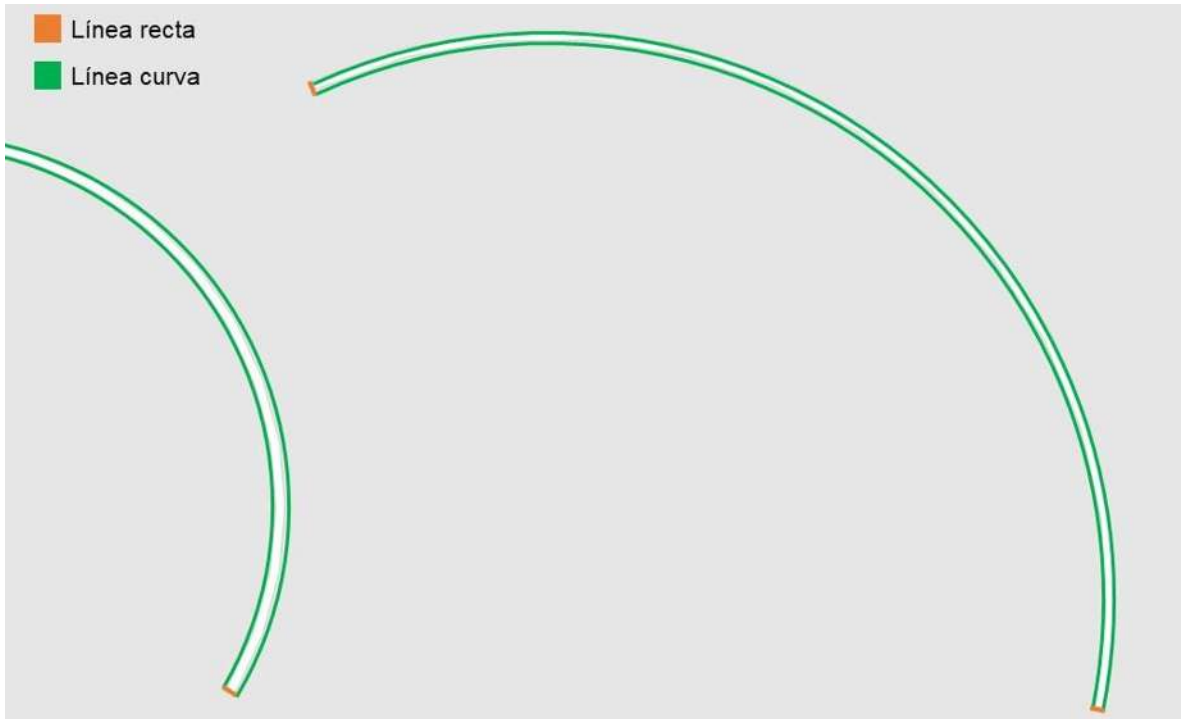


Fig. B.11. Líneas curvas y líneas rectas de los álabes de la turbina Savonius.

Finalmente, para generar la malla en el menú superior en la pestaña *Home*, se da clic en *Generate*. La malla obtenida se muestra en la Fig. B.13. Se guarda el proceso del proyecto en el menú superior en la pestaña *File* y *Save Project*.

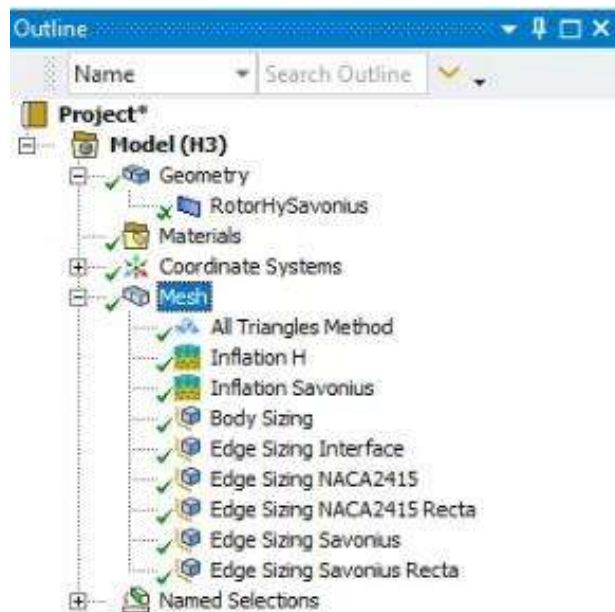


Fig. B.12. Nomenclatura empleada para las distintas herramientas de mallado aplicadas al rotor.

Tabla B.1. Relación de las mallas del rotor y sus valores para las técnicas de mallado.

| Malla | R1 | R2 | R3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| <i>Inflation H</i> Maximum Layer Growth Rate | 20 1.15 | 15 1.2 | 15 1.2 |
| <i>Inflation Savonius</i> Maximum Layer Growth Rate | 15 1.15 | 15 1.2 | 15 1.2 |
| <i>Edge Sizing Interface</i> Number of Divisions Growth Rate | 720 1.2 | 540 1.2 | 360 1.2 |
| <i>Edge Sizing NACA2415</i> Number of Divisions Growth Rate | 2300 1.1 | 2000 1.2 | 1700 1.2 |
| <i>Edge Sizing NACA2415 Recta</i> Number of Divisions Growth Rate | 10 1.1 | 10 1.2 | 6 1.2 |
| <i>Edge Sizing Savonius</i> Number of Divisions Growth Rate | 1300 1.1 | 1000 1.2 | 800 1.2 |
| <i>Edge Sizing Savonius Recta</i> Number of Divisions Growth Rate | 10 1.1 | 10 1.2 | 5 1.2 |

Tabla B.2. Tamaño de *First Layer Height* a las diferentes velocidades de viento para la técnica de *Inflation* aplicada a los álabes del rotor H

| V_{∞} (m/s) | 2.5 | 4 | 5.5 | 7 | 8.5 | 10 |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| First Layer Height (m) | 4×10^{-5} | 4×10^{-5} | 4×10^{-5} | 4×10^{-5} | 3×10^{-5} | 2×10^{-5} |

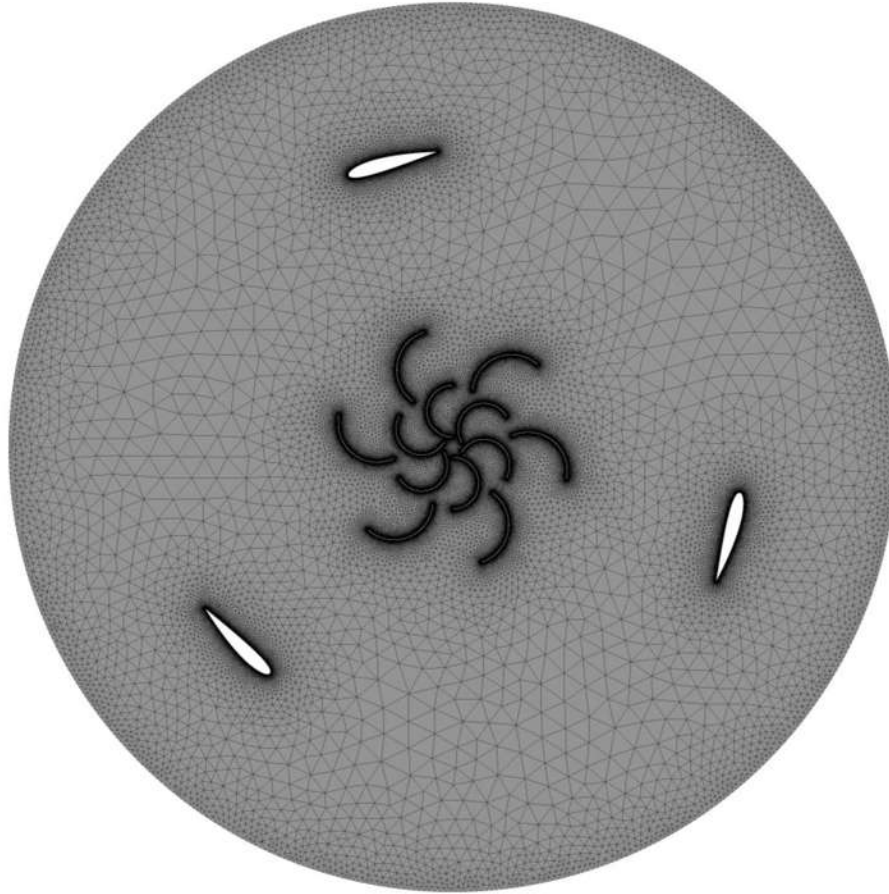


Fig. B.13. Malla del rotor, malla R2.

B.2 Malla estator

Se abre *ANSYS Meshing* del módulo *MallaE* en *ANSYS Workbench*. En *ANSYS Meshing* en la sección de *Outline* se selecciona *Mesh*, ver Fig. B.3, en la sección *Details* (ubicada en la esquina inferior izquierda de la pantalla), ver Fig. B.14, en el apartado *Defaults*, en *Physics Preference* seleccionar *CFD*, en *Solver Preference* seleccionar *Fluent*, en *Element Size*, especificar 0.25m. En el apartado *Sizing* en *Use Adaptive Sizing* seleccionar *Yes*, en *Resolution* especificar 3, en *Mesh Defeaturing* seleccionar *No*, en *Transition* seleccionar *Fine*, en *Initial Size Seed* seleccionar *Part*. En el apartado *Quality* en *Smoothing* seleccionar *Hight*.

| Details of "Mesh" | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Display | |
| Display Style | Use Geometry Setting |
| Defaults | |
| Physics Preference | CFD |
| Solver Preference | Fluent |
| Element Order | Linear |
| Element Size | 0.25 m |
| Export Format | Standard |
| Export Preview Surface Mesh | No |
| Sizing | |
| Use Adaptive Sizing | Yes |
| Resolution | 3 |
| Mesh Defeaturing | No |
| Transition | Slow |
| Span Angle Center | Fine |
| Initial Size Seed | Part |
| Bounding Box Diagonal | 86.533 m |
| Average Surface Area | 287.16 m ² |
| Minimum Edge Length | 1.8 m |
| Quality | |
| Check Mesh Quality | Yes, Errors |
| Target Skewness | Default (0.900000) |
| Smoothing | High |
| Mesh Metric | None |
| Inflation | |
| Batch Connections | |
| Advanced | |
| Statistics | |

Fig. B.14. *Details* de la selección *Mesh* del estator de la sección *Outline*

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Method*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.15, en *Geometry* seleccionar la geometría del dominio computacional en la sección gráfica, en *Method* seleccionar *Multizone Quad/Tri*, en *Free Face Mesh Type* seleccionar *All Quad*, en *Mesh Based Defeaturing* seleccionar *Off*.

| Details of "MultiZone Quad/Tri Method" - Method | |
|---|--------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Method | MultiZone Quad/Tri |
| Surface Mesh Method | Program Controlled |
| Element Order | Use Global Setting |
| Free Face Mesh Type | All Quad |
| Advanced | |
| Preserve Boundaries | Protected |
| Mesh Based Defeaturing | Off |
| Sheet Loop Removal | No |
| Minimum Edge Length | 1.8 m |
| Write ICEM CFD Files | No |

Fig. B.15. *Details* del submenú *Insert* → *Method* → *MultiZone*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.16, en *Geometry* usando el filtro de selección *Face* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) y presionando la tecla *Ctrl* se selecciona en la sección gráfica las cuatro caras colindantes con la circunferencia, ver Fig. B.17, en *Type* seleccionar *Element Size*, en *Element Size* especificar el valor según corresponda en la Tabla B.3. Renombrar *Face Sizing* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Face Sizing Cuadrado*, ver Fig. B.22.

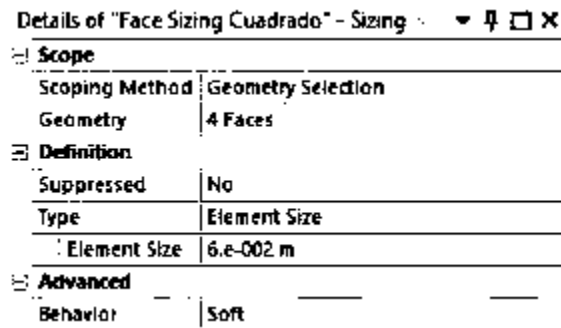


Fig. B.16. *Details* del submenú *Insert* → *Sizing*, para *Face Sizing Cuadrado*.

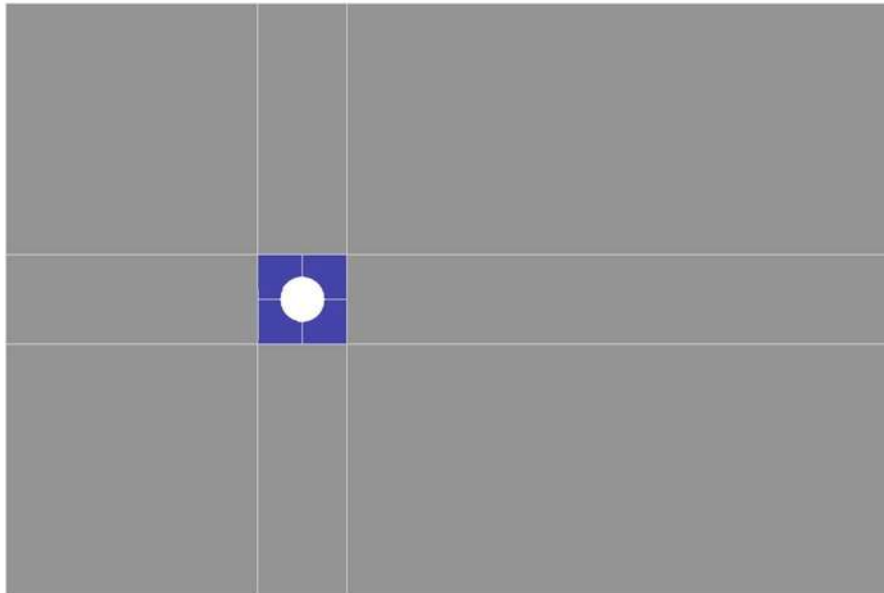


Fig. B.17. Caras seleccionadas para la aplicación de la herramienta *Face Sizing*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.18, en *Geometry* usando el filtro de selección *Edge* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) y presionando la tecla *Ctrl* se selecciona en la sección gráfica las diez líneas que

aparecen remarcadas en la Fig. B.19, en *Type* seleccionar *Number of Divisions*, en *Number of Divisions* especificar el valor según corresponda en la Tabla B.3, en *Behavior* seleccionar *Hard*, en *Bias Type* seleccionar “_____”, en *Bias Option* seleccionar *Bias Factor*, en *Bias Factor* especificar el valor de 3 y en *Reverse Bias* seleccionar las líneas a las que se les deba cambiar la orientación para que queden como en la Fig. B.19. Se recomienda usar un valor de 10 en *Number of Divisions* para visualizar las líneas a seleccionar al cambiar la orientación, posteriormente regresar al valor correcto. Renombrar *Edge Sizing* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Edge Sizing 8.5D*, ver Fig. B.22.

| Details of "Edge Sizing 8.5D" - Sizing | |
|--|---------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 10 Edges |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Type | Number of Divisions |
| Number of Divisions | 102 |
| Advanced | |
| Behavior | Hard |
| Bias Type | _____ |
| Bias Option | Bias Factor |
| Bias Factor | 3.0 |
| Reverse Bias | 5 Edges |

Fig. B.18. *Details* del submenú *Insert* → *Sizing*, para *Edge Sizing 8.5D*.

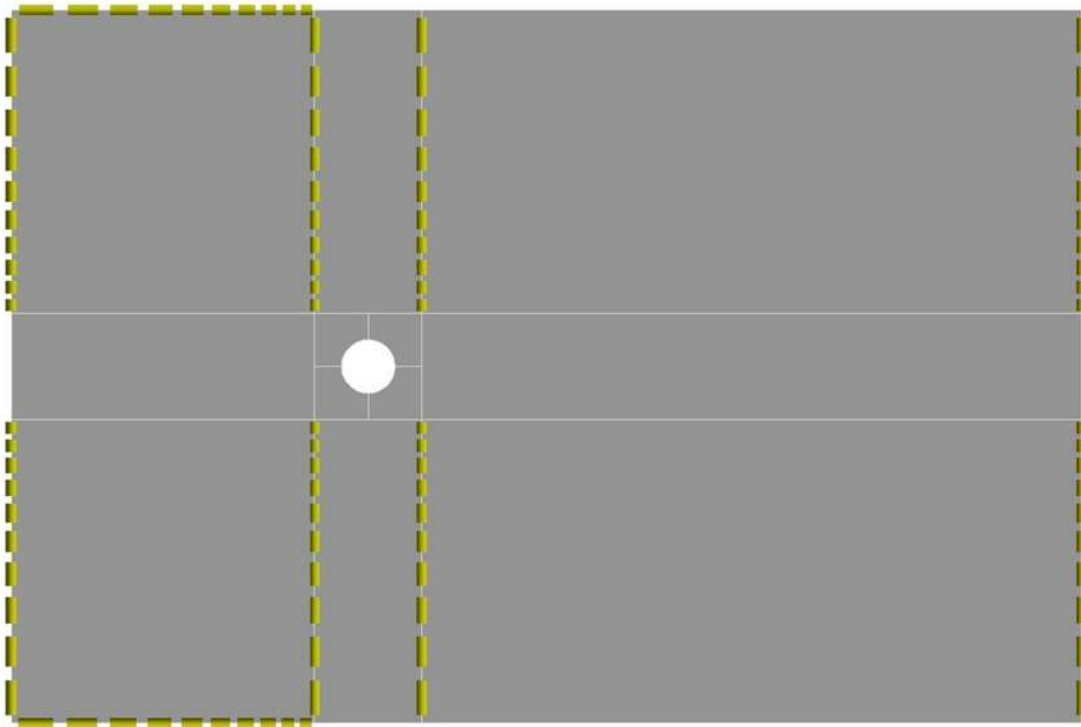


Fig. B.19. Líneas seleccionadas para *Edge Sizing 8.5D*.

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Sizing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.18 como referencia, en *Geometry* usando el filtro de selección *Edge* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) y presionando la tecla *Ctrl* se selecciona en la sección gráfica las dos líneas que aparecen remarcadas en la Fig. B.20, en *Type* seleccionar *Number of Divisions*, en *Number of Divisions* especificar el valor según corresponda en la Tabla B.3, en *Behavior* seleccionar *Hard*, en *Bias Type* seleccionar “_____ _ _”, en *Bias Option* seleccionar *Bias Factor*, en *Bias Factor* especificar el valor de 3 y en *Reverse Bias* seleccionar las líneas a las que se les deba cambiar la orientación para que queden como en la Fig. B.20. Se recomienda usar un valor de 10 en *Number of Divisions* para visualizar las líneas a seleccionar al cambiar la orientación, posteriormente regresar al valor correcto. Renombrar *Edge Sizing* de la sección *Outline*, del apartado *Mesh*, con el nombre de *Edge Sizing 18.5D*, ver Fig. B.22.

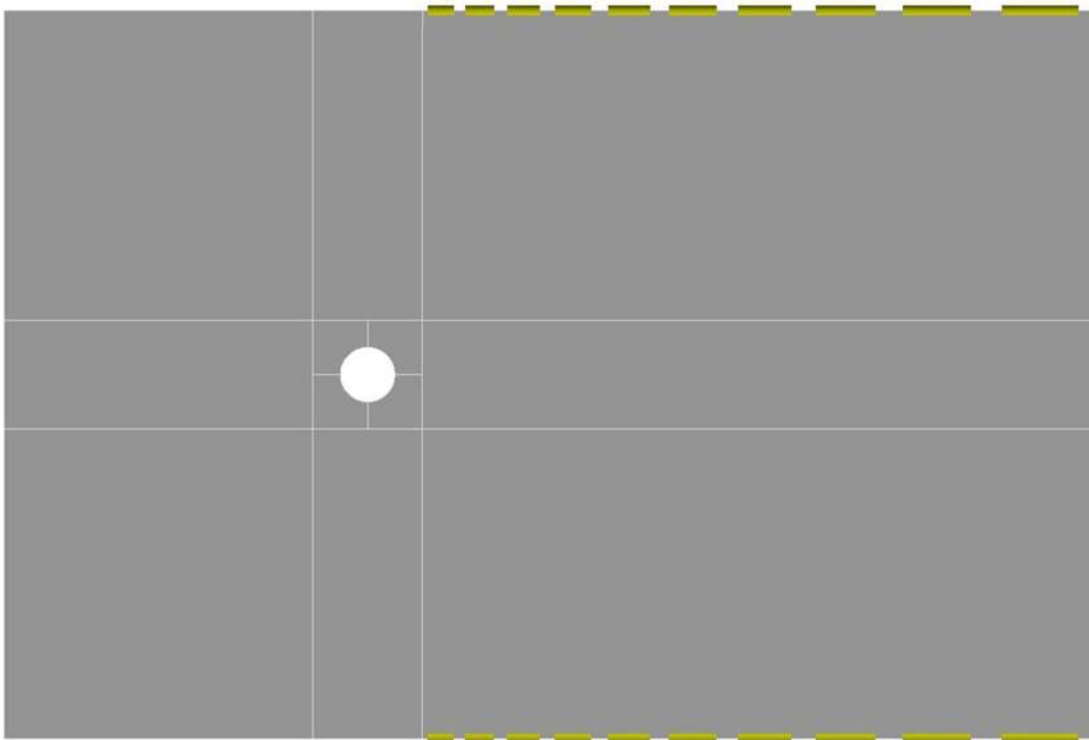


Fig. B.20. Líneas seleccionadas para *Edge Sizing 18.5D*

En la sección *Outline* se selecciona *Mesh*, clic derecho del *mouse*, se muestra un nuevo menú, ver Fig. B.3, se selecciona *Insert*, se abre un submenú y se selecciona *Face Meshing*. Se abre un nuevo menú en la sección *Details*, ver Fig. B.21, en *Geometry* usando el filtro de selección *Face* (ubicado en la parte superior de la sección gráfica) y presionando la tecla *Ctrl* se selecciona en la sección gráfica las cuatro caras colindantes con la circunferencia, ver Fig. B.17.

Details of "Face Meshing" - Mapped Face Meshing

| | |
|--------------------|--------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 4 Faces |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Mapped Mesh | Yes |
| Method | Quadrilaterals |
| Constrain Boundary | No |
| Advanced | |
| Specified Sides | No Selection |
| Specified Corners | No Selection |
| Specified Ends | No Selection |

Fig. B.21. *Details* del submenú *Insert* → *Face Meshing*.

Finalmente, para generar la malla en el menú superior en la pestaña *Home*, se da clic en *Generate*. La malla obtenida se muestra en la Fig. B.23. Se guarda el proceso del proyecto en el menú superior en la pestaña *File* y *Save Project*.

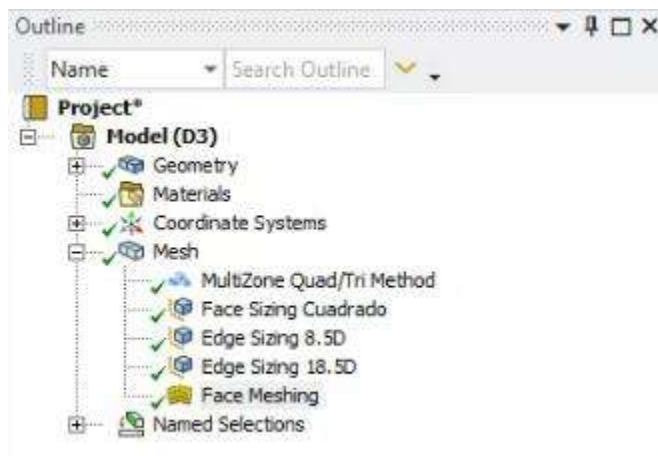


Fig. B.22. Nomenclatura empleada para las distintas herramientas de mallado aplicadas al estator.

Tabla B.3. Relación de las mallas del estator y sus valores para las técnicas de mallado

| Malla | E1 | E2 | E3 |
|---|------|------|-----|
| Face Sizing Cuadrado Element Size (m) | 0.03 | 0.06 | 0.1 |
| Edge Sizing 8.5D Number of Divisions | 136 | 102 | 68 |
| Edge Sizing 18.5D Number of Divisions | 296 | 222 | 148 |

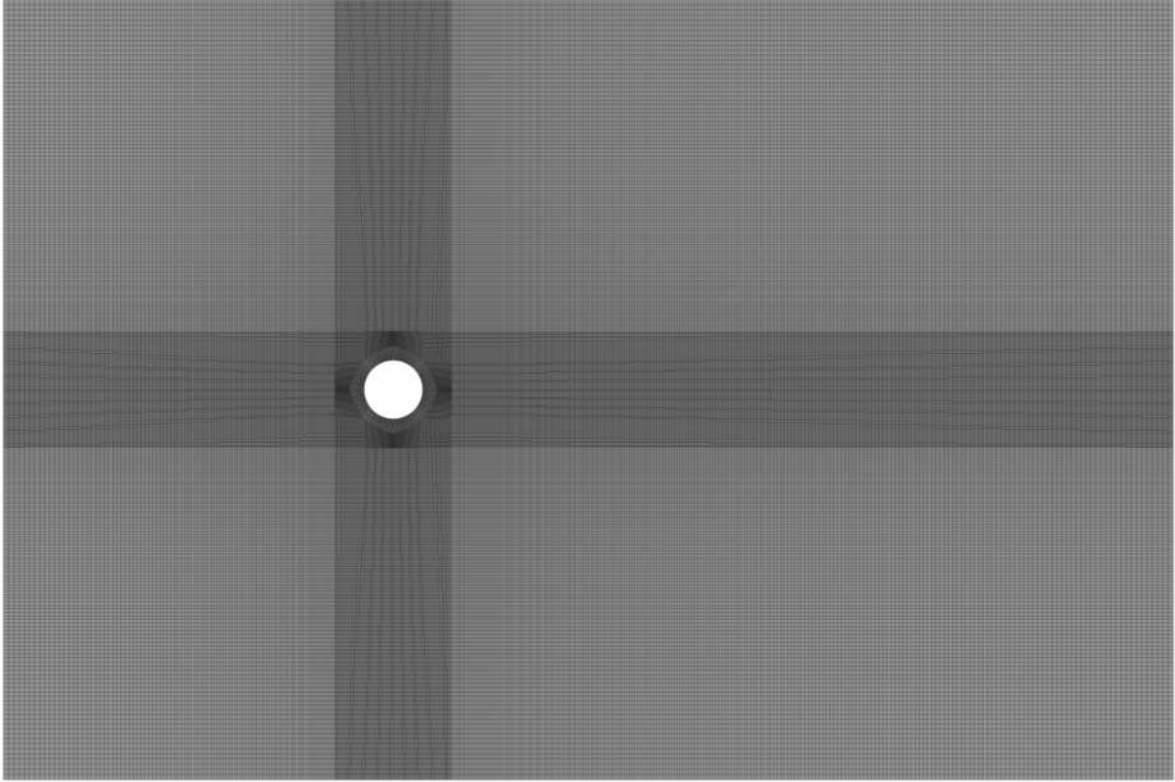


Fig. B.23. Malla del estator, malla E2.

Anexo C. Configuración CFD en ANSYS Fluent

En el programa de *ANSYS Workbench*, en la sección de *Toolbox* (sección izquierda, en el panel de trabajo que se muestra por defecto), en el submenú *Component Systems*, se selecciona y se arrastra el módulo de *Fluent* a la sección de *Project Schematic* colocándolo enfrente de cualquiera de los dos módulos de *Mesh*, ver Fig. C.1. Se renombra el módulo como “Iniciación Frame Motion”.

Seleccionar y mantener presionado con *click* izquierdo del *mouse* la tercera fila *Mesh* del módulo de *Mesh*, de cualquiera de los dos módulos *MallaR* o *MallaE*, arrastrarlo hasta la segunda fila *Setup* del módulo *Fluent* y dejar de presionar el *click* izquierdo del *mouse*, ver Fig. C.1. En el módulo *Mesh* arrastrado en la tercera fila cambiara el icono de una palomita verde a un rayo amarillo. Seleccionar la fila con el rayo amarillo y dar *click* derecho, se abrirá un nuevo menú contextual, ver Fig. C.2, seleccionar *Update*. Esperar hasta que vuelva a cambiar del rayo amarillo por la palomita verde. Repetir las acciones anteriores para el módulo *Mesh* faltante, *MallaR* o *MallaE*.

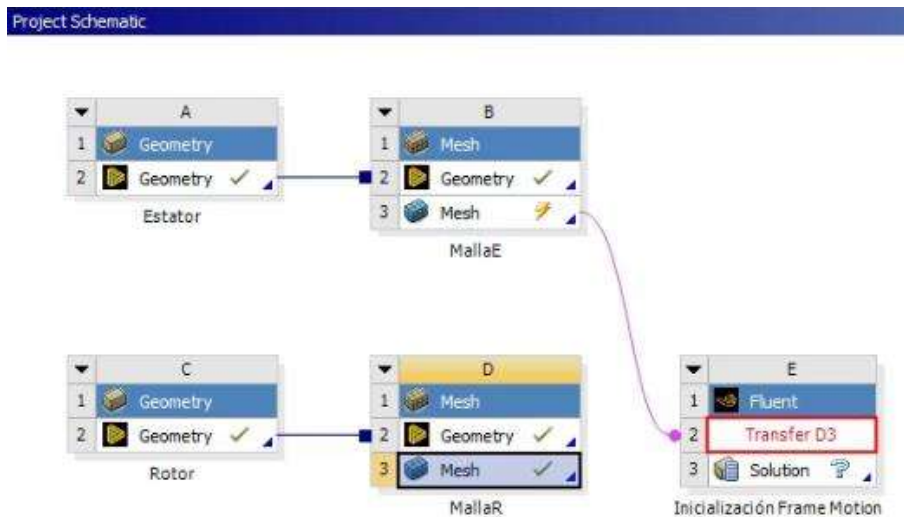


Fig. C.1. Vista del proceso para compartir información entre módulo de *Mesh* y *Fluent*.

Para iniciar *Fluent* dar doble *click* sobre *Setup*, ubicado en la segunda fila del módulo *Fluent*. En la ventana emergente en la sección *Options* habilitar la opción *Double Precision* y *Display Mesh After Reading*, en la sección *Parallel (Local Machine)* en *Solver Processes* especificar el valor de 7, que es el número de procesadores que usara el programa. Este valor dependerá del número de núcleos reales con las que cuenta el equipo de cómputo en donde se realizarán las simulaciones. Para el presente trabajo se cuenta con una computadora con un procesador Intel i7-9700 con 8 núcleos.

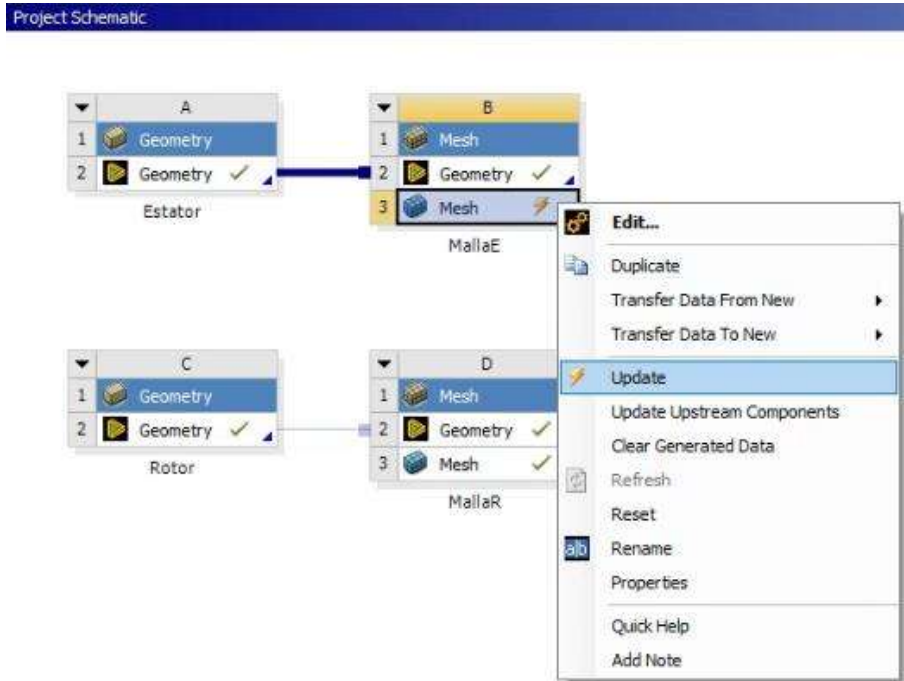


Fig. C.2. Menú contextual para transferir la información del módulo de Mesh a Fluent.

En ANSYS Fluent en la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se selecciona *General*, en la sección *Task Page*, ver Fig. C.3, en la sección *Solver* en *Type* se seleccionar *Pressure-Based*, en *Velocity Formulation* seleccionar *Absolute*, en *Time* seleccionar *Steady* y en *2D Space* seleccionar *Planar*.

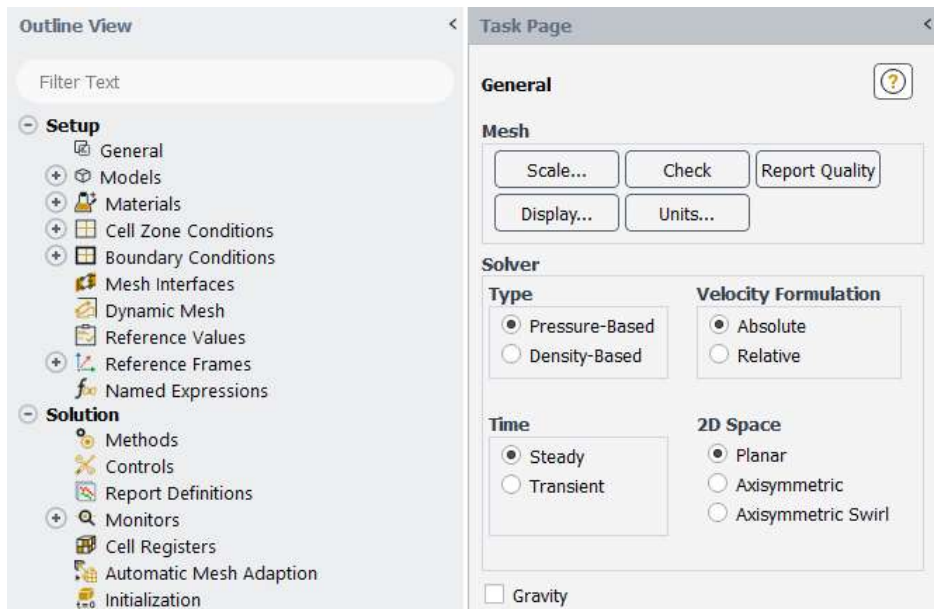


Fig. C.3. Task Page de Outline View → Setup → General.

Se crea la interfaz entre la malla del rotor y la malla del estator. En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se selecciona *Mesh Interfaces*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.4, en la sección *Boundary Zones* seleccionar *Interfaceestator* e

Interfacerotor, en *Interface Name Prefix* nombrar como *interface_estator_rotor*, clic en *Create* y clic en *Close*.

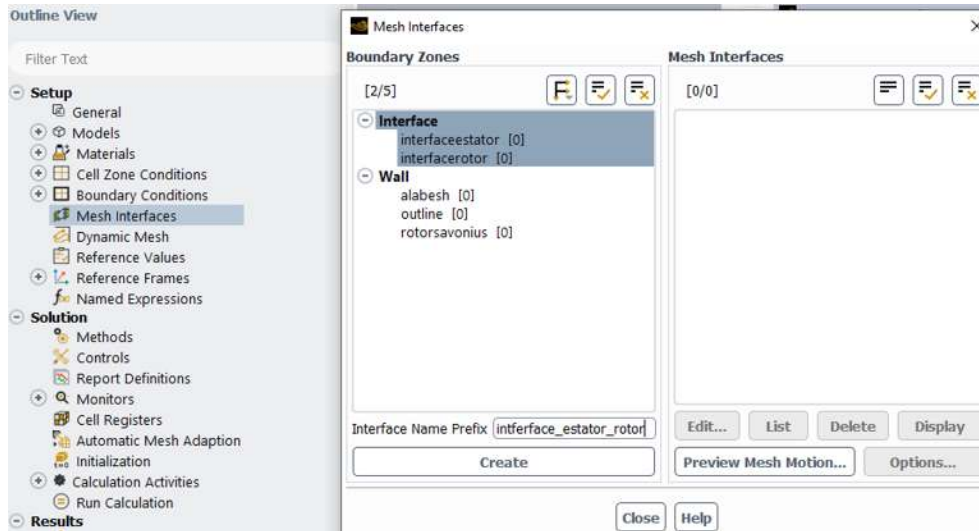


Fig. C.4. Mesh Interfaces de Outline View → Setup → Mesh Interfaces.

Se realiza la configuración del modelo de turbulencia para la simulación. En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se despliega el menú de *Models*, se selecciona *Viscous*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.5. En la nueva ventana en la sección *Model* seleccionar *k-omega (2 eqn)*, en *k-omega Model* seleccionar *SST*, habilitar *Low-Re Corrections*, clic en *Ok*. Se comprime el menú de *Models* del apartado de *Setup* de la sección de *Outline View*.

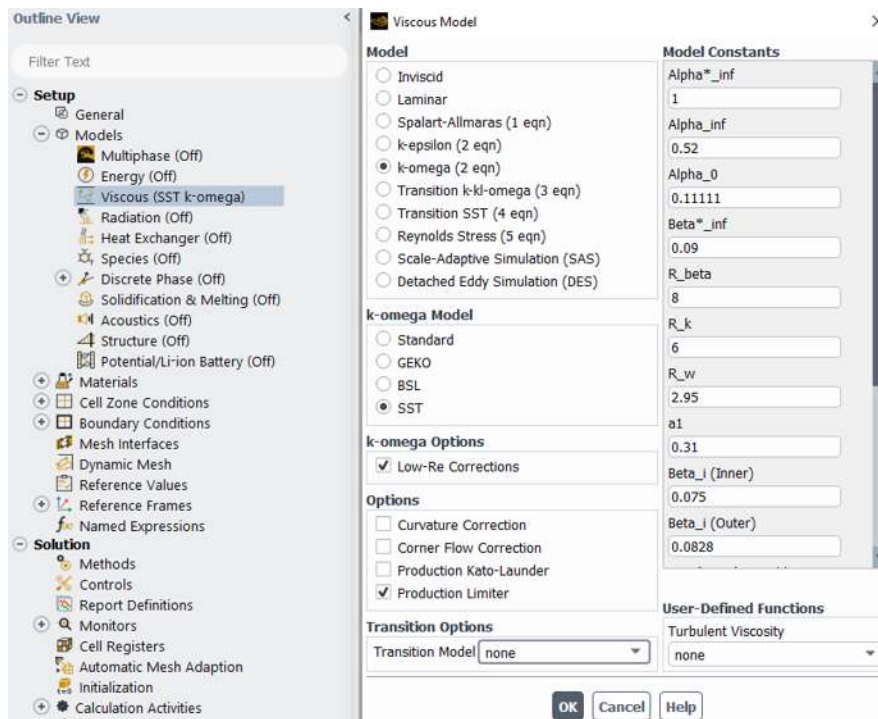


Fig. C.5. Viscous Model de Outline View → Setup → Models → Viscous.

Se realiza la configuración de las propiedades físicas del fluido de trabajo para la simulación. En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* desplegar el menú de *Materials*, desplegar apartado *Fluid*, selecciona *air*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.6. En la nueva ventana en *Name* renombrar como *air-gdl*, en la sección *Properties*, en *Density* especificar el valor de densidad, en *Viscosity* especificar el valor de viscosidad. Para la simulación se usan los valores calculados en el Capítulo III. Se da *clic* en *Change/Create*, surgirá una nueva ventana emergente dar *clic* en *Yes*. Finalmente se da *clic* en *Close*. Se comprime el menú de *Materials* del apartado de *Setup* de la sección de *Outline View*.

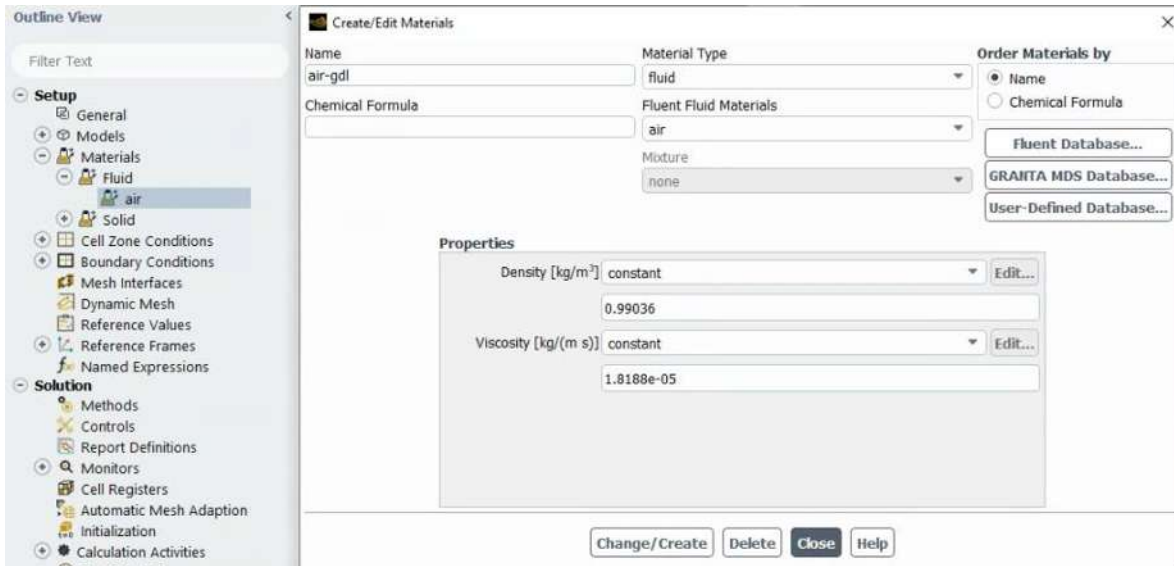


Fig. C.6. Create/Edit Materials de Outline View → Setup → Materials → Fluid.

Se realiza la configuración del movimiento de la malla, en el caso del estator es una malla estática y para la malla del rotor también es estática; sin embargo, las ecuaciones gobernantes se modifican para simular el efecto del movimiento a una velocidad angular constante. En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se despliega el menú de *Cell Zone Conditions*, desplegar apartado *Fluid*, seleccionar *insideestator*, y presionar la tecla *enter*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.7. En la nueva ventana verificar que en *Material Name* este seleccionado *air-gdl*, en caso contrario seleccionar *air-gdl*, *clic* en *Apply* y posteriormente *clic* en *Close*. Seleccionar *insiderotor*, y presionar la tecla *enter*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.8. En la nueva ventana verificar que en *Material Name* este seleccionado *air-gdl*, en caso contrario seleccionar *air-gdl*, habilitar la opción *Frame Motion*, en *Relative To Cell Zone* seleccionar *absolute*, en la sección *Rotation-Axis Origen* ingresar las coordenadas del eje de rotación, en nuestro caso el eje de rotación coincide con el origen de coordenadas, por lo cual indicar 0 en X y 0 en Y, en *Speed* especificar la velocidad de rotación en las unidades marcadas según el valor de la Tabla 4.5, *clic* en *Apply* y posteriormente *clic* en *Close*.

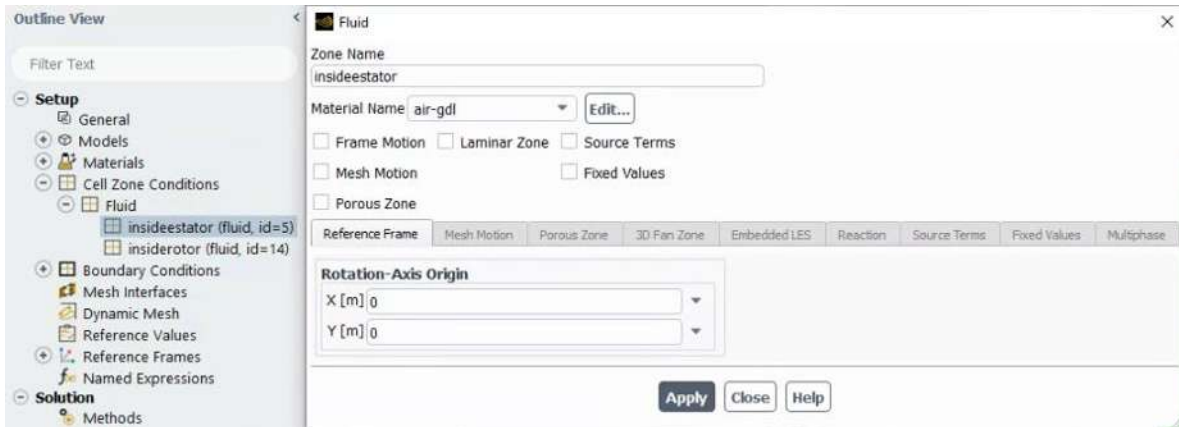


Fig. C.7. Outline View → Setup → Cell Zone Conditions → Fluid → insideestator.

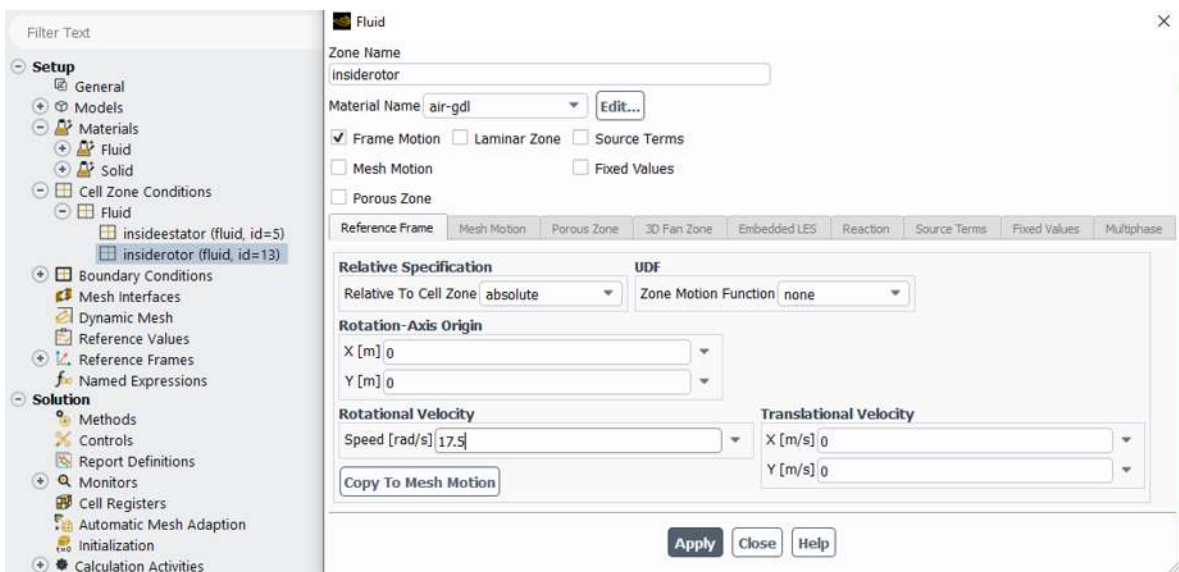


Fig. C.8. Outline View → Setup → Cell Zone Conditions → Fluid → insiderotor.

Se realiza la configuración de las condiciones de frontera. En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se selecciona *Boundary Conditions*, en la sección *Task Page*, dar doble clic en *inlet*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.9. En *Velocity Magnitude* especificar la velocidad de entrada del viento en las unidades marcadas según el valor de la Tabla 4.5, en la sección *Turbulence* en *Specification Method* seleccionar *Intensity and Length Scale*, clic en *Apply* y posteriormente clic en *Close*.

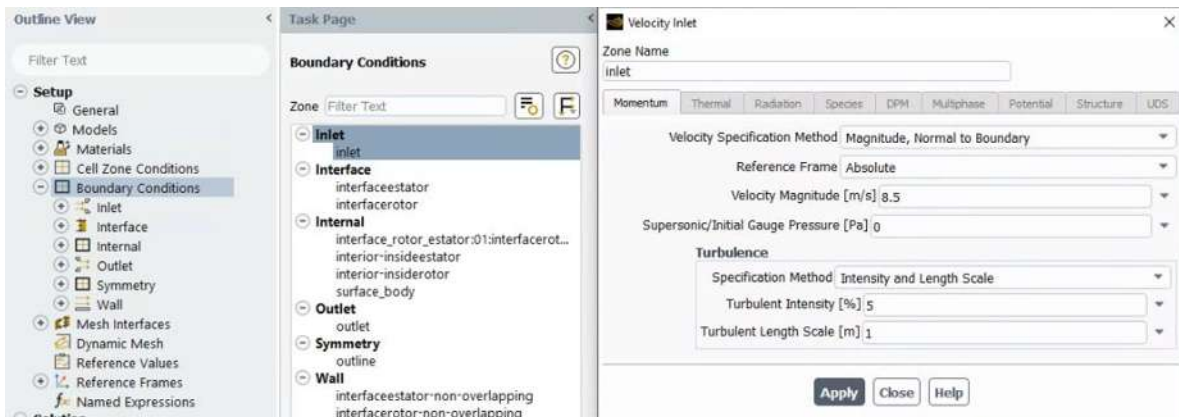


Fig. C.9. Outline View → Setup → Boundary Conditions → inlet.

En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se selecciona *Boundary Conditions*, en la sección *Task Page*, dar doble clic en *inlet*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.10. En *Gauge Pressure* especificar 0, en la sección *Turbulence* en *Specification Method* seleccionar *Intensity and Length Scale*, clic en *Apply* y posteriormente clic en *Close*.

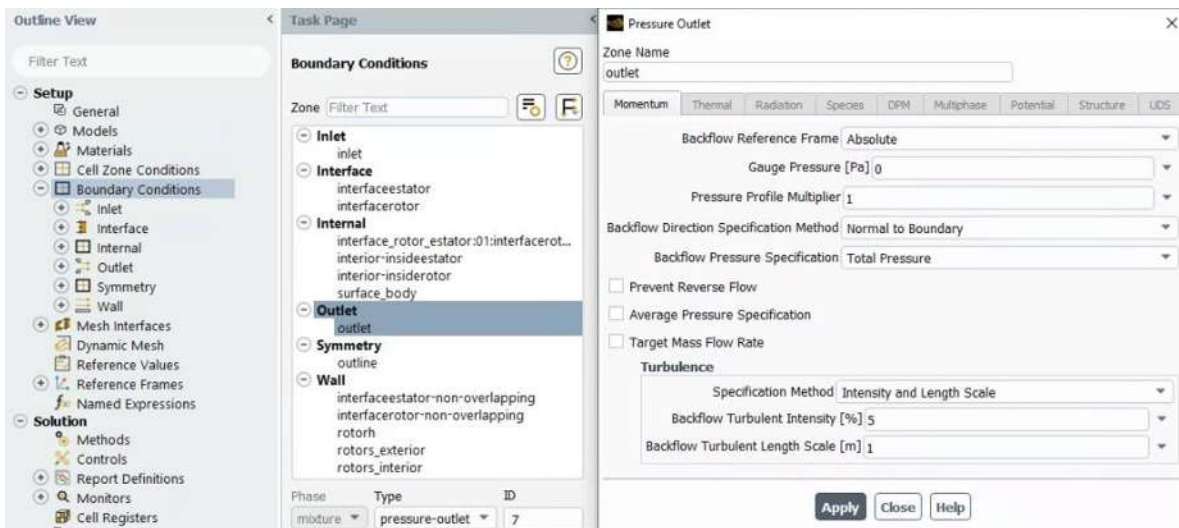


Fig. C.10. Outline View → Setup → Boundary Conditions → outlet.

En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se selecciona *Boundary Conditions*, en la sección *Task Page*, seleccionar *Outlet*, en la misma sección de *Task Page* en *Type* seleccionar *symmetry*, ver Fig. C.11.

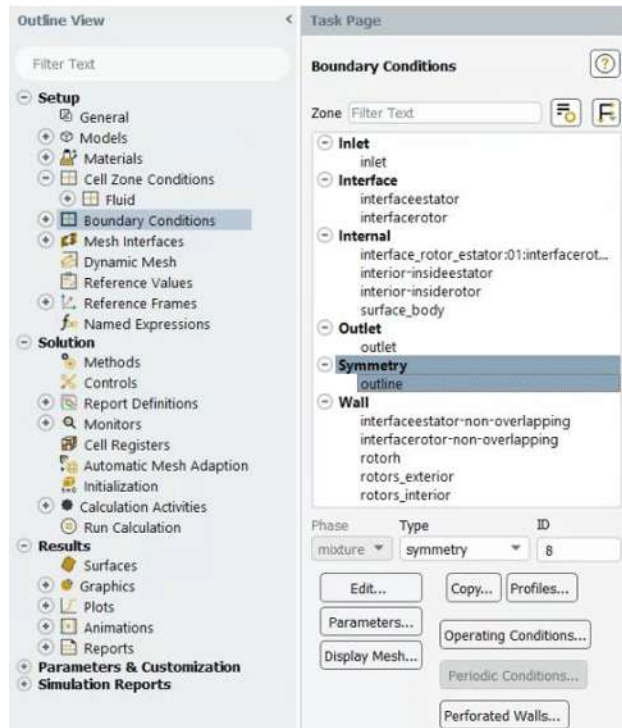


Fig. C.11. Task Page de Outline View → Setup → Boundary Conditions, selección de symmetry para outline.

En la sección Outline View en el apartado Setup se selecciona Boundary Conditions, en la sección Task Page, dar doble clic en alabesh, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.12. En la sección Wall Motion seleccionar Moving Wall, en la sección Motion seleccionar Relative to Adjacent Cell Zone y Rotational, clic en Apply y posteriormente clic en Close. Repetir la configuración anterior para rotors_exterior y rotors_interior.

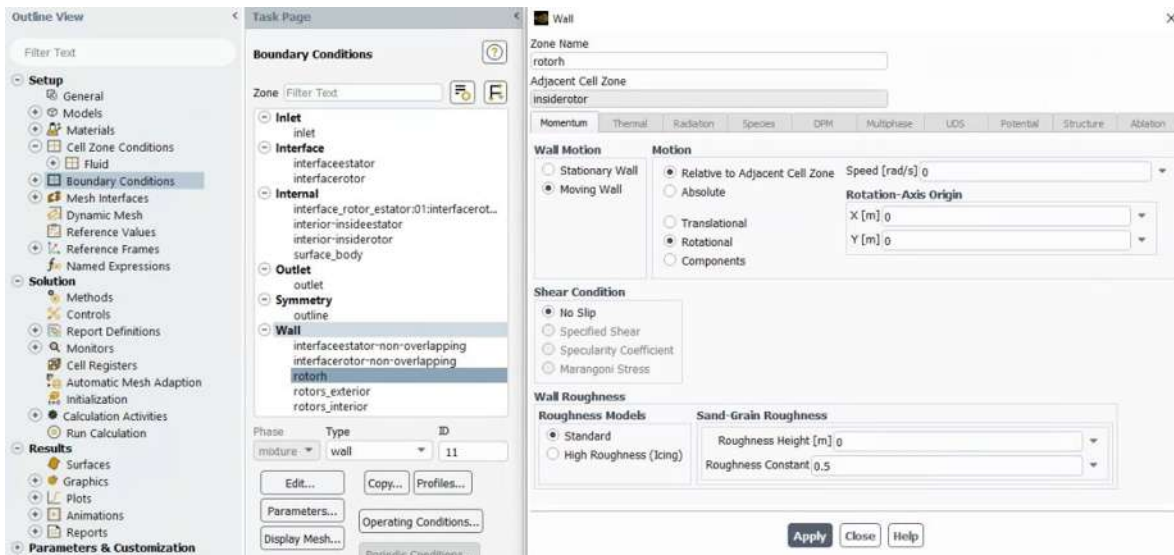


Fig. C.12. Outline View → Setup → Boundary Conditions → rotorh

Se realiza la configuración de valores de referencia para las simulaciones 2D. En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se selecciona *Reference Values*, en la sección *Task Page*, ver Fig. C.13, en *Area* especificar 2.4, en *Density* especificar el valor de la densidad, en *Depth* especificar 1, en *Length* especificar 1.2 y en *Velocity* especificar la velocidad de entrada del viento según el valor de la Tabla 4.5.

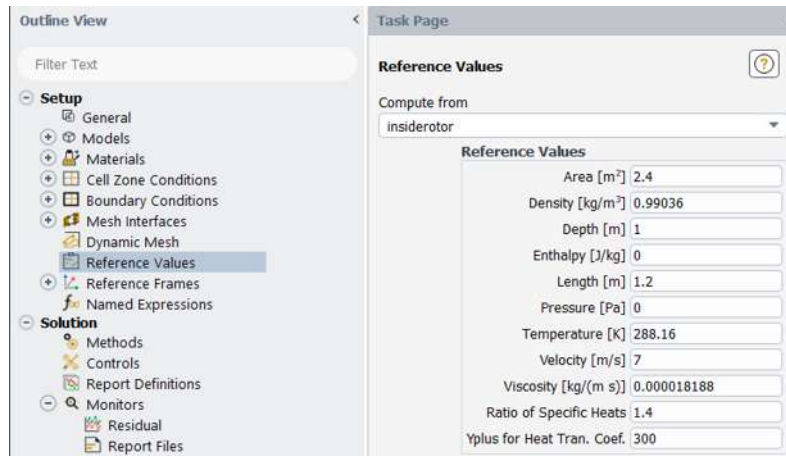


Fig. C.13. Outline View → Setup → Reference Values.

Se realiza la configuración del solucionador. En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se selecciona *Methods*, en la sección *Task Page*, verificar que los valores coincidan con los que se muestra en la ver Fig. C.14.

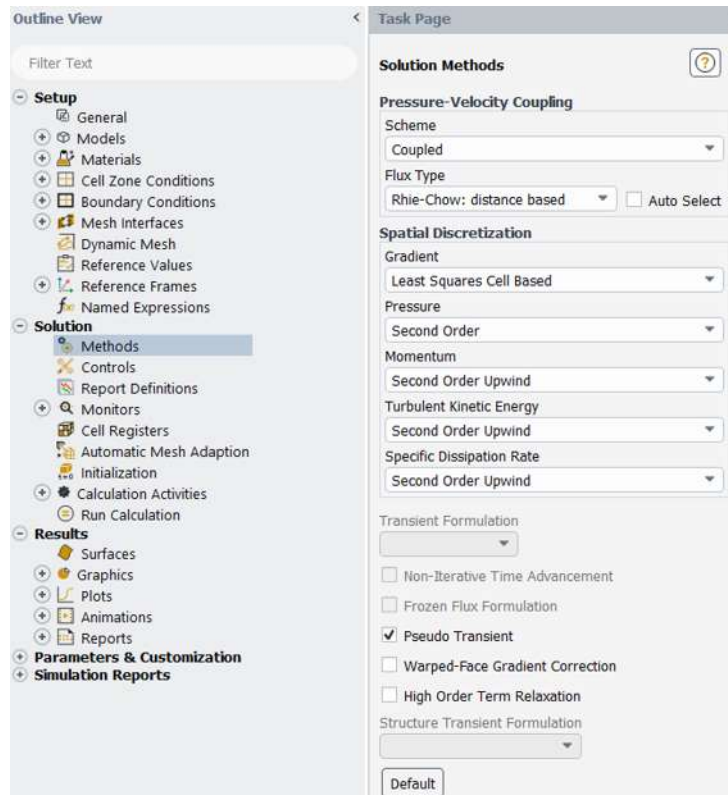


Fig. C.14. Task Page de Outline View → Solution → Methods.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se selecciona *Report Definitions*, clic derecho, se abre un menú contextual y se sigue la siguiente ruta *New* → *Force Report* → *Moment*, ver Fig. C.15. Se abre una nueva ventana, ver Fig. C.16, en *Name* nombrar según corresponda en la Tabla C.1, en *Report Output Type* seleccionar *Moment*, en la sección *Create* desmarcar *Report File* y *Report Plot*, en la sección *Zones* seleccionar según corresponda en la Tabla C.1, clic en *Ok*. Repetir el procedimiento anterior para crear los cinco reportes que aparecen en la Tabla C.1.

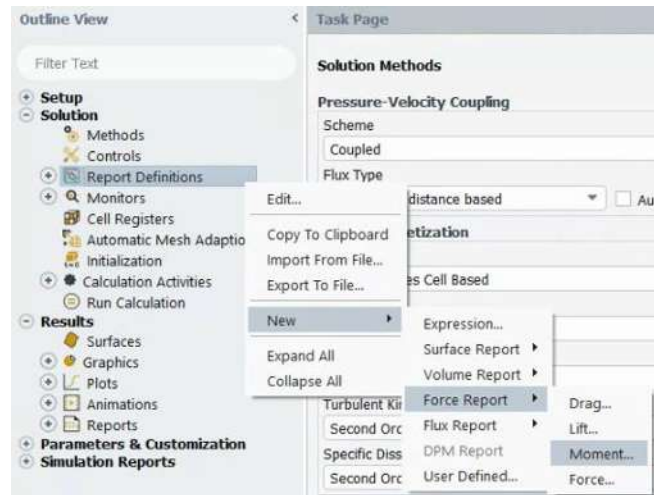


Fig. C.15. Menú contextual de *Outline View* → *Solution* → *Report Definitions*, con detalle en *New* → *Force Report* → *Moment*

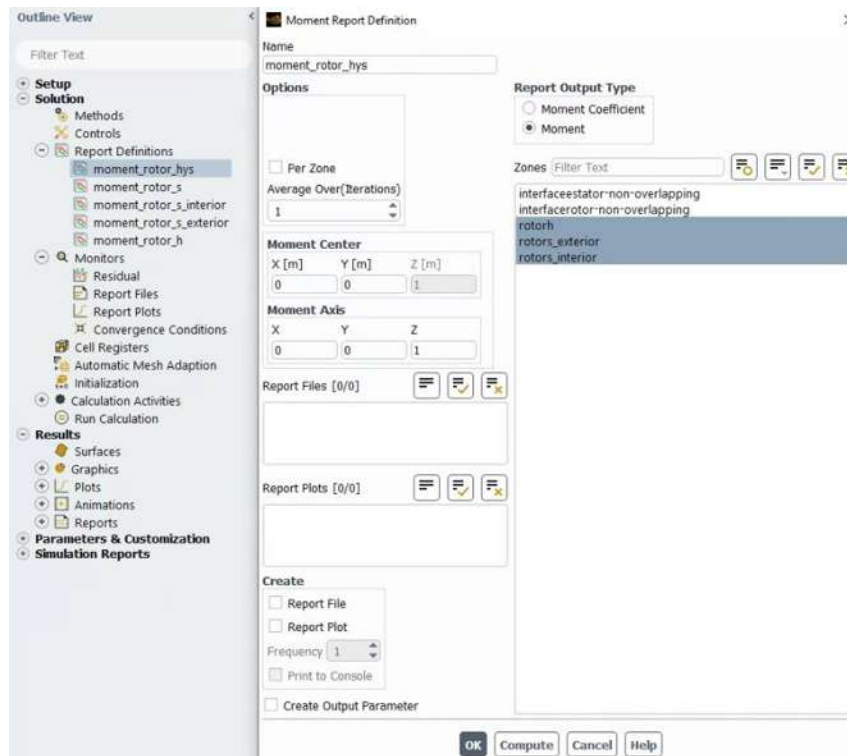


Fig. C.16. Ventana para la configuración de reportes.

Tabla C.1. Nombre de los reportes y zonas seleccionadas.

| Name | Zone |
|--------------------------|--|
| Momento_rotor_hys | rotorh rotors_exterior rotors_interior |
| Momento_rotor_s | rotors_exterior rotors_interior |
| Momento_rotor_s_interior | rotors_interior |
| Momento_rotor_s_exterior | rotors_exterior |
| Momento_rotor_h | Rotorh |

Se realiza la configuración del valor de los residuales para considerar la convergencia de la solución. En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se despliega el menú de *Monitors*, seleccionar *Residual*, y presionar la tecla *enter*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.17. En la nueva ventana en la columna *Absolute Criteria* rellenar todas las filas con el valor de 0.00001 o con $1e-05$, clic en *OK*.

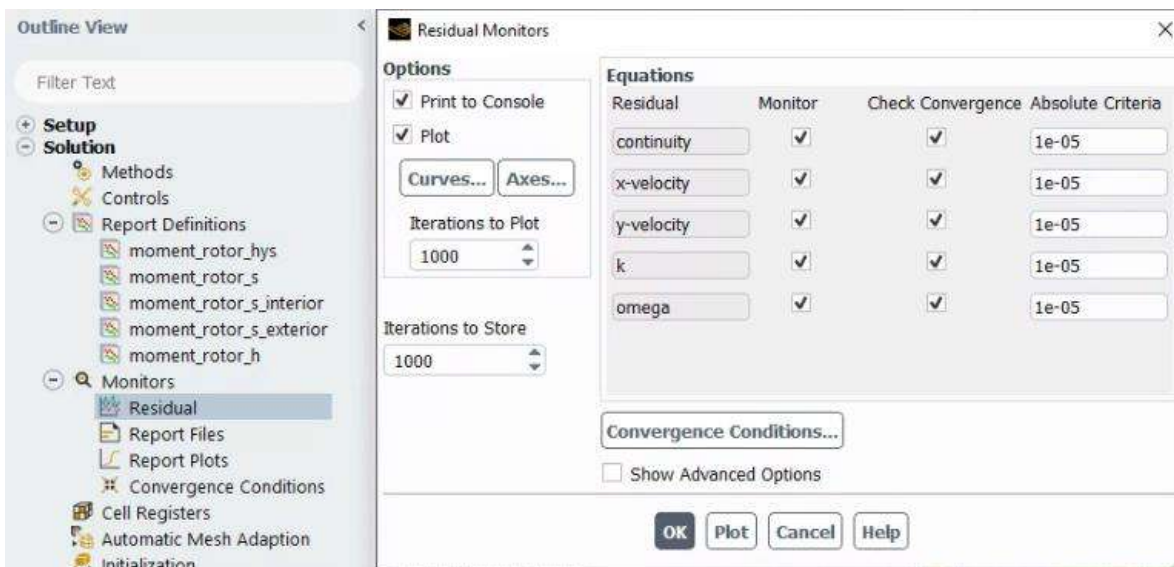


Fig. C.17. *Outline View* → *Solution* → *Monitors* → *Residual*.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se despliega el menú de *Monitors*, seleccionar *Report Files*, clic derecho y se selecciona *New*. Se abre una nueva ventana, ver Fig. C.18, en *Name* y en *File Name* nombrar como *report-momentos*, en *Available Report Definitions* seleccionar todo y clic en *Add*, finalmente clic en *OK*.

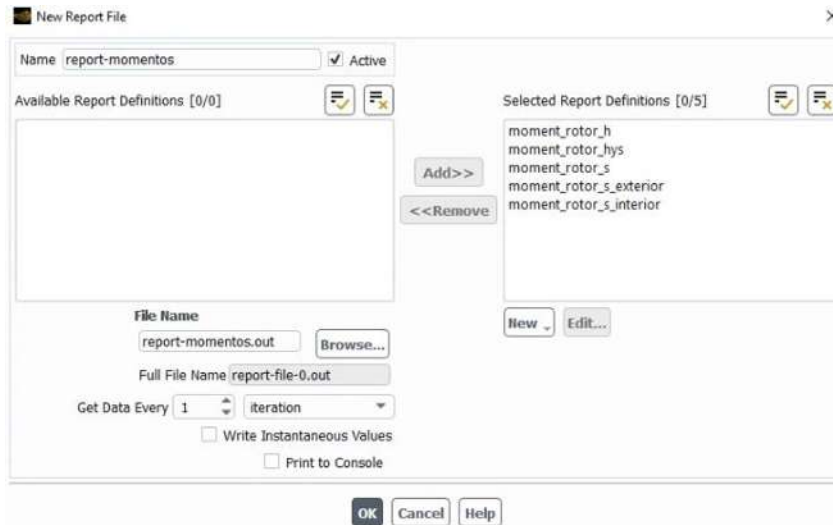


Fig. C.18. Ventana para la configuración de los archivos de reportes.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se despliega el menú de *Monitors*, seleccionar *Report Plot*, clic derecho y seleccionar *New*. Se abre una nueva ventana, ver Fig. C.19, en *Name* y en *File Name* nombrar como *grafica-rotor-hibrido*, en *Available Report Definitions* seleccionar *moment_rotor_h*, *moment_rotor_hys* y *moment_rotor_s*, clic en *Add* y clic en *Ok*.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se despliega el menú de *Monitors*, seleccionar *Report Plot*, clic derecho y seleccionar *New*. Se abre una nueva ventana, ver Fig. C.19 de referencia, en *Name* y en *File Name* nombrar como *grafica-rotor-savonius*, en *Available Report Definitions* seleccionar *moment_rotor_s_interior*, *moment_rotor_s_exterior* y *moment_rotor_s*, clic en *Add* y clic en *Ok*.

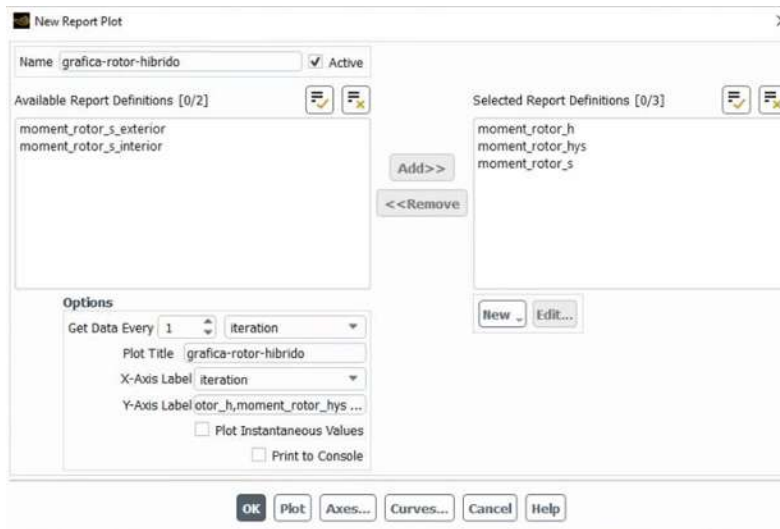


Fig. C.19. Ventana para la configuración de los archivos de gráficas.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se selecciona *Initialization*, en la sección *Task Page*, ver Fig. C.20, seleccionar *Standard Initialization*, en *Compute From* seleccionar *inlet*, en *Reference Frame* seleccionar *Absolute* y clic en *Initialize*.

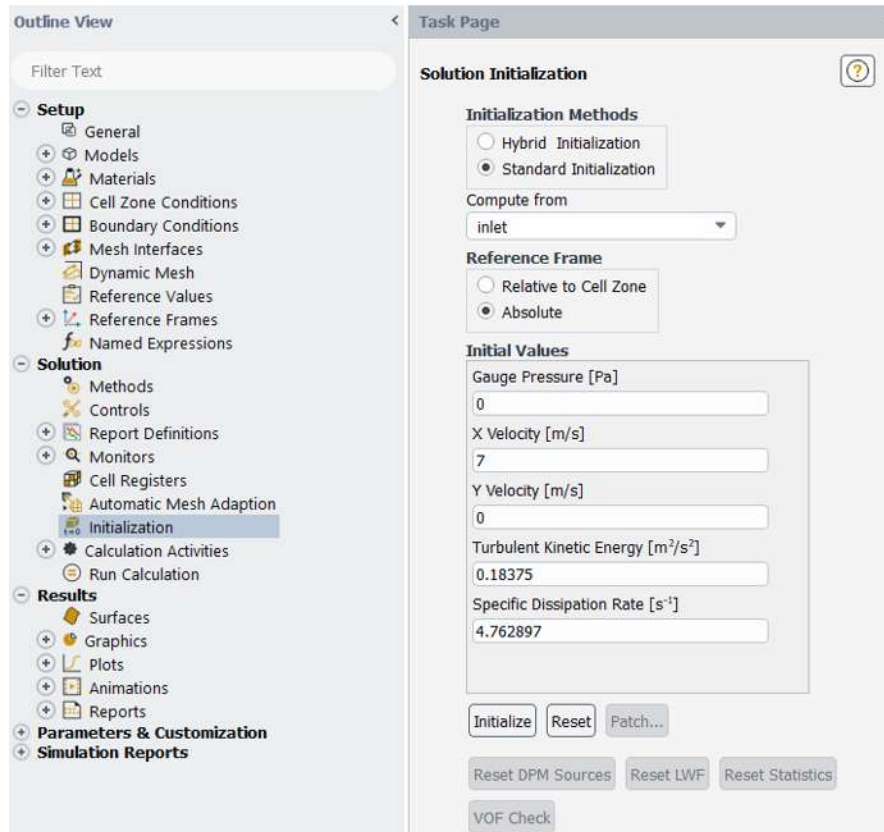


Fig. C.20. *Task Page* de *Outline View* → *Solution* → *Initialization*.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* seleccionar *Run Calculation*, en la sección *Task Page*, ver Fig. C.21, especificar el valor de 20000 en *Number of Iterations*. Guardar la configuración y el progreso del proyecto, en el menú superior seleccionar la pestaña *File* seleccionar *Save Project*. Cerrar el programa *Fluent*.

En ANSYS Workbench en el módulo de *Fluent* nombrado “Iniciación Frame Motion”, en la segunda fila *Setup* tendrá el icono de una palomita verde y la tercera fila *Solution* tendrá un rayo amarillo como se muestra en la Fig. C.22. Dar doble clic sobre *Solution*, ubicado en la tercera fila del módulo *Fluent*.

En el programa *Fluent* en la sección *Outline View* en el apartado *Solution* seleccionar *Run Calculation*, en la sección *Task Page*, ver Fig. C.21, dar clic en *Calculate*.

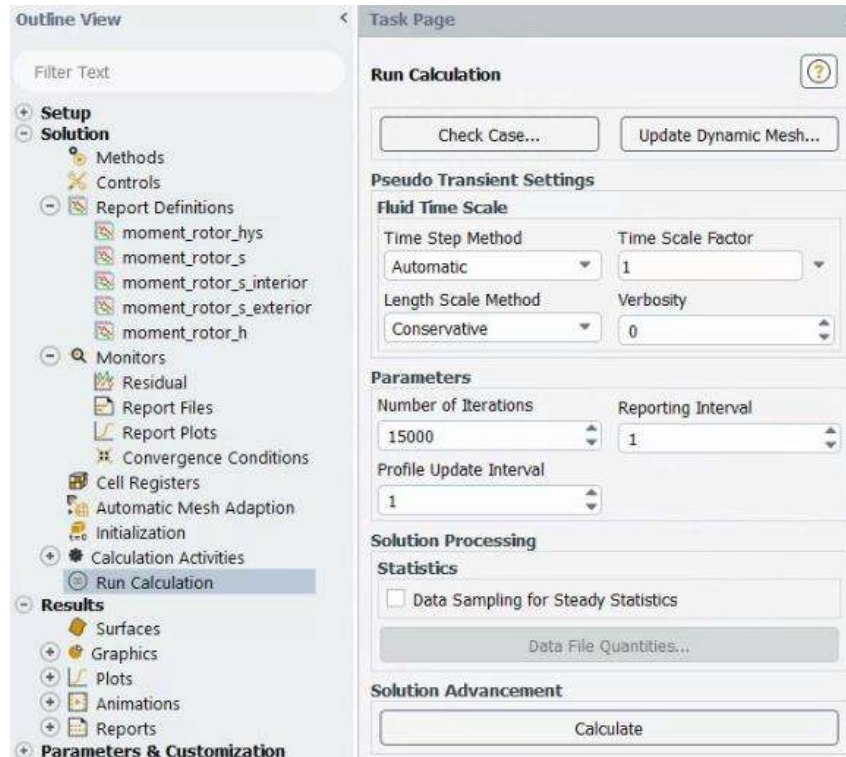


Fig. C.21. Task Page de Outline View → Solution → Run Calculation. Simulación no transitoria.

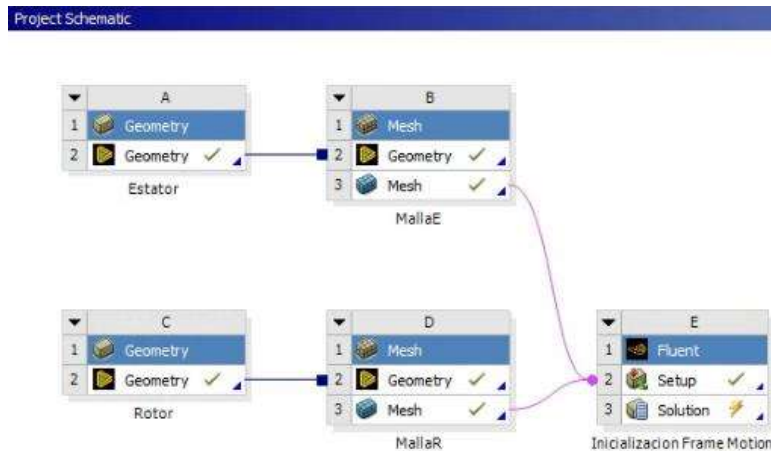


Fig. C.22. Vista de ANSYS Workbench al terminar el Setup del módulo Fluent “Inicialización Frame Motion”

Con lo anterior se iniciará el cálculo de la solución CFD mediante la técnica de Frame Motion, esperar a que los cálculos terminen y converja la solución mientras se monitorea la convergencia mediante las gráficas de residuales y las gráficas de momento configuradas en pasos anteriores. Al finalizar el cálculo, se abrirá una nueva ventana emergente avisando que los cálculos han concluido, dar *click* en *OK*. Guardar el progreso del proyecto, en el menú superior seleccionar la pestaña *File* seleccionar *Save Project*. Cerrar el programa Fluent.

En ANSYS Workbench en el módulo de Fluent nombrado “Inicialización Frame Motion”, seleccionar la esquina superior izquierda con el icono de un triángulo, en la primera columna encima de los números, ver la Fig. C.22. Se mostrará un nuevo menú, seleccionar *Duplicate*, se abrirá una nueva ventana emergente, seleccionar *No*. Renombrar el módulo duplicado de Fluent como “Sliding Mesh”.

Seleccionar y mantener presionado con *clic* izquierdo del *mouse* la tercera fila *Solution* del módulo de Fluent nombrado “Inicialización Frame Motion”, arrastrarlo hasta la tercera fila *Solution* del módulo *Fluent* nombrado “Sliding Mesh” y dejar de presionar el *clic* izquierdo del *mouse*, ver Fig. C.23.

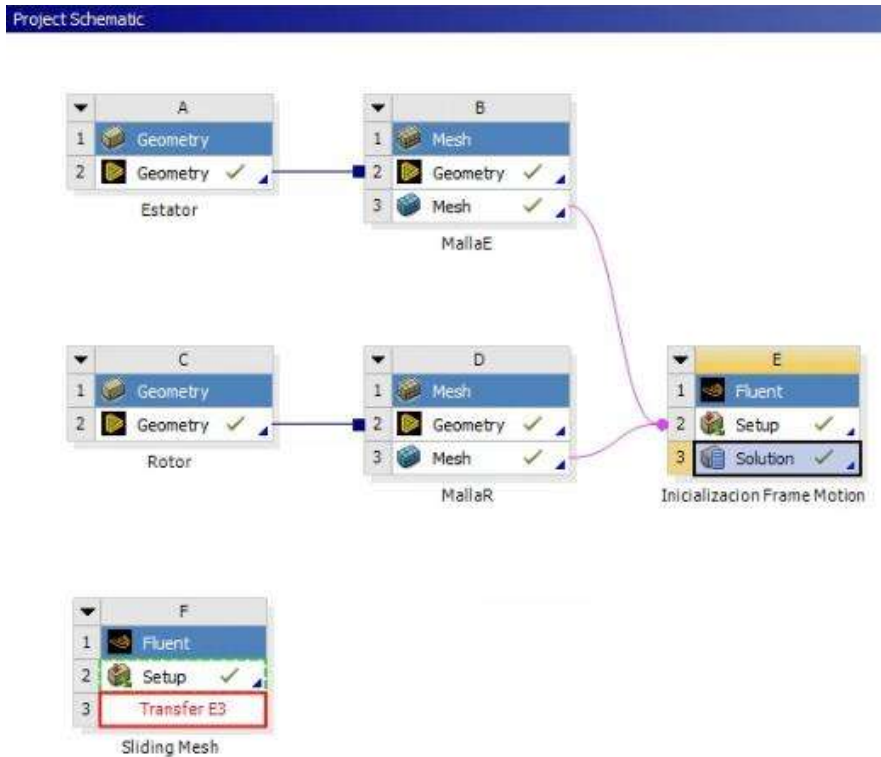


Fig. C.23. Proceso de transferencia de datos de solución como datos de inicialización en *Fluent*.

En el módulo de Fluent llamado *Sliding Mesh*, dar doble *clic* sobre *Solution*, ubicado en la tercera fila, ver Fig. C.24.

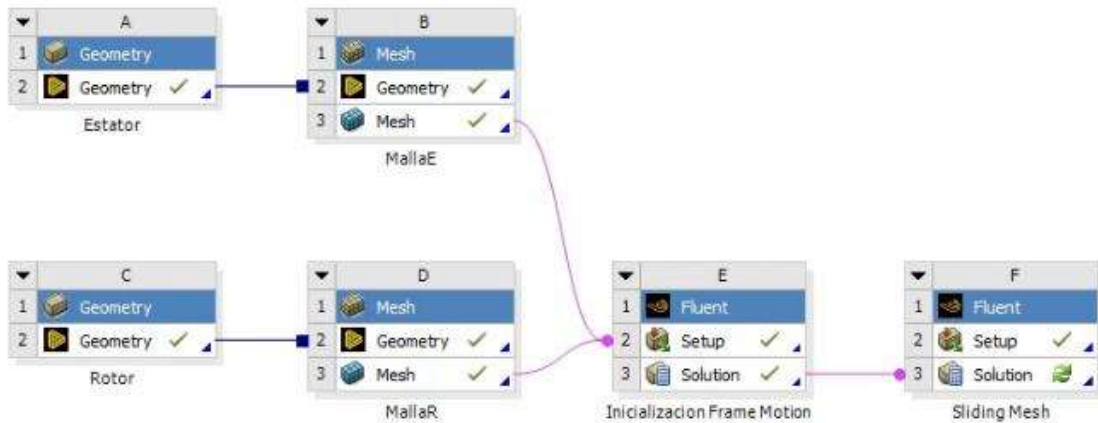


Fig. C.24. Vista de las relaciones entre los diferentes módulos para realizar la simulación de Sliding Mesh.

En *ANSYS Fluent* en la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se selecciona *General*, en la sección *Task Page*, ver Fig. C.3 como referencia, en *Time* seleccionar *Transient*.

En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se despliega el menú de *Models*, se selecciona *Viscous*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.25. En la nueva ventana se realiza la configuración del modelo de turbulencia para la simulación con la técnica de *Sliding Mesh*, en la sección *Model* seleccionar *Transition SST*, clic en *Ok*. Se comprime el menú de *Models* del apartado de *Setup* de la sección de *Outline View*.

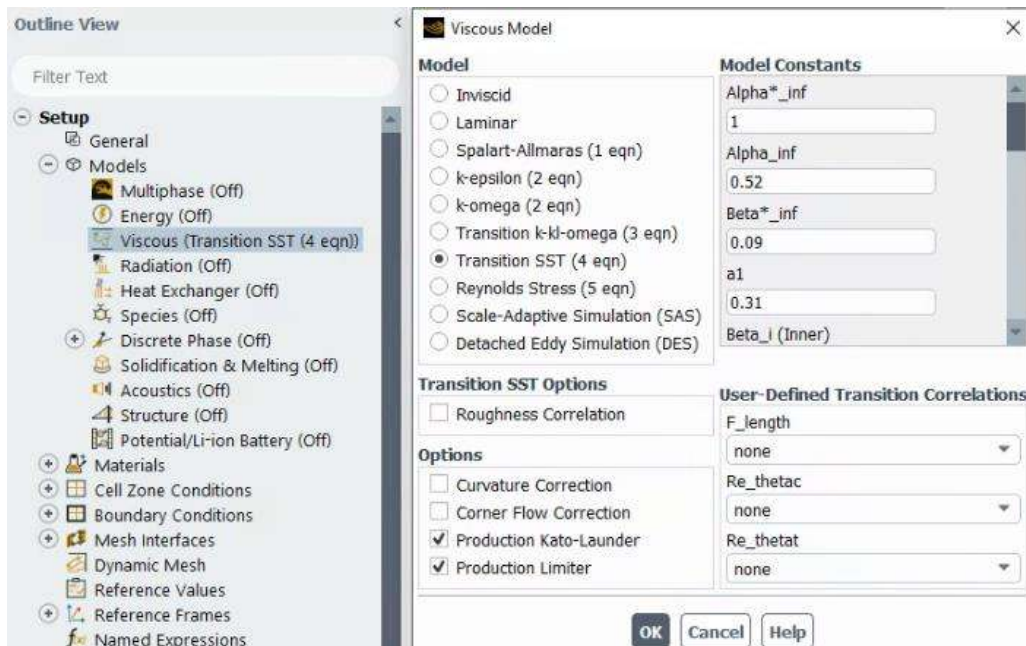


Fig. C.25. *Viscous Model* de *Outline View* → *Setup* → *Models* → *Viscous* → *Transition SST*.

Se realiza la configuración del movimiento de la malla, en el caso del estator es una malla estática y para la malla del rotor es una malla deslizante a una velocidad angular constante. En la sección *Outline View* en el apartado *Setup* se despliega el menú de *Cell Zone Conditions*, desplegar apartado *Fluid* seleccionar *insiderotor*, y presionar la tecla *enter*, se abre una nueva ventana. En la nueva ventana clic en *Copy To Mesh Motion*, ver Fig. C.8 como referencia. Verificar que se deselectione la opción *Frame Motion*, se habilite la opción *Mesh Motion* y se traslade a *Mesh Motion* los valores ingresados anteriormente en *Frame Motion*. Clic en *Apply* y posteriormente clic en *Close*.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se selecciona *Methods*, en la sección *Task Page*, en la sección *Spatial Discretization* y en *Transient Formulation* verificar y elegir todas las opciones *Second Order*, ver Fig. C.26.

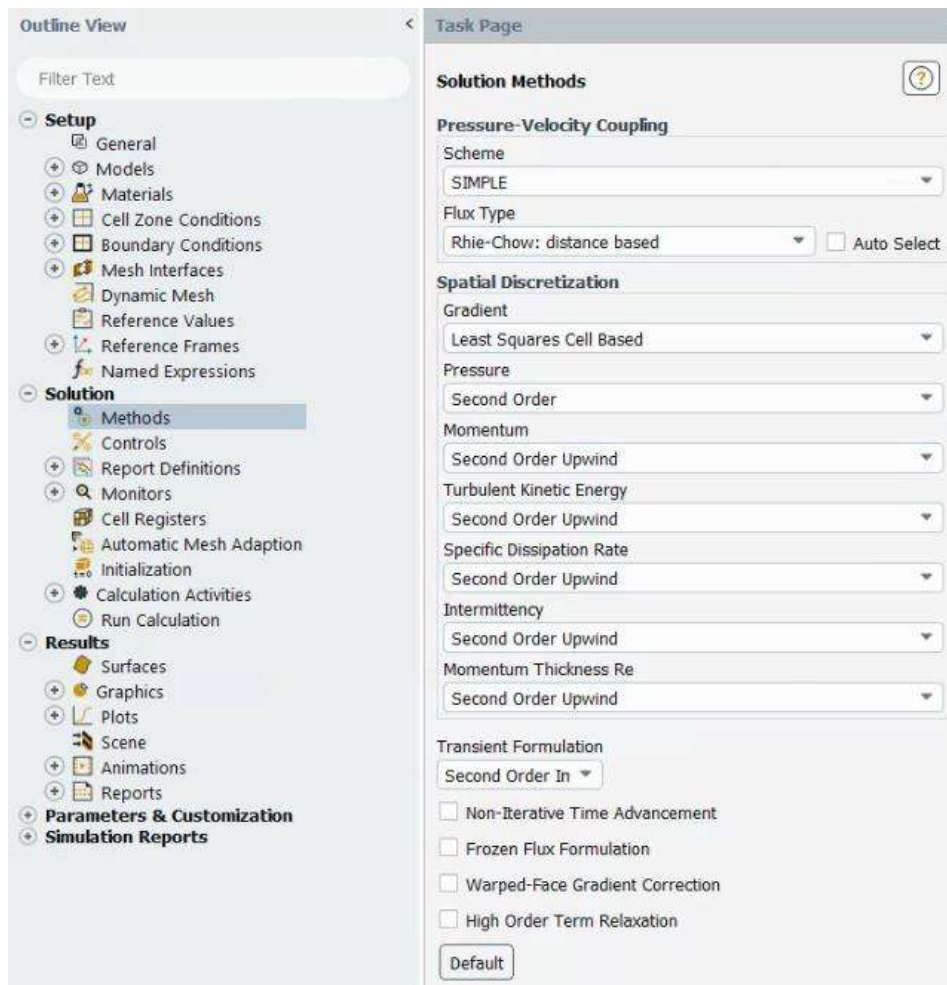


Fig. C.26. Task Page de Outline View → Solution → Methods, para Sliding Mesh.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se despliega el menú de *Monitors*, seleccionar *Residual*, y presionar la tecla *enter*, se abre una nueva ventana, ver Fig. C.17 como referencia. En la nueva ventana en la columna *Absolute Criteria* rellenar todas las filas con el valor de 0.00001 o con $1e-05$, clic en *OK*.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se despliega el menú de *Monitors*, se despliega la opción *Report Files*, se selecciona *report-momentos* y se presiona la tecla *enter*. Se abre una nueva ventana, ver Fig. C.18 como referencia. En *Available Report Definitions* seleccionar *delta-time*, clic en *Add* y finalmente clic en *OK*.

Se configura el autoguardado. En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* se despliega el menú de *Calculation Activities*, se selecciona *Autosave (Every Time Steps)*. Se abre una nueva ventana, ver Fig. C.27. En *Save Data File Every* especificar 360, para hacer un autoguardado cada media revolución de la turbina, seleccionar *Each Time*, habilitar *Retain Only the Most Recent Files*, especificar 5 en *Maximum Number of Data Files* y finalmente clic en *OK*.

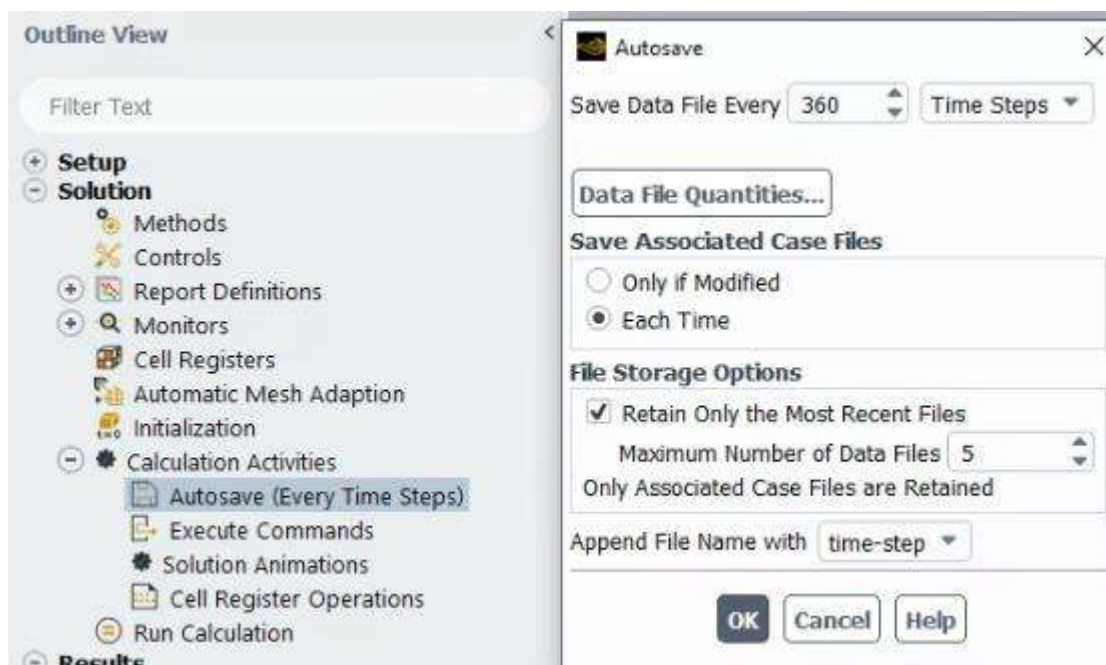


Fig. C.27. *Outline View* → *Solution* → *Calculation Activities* → *Autosave (Every Time Steps)*.

En la sección *Outline View* en el apartado *Solution* seleccionar *Run Calculation*, en la sección *Task Page*, ver Fig. C.28, en *Number of Time Steps* especificar el valor según la Tabla 4.4 y Tabla 4.5, en *Time Step Size* especificar el valor correspondiente con base en la Tabla 4.5, en *Max Iterations/Time Step* especificar 40. Guardar la configuración y el progreso del proyecto, en el menú superior seleccionar la pestaña *File* seleccionar *Save Project*, esperar a que se guarde y dar clic en *Calculate*.

Con lo anterior se iniciará el cálculo de la solución CFD con la técnica de Sliding Mesh, esperar a que los cálculos terminen y converja la solución mientras se monitorea la convergencia mediante las gráficas de residuales y las gráficas de momento configuradas en pasos anteriores. Al finalizar el cálculo, se abrirá una nueva ventana emergente avisando que los cálculos han concluido, dar clic en *OK*.

Guardar el progreso del proyecto, en el menú superior seleccionar la pestaña *File* seleccionar *Save Project*.

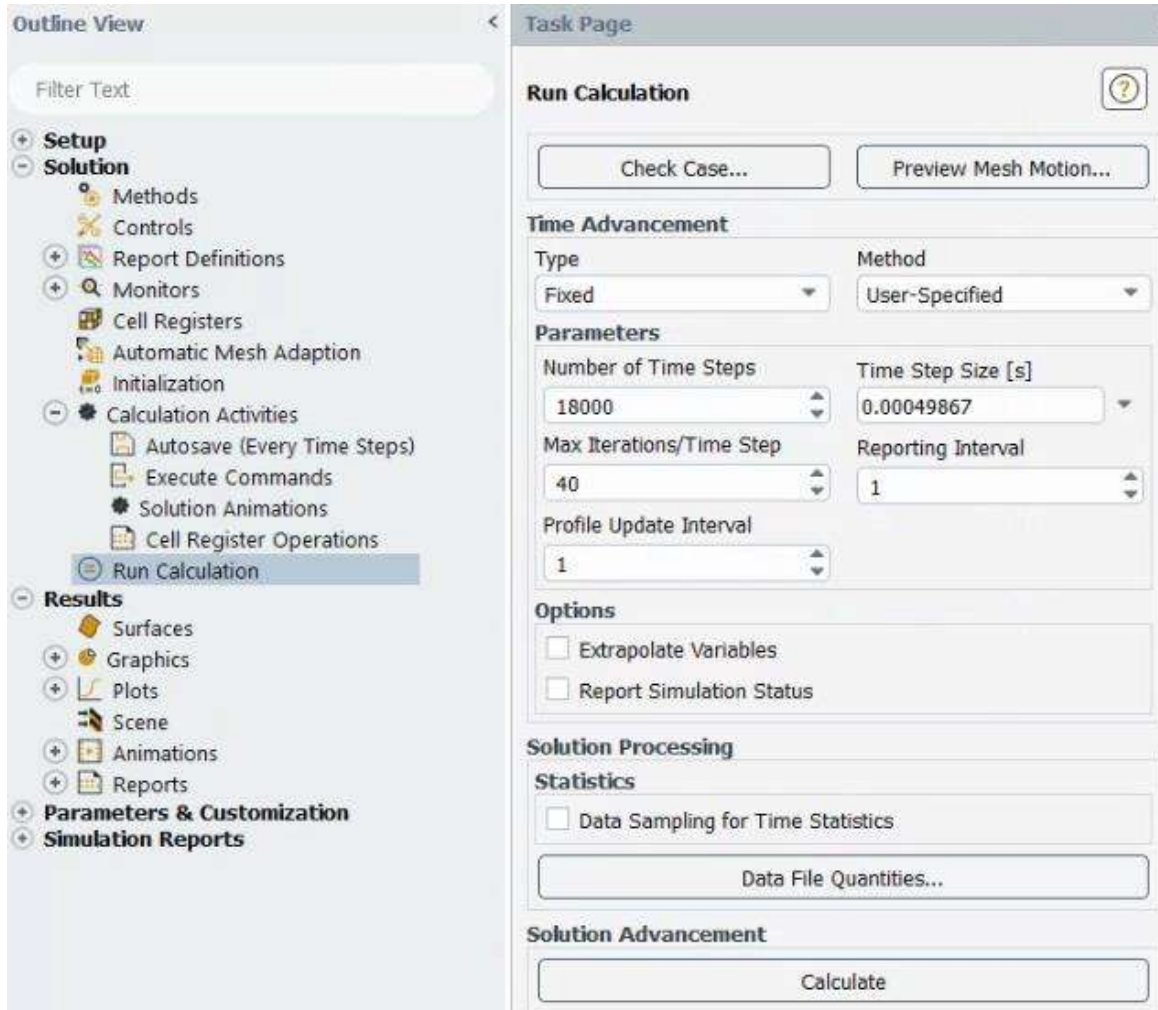


Fig. C.28. Task Page de Outline View → Solution → Run Calculation. Simulación transitoria.