Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Mecánica
Valparaíso, Chile

"WIND-PANEL: DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN PANEL AEROGENERADOR MODULAR EQUIPADO CON TURBINAS EÓLICAS DE GEOMETRÍA HÍBRIDA DARRIEUS-SAVONIUS PARA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD"

Vanessa Angélica Morales Carlos

Memoria de Titulación para optar al Título de Ingeniera Civil Mecánica Mención Energía

Profesor Guía: Dr. Ing. Alex Flores Maradiaga
Profesor Correferente: Dr. Ing. Sheila Lascano Farak

Noviembre de 2021

Resumen Ejecutivo

Como una contribución al avance en la innovación tecnológica para el sector de energía eólica y proyectos de generación distribuida, se ha identificado la oportunidad de desarrollar un panel modular equipado con microaerogeneradores híbridos, capaces de aprovechar los vientos de baja y mediana densidad energética. Por ende, el presente trabajo tiene como objetivo general diseñar un sistema eólico modular, escalable e interconectable con microturbinas híbridas Darrieus-Savonius.

Para esto, se toma como punto de partida las investigaciones "Diseño y pruebas numéricas de un microaerogenerador híbrido multipropósito" de Ricardo Sanzana, y "Diseño, fabricación y pruebas de un microaerogenerador híbrido multipropósito", de Jonathan Maldonado, las que entregan un prototipo de microturbina ya probada, teórica y empíricamente, que se puede implementar en el panel.

Se diseñaron cuatro tipos de paneles en base al tipo de acople y cantidad de alternadores. Cada configuración contempló turbinas, un marco, alternadores y conectores para ejes con más de una turbina. Estos diseños y posteriores simulaciones de análisis de tensiones se realizaron en Autodesk Inventor, y de los resultados obtenidos se seleccionó la tensión de Von Mises, desplazamientos, y factor de seguridad para ser estudiados.

A partir de los primeros resultados, se concluyó que el material seleccionado para la turbina no cumplía con los requerimientos mínimos, por lo que se optó por un nuevo material que permitiera continuar con el análisis. Los nuevos resultados permitieron descartar algunas de las configuraciones de paneles previamente diseñadas, y modificar el modelo de la turbina para reforzar las zonas de alta concentración de esfuerzo. Luego, se realizó un nuevo análisis que confirmo que los cambios realizados fueron adecuados.

Con los cambios realizados se pudo seguir con las simulaciones de dinámica de fluidos en el programa CFD de Autodesk. En estas se pudo analizar el comportamiento del aire alrededor de la turbina y como afectaban a las turbinas adyacentes, permitiendo optimizar las distancias entre ellas, las cuales fueron consideradas para el diseño del panel.

Una vez analizadas las simulaciones, se escogieron los parámetros óptimos para cada configuración, y se simularon para evaluar sus desempeños, obteniendo resultados alentadores, por lo que se ponen a disposición para que se sigan estudiando en futuros trabajos.

Palabras claves: Energía eólica, Microturbina, Panel eólico, Turbina híbrida.

Abstract

As a contribution to technological development for the wind energy sector and power generation projects, the opportunity arises to develop a modular panel equipped with hybrid micro-wind generators, capable of taking advantage of low and medium energy density winds. Therefore, the present research aims to design a modular, scalable and interconnectable wind power system with hybrid Darrieus-Savonius microturbines.

Thanks to the work carried out by Ricardo Sanzana and Jonathan Maldonado in their research "Design and numerical tests of a multipurpose hybrid micro-wind generator" and "Design, manufacture and tests of a multipurpose hybrid micro-wind generator" respectively, a turbine model was obtained, suitable to be implemented in the panel.

Panels were designed based on the type of coupling and number of alternators. Each configuration included turbines, a frame, alternators, and connectors for multiple turbine shafts. The designs and subsequent stress analysis simulations were performed in Autodesk Inventor, and from the results obtained, the Von Mises stress, displacements, and factor of safety were selected to be studied.

From the first results, it was concluded that the material selected for the turbine did not meet the minimum requirements, so a new material was chosen that would allow the analysis to continue. The new results allowed discarding some of the previously designed panel configurations and modifying the turbine model to reinforce the areas of high stress concentration. Then a new analysis was carried out confirming that the changes made were accurate.

With the changes made, it was possible to continue with the fluid dynamics simulations in Autodesk's CFD program. In these it was possible to analyze the behavior of the air around the turbine and how they affected the adjacent turbines, allowing to optimize the distances between them, which were considered for the design of the panel.

Once the simulations were analyzed, the optimal parameters for each configuration were chosen, and they were simulated to evaluate their performance, obtaining encouraging results, which is why they are made available for further study in future research.

Keywords: Wind energy, Microturbine, Wind panel, Hybrid turbine.

Índice de Contenidos

Resumen Ejecutivo **I**

Abstract **II**

Índice de Figuras **VI**

Índice de Tablas **XIII**

1. Problema **1**

1.1. Problema Global 1
1.2. Problema en Chile 1
1.3. Energías Renovables No Convencionales 3
1.4. Problema aerogeneradores 3

2. Estado del arte **5**

2.1. Energía Eólica 5
2.1.1. Aerogeneradores 5
2.2. Microturbinas 7
2.3. Conjuntos de turbinas 8
2.3.1. EOGU 8
2.3.2. Matriz de micro turbinas eólicas 9
2.3.3. Sistemas de múltiples rotores 9
2.3.4. Turbina eólica multirotor Vestas 10
2.3.5. Patentes 10
2.4. Normas Técnicas 16

3. Marco teórico **17**

3.1. Aerodinámica 17
3.2. Interacción Fluido-Estructura 17
3.2.1. Dinámica de Fluido Computacional (CFD) 18
3.2.2. Análisis estructural 19
3.3. Estela 19

3.4. Materiales y Procesos de manufactura 21
3.4.1. Materiales 22
3.4.2. Procesos 23

4. Propuesta de innovación tecnológica 25

5. Objetivos 26

5.1. Objetivo General 26
5.2. Objetivos específicos 26

6. Metodología 27

6.1. Método de trabajo 27
6.2. Recursos 27

7. Prototipos 28

7.1. Configuración acople individual simple 29
7.2. Configuración acople por columnas simple 30
7.3. Configuración acople individual doble 30
7.4. Configuración acople por columnas doble 31

8. Análisis de tensión 32

8.1. Análisis turbina 33
8.1.1. Simulación estática 33
8.1.2. Simulación rotacional 35
8.2. Análisis panel 37
8.2.1. Configuración acople individual simple 37
8.2.2. Configuración acople por columnas simple 39
8.2.3. Configuración acople individual doble 40
8.2.4. Configuración acople por columnas doble 42
8.3. Comparación de los prototipos 44
8.4. Análisis turbina de fibra de carbono 44
8.4.1. Simulación estática 44
8.4.2. Simulación rotacional 45
8.5. Análisis panel con turbinas de fibra de carbono 46
8.5.1. Configuración acople individual simple 46

8.5.2. Configuración acople por columnas simple 48
8.5.3. Configuración acople individual doble 49
8.5.4. Configuración acople por columnas doble 51
8.6. Comparación de los prototipos 52
8.7. Análisis turbina modificada de fibra de carbono 53
8.7.1. Simulación estática 53
8.7.2. Simulación rotacional 54
8.8. Análisis panel con turbina modificada de fibra de carbono 55
8.8.1. Configuración acople individual doble 55
8.8.2. Configuración acople por columnas doble 57

9. Análisis de fluidos 60

9.1. Análisis turbina 61
9.2. Análisis distancia entre turbinas 67
9.3. Análisis columna de turbinas individuales 71
9.4. Análisis columna de turbinas en un mismo eje 74
9.5. Simulación de los paneles 77
9.5.1. Configuración de acople individual doble 77
9.5.2. Configuración de acople por columnas doble 80

10. Conclusiones 83

Referencias 85

Índice de Figuras

Figura 1.1. Crecimiento mundial de la energía eléctrica consumida **1**

Figura 1.2. Distribución de la capacidad instalada de la matriz energética en Chile **2**

Figura 1.3. Emisiones de CO2 en Chile por fuente de energía **3**

Figura 1.4. Aerogenerador de Veladero **4**

Figura 2.1. Zonas con capacidad instalable en Chile **6**

Figura 2.2. Diseño en 3D de la microturbina O-wind **8**

Figura 2.3. Miniaerogenerador de Nils Ferber **8**

Figura 2.4. Panel eólico EOGU **9**

Figura 2.5. Matriz de pequeñas turbinas **9**

Figura 2.6. Sistema DAWT multirotor de 10 kW **10**

Figura 2.7. Aerogenerador multirotor Vestas **10**

Figura 2.8. Diseño de la patente de Alexander Beldimano **10**

Figura 2.9. Diseño de la patente de Martin J O'Malley **11**

Figura 2.10. Diseño de la patente de Donald A. Kelly **11**

Figura 2.11. Diseño de la patente de William Heronemus **12**

Figura 2.12. Diseño de la patente de Mihai Grumazescu **12**

Figura 2.13. Diseño de la patente de Chia-Lung Yeh **13**

Figura 2.14. Diseño de la patente de Habib Bahari **13**

Figura 2.15. Diseño de la patente de Giles Henry Rodway **14**

Figura 2.16. Diseño de la patente de Ramón Dominguez Pérez **14**

Figura 2.17. Diseño de la patente de Dustin Clemo **15**

Figura 2.18. Diseño de la patente de Valod Menaskanian **15**

Figura 2.19. Diseño de la patente de Pasquale Lentini **15**

Figura 3.1. Perfiles alares estandarizados **17**

Figura 3.2. Fuerzas de arrastre y sustentación en un perfil alar **17**

Figura 3.3. Perfil de velocidad luego de pasar por la turbina **19**

Figura 3.4. Estela generada por una turbina afectando directamente a una segunda **20**

Figura 3.5. Interacción de estelas de cuatro turbinas **20**

Figura 3.6. Área solapada entre dos aerogeneradores **21**

Figura 3.7. Clasificación de los procesos de manufactura **22**

Figura 7.1. Diseño CAD de la turbina propuesta en la memoria de Jonathan Maldonado **28**

Figura 7.2. Configuración respecto al acople de las turbinas **29**

Figura 7.3. Configuración respecto a la cantidad de generadores acoplados **29**

Figura 7.4. Configuración acople individual simple **30**

Figura 7.5. Configuración acople por columnas simple **30**

Figura 7.6. Configuración acople individual doble **31**

Figura 7.7. Configuración acople por columnas doble **31**

Figura 8.1. Restricciones de movimientos para la simulación estática de la turbina **33**

Figura 8.2. Cargas aplicadas para la simulación estática de la turbina **33**

Figura 8.3. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación estática de la turbina **34**

Figura 8.4. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación estática de la turbina **34**

Figura 8.5. Restricciones de movimiento para la simulación rotacional de la turbina **35**

Figura 8.6. Cargas aplicadas para la simulación rotacional de la turbina **35**

Figura 8.8. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación rotacional de la turbina **36**

Figura 8.9. Visualización de la deformación que sufre la turbina respecto la original **37**

Figura 8.10. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual simple **37**

Figura 8.11. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople individual simple **38**

Figura 8.12. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual simple **38**

Figura 8.13. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas simple **39**

Figura 8.14. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople por columnas simple **39**

Figura 8.15. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas simple **40**

Figura 8.16. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual doble **40**

Figura 8.18. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople individual doble **41**

Figura 8.19. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual doble **42**

Figura 8.20. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas doble **42**

Figura 8.21. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople por columnas doble **43**

Figura 8.22. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble **43**

Figura 8.23. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación estática de la turbina de fibra de carbono **44**

Figura 8.24. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación estática de la turbina de fibra de carbono **45**

Figura 8.25. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación rotacional de la turbina de fibra de carbono **45**

Figura 8.26. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación rotacional de la turbina de fibra de carbono **46**

Figura 8.27. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual simple con turbinas de fibra de carbono **46**

Figura 8.28. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople individual simple con turbinas de fibra de carbono **47**

Figura 8.29. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual simple con turbinas de fibra de carbono **47**

Figura 8.30. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas simple con turbinas de fibra de carbono **48**

Figura 8.31. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas simple con turbinas de fibra de carbono **48**

Figura 8.32. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas simple con turbinas de fibra de carbono **49**

Figura 8.33. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas de fibra de carbono **49**

Figura 8.34. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas de fibra de carbono **50**

Figura 8.35. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas de fibra de carbono **50**

Figura 8.36. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas de fibra de carbono **51**

Figura 8.37. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas de fibra de carbono **51**

Figura 8.38. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas de fibra de carbono **52**

Figura 8.39. Comparación entre las turbinas **53**

Figura 8.40. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación estática de la turbina modificada **53**

Figura 8.41. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación estática de la turbina modificada **54**

Figura 8.42. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación rotacional de la turbina modificada **54**

Figura 8.43. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación rotacional de la turbina modificada **55**

Figura 8.44. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas modificadas **55**

Figura 8.45. Vista en corte donde se produce la máxima tensión en la configuración de acople individual doble con turbinas modificadas **56**

Figura 8.46. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople individual doble con turbinas modificadas **56**

Figura 8.47. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas modificadas **57**

Figura 8.48. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas **57**

Figura 8.49. Vista en corte donde se produce la máxima tensión en la configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas **58**

Figura 8.50. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas **58**

Figura 8.51. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas **59**

Figura 8.52. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas **59**

Figura 9.1. Diseño general a simular en CFD Autodesk **60**

Figura 9.2. Diferencia entre mallados **61**

Figura 9.3. Perfiles de velocidad variando la velocidad de entrada para la simulación de una turbina **62**

Figura 9.4. Perfiles de presión variando la velocidad de entrada para la simulación de una turbina **63**

Figura 9.5. Velocidad rotacional vs tiempo obtenida de la simulación de una turbina para cada velocidad de entrada **63**

Figura 9.6. Perfiles de velocidad variando la intensidad de turbulencia para la simulación de una turbina **65**

Figura 9.7. Perfiles de presión variando la intensidad de turbulencia para la simulación de una turbina **66**

Figura 9.8. Velocidad rotacional vs tiempo obtenida de la simulación de una turbina para cada intensidad de turbulencia. **66**

Figura 9.9. Disposición de las turbinas dentro del túnel para la simulación de distancia entre turbinas **67**

Figura 9.10. Perfiles de velocidad variando la distancia entre las turbinas **68**

Figura 9.11. Perfiles de presión variando la distancia entre las turbinas **69**

Figura 9.12. Velocidad rotacional vs tiempo para cada distancia entre turbinas **70**

Figura 9.13. Disposición de las turbinas dentro del túnel para la simulación de columnas de turbinas individuales **71**

Figura 9.14. Perfiles de velocidad variando la distancia vertical entre las turbinas **72**

Figura 9.15. Perfiles de presión variando la distancia vertical entre las turbinas **73**

Figura 9.16. Velocidad rotacional vs tiempo para cada distancia vertical entre turbinas **74**

Figura 9.17. Forma de conexión entre las turbinas para la simulación de columna de turbinas en un mismo eje **74**

Figura 9.18. Perfiles de velocidad variando el tamaño de la conexión entre turbinas **76**

Figura 9.19. Perfiles de presión variando el tamaño de la conexión entre turbinas **76**

Figura 9.20. Velocidad rotacional vs tiempo para cada tamaño de conexión entre turbinas **77**

Figura 9.21. Geometría de la configuración acople individual doble a simular **78**

Figura 9.22. Disposición del panel acople individual doble dentro del túnel **78**

Figura 9.23. Velocidad rotacional vs tiempo de cada turbina para la simulación de la configuración de acople individual doble **79**

Figura 9.24. Matriz con las RPM a las que llega cada turbina a los 10 [s] **80**

Figura 9.25. Geometría de la configuración acople por columnas doble a simular **80**

Figura 9.26. Disposición del panel acople por columnas doble dentro del túnel **81**

Figura 9.27. Velocidad rotacional vs tiempo de cada turbina para la simulación de la configuración de acople por columnas doble **82**

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Propiedades de los polímeros **23**

Tabla 3.2. Propiedades de los polímeros reforzados con fibra **23**

Tabla 7.1. Características de la turbina propuesta en la memoria de Jonathan Maldonado **28**

Tabla 8.1. Comparación de los valores de cada prototipo **44**

Tabla 8.2. Comparación de los valores de cada prototipo con turbinas de fibra de carbono en epóxico **52**

Tabla 9.1. Parámetros para resolver la simulación de una turbina variando la velocidad de entrada **62**

Tabla 9.2. Parámetros para resolver la simulación de una turbina variando la intensidad de turbulencia **64**

Tabla 9.3. Parámetros para resolver la simulación de distancia entre turbinas **68**

Tabla 9.4. Parámetros para resolver la simulación de columnas de turbinas individuales **72**

Tabla 9.5. Parámetros para resolver la simulación de columna de turbinas en un eje **75**

Tabla 9.6. Parámetros para resolver la simulación de la configuración de acople individual doble **79**

Tabla 9.7. Parámetros para resolver la simulación de la configuración de acople por columnas doble **82**

1. Problema

1.1. Problema Global

En la actualidad, la energía, principalmente la eléctrica, tiene un desempeño que es vital para el desarrollo de los países, ya que tiene una estrecha relación con el crecimiento de las economías, lo cual se ve reflejado en la Figura 1.1, donde el aumento de la energía consumida a lo largo de los años se ha ido incrementado, al igual que lo ha hecho el producto interno bruto (PIB).

A lo largo de la historia, se han encontrado diferentes formas de producir energía, siendo la más utilizada por décadas, la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural, etc.), debido a su alto contenido energético. Sin embargo, estos combustibles no son inagotables y, además, con el paso del tiempo nos hemos dado cuenta de lo perjudicial que es esta forma de obtener energía, ya que libera una gran cantidad de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, vapor de agua, etc.), que son la principal causa del calentamiento global.

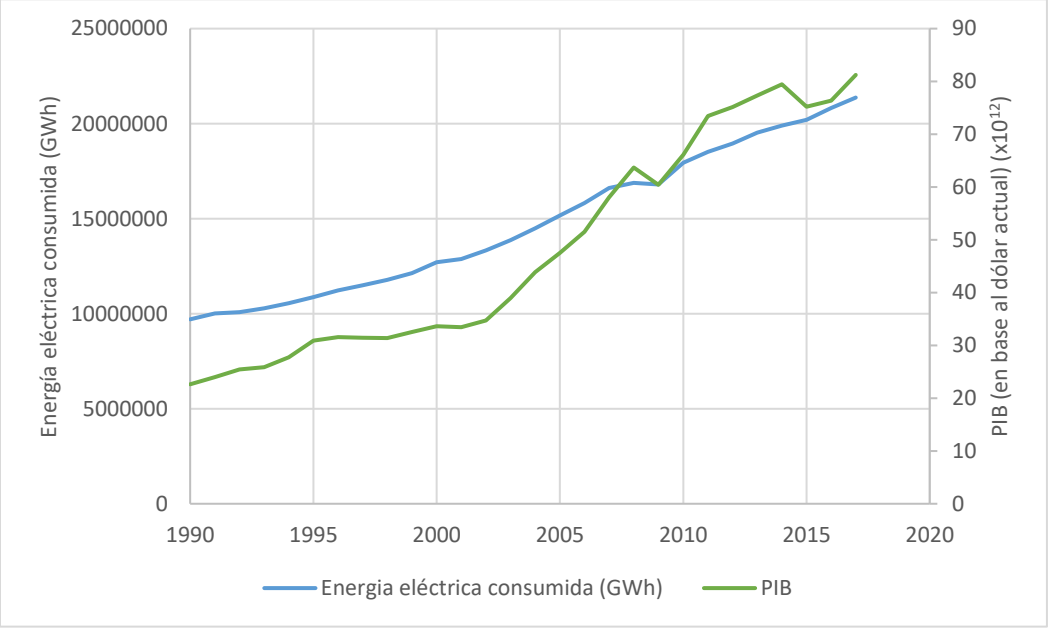

Figura 1.1. Crecimiento mundial de la energía eléctrica consumida, en GWh [1], y el PIB [2]

Una de las problemáticas mundiales que ya se ha empezado a evidenciar, es el cambio climático, el cual es causado por el calentamiento global, por ello se deben adoptar medidas de forma de mitigar los efectos. A raíz de esto, el año anterior entró en vigencia el Acuerdo de París, firmado por 200 países en la Cumbre Mundial del Clima en 2015, donde por primera vez los países acordaron establecer medidas para frenar el calentamiento global, dentro de las cuales las energías renovables no convencionales jugarán un papel fundamental [3].

1.2. Problema en Chile

Al igual que en todo el mundo, la demanda energética en Chile también se ha incrementado, llegando actualmente a 26.811 [MW] de capacidad instalada. Pero como país nos hemos visto expuestos constantemente a problemas en este ámbito. En el pasado, nuestra matriz energética dependió por varios años de la hidroelectricidad, una energía sin emisiones de gases de efecto invernadero, pero con consecuencias medioambientales muy perjudiciales. Hasta que, en la década de 1980, el país se

vio afectado por una gran sequía, lo que motivó a buscar un nuevo recurso para abastecer al sistema eléctrico nacional. Es aquí donde se decide empezar a consumir gas natural, proveniente de Bolivia y Argentina, aprovechando los bajos costos de este combustible. Sin embargo, entre los años 2002 y 2009 se provocó un desabastecimiento, por lo que el país decidió concentrar la generación de electricidad en el carbón, recurso que ha entregado seguridad a la matriz energética, pero que emite una gran cantidad de gases que contribuyen al calentamiento global.

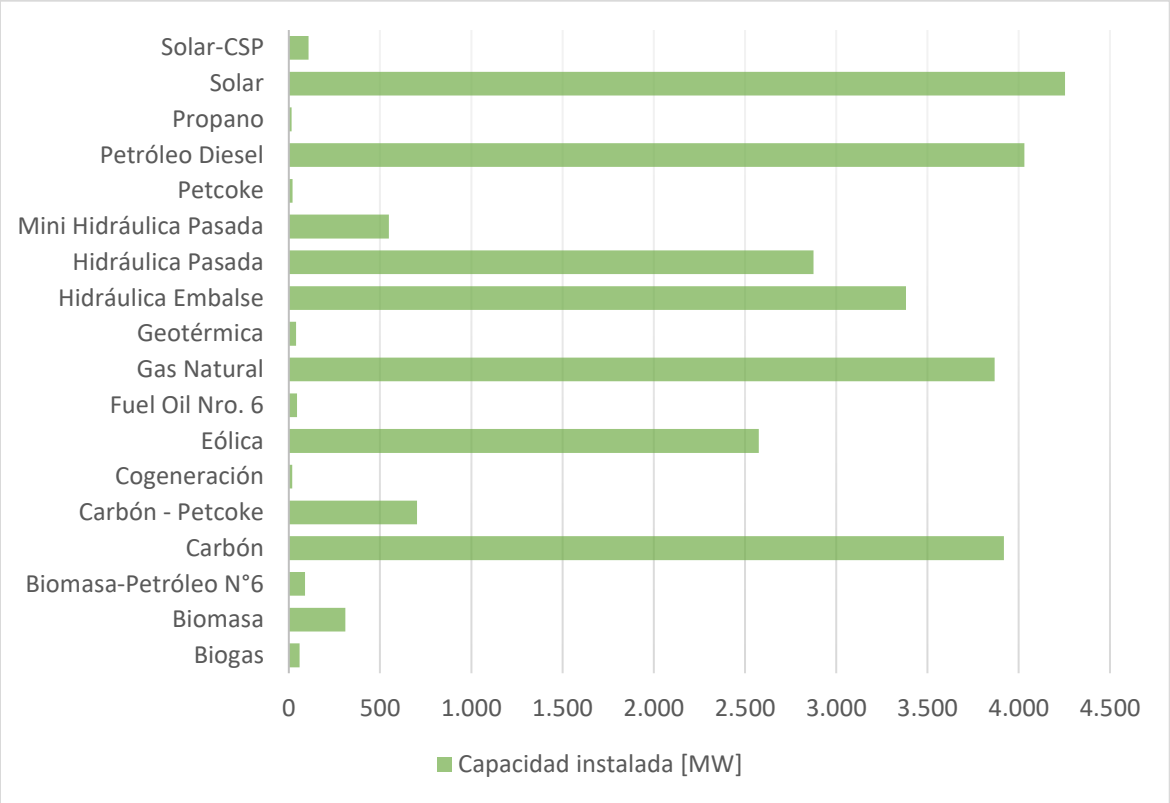

Figura 1.2. Distribución de la capacidad instalada de la matriz energética en Chile [4]

En esta línea, y considerando que Chile se encuentra entre los países que firmaron el Acuerdo de París, el país debe avanzar a la descarbonización [5], aprovechando la gran cantidad de recursos renovables que se encuentran presente en el territorio nacional, con el fin de reducir las emisiones contaminantes para frenar el cambio climático, y progresar en el ámbito económico. En la Figura 1.3. se pueden observar los niveles de emisiones de CO2 por fuentes en Chile, que está directamente relacionada con la distribución de la matriz energética que se muestra en la Figura 1.2, donde gracias a los altos consumos de carbón, gas natural y petróleo diésel, en el 2017 se llegó a una emisión de más de 85 millones de toneladas de CO2. No obstante, un aspecto positivo a destacar es el aporte de las energías renovables a la matriz energética, las que ya representan más del 50% de la capacidad instalada en el país, siendo la principal fuente la energía solar.

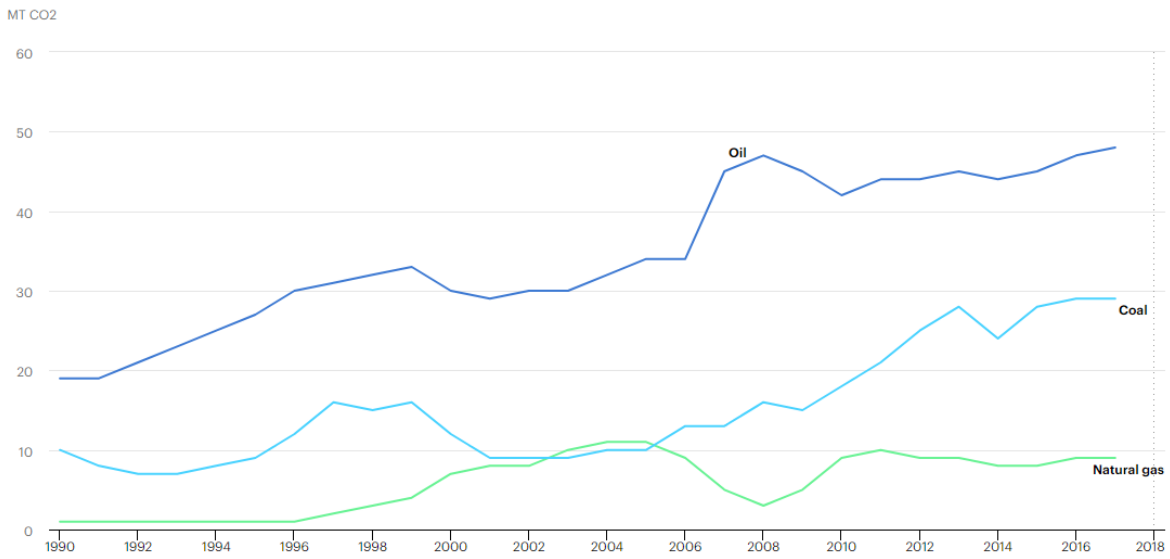

Figura 1.3. Emisiones de CO2 en Chile por fuente de energía, en MT (millones de toneladas), entre los años 1990 y 2017 [6]

1.3. Energías Renovables No Convencionales

Las energías renovables no convencionales o ERNC, son fuentes de energía inagotables que han existido por mucho tiempo, sin embargo, su aprovechamiento se ha visto frenado por la preferencia hacia los combustibles fósiles. Hoy, las ERNC surgen como la principal solución al cambio climático, y, además, gracias al desarrollo de nuevas tecnologías, aparecen con precios atractivos que las hacen más competitivas frente a los combustibles fósiles, los cuales continúan con alzas en los precios. Asimismo, en el caso de Chile, permitirían una independencia energética, que evitaría problemas como los que se tuvieron en el pasado con Argentina y Bolivia, utilizando de buena forma los grandes recursos que existen en el país.

Existen diversos tipos de ERNC, sin embargo, dado el contexto de este trabajo se hará énfasis en la energía eólica, la cual aprovecha la fuerza del viento a través de aerogeneradores para producir energía.

1.4. Problema aerogeneradores

Al igual que todas las energías, la energía eólica también presenta problemas, los cuales están relacionados con los aerogeneradores, ya que son los encargados de producir la energía. El desarrollo de esta energía ha ido dirigido hacia el aprovechamiento de vientos de altas velocidades, los cuales en su mayoría se encuentran a grandes alturas, por lo que los diseños de turbinas se han debido adaptar, construyendo cada vez molinos más altos, como se puede ver en la Figura 1.4. Sin embargo, esto trae consigo elevados costos de producción y montaje, además de impactos perjudiciales en el medio ambiente [7].

La instalación de un parque eólico, dada las grandes dimensiones de los molinos, requiere de grandes espacios para emplazarla. Esto sumado a que se debe contar con un potencial eólico, además de encontrarse alejado de sectores habitados por el ruido que generan, hace complicado encontrar lugares donde poder realizar una instalación, por lo que en algunos casos también se puede llevar a realizar deforestaciones. Por otro lado, la altura de los aerogeneradores también genera grandes problemas en la fauna, alterando las migraciones de las aves, las que pueden llegar a impactar con las aspas de los molinos, produciendo la muerte de cientos de aves, además de generar posibles averías en las palas.

Figura 1.4. Aerogenerador de Veladero, en la provincia de San Juan de Argentina.

Al mismo tiempo, también los aerogeneradores tienen el problema de intermitencia, ya que, a pesar de tener instalaciones de gran altura, esto no asegura una constante producción de energía, dependiendo del horario, e incluso de la temporada en que se encuentre. De esta manera, una opción para suplir los problemas de los aerogeneradores actuales es el aprovechamiento de vientos de baja velocidad a nivel de suelo, de manera de no incurrir en grandes costos, y poder suplir las necesidades básicas, a través de pequeñas instalaciones. Esto, además, traería como ventaja un bajo impacto sobre el paisaje, a diferencia de los grandes molinos.

2. Estado del arte

2.1. Energía Eólica

Se considera a esta energía una fuente indirecta de la energía solar, ya que la radiación del Sol modifica la temperatura de las partículas de la atmósfera, produciendo corrientes de viento, que serán aprovechadas por aerogeneradores para producir tanto energía eléctrica como energía mecánica [8].

Para aprovechar a gran escala está energía, se realiza la construcción de parques o centrales eólicas, que consisten en utilizar un lugar con potencial eólico, para luego instalar una gran cantidad de aerogeneradores que aprovechen el recurso de la zona. Es importante destacar que el lugar puede ser tanto terrestre como mar adentro.

El bajo desarrollo de esta energía es debido a que no se prestó principal atención, prefiriendo otras fuentes, y retrasando los avances tecnológicos. Hoy, cuando estamos necesitando el desarrollo de las ERNC, se han empezado a ver mejores resultados, ya que la potencia de los aerogeneradores ha aumentado considerablemente, lo que hace más viable los proyectos de este ámbito.

Chile no está ajeno a esta energía, y si bien no representa un gran porcentaje de la matriz energética, si ha habido avances en esta materia. La energía eólica se ha encontrado presente en el país desde los inicios del siglo XX, donde por el auge minero de las salitreras, se convirtió en pionero en la utilización de molinos para bombear aguas de napas. Actualmente, la energía eólica se utiliza mayormente para la producción de electricidad, y en este sentido Chile ha tenido un corto recorrido en esta materia, ya que fue en el año 2001 cuando se instaló el primer parque eólico, de tres rotores, específicamente en la Región de Aysén. Pero fue recién en el 2007 cuando se instaló la primera central eólica conectada al Sistema Interconectado Central (SIC), el que se ubica en Canela, Región de Coquimbo, el cual contó con 11 aerogeneradores [9].

Desde ese momento, se ha seguido avanzando, instalando cada vez más centrales eólicas, principalmente en la Región de Coquimbo, ya que es una de las regiones que además de presentar un buen potencial eólico, posee grandes terrenos no habitados. Otras regiones que destacan por su gran potencial eólico son la Región de Antofagasta, la Región del Biobío, la Región de la Araucanía, y la Isla grande de Chiloé [10], como se muestra en la Figura 2.1. Esto considerando solamente instalaciones terrestres, ya que Chile también presenta buenos recursos a nivel marítimo, sin embargo, aún falta por desarrollar esta tecnología para aminorar los costos que conllevan estas instalaciones, al igual como se ha hecho con los aerogeneradores terrestres.

2.1.1. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son turbinas que se encargan de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica o mecánica, lo que se logra cuando el viento incide sobre las aspas y las hace girar. Su potencia va a depender principalmente de la velocidad del viento, y en menor medida de otras variables, como la turbulencia, ya que para tener una buena operación del aerogenerador se busca que la turbulencia del viento sea mínima. Por lo tanto, habitualmente se tienden a instalar estas turbinas a gran altura, llegando a ser, gracias a la tecnología, de hasta 100 metros, para cumplir las condiciones mínimas de operación, vientos de altas velocidades y baja turbulencia.

Existen diversos tipos de aerogeneradores, los cuales se pueden clasificar de acuerdo con su principio de funcionamiento (arrastre o sustentación), cantidad de álabes, propósito, etc. Sin embargo, la forma

más usual de clasificarlos es respecto a la disposición de su eje, el que puede ser horizontal o vertical [11].

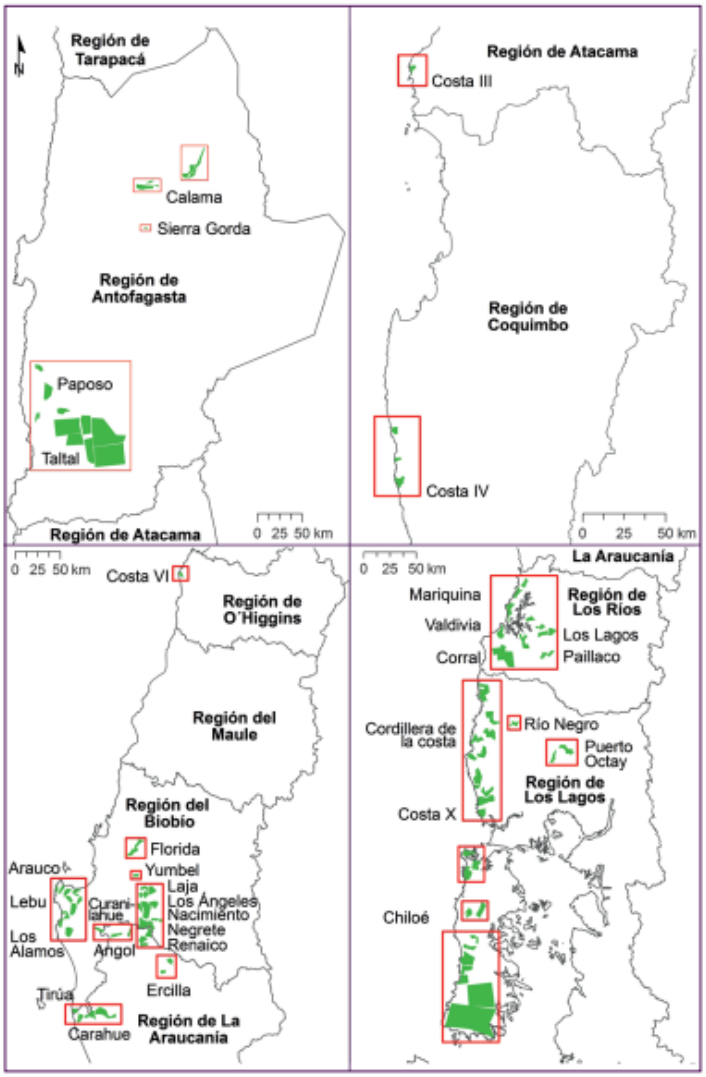

Figura 2.1. Zonas con capacidad instalable en Chile, de al menos 50 MW y factor de planta mínimo de 0,3 [10]

- **Aerogeneradores de eje horizontal**
  También conocidos como HAWTs (horizontal axis wind turbines), tal como dice su nombre, se caracterizan por tener su eje de rotación paralelo al suelo y a la dirección del viento. Son los más utilizados comercialmente, ya que poseen una mejor eficiencia. Dada la disposición del rotor, deben poseer un sistema de seguimiento, de manera de enfrentarse directamente al viento. Los HAWTs también pueden clasificarse según el número de álabes, que parten desde un álabe, pero generalmente no se usa debido a que presentan desbalances aerodinámicos, al igual que el de dos álabes. Así que normalmente se utilizan turbinas de 3 álabes, ya que más álabes implica un mayor costo y mayores pérdidas. Estas turbinas necesitan altas velocidades de arranque, por lo que suelen estar a grandes alturas (similares a un edificio de 20 pisos) para captar vientos de altas velocidades [12].

- **Aerogeneradores de eje vertical**
  El eje se encuentra perpendicular al suelo y a la dirección del viento, es decir vertical, y también son llamados VAWTs (vertical axis wind turbines). La principal ventaja de este tipo de turbina es que puede girar independiente del sentido del viento, por lo que no necesita un sistema de seguimiento. Además, dado a su disposición, el generador y la caja amplificadora se pueden situar al nivel del suelo, lo que disminuye costos, y facilita la mantención. Por otro lado, estos aerogeneradores al estar más cercanos al suelo reciben vientos de menor intensidad y más turbulentos, lo que dificulta su arranque y genera vibraciones. Existen varios tipos de VAWTs, siendo la turbina Savonius y la turbina Darrieus las más conocidas, donde la principal diferencia entre ellas, a parte del diseño, es su principio de funcionamiento, ya que la turbina Savonius trabaja con el arrastre y la turbina Darrieus con sustentación. Además, estos rotores, al igual que los de eje horizontal, pueden variar la cantidad de álabes según lo que se requiera [12].

Los aerogeneradores vistos suelen ser de grandes dimensiones y potencias, que generalmente se utilizan a gran escala, en parques o complejos eólicos, y utilizan vientos de altas velocidades. Sin embargo, cuando se habla de energía eólica a baja escala, se tiende a pensar en turbinas pequeñas, pero no es tan así, ya que esto se refiere a sistemas eólicos que puedan abastecer necesidades puntuales, como la demanda de un hogar. Es decir, como la demanda es menor, se instala una unidad de aerogenerador, que suele ser de menor dimensión que las turbinas de los parques (con potencias por debajo de 1,5 [MW]), pero no alcanza a ser lo suficientemente pequeña para ser llamada microturbina [13].

El auge de la energía eólica, en el último tiempo, ha venido de la mano con el desarrollo de grandes turbinas, que puedan generar cada vez más potencias aprovechando vientos de grandes velocidades. No obstante, existe otro potencial eólico, estos son los vientos de bajas intensidades que se pueden percibir a nivel de suelo. Este recurso se puede explotar con sistemas modulares eólicos, los que pueden estar formados por microturbinas, de manera de abastecer hogares o establecimientos pequeños.

2.2. Microturbinas

Se entenderá por microturbina a las turbinas tan pequeñas que puedan ser sostenidas por las manos, y capaz de aprovechar vientos de bajas velocidades. Lamentablemente, la tecnología de las microturbinas no se encuentra aún desarrollada, por lo que la mayoría de los avances en este ámbito solo se remiten a estudios, modelos, patentes, etc.

De esta forma se encontró O-wind turbine, diseñada por Nicolas Orellana y Yaseen Noorani [14], ambos estudiantes de la Universidad de Lancaster. Este pequeño dispositivo es una turbina omnidireccional de un solo eje capaz de aprovechar los vientos horizontales y verticales para producir energía eólica [15]. El prototipo usa el principio de Bernoulli para su movimiento mecánico y presenta una forma geométrica simple: una esfera de 25 cm de diámetro con bocas colocadas sobre un eje fijo.

Los estudiantes esperan que la turbina se instale en edificios donde puedan aprovechar al máximo las condiciones climáticas. Se espera que esta microturbina tarde por lo menos otros cinco años antes de que esté disponible comercialmente.

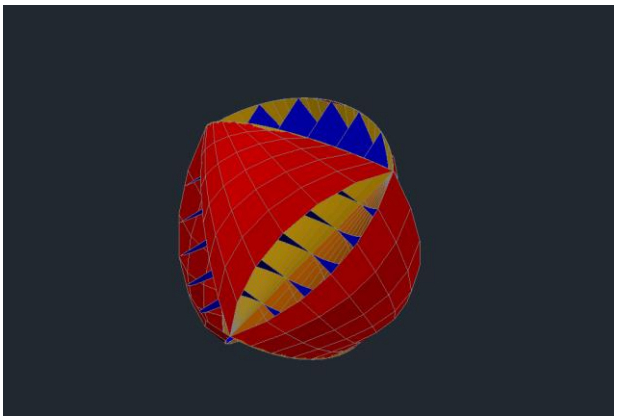

Figura 2.2. Diseño en 3D de la microturbina O-wind [14]

Por otro lado, también se encontró un mini aerogenerador muy ligero, diseñado por el alemán Nils Ferber [16]. Esta turbina es capaz de aprovechar vientos desde los 5 [m/s] de cualquier dirección, y está diseñada para obtener energía a baja escala en lugares alejados, como las salidas a camping, por lo que su diseño es compacto, similar a un paraguas, se pliega para hacer más fácil su traslado. La turbina es capaz de generar 5 [W], los que pueden ser utilizados directamente a través de un puerto USB, o se pueden almacenar en una batería.

Figura 2.3. Miniaerogenerador de Nils Ferber. A la izquierda se muestra la turbina montada cerca de las montañas. Y a la derecha se encuentran todos los componentes de la turbina antes de armar [16]

2.3. Conjuntos de turbinas

Como se dijo en el apartado 2.4, el desarrollo de las microturbinas es prematuro, por lo tanto el conjunto de turbinas lo es aún más, sin embargo, de igual manera se encontraron algunos diseños y desarrollos, y en mayor medida patentes.

2.3.1. EOGU

Es un panel eólico diseñado por estudiantes de la Universidad Politécnica de Valencia [17]. Consta de un centenar de toberas con microturbinas de eje vertical en la garganta, que aprovechan el efecto Venturi para acelerar la velocidad del viento. Todas las turbinas de una misma columna se encuentran conectadas al mismo eje que utiliza un alternador para transformar la energía rotacional. El panel, de

1 [m^2], está diseñado para aprovechar vientos de baja velocidad en zonas urbanas, como las terrazas de los edificios, así como zonas rurales sin electricidad, o en los lados de las carreteras

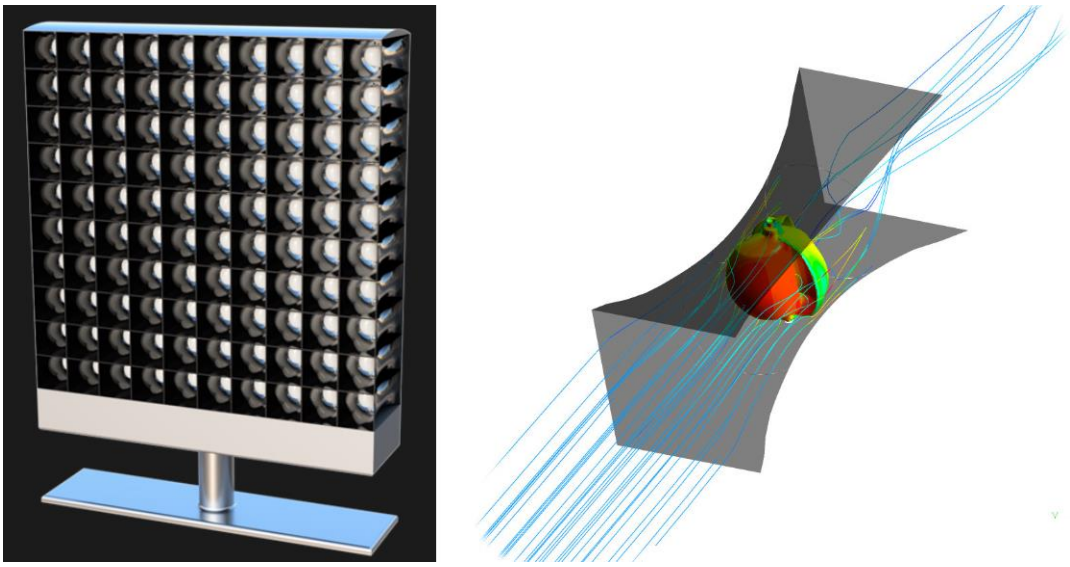

Figura 2.4. Panel eólico EOGU. En la izquierda se muestra el panel completo con las 100 microturbinas. En la derecha se muestra una de las toberas con su respectiva microturbina en la garganta, y como fluye el viento por ella [17]

2.3.2. Matriz de micro turbinas eólicas

Una invención desarrollada por Lucien Gambarota, lanzada por MotorWave Limited en conjunto con la Universidad de Hong Kong, que consiste en pequeños módulos de turbinas eólicas de 26 [cm] de diámetro, fabricados de polímeros moldeados por inyección, capaces de producir energía con vientos de sólo 2 [m/s], lo que permitiría generar entre 80 y 90% del tiempo. Se considera que al unir muchas de estas turbinas se pueda generar más electricidad, instalando las matrices en techos, balcones, etc [18].

Figura 2.5. Matriz de pequeñas turbinas [19]

2.3.3. Sistemas de múltiples rotores

Es un sistema desarrollado por la Universidad de Kyushu, Japón, compuesto por DAWT (turbinas eólicas aumentadas con difusor), que son básicamente HAWT con difusor, similar a un embudo para aumentar la captación de viento, que permite el aumento de la potencia. Poseen una capacidad instalada de 10 [kW] [20].

Figura 2.6. Sistema DAWT multirotor de 10 kW, instalado en Japón [20]

2.3.4. Turbina eólica multirotor Vestas

Equipo compuesto por 4 rotores de eje horizontal en una misma torre, con el fin de apostar por turbinas de menor tamaño sin disminuir la potencia. Cada rotor es de 225 [kW], con un diámetro de 29 [m] [21].

Figura 2.7. Aerogenerador multirotor Vestas [20].

2.3.5. Patentes

- **Generating electric power by means of wind.**

Patentado en 1932 por Alexander Beldimano [22]. Esta invención se refiere a un aparato capaz de generar energía eléctrica por medio del viento. Como se ve en la Figura 2.8., consiste en una red suspendida, entre dos torres, de uno o más cables metálicos o barras de hierro. Esta red es una malla cuadrangular, donde en cada cuadrado se encuentra suspendida una pequeña turbina con 2 o más álabes, la cual acciona un pequeño generador eléctrico. El diámetro de la turbina es de alrededor de 1 metro.

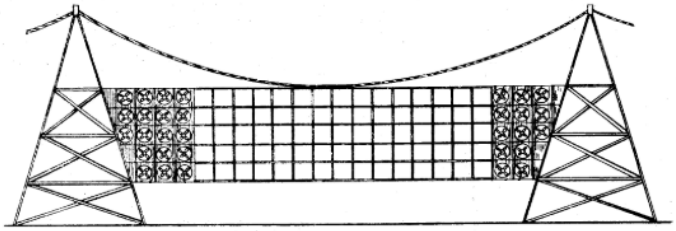

Figura 2.8. Diseño de la patente de Alexander Beldimano. Malla de turbinas suspendida entre dos torres por un cable [22]

- **Electric power generating system**

Patentado en 1969 por Martin J O'Malley [23]. Esta invención se refiere a generadores eléctricos accionados por vientos fuertes que soplan continuamente a grandes alturas. El sistema consiste en una pluralidad de generadores que se montan en forma pivotante a distancias espaciadas verticalmente, y se proporcionan medios para dirigirlos automáticamente hacia el viento.

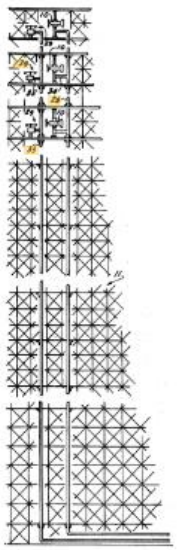

Figura 2.9. Diseño de la patente de Martin J O'Malley. Vista en alzado fragmentaria, en gran parte esquemática, de una torre alta que tiene una pluralidad de generadores eléctricos accionados por el viento espaciados verticalmente montados sobre ella [23]

- **Wind conversion lattice array, with multiple mini-turbo-generator modules**

Patentado en 1980 por Donald A. Kelly [24]. Es una red de enrejado de conversión eólica, que consta de múltiples módulos aerogeneradores en miniatura que están montados uniformemente en una estructura en forma de armazón abierta, que se puede ubicar en la azotea de un edificio u otra estructura elevada adecuada. Las turbinas son unidades de paletas múltiples de aproximadamente 6 pulgadas a diez pulgadas de diámetro, y se acoplan directamente a generadores eléctricos de CC.

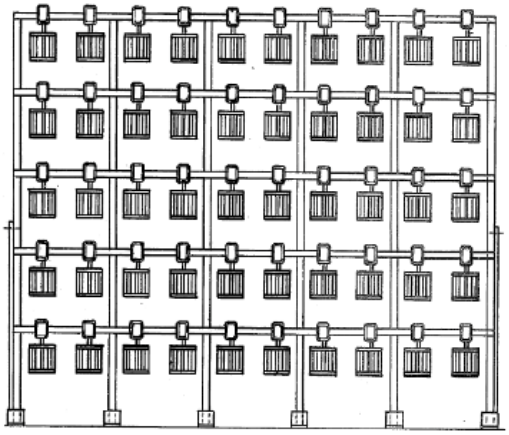

Figura 2.10. Diseño de la patente de Donald A. Kelly. Matriz de enrejado con múltiples módulos de aerogeneradores de eje vertical [24]

- **Offshore wind turbine with multiple wind rotors and floating system**

Patentado en 2006 por William Heronemus [25]. Es un sistema de conversión de energía eólica optimizado para aplicaciones en alta mar. Posee múltiples rotores distribuidos en una torre para distribuir el peso y las cargas, y para mejorar el rendimiento de la producción de energía cuando la resistencia al viento es alta.

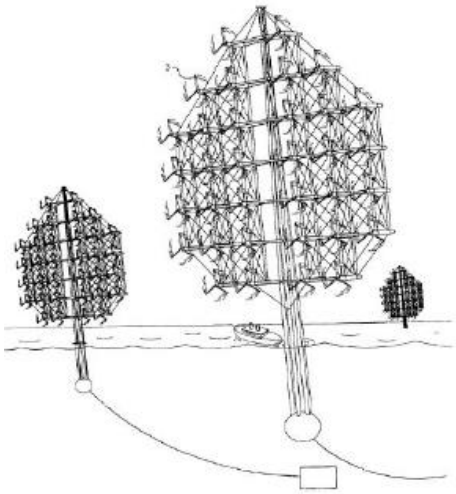

Figura 2.11. Diseño de la patente de William Heronemus. Sistema eólico de múltiples rotores para alta mar [25]

- **Wind-driven turbine cells and arrays**

Patentado en 2007 por Mihai Grumazescu [26]. Es un sistema de generación de energía eléctrica que está montado sobre una estructura, e incluye una cubierta que conduce y concentra el viento a través del efecto Coanda a las bocas de entradas de una pluralidad de pequeñas turbinas centrifugas o axiales conectadas a generadores.

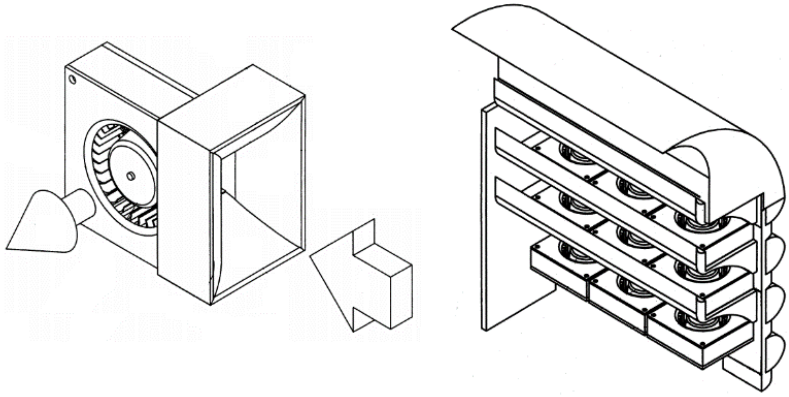

Figura 2.12. Diseño de la patente de Mihai Grumazescu. A la izquierda se presenta la geometría de una de las celdas, y como fluye el viento por ella. Y en la derecha se muestra la geometría del conjunto de celdas [26]

- **Wind Power System**

Patentado en 2009 por Chia-Lung Yeh [27]. Es un sistema eólico que consiste en un marco que contiene varias unidades eólicas que están conectadas mediante engranajes unas con otras, logrando una sincronización para transmitir potencia a un módulo final, donde está conectado el generador.

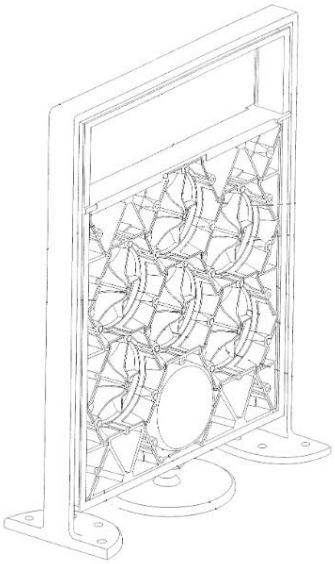

Figura 2.13. Diseño de la patente de Chia-Lung Yeh. Sistema con unidades eólicas interconectadas [27]

- **Clusters of small wind turbines a renewable energy technique**

Patentado en 2011 por Habib Bahari [28]. Sistema que consiste en una serie de pequeñas turbinas eólicas ubicadas una junto a la otra, formando varios grupos en forma de racimos. Sus aplicaciones pueden ser crear una planta de energía, abastecer una propiedad residencial, comercial letrero de calle, automóvil, bote, tren, etc.

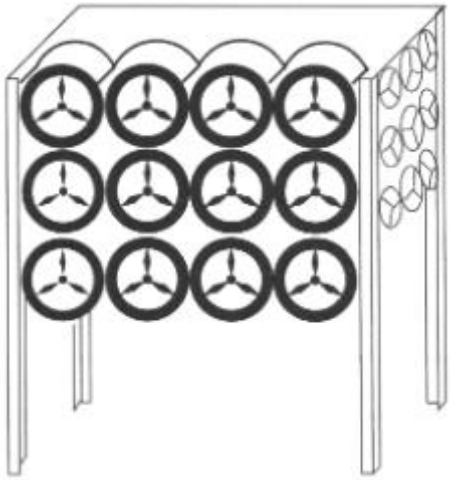

Figura 2.14. Diseño de la patente de Habib Bahari. Sistema de turbinas en grupos [28]

- **Wind turbine system**

Patentado en 2012 por Giles Henry Rodway [29]. Es un sistema con rieles estructurales eléctricamente conductores que soportan turbinas eólicas. Las turbinas eólicas accionan generadores conectados eléctricamente a los rieles. Los módulos individuales están conectados eléctrica y mecánicamente a módulos adyacentes, al mismo tiempo que sostienen la estructura general y proporcionan un medio para transportar la electricidad, producida por los generadores, a la ubicación o ubicaciones requeridas para el consumo, el almacenamiento o la transmisión posterior de esa electricidad.

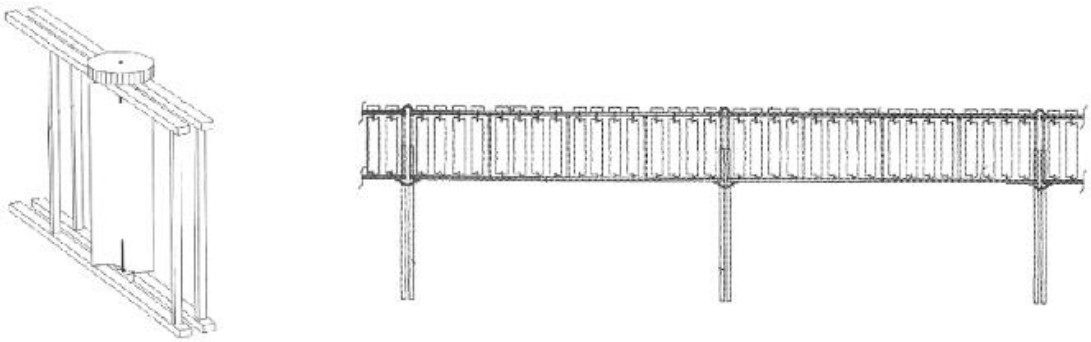

Figura 2.15. Diseño de la patente de Giles Henry Rodway. A la izquierda se muestra una de las turbinas que conforman el sistema. A la derecha el sistema con rieles estructurales que soportan a las turbinas [29]

- **Parque eólico aéreo de turbinas agrupadas**

Patentado en 2016 por Ramón Dominguez Pérez [30]. Se compone tanto por turbinas de eje vertical, como horizontal Con el fin de mejorar el rendimiento de las turbinas se constituyen conjuntos de tres turbinas, 2 son de eje vertical, ubicadas en los extremos y acopladas a un engranaje en la parte media del eje, de tal manera que giran en sentidos opuestos, la tercera turbina es de eje horizontal, y refuerza el giro de la turbina de eje vertical inferior. Al arreglo de estas tres turbinas se le llama conjunto, los cuales luego se acoplan de a tres conjuntos, formando un grupo. Con el mismo objetivo, estos grupos se siguen acoplando hasta formar el parque eólico de 16 grupos de turbinas, que se instalan en tendidos de cables de acero dispuestos a varias alturas, anclados a torres de hormigón u otro material, como se muestra en lado derecho de la Figura 2.16.

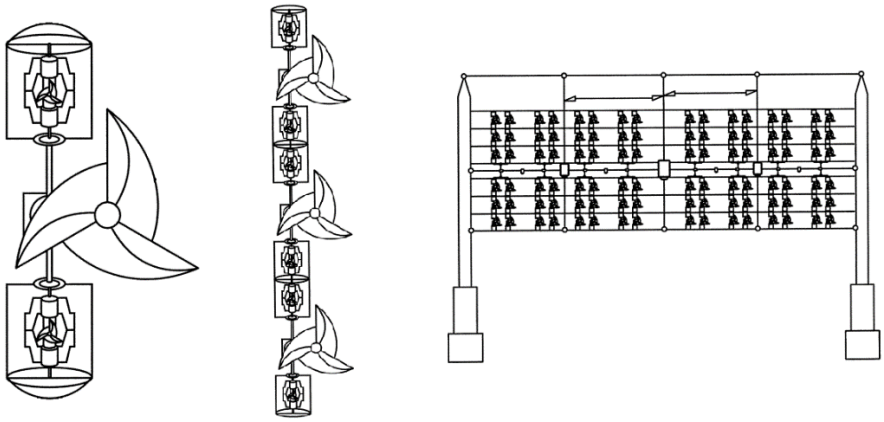

Figura 2.16. Diseño de la patente de Ramón Dominguez Pérez. En el lado izquierdo de la figura, se muestra el conjunto de las tres turbinas. En el medio, se ve un grupo de turbinas, que consiste en el acople de 3 conjuntos. Y en el lado derecho, se muestra el parque eólico de turbinas que consiste en varios grupos instalados en tendidos de cables [30]

- **Power generation system utilizing turbine arrays**

Patentado en 2017 por Dustin Clemo [31]. Es un conjunto de turbinas, donde cada una se puede descomponer en 3 partes que van acopladas en un mismo eje. En la parte inferior, se encuentra la unión del eje a la base por medio de un cojinete. En la parte superior, se encuentra el cabezal de la turbina (álabes), y en la parte media se encuentra una polea acoplada a un engrane, la cual a su vez se encuentra también acoplada a una segunda polea, unida al generador para producir la corriente eléctrica.

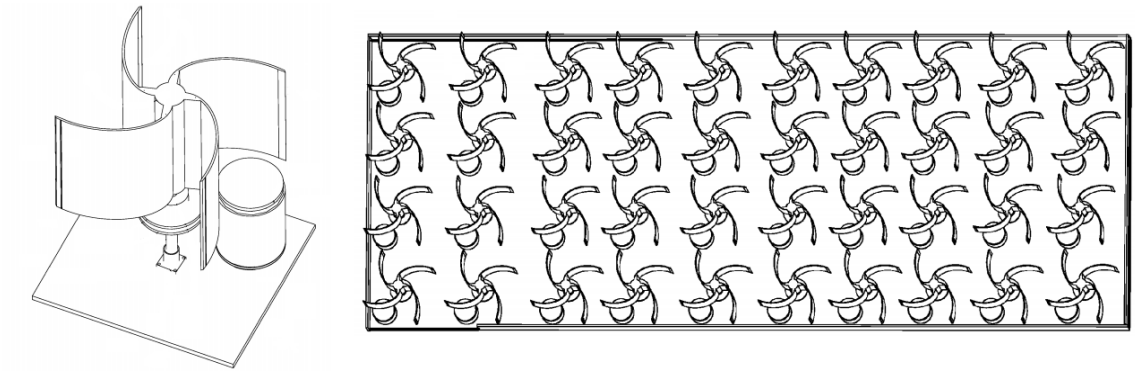

Figura 2.17. Diseño de la patente de Dustin Clemo. A la izquierda se muestra el sistema de una turbina. A la derecha se muestra la disposición del conjunto de turbinas [31]

- **Wind turbine panel**

Patentado en 2017 por Valod Menaskanian [32]. Panel de turbinas eólicas donde cada una está acoplada a dos alternadores, uno a cada lado en un mismo eje. El viento que atraviesa el panel se encarga de girar las turbinas para producir energía.

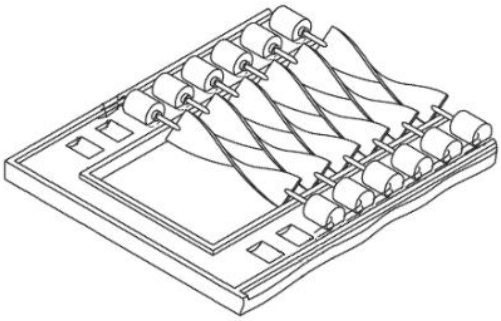

Figura 2.18. Diseño de la patente de Valod Menaskanian. Panel de turbinas con un alternador acoplado a cada lado [32]

- **Wind turbine array**

Patentado en 2019 por Pasquale Lentini [33]. Consiste en una pluralidad de turbinas eólicas de eje horizontal montadas en un bastidor, el cual se encuentra sobre un bolardo que se puede orientar en la dirección del viento.

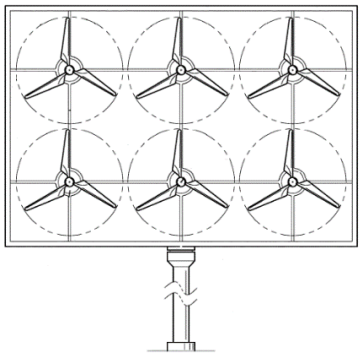

Figura 2.19. Diseño de la patente de Pasquale Lentini. Bastidor con turbinas de eje horizontal [33]

2.4. Normas Técnicas

La IEC (Comisión de Electrotécnica Internacional) es una organización encargada de preparar y publicar normas internacionales para tecnologías eléctricas, electrónicas, o relacionadas a ellas [34]. Por lo que gran cantidad de dispositivos dependen de estos estándares internacionales basados en el consenso de comités y subcomités técnicos (TC o SC). Existen una larga lista de TC y SC, encargados de temas específicos dentro de sus ámbitos, sin embargo el más a fin para este caso es el TC-88 [35], encargado de estandarizar los sistemas de generación de energía eólica, lo que incluye las turbinas eólicas, plantas de energía eólica en tierra y en mar, y la interacción con los sistemas eléctricos a los que se suministra energía. Estos alcances permiten que el comité TC-88 elabore las Normas IEC 61400, que se encuentra dividida en subpartes, dentro de las cuales se considerará la IEC 61400/2:2013, que contempla las turbinas eólicas pequeñas.

En cuanto las normas técnicas nacionales o chilenas (NCh) son creadas por el Instituto Nacional de Normalización (INN) [36], donde el más a fin con el tema es la NCh 2946, correspondiente a la normalización de aerogeneradores, más específicamente la NCh 2946/2:2005, que indica la seguridad de aerogeneradores pequeños [37].

3. Marco teórico

3.1. Aerodinámica

La aerodinámica se suele asociar con las alas de los aviones, pero también es utilizada en el diseño de turbinas eólicas. Los perfiles alares pueden tener diferentes formas y/o tamaños, por lo que existe una estandarización del Comité Asesor Nacional de Aeronáutica (NACA), que implica la sigla NACA acompañada por 4 a 8 dígitos. En las turbinas eólicas, se suele usar entre 4 y 5 dígitos para el perfil, como los que se muestran en la Figura 3.1. [12]

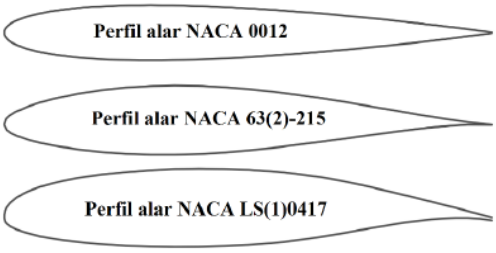

Figura 3.1. Perfiles alares estandarizados [12]

Cuando un sólido se expone a un fluido, este interactúa con cada punto de la superficie, por lo tanto al exponer el perfil alar al viento se generará una distribución de presión a lo largo de su superficie, que dará como resultado una fuerza neta sobre el cuerpo, la cual al descomponerse se obtiene una fuerza paralela a la dirección del viento, denominada arrastre, y una normal, denominada sustentación, como se observa en la Figura 3.2.

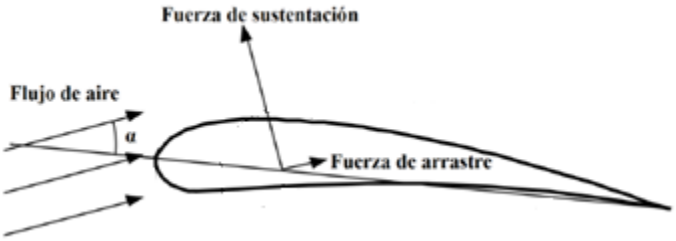

Figura 3.2. Fuerzas de arrastre y sustentación en un perfil alar [12]

3.2. Interacción Fluido-Estructura

A través de la disciplina conocida como multifísica computacional, se pueden modelar y resolver numéricamente problemas que se ven afectados por la interacción de varios fenómenos físicos de distinta naturaleza [38]. Cuando no existía el desarrollo tecnológico suficiente, se obtenía un aproximado de los efectos de estas interacciones o se ignoraban, sin embargo actualmente existen software y los medios informáticos suficientes para resolver estos problemas, como es el software CFD de Autodesk, lo que nos permite obtener una mayor comprensión de la realidad de diseños ingenieriles. Una de las interacciones de mayor interés en este estudio es la interacción fluido-estructura (FSI), que consiste en la interacción que ocurre entre un sólido deformable y el fluido en el que está inmerso, generando este último, presión en la estructura, lo que provoca una deformación, y por ende, un cambio en las condiciones de contorno del flujo, que vuelve a generar un cambio de presión, y así sucesivamente.

La FSI implica un acoplamiento entre las leyes de la dinámica de fluidos y la mecánica de estructuras [39]. Cuando el fluido interactúa con una estructura se ejercen tensiones y deformaciones en el sólido, las cuales pueden ser grandes o pequeñas, lo que dependerá de la presión y la velocidad del fluido, y las propiedades del material de la estructura. En el caso de que las deformaciones sean pequeñas, y las variaciones con el tiempo también, el fluido no verá muy afectado, y se debe poner atención solo en las tensiones de la estructura. Pero si las variaciones con el tiempo son grandes, pequeñas deformaciones estructurales pueden generar ondas de presión, lo que da lugar a radiación de sonido de estructuras vibrantes, y el problema deberá ser tratado como interacción acústico-estructural. Por otro lado si las deformaciones son grandes, cambiará el campo de velocidad y la presión del fluido.

3.2.1. Dinámica de Fluido Computacional (CFD)

La Dinámica de Fluido Computacional o CFD, es el área que permite el análisis de flujos de fluidos, transferencia de calor y/o fenómenos asociados a reacciones químicas, abarcando un amplio rango de aplicaciones, por medio de estructurados algoritmos numéricos [40]. Para realizar estos análisis se deben resolver las ecuaciones que rigen estos fenómenos, que son las ecuaciones de conservación, las cuales se presentan a continuación,

- **Masa:**

$$\frac{Dm}{Dt} = 0 \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{V}) = \mathbf{0} \tag{3.2}$$

- **Momentum:**

$$\frac{Dp}{Dt} = \sum F \tag{3.3}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 V \tag{3.4}$$

- **Energía:** En este caso, esta ecuación no es necesario resolverla, ya que no hay temperaturas involucradas.

Las ecuaciones presentadas no poseen una solución analítica, por lo que deben ser resueltas mediante cálculos numéricos que permitan obtener una aproximación del problema, donde los métodos más utilizados son los siguientes.

- **Método de diferencias finitas (FDM):** este método consiste en aproximar las derivadas con diferencias finitas dependiendo de la discretización de una función en una malla [41].
- **Métodos de elementos finitos (MEF):** La metodología consiste en dividir un sistema continuo en un numero finito de elementos interconectados por nodos. Luego discretizando el sistema se obtiene el MEF, que viene a ser una representación matemática de un sistema físico [42].
- **Método de los Volúmenes Finitos (FVM):** Se discretiza el volumen continuo en pequeños volúmenes de control, y las variables se calculan y almacenan en los nodos o en el centro de cada volumen [41].

Para procesar los problemas de CFD se deben cumplir tres etapas, el pre-procesador, el solucionador y el post-procesador, que se explican a continuación.

- **Pre-procesador:** se definen las entradas del problema que permitirán la resolución, como la geometría, generación de malla, condiciones de contorno, fenómenos físicos, y propiedades del fluido.
- **Solucionador:** puede utilizar diferentes técnicas de solución numérica, y por medio de métodos iterativos se encuentra la solución de estas ecuaciones algebraicas.
- **Post-procesador:** Se analizan los resultados obtenidos del solucionador con diferentes herramientas de visualización.

3.2.2. Análisis estructural

Este análisis permite calcular los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre una estructura. En el área de la energía eólica, este análisis es fundamental ya que los rotores se encuentran sometidos a altas cargas. Para realizar un correcto estudio es necesario apoyarse de medios computacionales, para tener una aproximación del comportamiento de las estructuras bajo condiciones reales. Dentro de los métodos numéricos, para la mecánica de materiales, el método de elementos finitos ha sido ampliamente implementado [43].

3.3. Estela

Cuando un flujo de viento pasa a través de una turbina eólica se ralentiza, formando una estela de menor velocidad, la cual se disipa gradualmente, como se muestra en la Figura 3.3, pero si encuentra otra turbina antes de que se restaure el flujo, la salida de esta será menor que en la primera, y por tanto la pérdida de potencia aumentará, como se muestra en la Figura 3.4. En turbinas de eje vertical se espera que la estela sea simétrica [44].

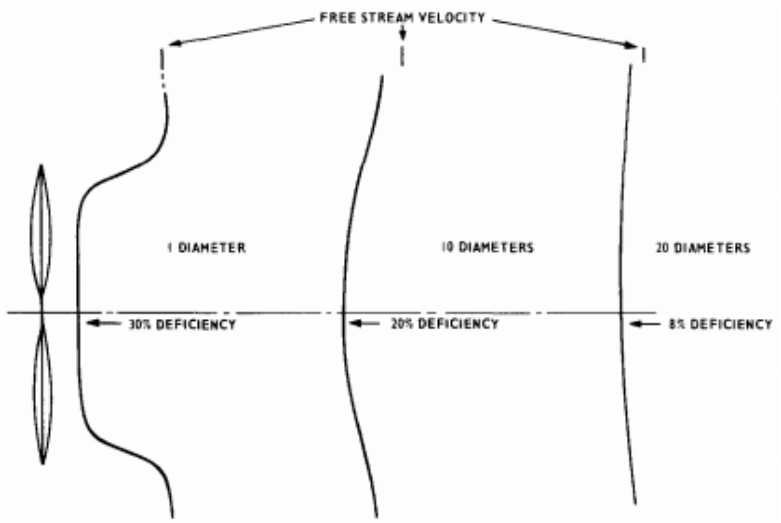

Figura 3.3. Perfil de velocidad luego de pasar por la turbina [44].

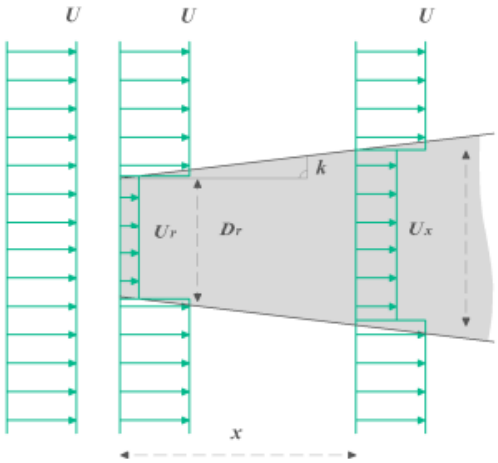

Figura 3.4. Estela generada por una turbina afectando directamente a una segunda [45].

La Figura 3.4. muestra el caso de interacción de dos turbinas, sin embargo generalmente se tienen más de dos, por lo que se generarían más estelas que se fusionarían al entrar en contacto una con otra. En la Figura 3.5. se muestra un caso más real, donde las turbinas son afectadas por más de una estela, en este caso se dice que la estela que sale de una turbina afecta parcialmente a otra turbina, lo que queda determinado por el área solapada, que vendría siendo la intersección entre el área de acción de la estela a la distancia de la turbina afectada, y el área de barrido de las palas de la turbina afectada, lo cual se ve en la Figura 3.6 [45].

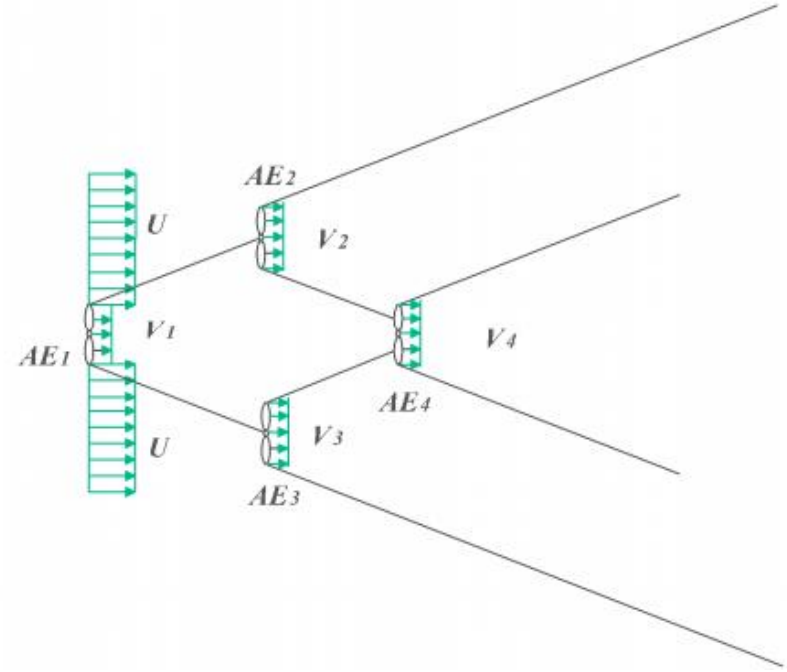

Figura 3.5. Interacción de estelas de cuatro turbinas [45].

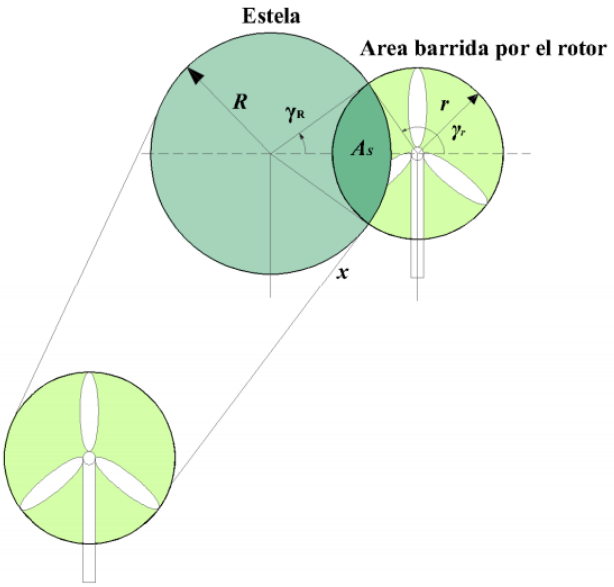

Figura 3.6. Área solapada entre dos aerogeneradores [45].

Teniendo en cuenta que una turbina puede ser afectada por varias estelas de manera parcial, se encontró la expresión de la velocidad en el aerogenerador afectado por N estelas [45],

$$U_N = U\left[1 - \sqrt{\sum_{j=1}^{N}\left(\left(1 - \frac{U_j}{U}\right)\frac{A_{ij}}{A_{rotor}}\right)^2}\right] \tag{3.5}$$

Donde U_j es la velocidad tras la turbina j a la distancia de la i-ésima, y A_{ij} es el área solapada.

3.4. Materiales y Procesos de manufactura

Los procesos de manufactura son actividades y operaciones relacionadas, ordenadas y consecutivas, a través del uso de máquinas-herramientas o equipos, con el fin de transformar materiales para la obtención de un producto industrial [46]. Estos procesos se pueden dividir en dos tipos, las **operaciones del proceso,** que hacen que un material pase de un estado de acabado a otro más avanzado, cercano al producto final, y las **operaciones de ensamblado**, que unen dos o más componentes para crear una nueva entidad [47]. En la Figura 3.7, se muestra la clasificación de estos procesos.

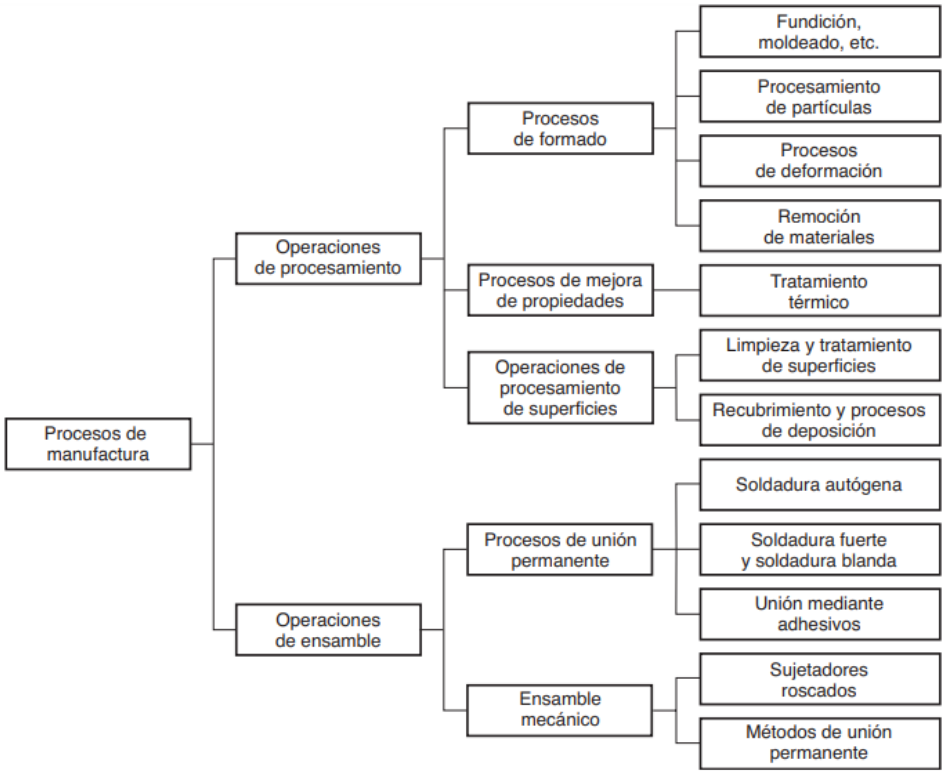

Figura 3.7. Clasificación de los procesos de manufactura [47]

3.4.1. Materiales

Los materiales que se utilizan para ingeniería se pueden clasificar en tres grandes grupos, metales, cerámicos y polímeros, además de un grupo llamado compuestos, que es una mezcla de los tres anteriores. En el caso de este trabajo, se pretende capturar vientos de bajas velocidades, por lo que las microturbinas deben ser rígidas y resistentes a altas tensiones, además de livianas. Los materiales más apropiados para esto son los polímeros, en específico los termoplásticos, ya que poseen densidades bajas, sin embargo también se tiene como opción los materiales compuestos de matriz de polímeros, ya que poseen mejores propiedades mecánicas.

a) Polímeros

Existen diversos tipos de termoplásticos, sin embargo a continuación se presentan los más apropiados para la fabricación de las microturbinas [47].

- **Polioximetileno:** también conocido como Acetal, este plástico está formado a partir de formaldehído, posee mucha rigidez, resistencia, tenacidad y resistencia al desgaste. Además, absorbe poca humedad y es insoluble en solventes ambientales.
- **Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno:** mejor conocido por sus siglas ABS, posee excelentes propiedades mecánicas. Es un terpolímero (polímero compuesto por tres meros) de dos fases, una es la de copolímero duro de estireno-acrilonitrilo, y la otra es de copolímero de estireno-butadieno similar al caucho.
- **Policarbonato:** posee excelentes propiedades mecánicas, como una tenacidad elevada y buena resistencia al escurrimiento plástico.
- **Polipropileno:** se trabaja principalmente por moldeo por inyección. Es el más ligero de los plásticos y su resistencia a peso es elevada.

- **Ácido poliláctico:** mejor conocido como PLA, es un termoplástico compostable de origen natural, obtenido tanto de la condensación directa del ácido láctico, como de la polimerización de apertura de anillo del dímero de lactida cíclica. Ha sido de gran interés en los últimos años por comportarse como un sustituto de los termoplásticos tradicionales, pero con mejores propiedades mecánicas [48].

Polímero	Gravedad específica	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Acetal	1,42	70	3500
ABS	1,06	50	2100
Policarbonato	1,2	65	2500
Polipropileno	0,9	35	1400
PLA	1,2	27	2700

Tabla 3.1. Propiedades de los polímeros [47] y [48].

b) Compuestos

Debido a que se necesita un material de baja densidad, se consideran los compuestos de matriz de polímeros, que consisten en un polímero al cual se le incrusta una fase secundaria que puede ser en forma de fibra, partícula u hojuela. Sin embargo, los más populares son los polímeros reforzados con fibras o FRP, donde los materiales principales de las fibras son el vidrio, el carbono, y el Kevlar 49 [47].

Los FRP tienen mayor aplicación en la industria aeroespacial y automotriz, pero también están siendo ampliamente utilizados para la fabricación de turbinas eólicas [49]. En la Tabla 3.2. se presentan los FRP más utilizados.

Compuesto o FRP	Gravedad específica	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Fibra de vidrio en poliéster	1,5	205	69000
Fibra de carbono en epóxico	1,55	1500	140000
Fibra de Kevlar en matriz epóxica	1,4	1380	76000

Tabla 3.2. Propiedades de los polímeros reforzados con fibra [47].

3.4.2. Procesos

a) Polímeros

Existen diferentes procesos para dar forma a los polímeros, de forma general se tienen los siguientes [47],

- **Extrusión:** es un proceso de compresión donde se fuerza al polímero a fluir a través de un orificio practicado en un troquel, para obtener un producto largo y continuo, con una sección transversal igual a la del orificio.
- **Moldeo por inyección:** se calienta el polímero hasta un estado muy plástico y se fuerza a fluir a alta presión hasta un molde, donde se solidifica. Dado que se requiere el uso de moldes, este proceso se elige para grandes producciones, por los altos precios de estos.
- **Moldeo por soplado:** se utiliza la presión del aire para inflar plástico dentro de un molde. Este proceso es común para la fabricación de piezas huecas, de una sola pieza y con paredes delgadas, como las botellas.
- **Moldeo rotacional:** este proceso también se utiliza para la fabricación de piezas huecas, pero haciendo uso de la gravedad. Se coloca polvo de polímero en un molde, luego se calienta el

molde y se gira sobre dos ejes perpendiculares, de formas de impregnar toda la superficie. Mientras sigue girando se enfría para solidificar la pieza, y finalmente se extrae del molde.

- **Termoformado:** en este proceso se utilizan hojas planas termoplásticas. Se calientan y se deforman, empujándolas contra la cavidad de un molde hasta obtener la forma deseada.
- **Moldeo por compresión y transferencia:** este proceso se utiliza generalmente para polímeros termofijos y elastómeros.

b) Compuestos

Existen diferentes procesos para dar forma a los compuestos, los más usados son los siguientes [47],

- **Aplicación manual:** se aplican manualmente capas sucesivas de fibra y resina en forma de estera o tela. A cada capa se le pasa un rodillo para impregnar completamente la fibra con la resina y remover las burbujas de aire.
- **Aplicación automatizada:** Es igual al proceso manual, pero las capas se aplican automáticamente con un aplicador de cinta de productos preimpregnados siguiendo una ruta programada.
- **Moldeo por compresión:** se coloca una carga en la sección inferior del molde y las dos secciones se cierran bajo presión, para que la carga tome la forma de la cavidad. Las dos mitades del molde se calientan para efectuar el curado del polímero termofijo.
- **Moldeo por transferencias:** se coloca una carga de resina termofija en un depósito o cámara, se calienta y se presiona por medio de un pisón dentro de una o más cavidades del molde.
- **Bobinado de filamentos:** se enrollan fibras continuas impregnadas con resina alrededor de un husillo giratorio, que tiene la forma interna de la pieza que se quiere producir.
- **Procesos de pultrución:** es similar a la extrusión, pero implica el estirado de la pieza de trabajo.
- **Enrollado de tubo:** se envuelve alrededor de un husillo cilíndrico y varias veces una lámina con productos preimpregnados precortada para obtener la pieza de un tubo de un espesor conformado de múltiples capas.
- **Aspersión:** Es el mismo proceso que la aplicación manual, solo que la resina líquida y las fibras cortadas se rocían para construir capas sucesivas.
- **Moldeo por inyección:** es notable por el bajo costo de producción de las piezas de plástico en cantidades grandes. Aunque se asocia más cercanamente con los termoplásticos, el proceso puede también adaptarse a los termofijos
- **Vaciado centrifugo:** se agregan trozos de fibras y resina liquida en un molde cilíndrico, el cual se hace girar rápidamente, formándose una superficie lisa en la parte interior por la fuerza centrífuga.
- **Laminado continuo:** involucra varios procesos 1) impregnación de capas de esteras de fibras en resina líquida, 2) unión entre películas de cubierta, y 3) compactación entre rodillos de presión y curado. Finalmente la forma se da con rodillos de formado o zapatas de molde.

4. Propuesta de innovación tecnológica

En el apartado 1.4. se evidenciaron los problemas de los aerogeneradores, lo que lleva a proponer un diseño de innovación en el área de la energía eólica. A diferencia de a donde han ido dirigidos los avances tecnológicos en el área (molinos cada vez más grande para aprovechar más viento), en este caso, el diseño se centrará en aprovechar vientos de baja potencia, y a nivel de suelo. De esta manera se propone un panel eólico modular, que consistirá en un arreglo de microturbinas híbridas Darrieus-Savonius. Para esto se toma como punto de partida las investigaciones "Diseño y pruebas numéricas de un microaerogenerador híbrido multipropósito" de Ricardo Sanzana [12], y "Diseño, fabricación y pruebas de un microaerogenerador híbrido multipropósito", de Jonathan Maldonado [50], las que entregan un prototipo de microturbina ya evaluada que se puede implementar en el panel.

De esta forma se utilizaría un recurso que está siendo desaprovechado, y se incurriría en menores costos y material. Además, su uso abarcaría mayores aplicaciones, pudiendo usarse de forma unitaria en espacios residenciales, o en conjuntos para uso industrial.

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Diseñar y optimizar un panel aerogenerador modular de microturbinas eólicas hibridas Darrieus-Savonius para producir electricidad a partir de vientos de baja potencia, tanto en aplicaciones residenciales como industriales.

5.2. Objetivos específicos

- Investigar el estado de arte de tecnología eólica modular y las normas técnicas para su diseño y pruebas estandarizadas.
- Investigar posibles materiales y métodos adecuados para la fabricación del panel.
- Proponer diferentes configuraciones constructivas y operativas para los paneles eólicos, que se ajusten a los requerimientos de modularidad, escalabilidad y fácil interconexión.
- Simular y verificar el acoplamiento aerodinámico del conjunto de microaerogeneradores híbridos, para identificar posibles problemas operacionales.
- Comparar a través del análisis de las simulaciones numéricas los prototipos propuestos, y seleccionar el o los más adecuado.
- Proponer mejoras de diseño para trabajos futuros de prototipado y pruebas de validación experimental.

6. Metodología

6.1. Método de trabajo

- **Paso 1: Estudio de otros modelos, normas técnicas.** Se estudian los diseños y patentes planteados en el Estado del arte, de forma de ver lo más conveniente para el diseño, como el acople entre turbinas y el generador. Además, se revisan las normas técnicas, tanto nacionales como internacionales, a fines al desarrollo de la tecnología.
- **Paso 2: Estudio de materiales y procesos.** Se estudian diferentes materiales para escoger los que más se ajusten a los requerimientos del panel eólico.
- **Paso 3: Diseño computacional preliminar de los prototipos.** A partir del Paso 1, se comienzan a esbozar los primeros diseños del panel eólico, reparando en la mejor forma de disponer los elementos. Luego se modelan en 3D con ayuda de un software.
- **Paso 4: Simulación estática de los prototipos.** Se realizan simulaciones estáticas en un software de los prototipos planteados en el Paso 3, con un material estándar. Se analizan las simulaciones y se advierten los problemas de los diseños.
- **Paso 5: Corrección de los prototipos.** Se realizan mejoras en los diseños y en los materiales, con el fin de resolver los problemas que se advirtieron de las simulaciones.
- **Paso 6: Simulación estática de los prototipos corregidos.** Se vuelven a ejecutar las simulaciones, y se verifica que las modificaciones realizadas corrigieron los problemas presentados en las primeras simulaciones. A partir de los resultados que se obtengan se pueden descartar algunos prototipos de ser necesario.
- **Paso 7: Simulación de CFD de los prototipos.** Se realizan simulaciones en un software variando diferentes parámetros de diseño, y se escogen los mejores para optimizar los prototipos.
- **Paso 8: Diseño de los prototipos con los parámetros escogidos.** Con la ayuda de un software se vuelven a modelar los prototipos con los parámetros escogidos del análisis del Paso 7, obteniendo los prototipos definitivos.
- **Paso 9: Simulación de CFD de los prototipos finales.** Se simulan en un software de CFD los modelos finales, para evaluar su desempeño.
- **Paso 10: Redacción de la memoria.** Documentar, analizar y concluir el trabajo desarrollado en los pasos anteriores.

6.2. Recursos

Equipos: Para el desarrollo del trabajo se utilizará un computador personal, capaz de soportar software de diseños y de simulaciones numéricas, el cual tiene las siguientes características,

- Modelo: Acer Aspire 3
- Procesador: AMD Ryzen 5 2500U
- Núcleos: Quad-core (4 Core™)
- Memoria Ram: 8,00 GB
- Controlador de Gráficos: AMD Radeon™ Vega 8

Recursos computacionales: Estos recursos se refieren a los programas que se utilizarán, los cuales serán Autodesk Inventor (software CAD 3D), para diseñar y realizar simulaciones estáticas, y Autodesk CFD, para simulaciones con fluidos.

7. Prototipos

Analizando los conjuntos de turbinas del estado del arte, las configuraciones a diseñar se basarán principalmente en el panel eólico diseñado por estudiantes de la Universidad Politécnica de Valencia, EOGU (apartado 2.3.1.), y las patentes de Donald A. Kelly [24], Giles Henry Rodway [29] y Valod Menaskanian [32], ya que son los que más se ajustan para el tipo de turbina con el que se trabajará (turbina vertical híbrida).

Para diseñar los prototipos se utilizará el modelo realizado en la memoria de Jonathan Maldonado, "Diseño, fabricación y pruebas de un microaerogenerador híbrido multipropósito" [50], donde se propone una turbina híbrida Savonius-Darrieus. En ella la turbina Savonius se encuentra en la parte interior, y la Darrieus en la parte exterior, tal como se muestra en la Figura 7.1.

Figura 7.1. Diseño CAD de la turbina propuesta en la memoria de Jonathan Maldonado [50]

El diseño de la Figura 7.1. es el prototipo final que se obtuvo después de las pruebas en el túnel de viento. Donde el rotor Savonius tiene un eje macizo para dar mayor estabilidad, además de las características que se presentan en la Tabla 7.1.

Altura turbina	200 [mm]
Diámetro turbina	100 [mm]
Inclinación álabes Savonius	60°
Inclinación álabes Darrieus	75°
Desfase entre rotores	35°
Separación entre rotores	10 [mm]

Tabla 7.1. Características de la turbina propuesta en la memoria de Jonathan Maldonado [50]

Una vez definida la microturbina a utilizar, se propone un diseño para el panel eólico, el cual consistirá en un enrejado donde se ubicarán las turbinas y los generadores, para los cuales se presentarán dos tipos de configuraciones. La primera donde cada turbina va asociada a un generador propio, la cual llamaremos acople individual, y la segunda donde las columnas de turbinas se montan en un mismo eje que va acoplado al generador, llamado acople por columnas.

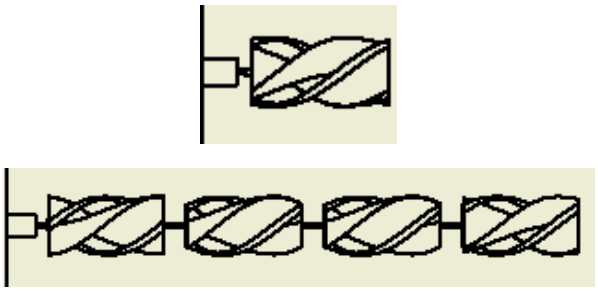

Figura 7.2. Configuración respecto al acople de las turbinas. Arriba, acople individual. Abajo, acople por columnas.

Además, se rescata la idea de la patente de Valod Menaskanian [32], donde se utiliza ambos lados de la turbina para conectar un alternador. De esta forma, se tendrían las configuraciones de la Figura 7.3., obteniéndose finalmente 4 posibles prototipos, los cuales se deberán analizar para elegir el más conveniente.

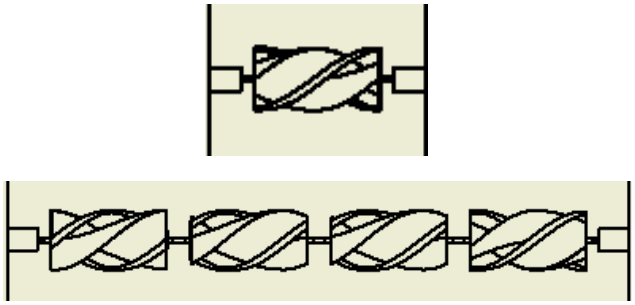

Figura 7.3. Configuración respecto a la cantidad de generadores acoplados.

Los diseños propuestos contemplan un marco (enrejado), generadores mitsumi (propuestos en la memoria de Jonathan Maldonado [50]), conectores que se utilizan para unir las turbinas en un mismo eje, y la turbina. Al realizar las configuraciones se estima que 16 turbinas por panel (4x4) es un número adecuado, ya que se obtendrían paneles de aproximadamente 1 [m^2]. Además, asumiendo, a partir de los ensayos de Jonathan, una potencia de 10 [W] por turbina, los paneles tendrían una potencia de 160 [W], lo cual es aceptable, sobre todo al hacer la comparación con los paneles solares, que poseen capacidades y dimensiones similares.

7.1. Configuración acople individual simple

Se tiene un marco de soporte con tres perfiles en el medio para soportar las turbinas y generadores. Se ubican 4 turbinas por piso, separadas a la misma distancia, y cada turbina se encuentra acoplada a un generador individual. Finalmente, el panel queda de 1110 x 1322 [mm].

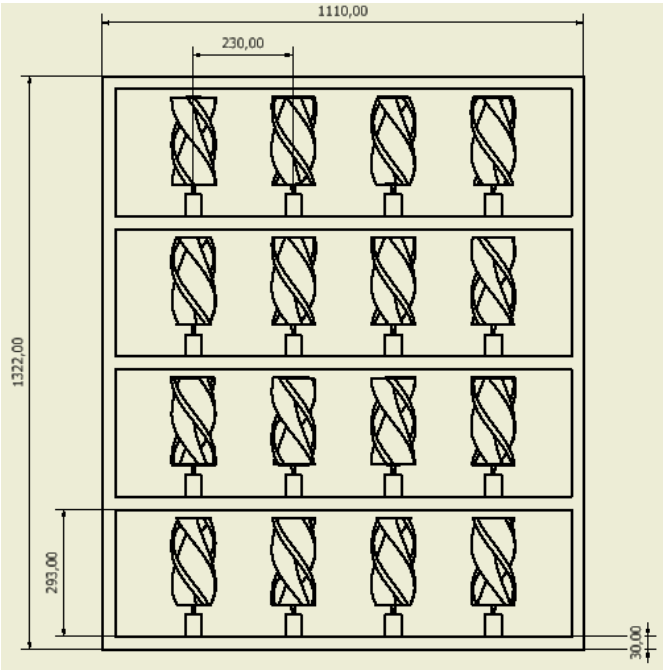

Figura 7.4. Configuración acople individual simple.

7.2. Configuración acople por columnas simple

Se considera un marco simple de 1110 x 1100 [mm]. En él se ubican columnas de turbinas, las cuales se encuentran acopladas en un mismo eje que va conectado a un generador en la parte inferior. Este mismo arreglo se repite 3 veces más hacia el lado, de manera que queden con la misma separación.

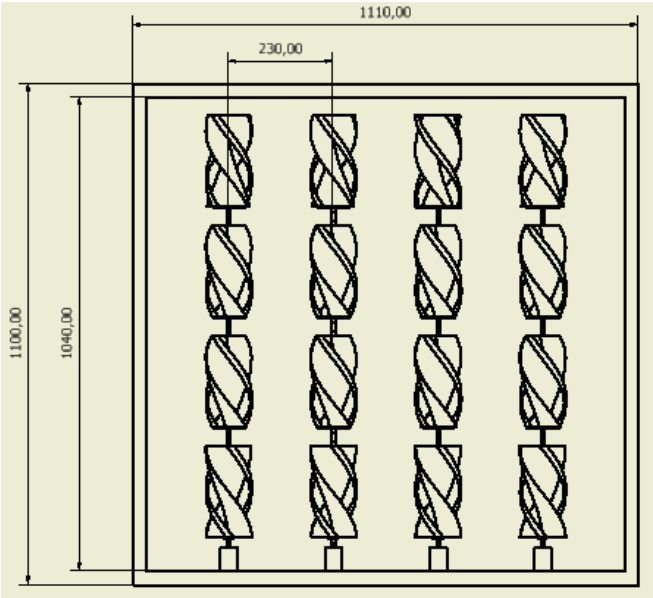

Figura 7.5. Configuración acople por columnas simple

7.3. Configuración acople individual doble

El marco posee tres perfiles en el medio, para soportar las turbinas. Se tienen 4 pisos de 4 turbinas cada uno separadas a la misma distancia. Cada turbina se encuentra acoplada a 2 generadores

individuales, uno en la parte superior, y otro en la inferior. Este panel es de dimensiones 1110 x 1542 [mm].

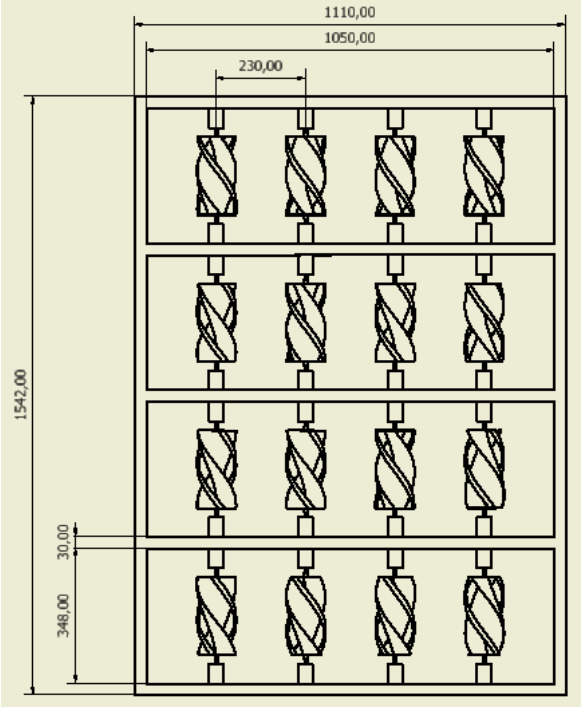

Figura 7.6. Configuración acople individual doble.

7.4. Configuración acople por columnas doble

Se tiene un marco de 1110 x 1134 [mm]. Se acoplan 4 turbinas en un mismo eje, el cual queda conectado a un generador en la parte superior, y otro en la parte inferior. Este arreglo se ubica 4 veces hacia los lados a una misma distancia.

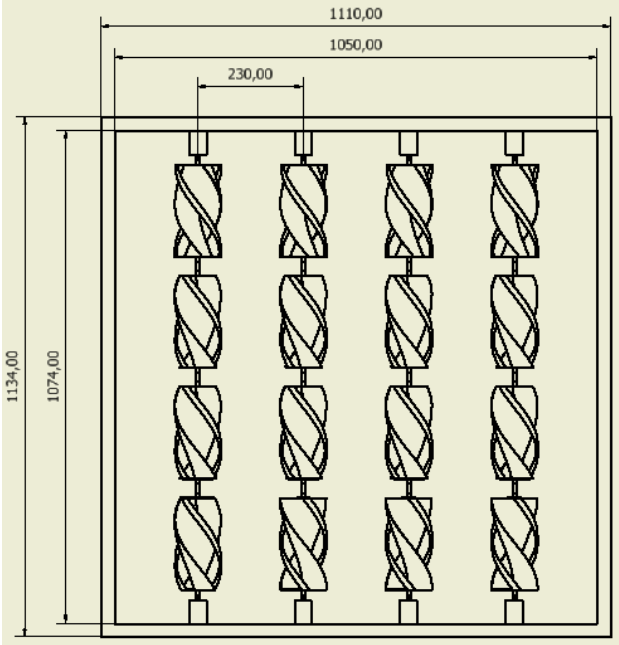

Figura 7.7. Configuración acople por columnas doble

8. Análisis de tensión

La estructura (panel eólico) estará sometida a cargas externas, principalmente al viento, es por esto que en el software de Inventor Professional, se realiza una simulación estática, basada en el método de elementos finitos [51], para observar que tan importantes son las tensiones que se producen. El programa ofrece funciones para análisis modal y estático estructural de los diseños.

El flujo de trabajo típico del análisis de tensión es el siguiente [52]:

a) Crear simulaciones y especificar sus propiedades.
b) Excluir los componentes que no sean necesarios para la simulación.
c) Asignar materiales. Si se define una simulación modal, se puede ejecutar ahora. Cuenta con suficiente información para ver las frecuencias naturales.
d) Añadir restricciones.
e) Añadir cargas.
f) Especificar las condiciones de contacto (opcional).
g) Especificar y previsualizar la malla (opcional).
h) Ejecutar la simulación.
i) Visualizar e interpretar los resultados.

Como resultado se obtienen visualizaciones donde las que se considerarán serán las siguientes:

- Tensión de Von Mises: es una tensión equivalente a todas las tensiones multidireccionales, es decir, los seis componentes de tensión. La combinación de los seis componentes de tensión en una única tensión equivalente se relaciona con el sistema de tensiones reales [53].
- Desplazamiento: es la distancia que se moverá un determinado punto de la estructura por la acción de las cargas.
- Coeficiente de seguridad: se calcula como la relación entre la tensión máxima permitida y la tensión equivalente (Von Mises) cuando se usa el límite de elasticidad. Los resultados del coeficiente de seguridad señalan inmediatamente áreas de elasticidad potencial [54].

Como se indicó en el flujo de trabajo, para realizar las simulaciones, se deberán tener o fijar algunos datos. Uno de ellos son los materiales, los diseños propuestos contemplan un marco, generadores mitsumi y conectores que se utilizan para unir las turbinas en un mismo eje, que en este caso se modelarán en aluminio, y las turbinas, que serán modeladas en plástico ABS.

Por otro lado, para realizar este análisis se tendrá en cuenta la presión del viento, la cual se calcula con la siguiente ecuación,

$$P = \frac{u^2}{16} \left[\frac{kgf}{m^2}\right] \tag{8.1}$$

Donde u es la velocidad del viento. Esta ecuación se obtiene de la norma chilena de cálculo de la acción del viento sobre las construcciones [55], donde P es la presión básica del viento. La ecuación también puede quedar expresada en Pascales,

$$P = 0{,}6125 \cdot u^2 \; [Pa] \tag{8.2}$$

Se tomará como base la mayor velocidad utilizada en los ensayos de Jonathan en el túnel de viento, que equivale a 16 [m/s], pero para dar mayor seguridad, se utilizará 20 [m/s]. Por lo que la presión con la que se trabajará será de 245 [Pa].

8.1. Análisis turbina

8.1.1. Simulación estática

En primer lugar se analizará solamente la turbina, para esto se selecciona el material de la turbina (ABS), y se aplican las respectivas restricciones. En este caso se fija la cara superior e inferior, tal como se muestra en la Figura 8.1.

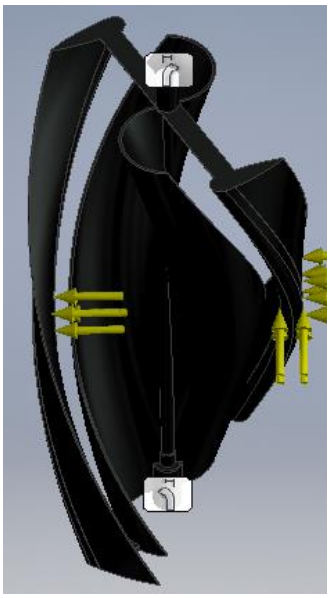

Figura 8.1. Restricciones de movimientos para la simulación estática de la turbina.

Se aplica la presión del viento en las caras de los álabes que dan hacia el frente.

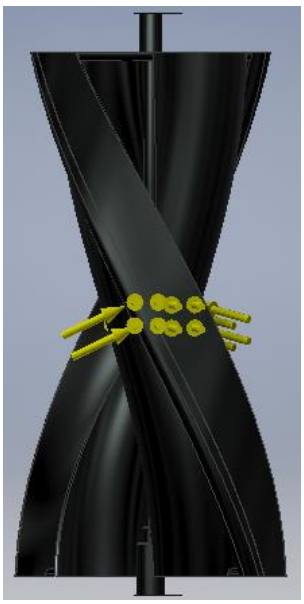

Figura 8.2. Cargas aplicadas para la simulación estática de la turbina. Presión del viento sobre la parte frontal de los álabes, representada como vectores amarillos.

Se aplica una malla de 99267 nodos y 60444 elementos, y se ejecuta la simulación.

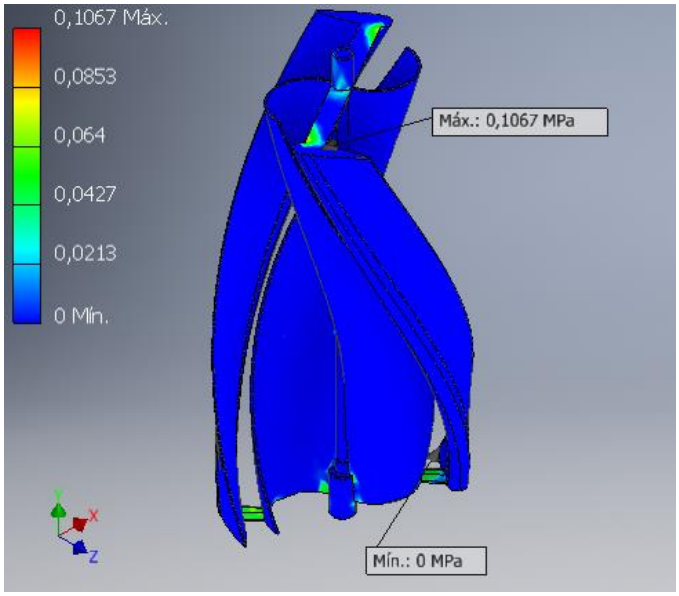

Figura 8.3. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación estática de la turbina.

Como se puede ver en la Figura 8.3. La tensión de Von Mises suele ser mayor en las uniones. Donde la tensión máxima es de 0,1067 [MPa] y se da en la unión del álabe Darrieus con la conexión que va al eje. También se aprecia una alta tensión en las conexiones entre los álabes de ambas turbinas, y en los extremos de la parte interior de los álabes Savonius, donde se unen al eje. Es decir se puede ver una mayor solicitud de esfuerzos en las uniones, lo que puede deberse a la robustez de estas partes.

Debido a estos esfuerzos tenemos como resultado desplazamientos en las turbinas, los cuales se pueden ver en la Figura 8.4. Los álabes Darrieus se ven afectados completamente, y los Savonius solo las partes externas, pero poseen el valor máximo de desplazamiento. Sin embargo, los valores de estos desplazamientos son prácticamente imperceptibles, por lo que no implica un gran problema, y se ve reflejado en el alto coeficiente de seguridad, para ser exactos, 15 en todo el sólido.

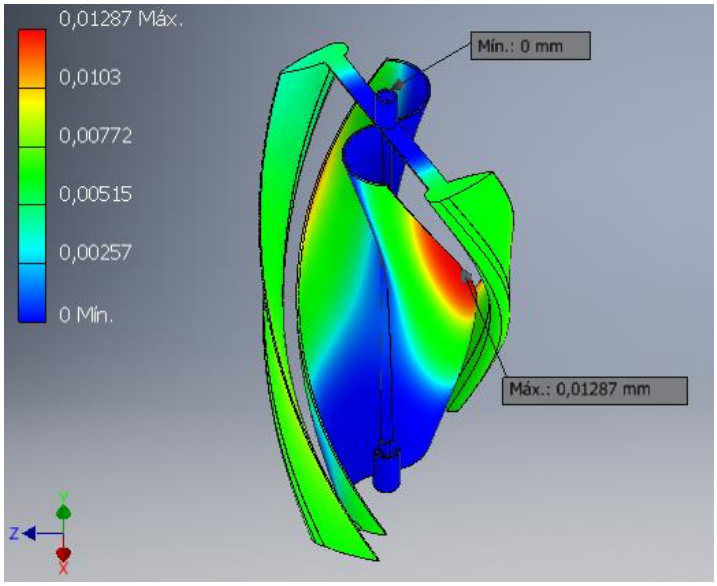

Figura 8.4. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación estática de la turbina.

8.1.2. Simulación rotacional

Al igual que en el caso anterior, se selecciona el material de la turbina (ABS), y se aplican las restricciones correspondientes, tal como se observa en la Figura 8.5.

Figura 8.5. Restricciones de movimiento para la simulación rotacional de la turbina.

Luego, para las cargas se aplica una velocidad rotacional sobre todo el cuerpo, equivalente a la velocidad lineal que toma la turbina en los extremos, la que se considera igual a la velocidad de seguridad del viento establecida anteriormente, 20 [m/s]. Por lo tanto, se aplica una velocidad rotacional igual a 22918 [grd/s]. Además, se aplicó la fuerza de gravedad.

Figura 8.6. Cargas aplicadas para la simulación rotacional de la turbina. El vector curvo, representa la velocidad rotacional, y el vector inferior la gravedad.

Se aplica una malla de 99267 nodos y 60444 elementos, y se ejecuta la simulación.

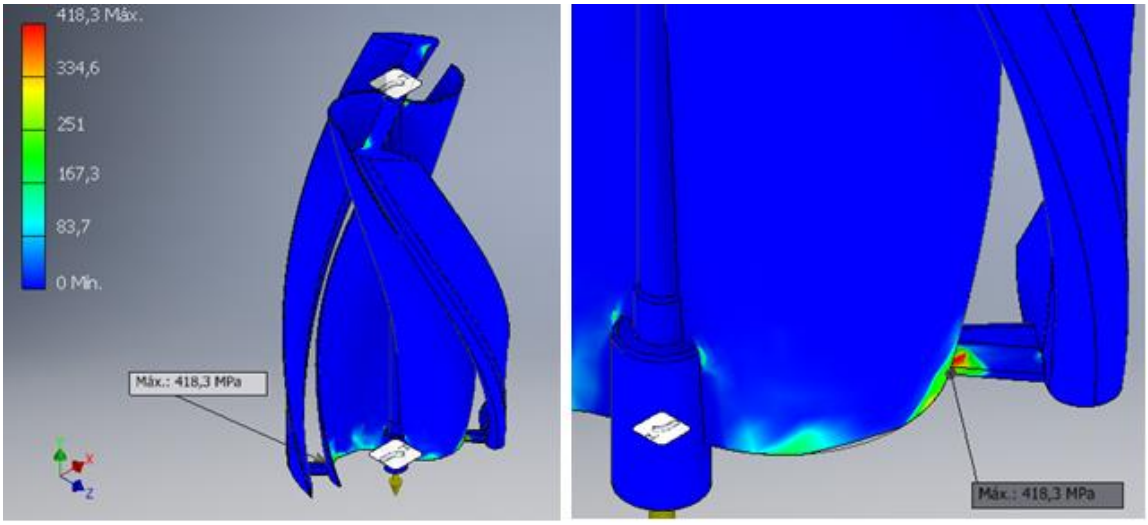

Figura 8.7. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación rotacional de la turbina. A la derecha se muestra un acercamiento del lugar donde se concentra el valor máximo de tensión.

Como se puede ver en la Figura 8.7. la tensión de Von Mises es mayor en el extremo superior e inferior, principalmente en las uniones, siguiendo la tendencia de la simulación estática. Sin embargo, las tensiones en este caso crecen considerablemente, lo que hace que el caso estático sea despreciable. La mayor tensión se encuentra en la conexión inferior de ambas turbinas, específicamente en la parte cercana al álabe Savonius.

Como resultado de los esfuerzos, se tienen los desplazamientos que se muestran en la Figura 8.8. En ella se ve que los mayores desplazamientos se producen en las partes inferiores y más alejadas al eje de la turbina, y se van aminorando hacia arriba y al interior. Esto se debe a que en la parte superior existe una conexión directa entre los álabes Darrieus y el eje de la turbina, a diferencia de la parte inferior, donde la conexión llega solo al extremo de los álabes Savonius.

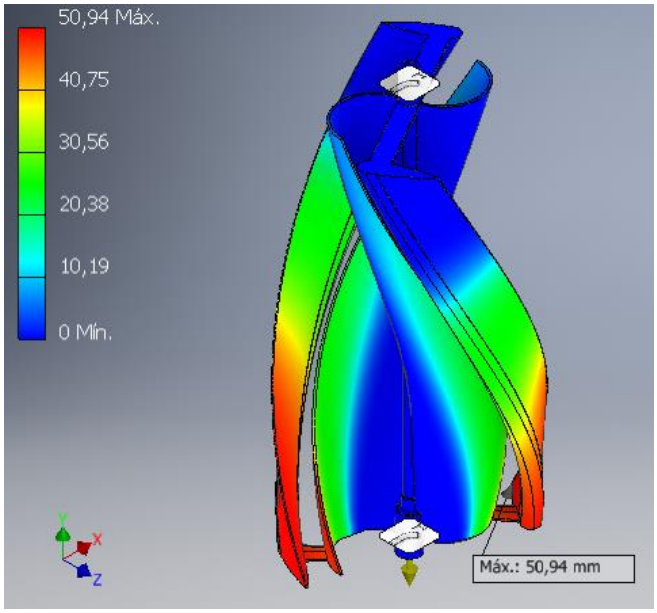

Figura 8.8. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación rotacional de la turbina.

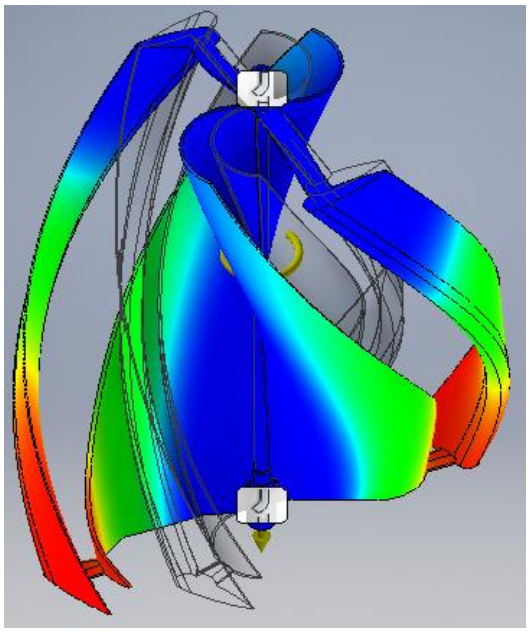

Figura 8.9. Visualización de la deformación que sufre la turbina respecto la original.

8.2. Análisis panel

El procedimiento para hacer la simulación es similar al caso estático para una turbina. Se eligen los materiales, se restringe la base del panel (parte inferior del marco), y se aplica una presión de 245 [Pa] en las caras frontales de los cuerpos, que simula la presión ejercida por el viento.

8.2.1. Configuración acople individual simple

Se generó una malla de 1541258 nodos y 915467 elementos.

Tensión de Von Mises en [MPa]:

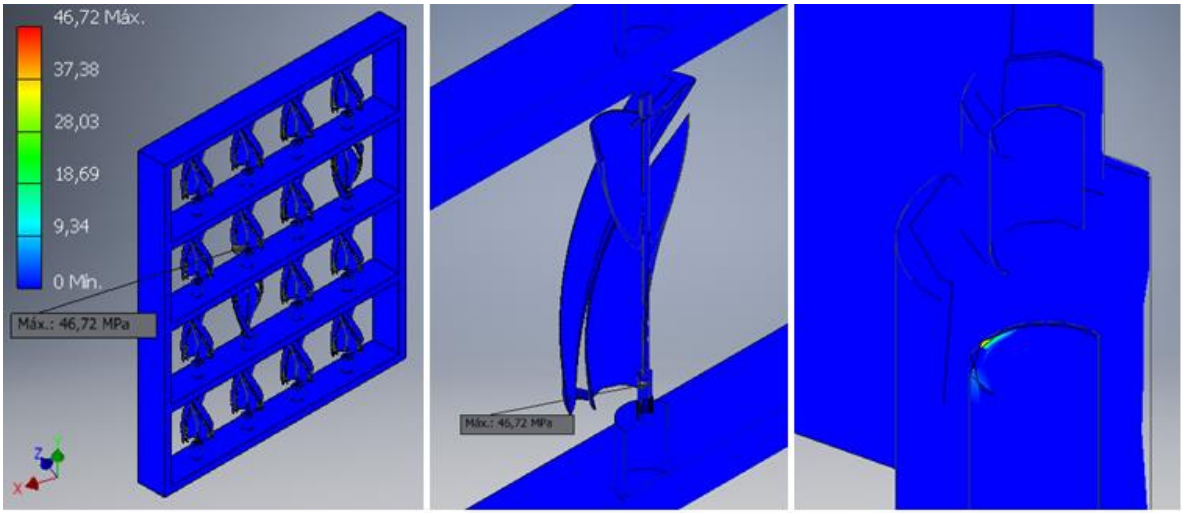

Figura 8.10. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual simple. En las dos ilustraciones de la derecha se muestra una vista en corte del lugar donde se concentra la máxima tensión.

Desplazamiento en [mm]:

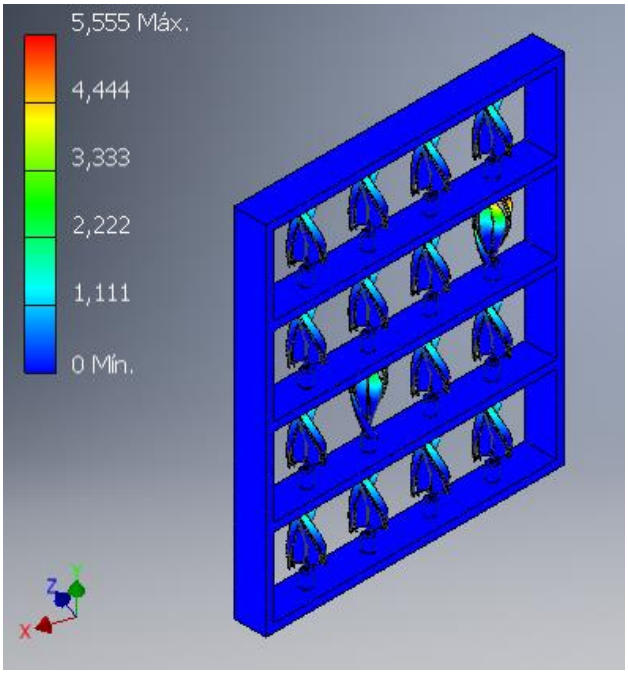

Figura 8.11. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople individual simple.

Coeficiente de seguridad:

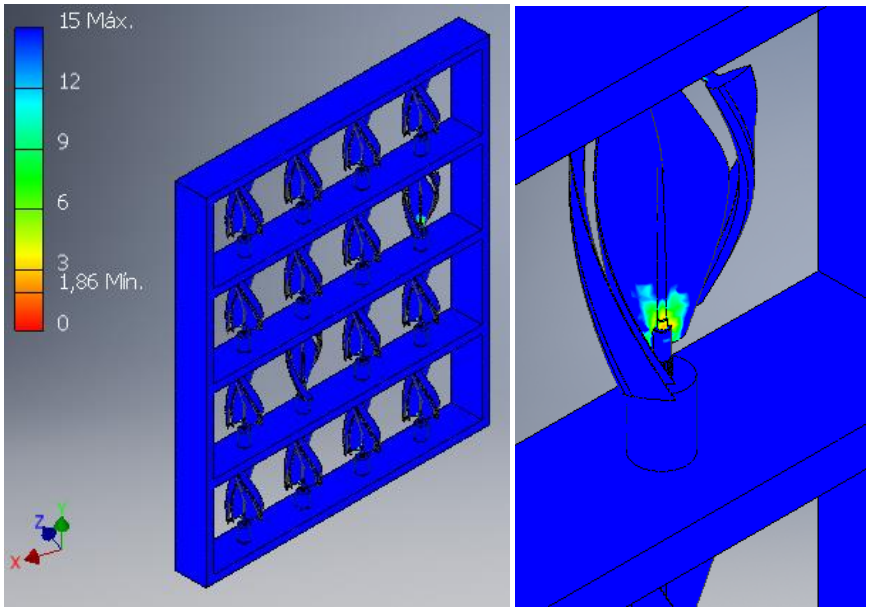

Figura 8.12. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual simple. También a la derecha se muestra un acercamiento del lugar con menor coeficiente de seguridad.

Como se aprecia en la Figura 8.10. las tensiones son mínimas y los puntos altos se producen al interior de la estructura, ya que no se ven. Los desplazamientos aumentan hacia la punta de la turbina, debido a que en la parte superior no tiene apoyo. Los coeficientes de seguridad son altos, salvo algunos

puntos donde el mínimo es 1,86, esto significa que se tendrán puntos críticos que pueden ser un problema para la geometría.

8.2.2. Configuración acople por columnas simple

Se generó una malla de 1392675 nodos y 827337 elementos.

Tensión de Von Mises en [MPa]:

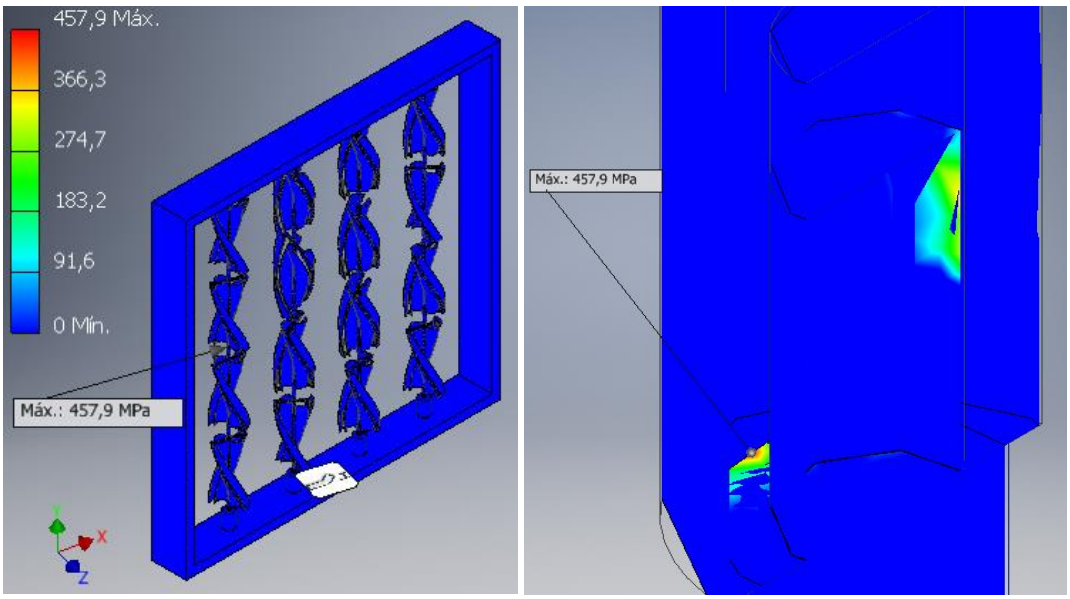

Figura 8.13. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas simple. En la ilustración de la derecha se muestra una vista en corte del lugar donde se concentra la máxima tensión.

Desplazamiento en [mm]:

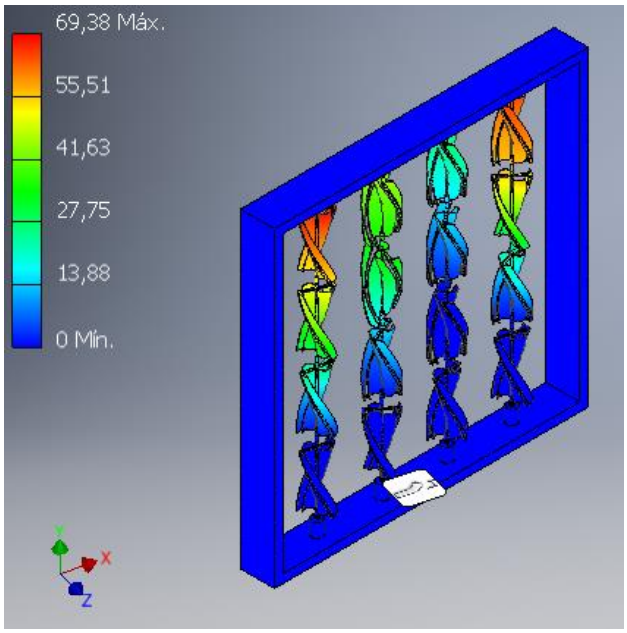

Figura 8.14. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople por columnas simple.

Coeficiente de seguridad:

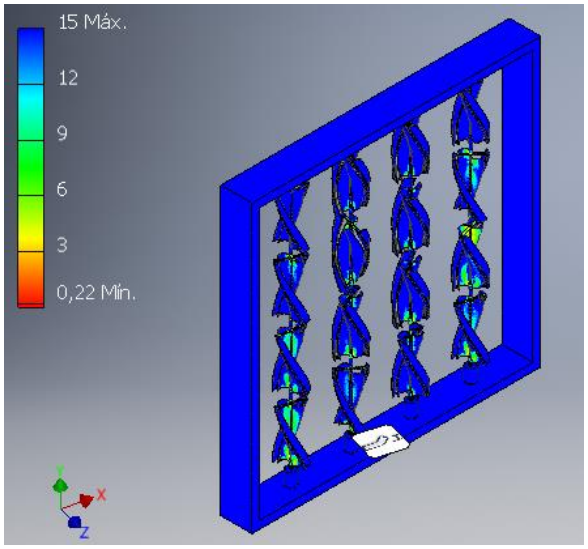

Figura 8.15. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas simple.

Al igual que en el caso anterior las tensiones se ven mínimas, aunque por dentro hay puntos de altas tensiones. El máximo es mucho mayor al caso anterior, casi 10 veces más. Además se observa que los desplazamientos siguen la misma tendencia, mayor en la punta superior, sin embargo los valores son excesivamente más altos que en el caso anterior. El coeficiente de seguridad no es del todo uniforme, y es menor en las turbinas bases. Al igual que antes, esto se debe a que en la parte superior no tiene apoyo.

8.2.3. Configuración acople individual doble

Se generó una malla de 1661969 nodos y 980277 elementos.

Tensión de Von Mises en [MPa]:

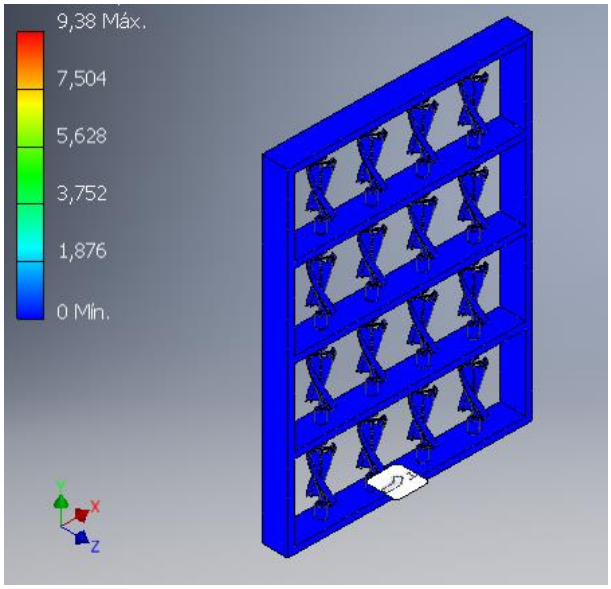

Figura 8.16. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual doble.

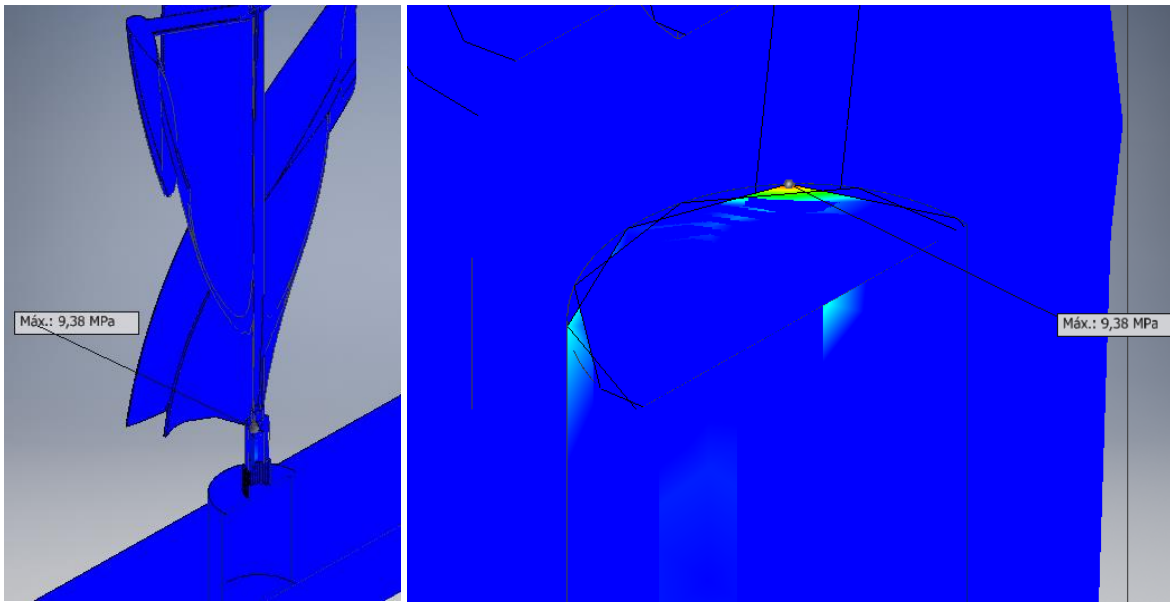

Figura 8.17. Vista en corte donde se produce la máxima tensión en la configuración de acople individual doble.

Desplazamiento en [mm]:

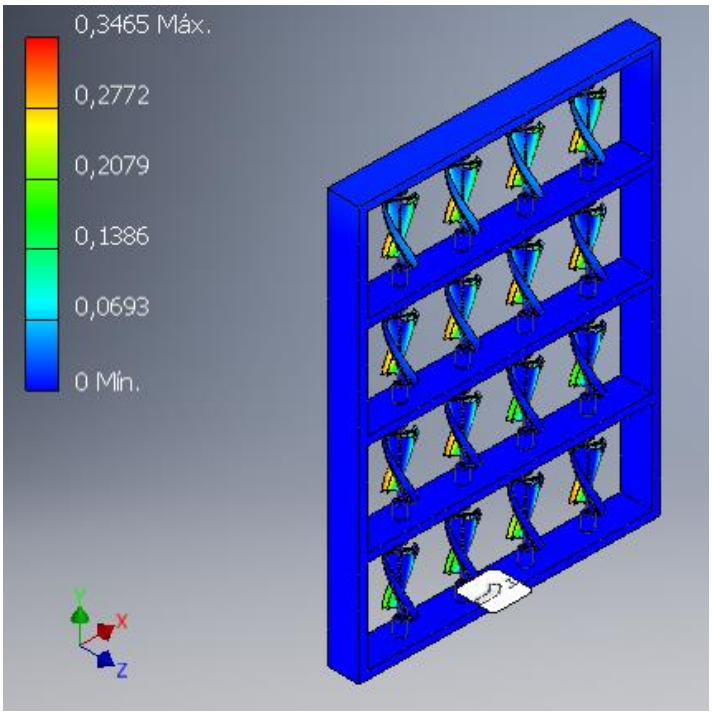

Figura 8.18. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople individual doble.

Coeficiente de seguridad:

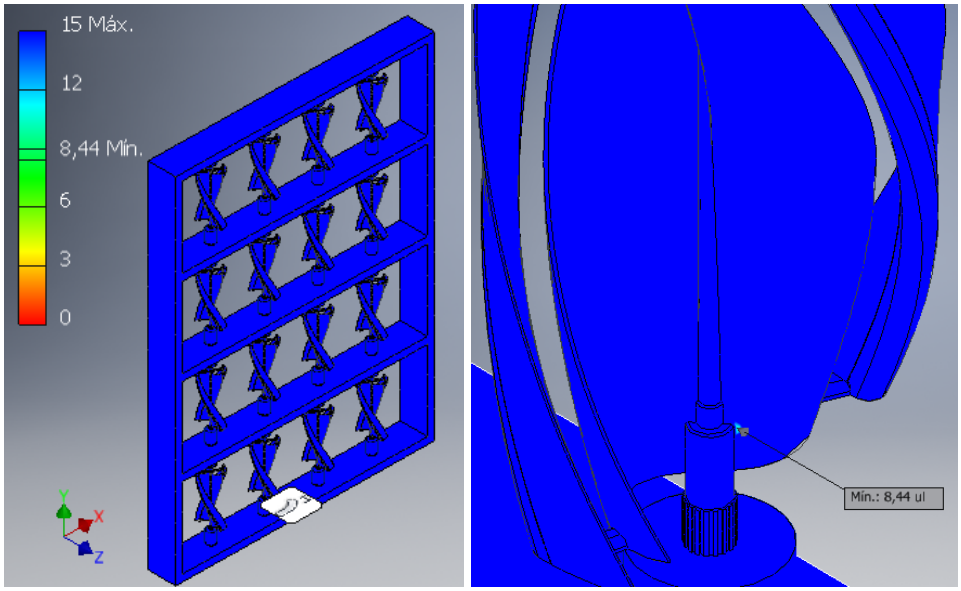

Figura 8.19. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual doble.

Aquí se aprecia un considerable cambio, disminuyen las tensiones, los desplazamientos son mínimos, teniendo un máximo de 0,3465 [mm], y el coeficiente de seguridad es bastante alto, siendo el mínimo de 8,44 [-]. Las mejoras en este prototipo se deben principalmente al doble apoyo que tiene, en los casos anteriores no había un apoyo en la parte superior.

8.2.4. Configuración acople por columnas doble

Se generó una malla de 1260196 nodos y 737447 elementos.

Tensión de Von Mises en [MPa]:

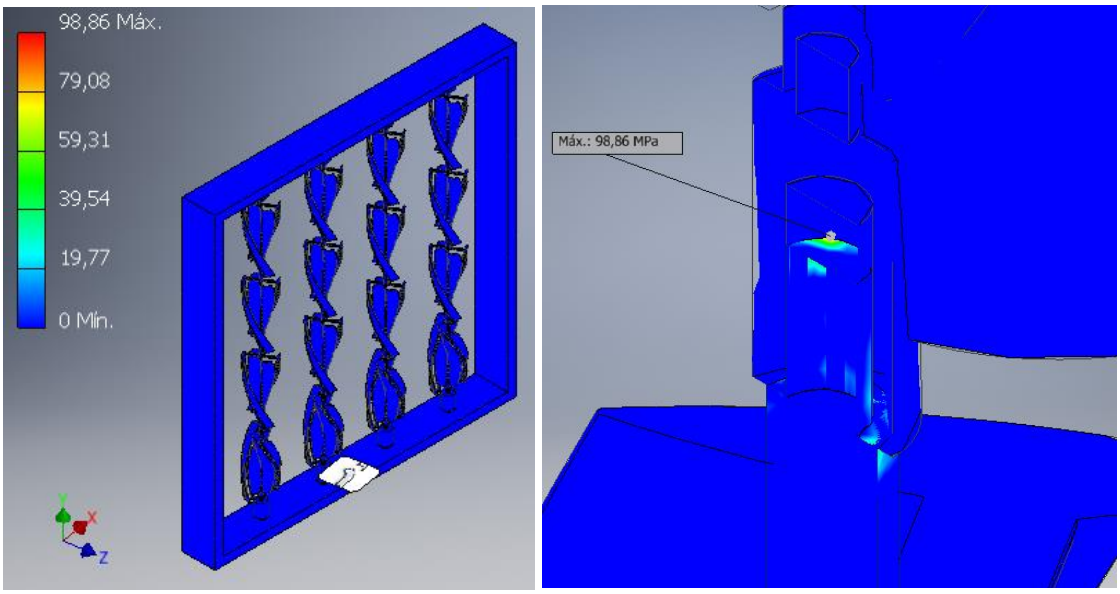

Figura 8.20. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas doble. A la derecha se muestra un acercamiento del lugar donde se concentra el valor máximo de tensión.

Desplazamiento en [mm]:

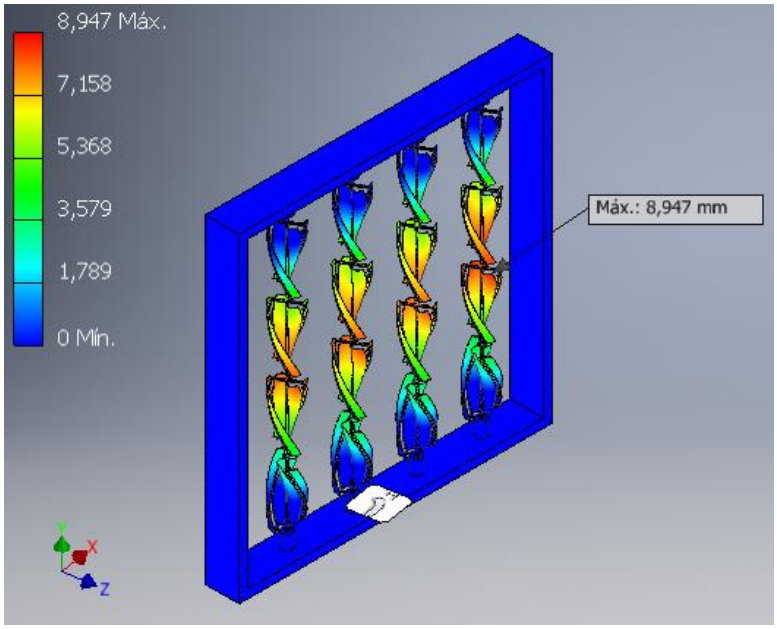

Figura 8.21. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople por columnas doble.

Coeficiente de seguridad:

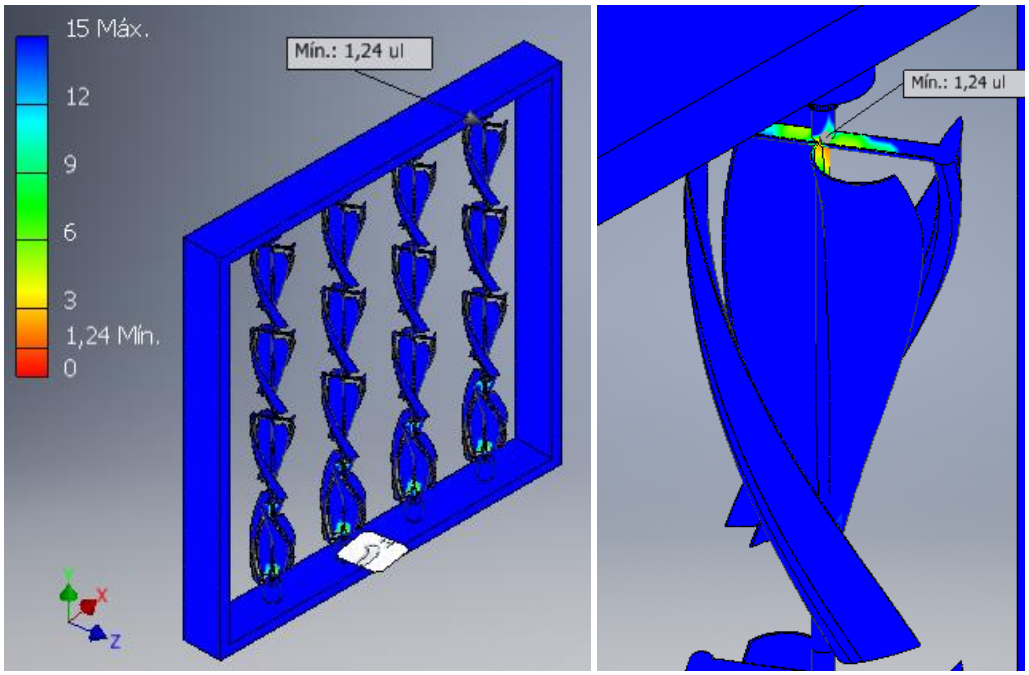

Figura 8.22. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble.

Al igual que en el prototipo anterior, se observan mejoras en los tres aspectos, sin embargo se presentan mayores tensiones, ya que las turbinas al estar en un mismo eje pierden puntos de apoyo, lo que permite que haya un mayor desplazamiento en la parte central, como se muestra en la Figura 8.21.

8.3. Comparación de los prototipos

En la Tabla 8.1. se presentan los valores obtenidos de las simulaciones de cada prototipo.

		Configuración			
		Individual simple	Columnas simple	Individual doble	Columnas doble
Tensión de Von Mises [MPa]	Max	46,72	457,9	9,38	98,86
	Min	0	0	0	0
Desplazamiento [mm]	Max	5,555	69,38	0,3465	8,947
	Min	0	0	0	0
Coeficiente de seguridad	Max	15	15	15	15
	Min	1,86	0,22	8,44	1,24

Tabla 8.1. Comparación de los valores de cada prototipo.

En la Tabla 8.1 se puede observar que la configuración de acople por columnas simple es la que presenta más problemas, ya que posee grandes tensiones en comparación con las demás. Por otro lado se tiene la configuración individual doble, que posee los mejores valores en los tres aspectos analizados. Y las dos restantes poseen valores aceptables.

Dado que los resultados no son satisfactorios, se propone hacer una mejora cambiando el material de la turbina por uno más adecuado a las condiciones.

8.4.Análisis turbina de fibra de carbono

Se propone utilizar fibra de carbono en epóxico, ya que es un material que se sigue considerando liviano, y posee propiedades mecánicas mejores y adecuadas a las condiciones. Una vez establecido el nuevo material se vuelve a simular la turbina bajo las mismas condiciones para ver si se presentan mejoras.

8.4.1. Simulación estática

En la Figura 8.23, se aprecian los esfuerzos de Von Mises como resultado de la presión del viento, misma que se utilizó en la primera simulación.

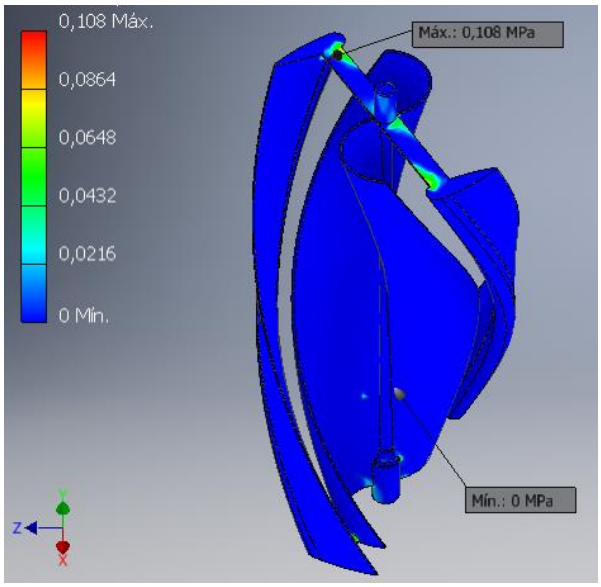

Figura 8.23. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación estática de la turbina de fibra de carbono.

Se puede apreciar que la tensión de Von Mises se mantiene prácticamente constante, concentrándose igualmente en las conexiones entre turbinas. Sin embargo si hay una diferencia en los desplazamientos, siendo en este caso dos órdenes menor que en la simulación con ABS. De esta forma se puede ver una mejora en el caso estático con un mejor material.

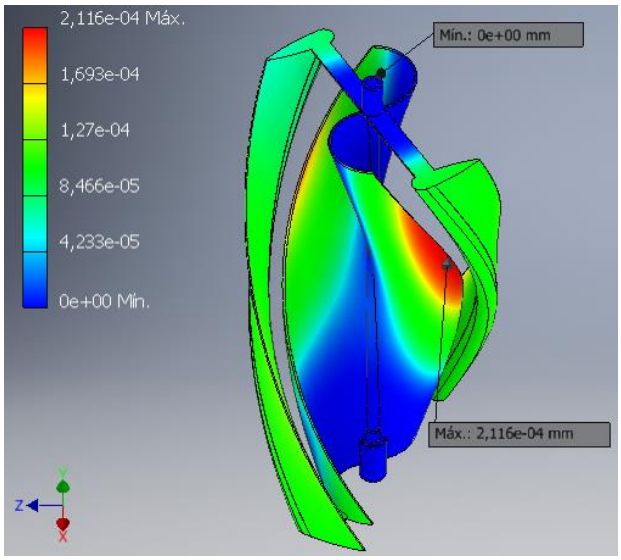

Figura 8.24. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación estática de la turbina de fibra de carbono.

8.4.2. Simulación rotacional

Se realiza la misma simulación que en el apartado 8.1.2, aplicando una velocidad rotacional asociada a la del viento y gravedad. En primera instancia, se nota al comparar con la simulación en ABS que los esfuerzos son levemente mayores, pero se presentan en los mismos lugares, en las uniones entre turbinas y en la parte inferior de los álabes de la turbina Savonius.

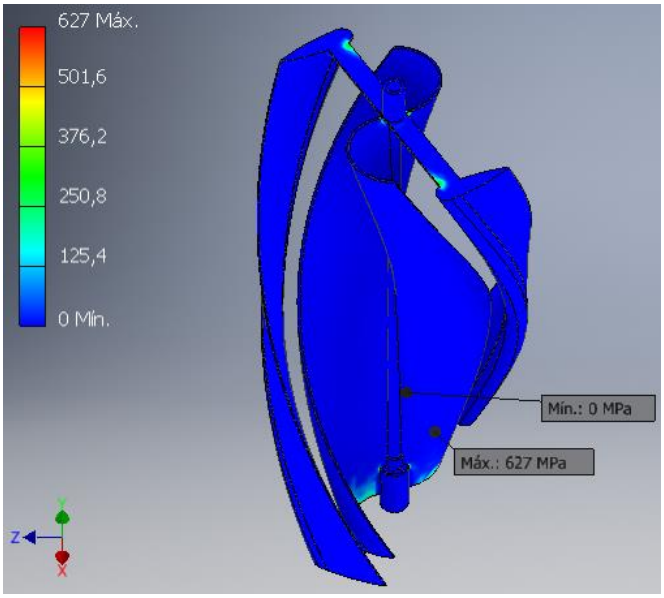

Figura 8.25. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación rotacional de la turbina de fibra de carbono.

Sin embargo los desplazamientos, a diferencia que el caso en ABS, son aceptables, siendo casi imperceptibles a la vista. Con este caso se puede afirmar que el cambio de material afecta positivamente a la turbina, por lo que conviene utilizar este material para su fabricación.

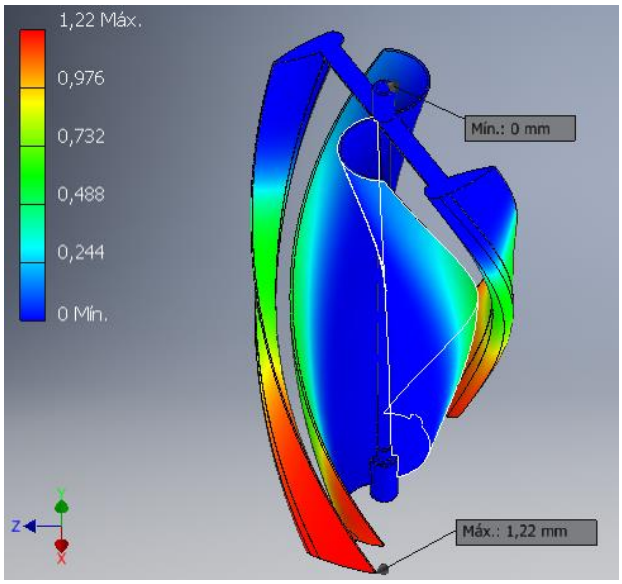

Figura 8.26. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación rotacional de la turbina de fibra de carbono.

8.5. Análisis panel con turbinas de fibra de carbono

Se vio en el punto 8.4 que el cambio de material es conveniente para el propósito, sin embargo se propone realizar la misma simulación para los 4 prototipos de panel, esta vez con fibra de carbono en epóxico, para ver si se presentan mejoras en conjunto.

8.5.1. Configuración acople individual simple

Tensión de Von Mises en [MPa]:

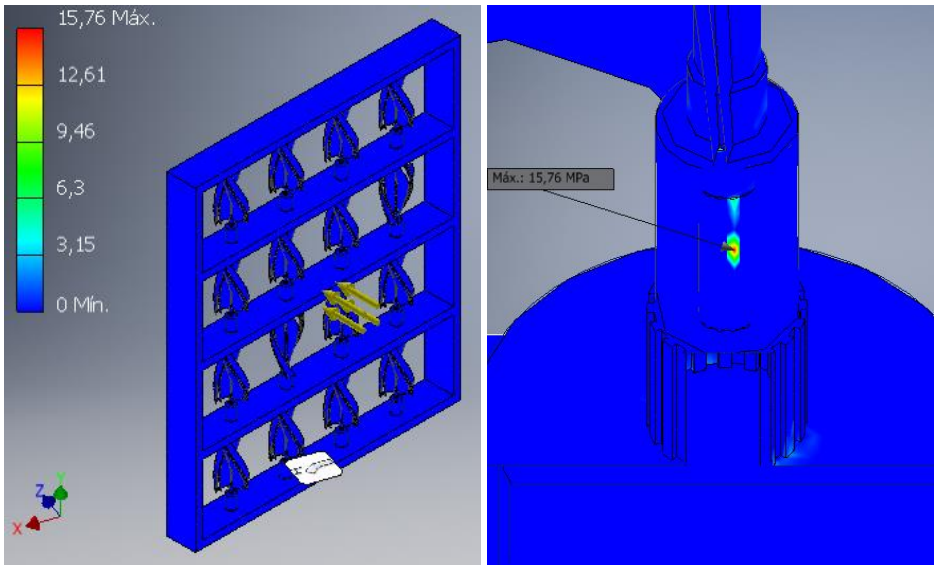

Figura 8.27. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual simple con turbinas de fibra de carbono. En la ilustración de la derecha se muestra una vista en corte del lugar donde se concentra la máxima tensión.

Desplazamiento en [mm]:

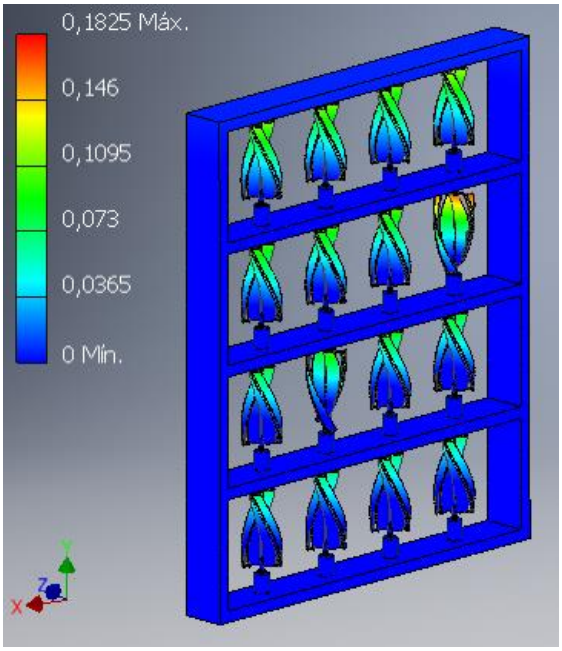

Figura 8.28. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople individual simple con turbinas de fibra de carbono.

Coeficiente de seguridad:

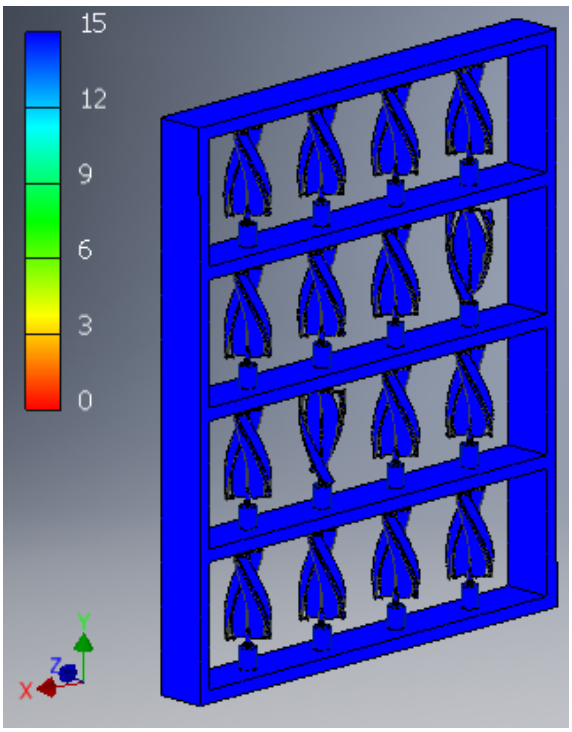

Figura 8.29. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual simple con turbinas de fibra de carbono.

8.5.2. Configuración acople por columnas simple

Tensión de Von Mises en [MPa]:

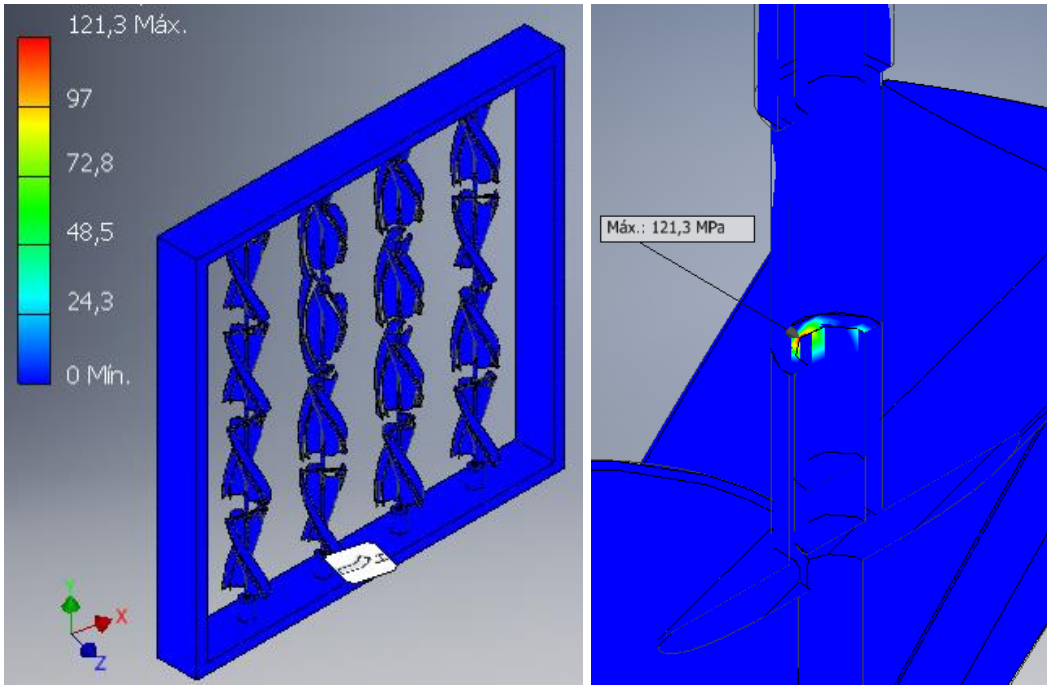

Figura 8.30. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas simple con turbinas de fibra de carbono. A la derecha se muestra un acercamiento del lugar donde se concentra el valor máximo de tensión.

Desplazamiento en [mm]:

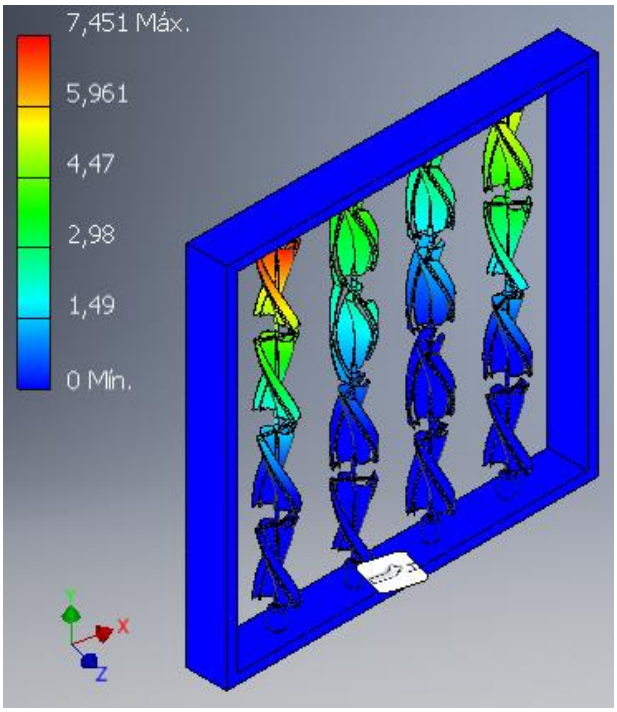

Figura 8.31. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas simple con turbinas de fibra de carbono.

Coeficiente de seguridad:

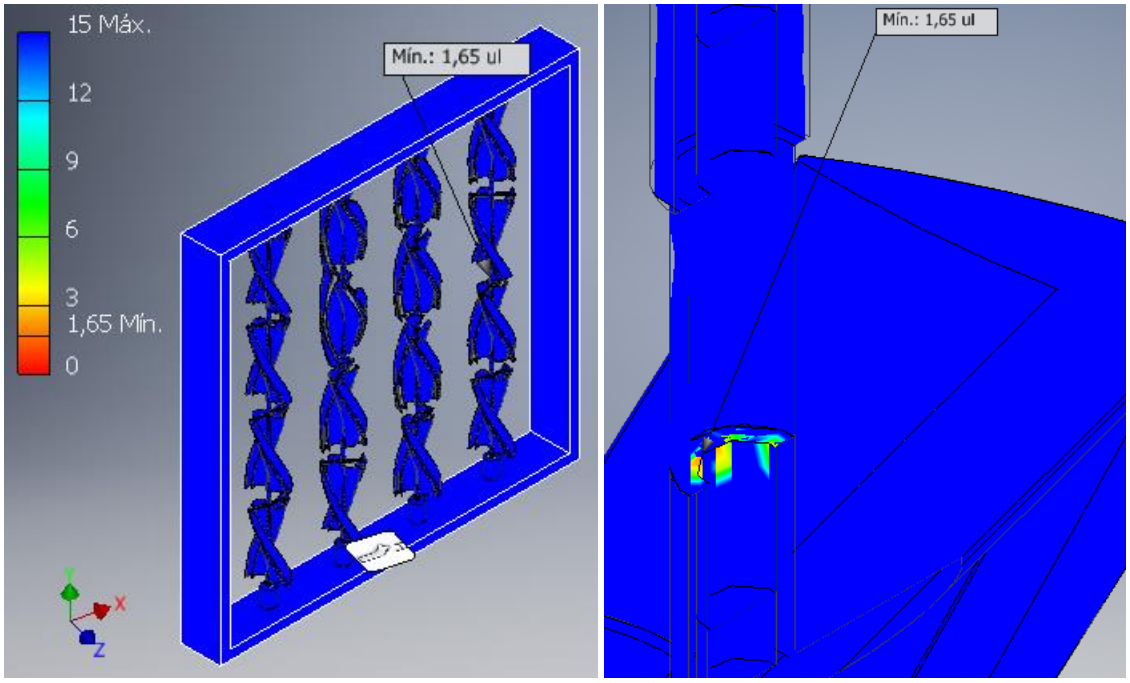

Figura 8.32. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas simple con turbinas de fibra de carbono. En el lado derecho se muestra un acercamiento de la zona con el menor coeficiente de seguridad.

8.5.3. Configuración acople individual doble

Tensión de Von Mises en [MPa]:

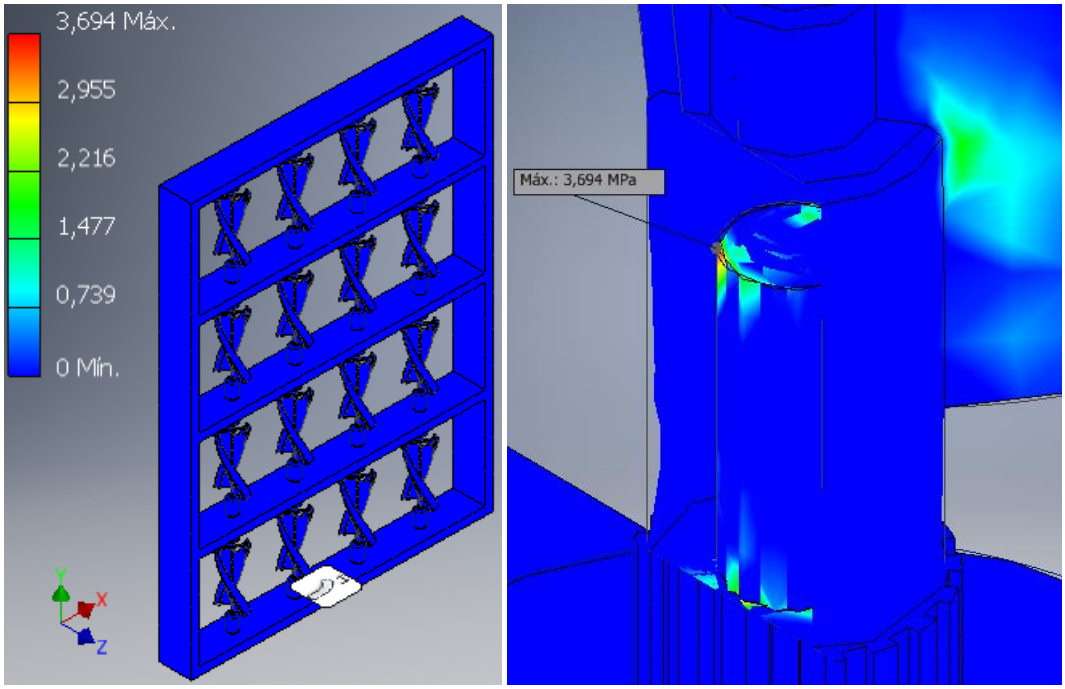

Figura 8.33. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas de fibra de carbono. A la derecha la vista en corte de la zona de máxima tensión.

Desplazamiento en [mm]:

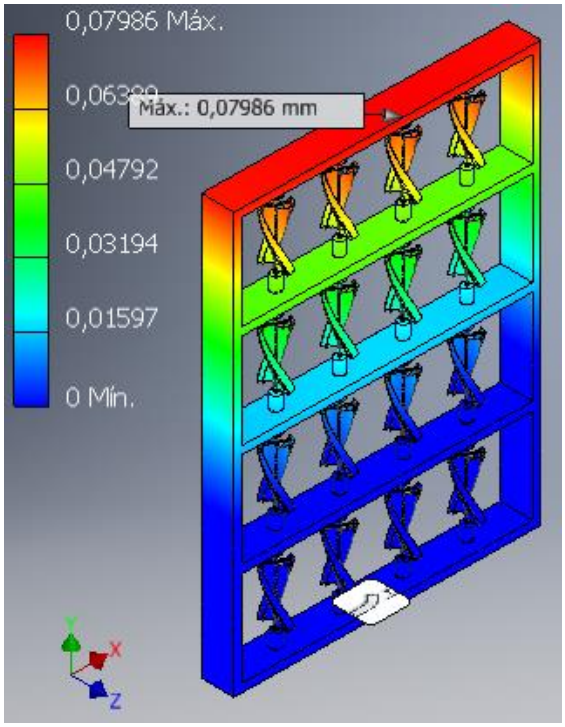

Figura 8.34. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas de fibra de carbono.

Coeficiente de seguridad:

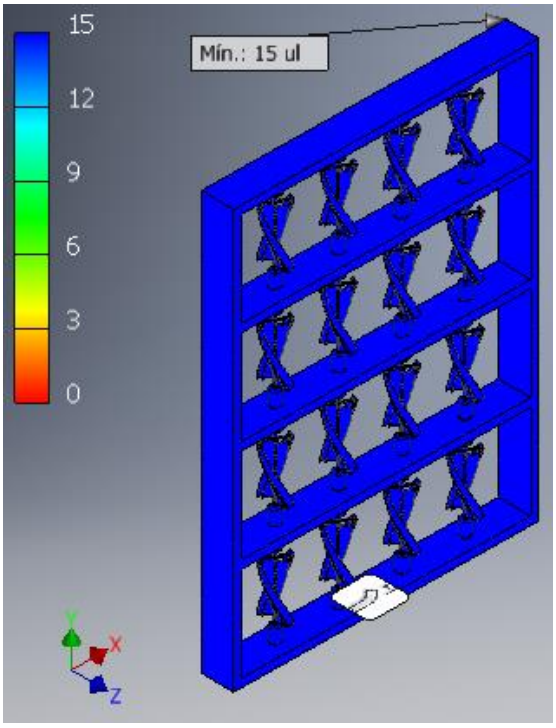

Figura 8.35. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas de fibra de carbono.

8.5.4. Configuración acople por columnas doble

Tensión de Von Mises en [MPa]:

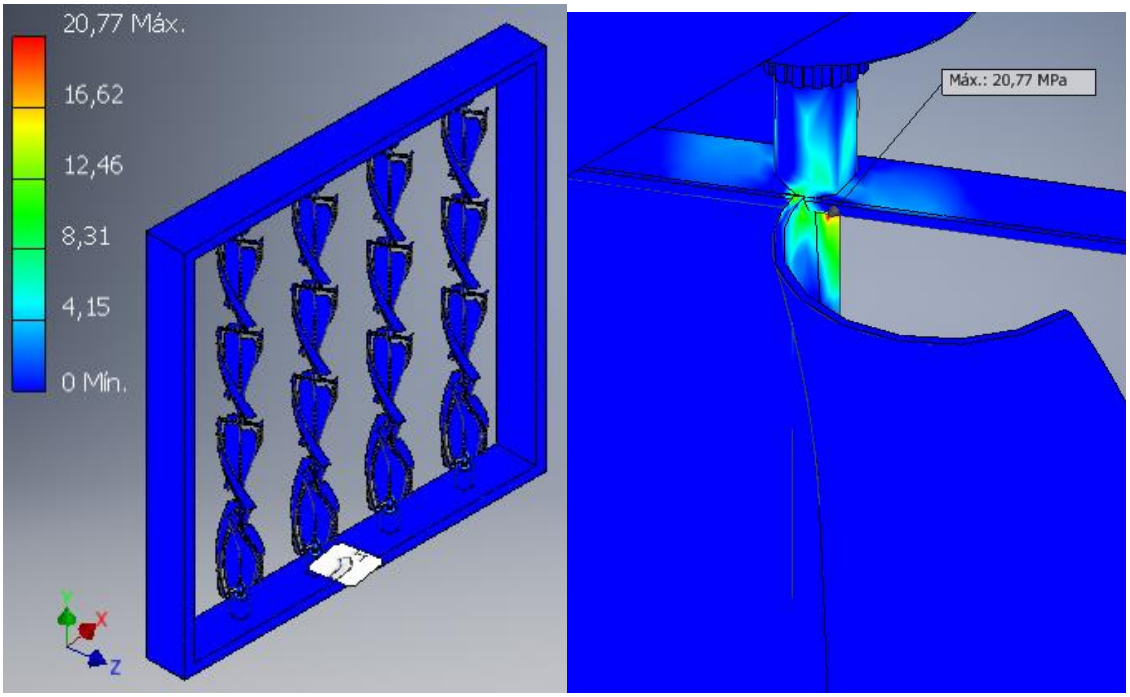

Figura 8.36. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas de fibra de carbono. También se muestra la zona donde se concentra la máxima tensión.

Desplazamiento en [mm]:

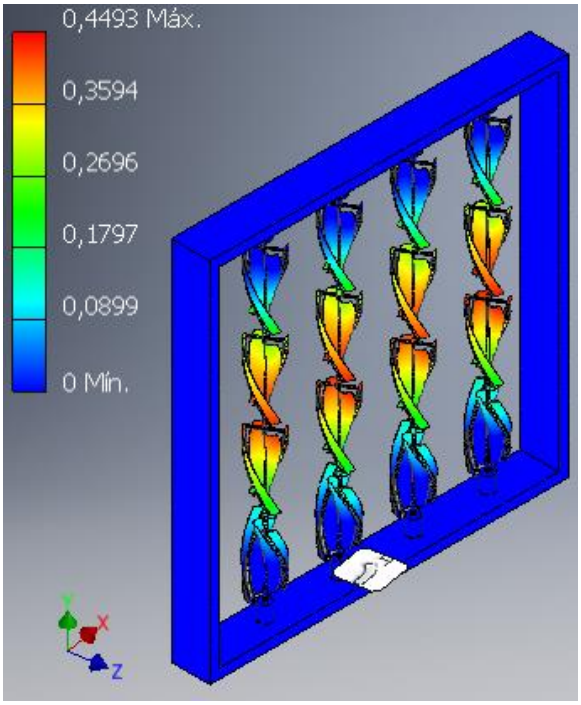

Figura 8.37. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas de fibra de carbono.

Coeficiente de seguridad:

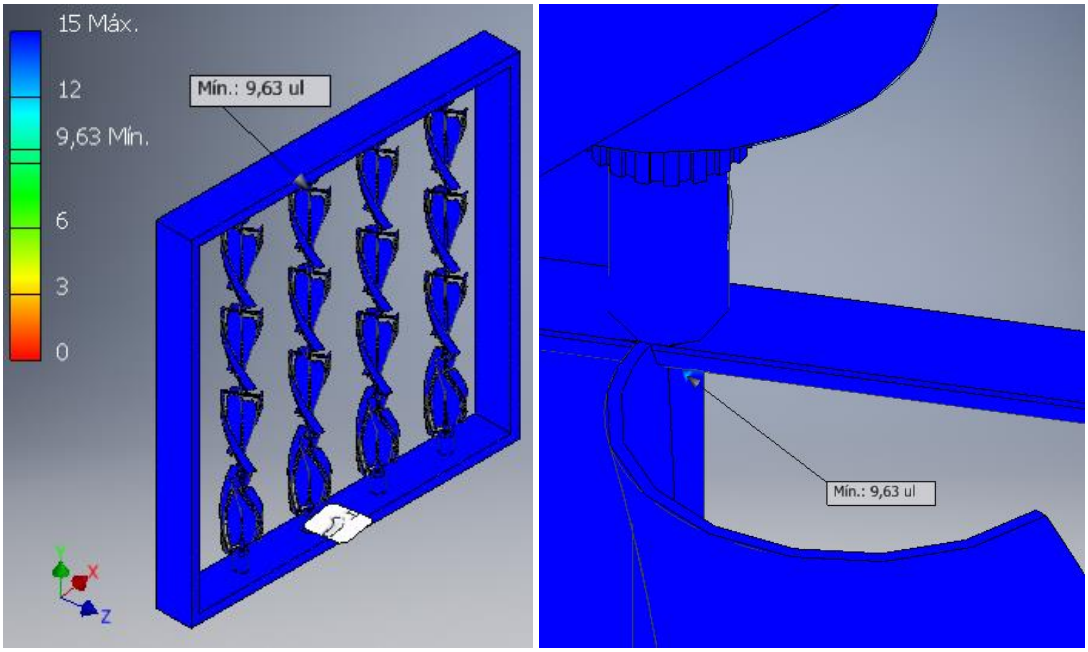

Figura 8.38. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas de fibra de carbono. A la derecha se muestra un acercamiento de la zona donde se encuentra el mínimo coeficiente de seguridad.

8.6. Comparación de los prototipos

En la Tabla 8.2. se presentan los valores obtenidos de las simulaciones de cada prototipo.

		Configuración			
		Individual simple	Columnas simple	Individual doble	Columnas doble
Tensión de Von Mises [MPa]	Max	15,76	121,3	3,694	20,77
	Min	0	0	0	0
Desplazamiento [mm]	Max	0,1825	7,451	0,07986	0,4493
	Min	0	0	0	0
Coeficiente de seguridad	Max	15	15	15	15
	Min	15	1,65	15	9,63

Tabla 8.2. Comparación de los valores de cada prototipo con turbinas de fibra de carbono en epóxico.

Al comparar la Tabla 8.2. con la Tabla 8.1. se puede apreciar que los valores son mucho mejores que en el caso anterior. En las configuraciones individuales no hay coeficiente de seguridad mínimo, las tensiones bajan, y los desplazamientos son despreciables. A excepción de la configuración de columnas simple, las demás poseen desplazamientos máximos de menos de 1 [mm], lo que indica que el material es el adecuado para estas condiciones. En general todas las configuraciones son aceptables, sin embargo, a pesar de que el acople por columnas simple mejoró sus valores, sigue siendo el que presenta más problemas, por lo tanto es prudente descartarlo en esta primera instancia. También se descartará el prototipo individual simple, ya que sus valores no se pueden comparar con los del prototipo individual doble. Por lo tanto, en adelante se trabajará con la configuración individual doble, y la configuración por columnas doble.

Por otro lado, del análisis de los puntos 8.1 y 8.4, se pudo evidenciar un problema en la turbina, ya que en la parte inferior solo hay conexión entre los álabes de ambas turbinas, pero no al eje como en la parte superior, por lo que se propone hacer una pequeña modificación en la turbina, agregando una conexión entre los álabes y el eje.

8.7. Análisis turbina modificada de fibra de carbono

Como se especificó en el punto anterior, se realizó una modificación en la turbina, uniendo los álabes al eje en la parte inferior, tal como se muestra a la derecha en la Figura 8.39.

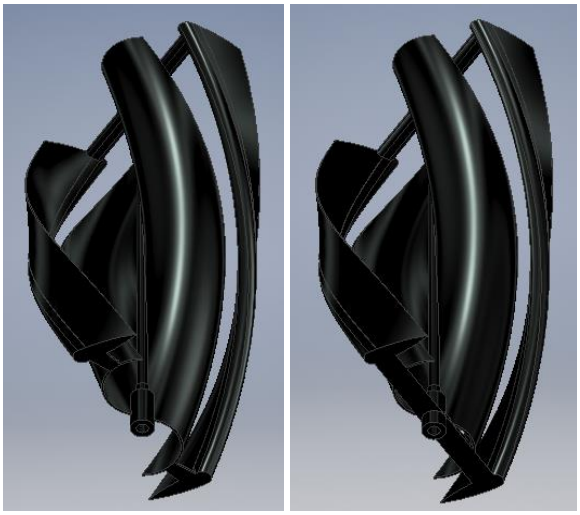

Figura 8.39. Comparación entre las turbinas. A la izquierda la turbina original y a la derecha la turbina modificada.

Con esta nueva turbina se procedió a realizar las mismas simulaciones, para ver el comportamiento con este cambio, considerando el material fibra de carbono epóxico.

8.7.1. Simulación estática

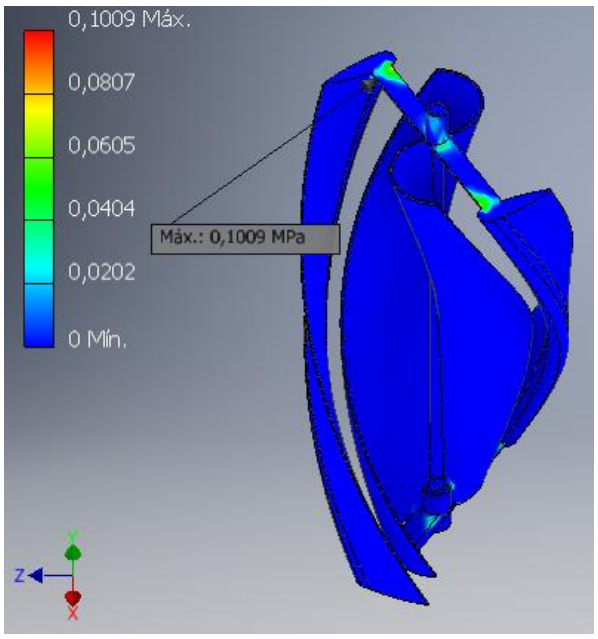

Figura 8.40. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación estática de la turbina modificada.

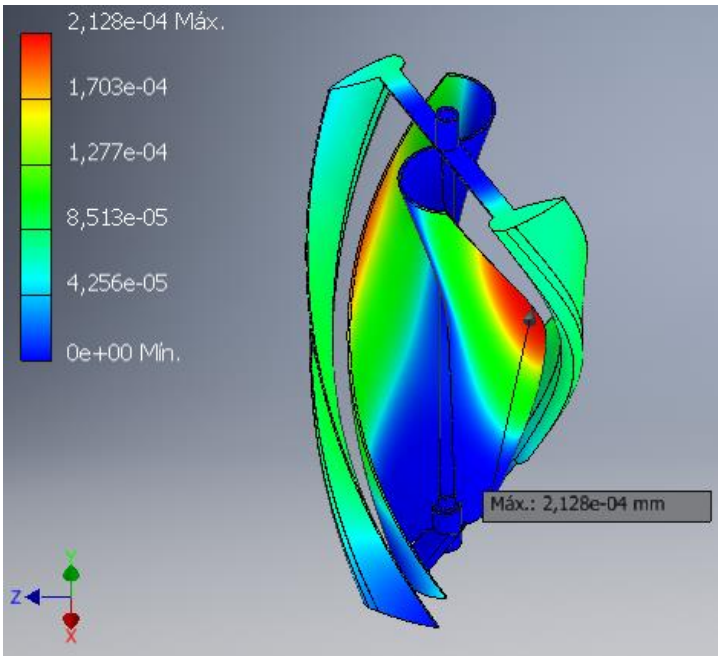

Figura 8.41. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación estática de la turbina modificada.

Tanto la tensión de Von Mises como el desplazamiento se mantienen prácticamente iguales respecto a la turbina original en fibra de carbono, por lo que no se puede decir si hay una mejora.

8.7.2. Simulación rotacional

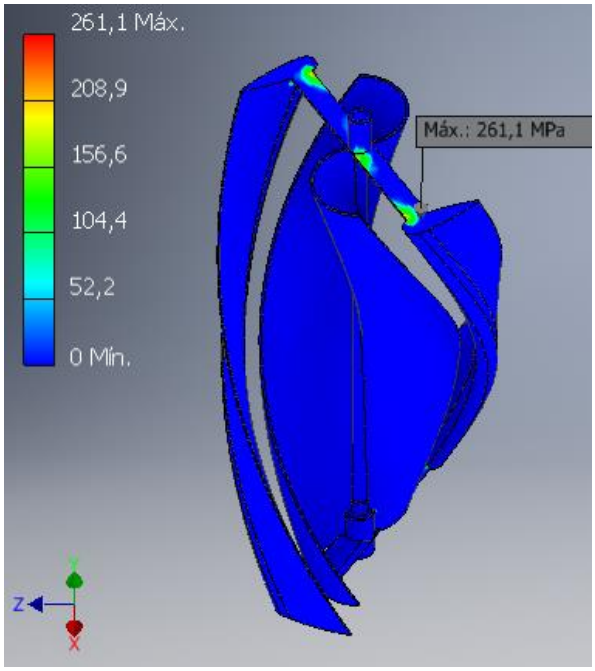

Figura 8.42. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación rotacional de la turbina modificada.

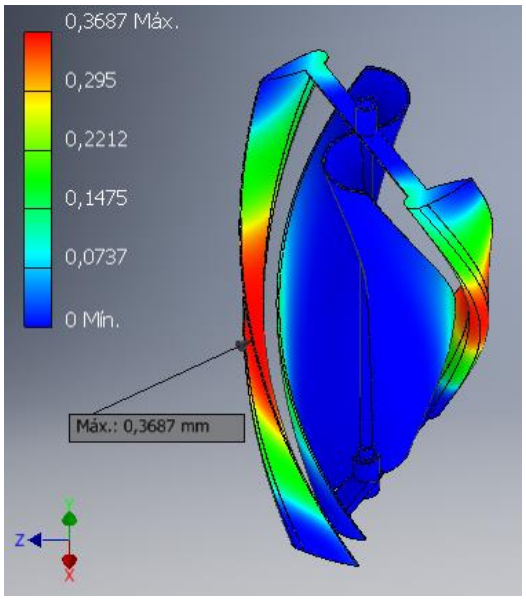

Figura 8.43. Visualización de los desplazamientos obtenidos de la simulación rotacional de la turbina modificada.

En el caso de esta simulación si se puede apreciar una mejora en los valores de ambos aspectos, por lo que se puede afirmar que esta modificación mejorará la performance de la turbina. En el caso del desplazamiento, éste cae a menos de 1 [mm] lo que sería prácticamente imperceptible.

8.8. Análisis panel con turbina modificada de fibra de carbono

Aunque ya se presentaron mejoras con respecto a la modificación de la turbina, también se procede a simular el panel completo para ver su comportamiento. En este caso, como se afirmó en el punto 8.6, se trabajará con los dos prototipos seleccionados.

8.8.1. Configuración acople individual doble

Tensión de Von Mises en [MPa]:

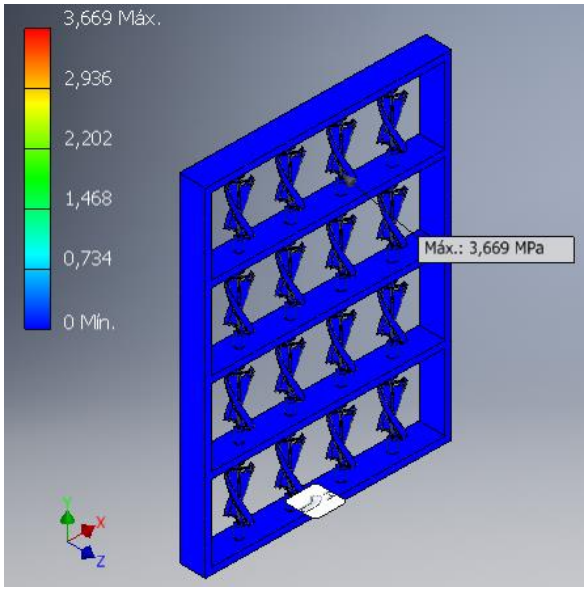

Figura 8.44. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas modificadas.

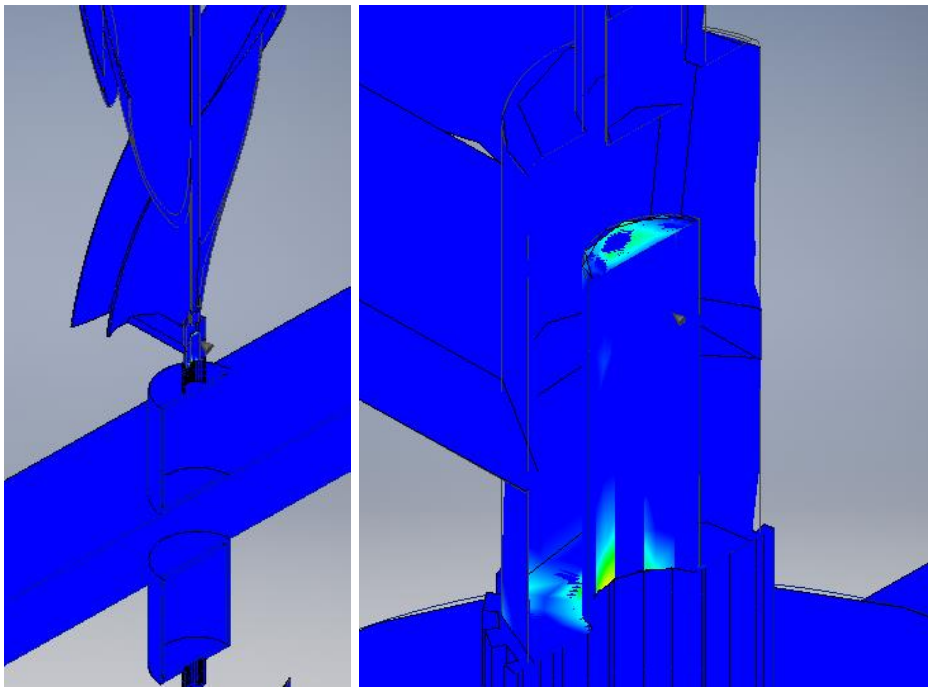

Figura 8.45. Vista en corte donde se produce la máxima tensión en la configuración de acople individual doble con turbinas modificadas.

Desplazamiento en [mm]:

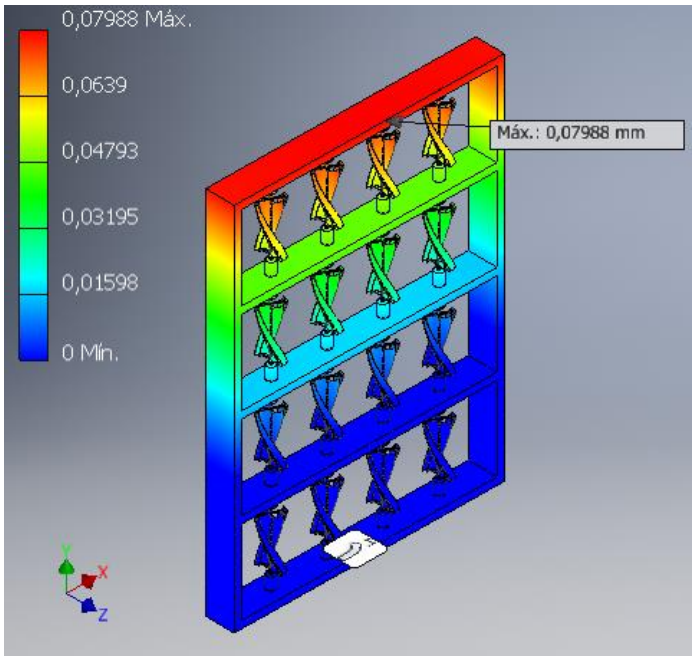

Figura 8.46. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople individual doble con turbinas modificadas.

Coeficiente de seguridad:

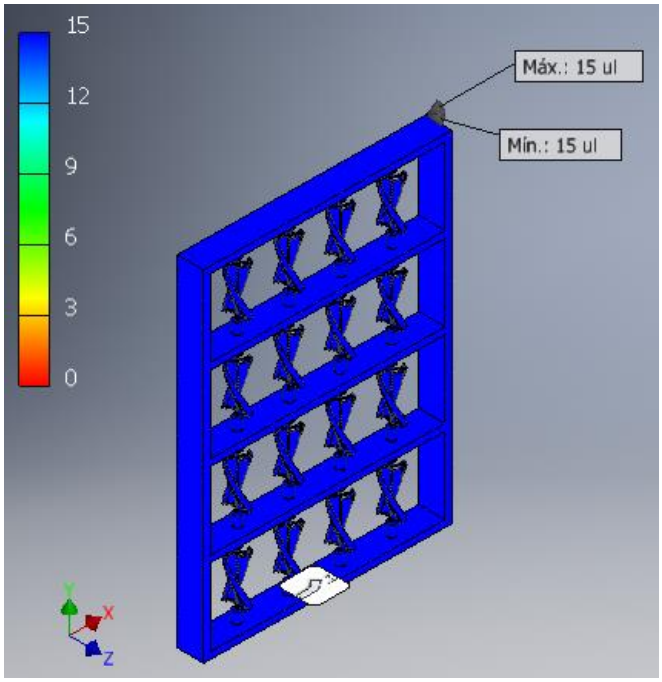

Figura 8.47. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople individual doble con turbinas modificadas.

Los valores de los parámetros considerados se mantienen igual, por lo que la modificación en la turbina no afecta la simulación estática.

8.8.2. Configuración acople por columnas doble

Tensión de Von Mises en [MPa]:

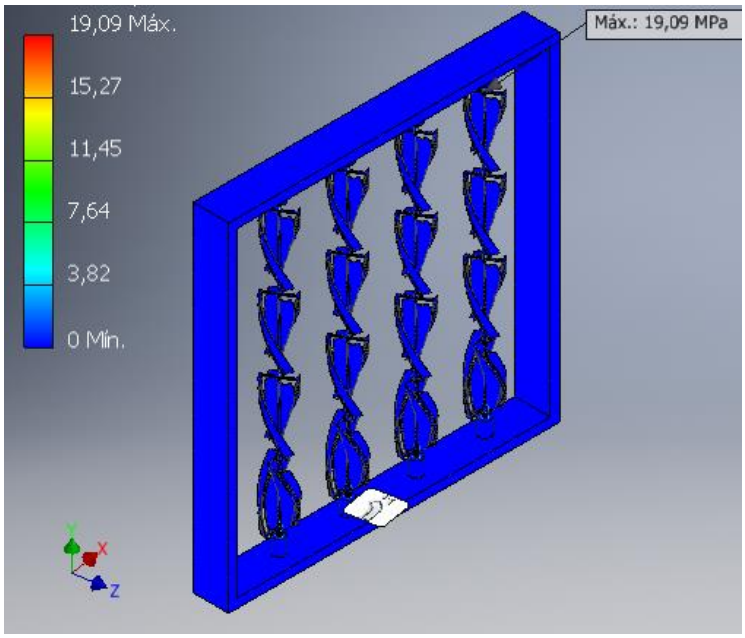

Figura 8.48. Visualización de la Tensión de Von Mises obtenida de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas.

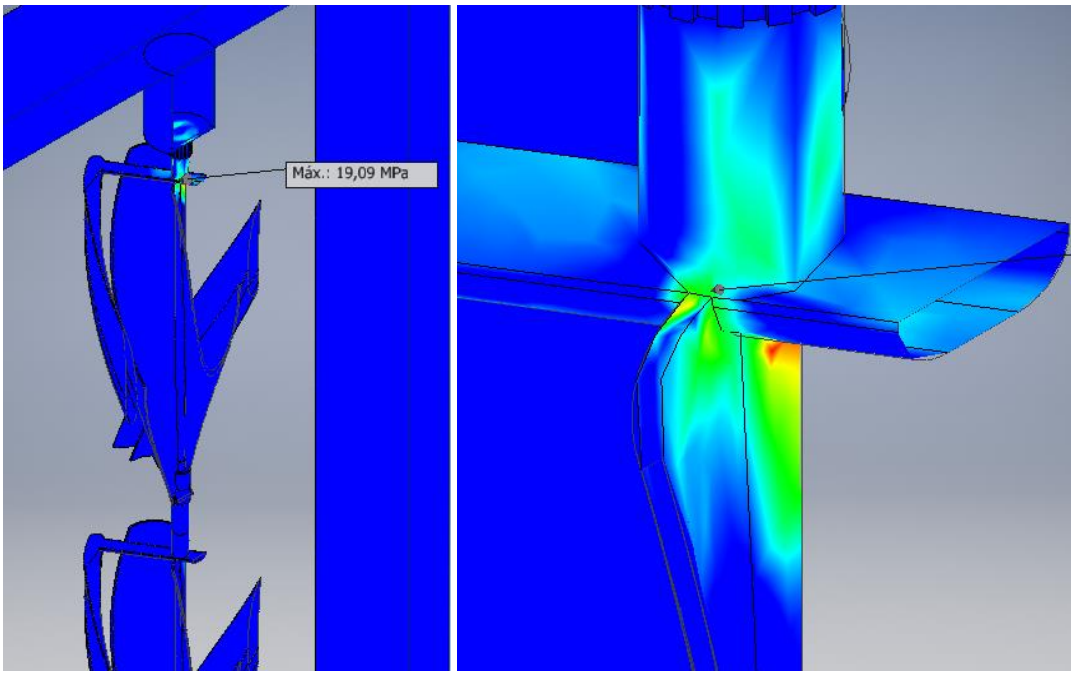

Figura 8.49. Vista en corte donde se produce la máxima tensión en la configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas.

Desplazamiento en [mm]:

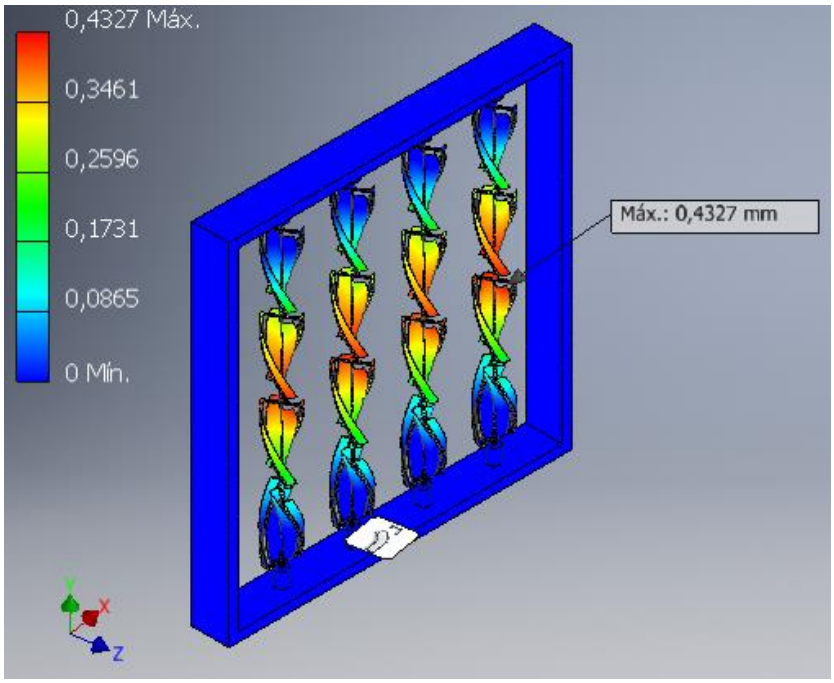

Figura 8.50. Visualización del desplazamiento obtenido de la simulación de configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas.

Coeficiente de seguridad:

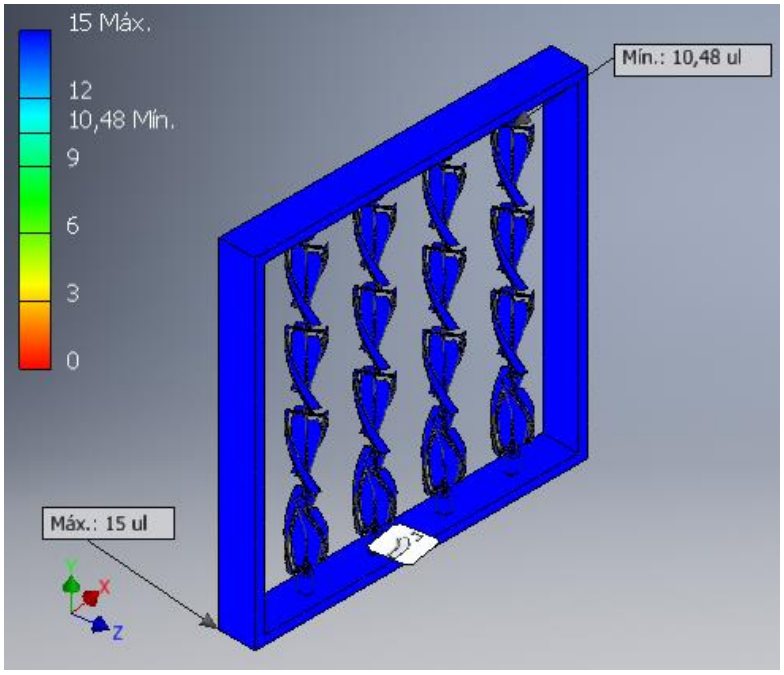

Figura 8.51. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas.

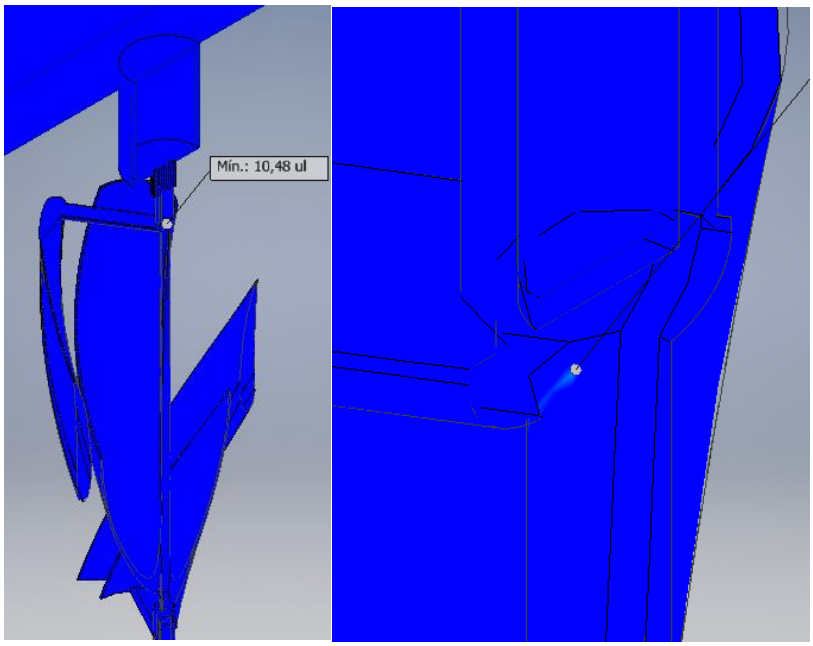

Figura 8.52. Visualización del coeficiente de seguridad obtenido de la simulación de la configuración de acople por columnas doble con turbinas modificadas.

A diferencia de la configuración individual doble, en este caso se presenta una leve mejoría en los valores, aunque no son tan considerables. Sin embargo el hecho de que no se vean afectados negativamente es significativo, ya que se puede confiar en esta modificación, la cual si bien no va a generar un cambio a nivel estático, si lo hará rotacionalmente, tal como se vio en la simulación rotacional de la turbina.

9. Análisis de fluidos

Para analizar la interacción entre el fluido y el panel, se utilizó el software "CFD 2021" de Autodesk. Para realizar las simulaciones se recreó un túnel de viento, cuyas dimensiones fueron variando, de forma de que las paredes no afectaran la interacción y de que se pudiera observar el desarrollo del flujo. En la Figura 9.1 se puede observar el diseño general de las simulaciones.

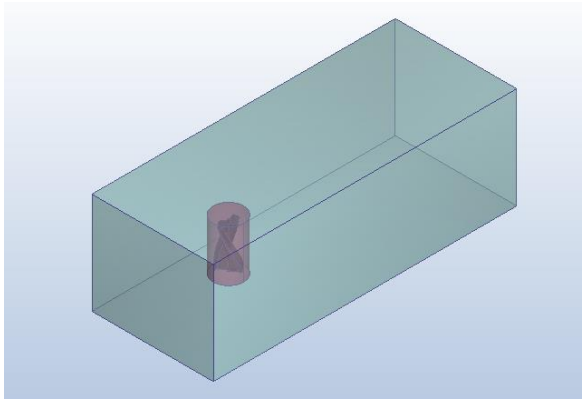

Figura 9.1. Diseño general a simular en CFD Autodesk. El diseño corresponde a las simulaciones realizadas en el apartado 9.1.

A continuación se presenta el procedimiento para realizar las simulaciones.

a) **Herramientas de Geometrías**
El primer paso para crear la simulación es abrir una geometría realizada previamente en Inventor u otro programa CAD. Una vez hecho esto, el software permite acceder a este primer paso, donde se tienen disponibles herramientas que proporcionan una forma de modificar el modelo CAD. Para las simulaciones que se realizarán, se utiliza la herramienta de creación de volúmenes externos, para crear el túnel de viento alrededor de la turbina o el panel.

b) **Materiales y dispositivos**
En esta sección se asignan los materiales a las geometrías involucradas en la simulación. Se utiliza fibra de carbono en epóxico para la turbina y aire para el fluido. Por otra parte, como las turbinas deben girar debido al flujo de aire, en esta sección se debe asignar una región rotatoria, esto se realiza al agregar un cilindro que contenga a la turbina, y este cilindro se indica como región rotatoria de giro libre.

c) **Condiciones de borde**
Este paso se refiere a las entradas de la simulación, las cuales permiten conectar el modelo con el entorno de la simulación. Para estas simulaciones se utilizan tres condiciones de borde, una en la entrada del túnel, otra en la salida y por último en las paredes. En la entrada se asigna una velocidad normal y constante a la superficie, y el valor dependerá de la simulación que se esté corriendo. A la salida se asigna presión atmosférica. Y en las paredes se asigna una condición de deslizamiento para evitar que se generen capas límites.

d) **Mallado**
Para la malla se asigna la malla automática en cada caso, y el volumen del túnel (a excepción de lo que está dentro del cilindro) se modifica, cambiando a una malla más refinada que la que entrega la automática, y además que sea uniforme.

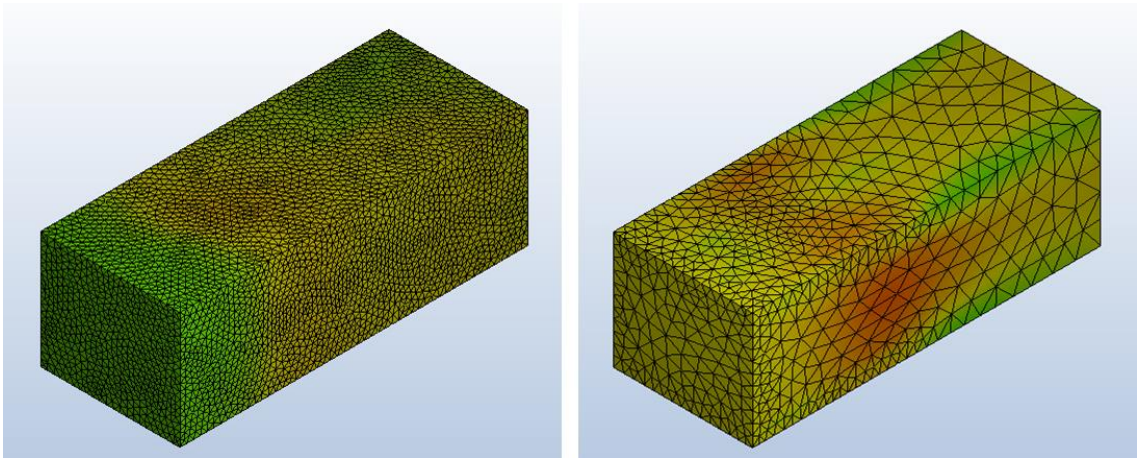

Figura 9.2. Diferencia entre mallados. A la izquierda se muestra la geometría con la malla del túnel más refinada y uniforme, y a la derecha la malla automática.

e) Solve

En esta sección se asignan los parámetros para realizar la simulación, como el estado transiente del problema, los pasos de tiempo, la cantidad de pasos de tiempos, y dada la naturaleza de la simulación se asigna turbulencia al fluido, la cual por lo general será de 10% de intensidad, ya que está dentro del rango para vientos cercanos a la superficie terrestre [56]. Además, se elige el mecanismo de advección apropiado para una región rotatoria.

9.1. Análisis turbina

En el capítulo anterior se realizó un análisis de tensión, con el cual se llegó a la conclusión de realizar una modificación a la turbina, es por ello que se realizarán simulaciones de CFD, variando la velocidad de entrada al túnel. Se utilizará 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, y 15 m/s. El detalle de estas simulaciones se muestra en la Tabla 9.1

Geometría					
Cantidad de turbinas		1			
Túnel	Alto [mm]	500			
	Ancho [mm]	600			
	Largo [mm]	1500			
Cilindro	Alto [mm]	250			
	Diámetro [mm]	150			
Ubicación turbina		¼ del túnel			
Material					
Turbina		Fibra de carbono en epóxico			
Túnel		Aire			
Cilindro		Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 272,835 [kg.mm2]			
Condiciones de borde					
Velocidad de entrada (normal) [m/s]		1	5	10	15
Presión estática de salida [Pa]		0			
Paredes		Slip/Symmetry (deslizamiento)			
Solve					
Solution mode		Transient			
Time Step Size		0,01			

Time steps to run		1000
Flujo		
Compresibilidad		Incompresible
Advección		ADV 5
Turbulencia	Modelo	k-epsilon
	Intensity	10%

Tabla 9.1. Parámetros para resolver la simulación de una turbina variando la velocidad de entrada.

En la Figura 9.3 y Figura 9.4, se muestran los perfiles de velocidad y presión respectivamente para cada velocidad utilizada, además se muestra la evolución que tienen al mostrar el perfil a la mitad del tiempo simulado, 5 segundos, y al final, 10 segundos.

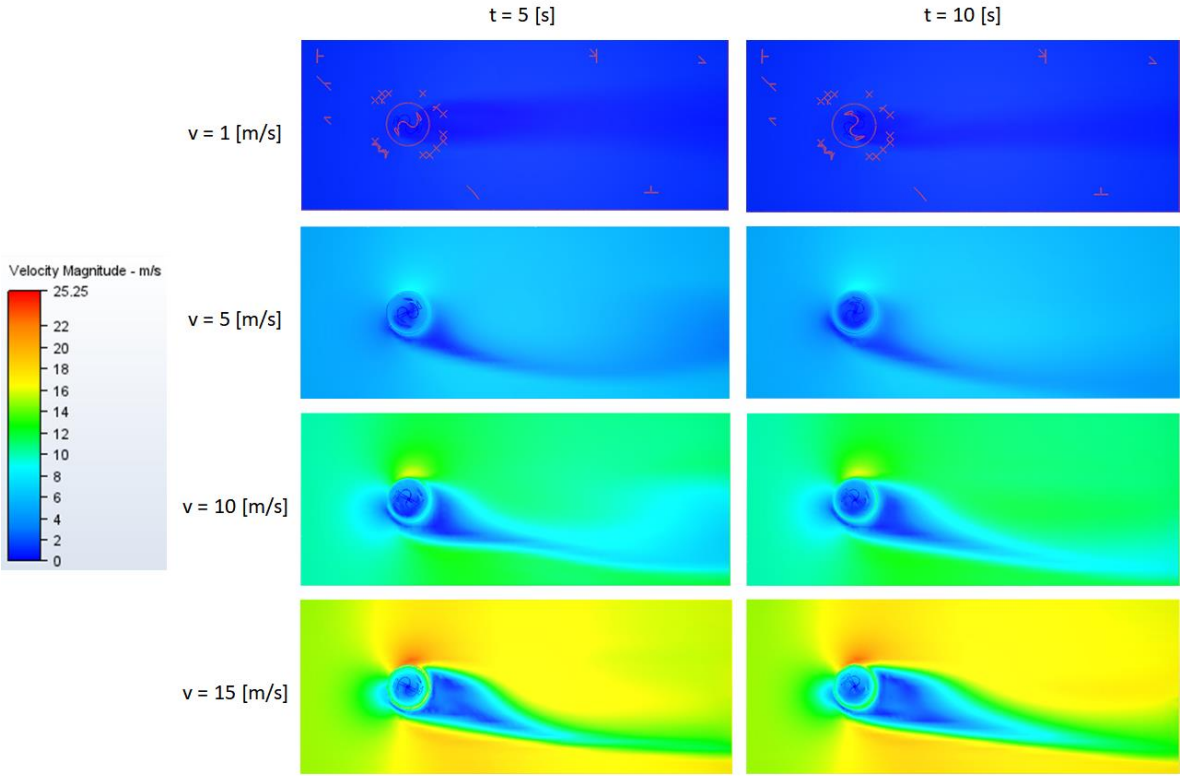

Figura 9.3. Perfiles de velocidad variando la velocidad de entrada para la simulación de una turbina, a los 5 [s] y 10 [s].

En la Figura 9.3. se puede observar un aumento de la velocidad en los costados de la turbina, lo cual se mantiene prácticamente constante aguas abajo, manifestando su punto más alto en un costado de la turbina, específicamente en la parte alta de cada imagen. Además antes de llegar a la turbina también se observa una merma en la velocidad.

El flujo, luego de pasar por la turbina forma una estela, la cual tiende a curvarse hacia la parte baja de la imagen por el sentido de giro de la turbina.

En la Figura 9.4 se observa un aumento en los valores, mínimos y máximos, de presión en los perfiles a medida que se aumenta la velocidad de entrada. La presión es mayor aguas arriba, sobre todo el punto antes de tocar a la turbina. Por el contrario, el punto opuesto registra la menor presión en el perfil. La línea entre los dos puntos forma un ángulo diferente a los 90° esperados, debido al giro de la turbina.

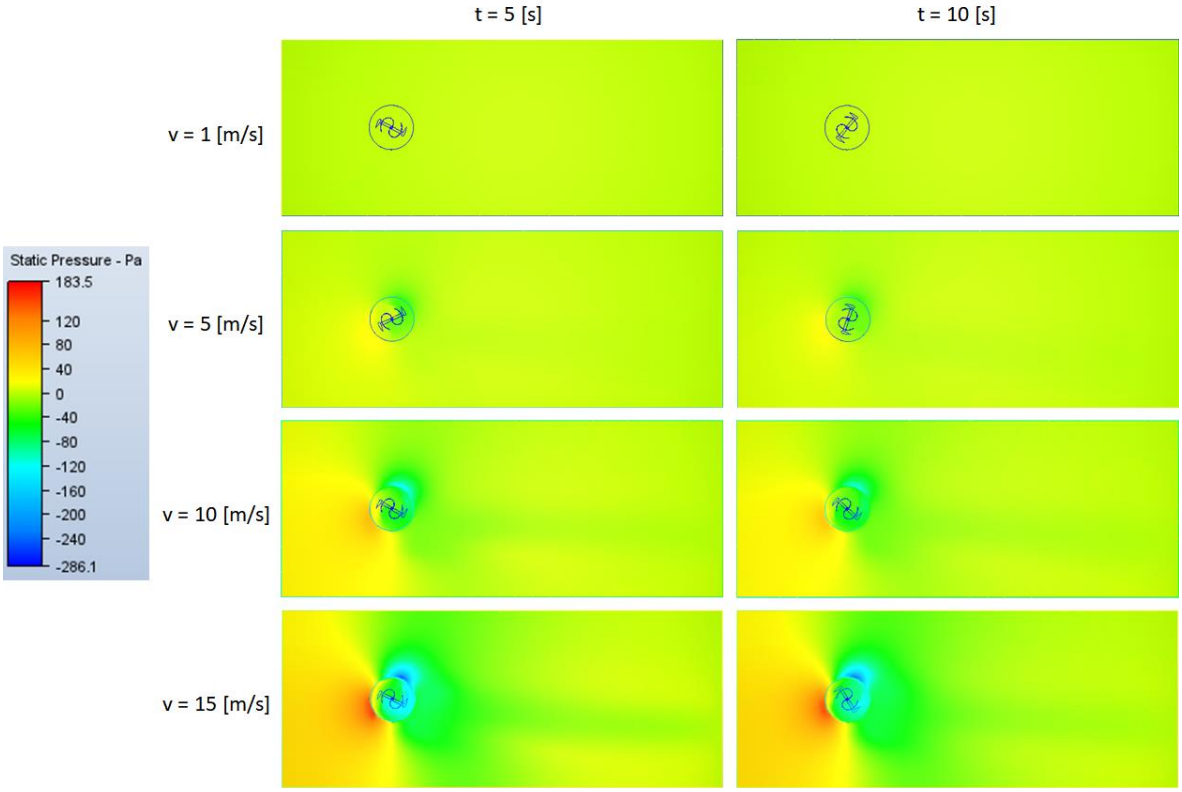

Figura 9.4. Perfiles de presión variando la velocidad de entrada para la simulación de una turbina, a los 5 [s] y 10 [s].

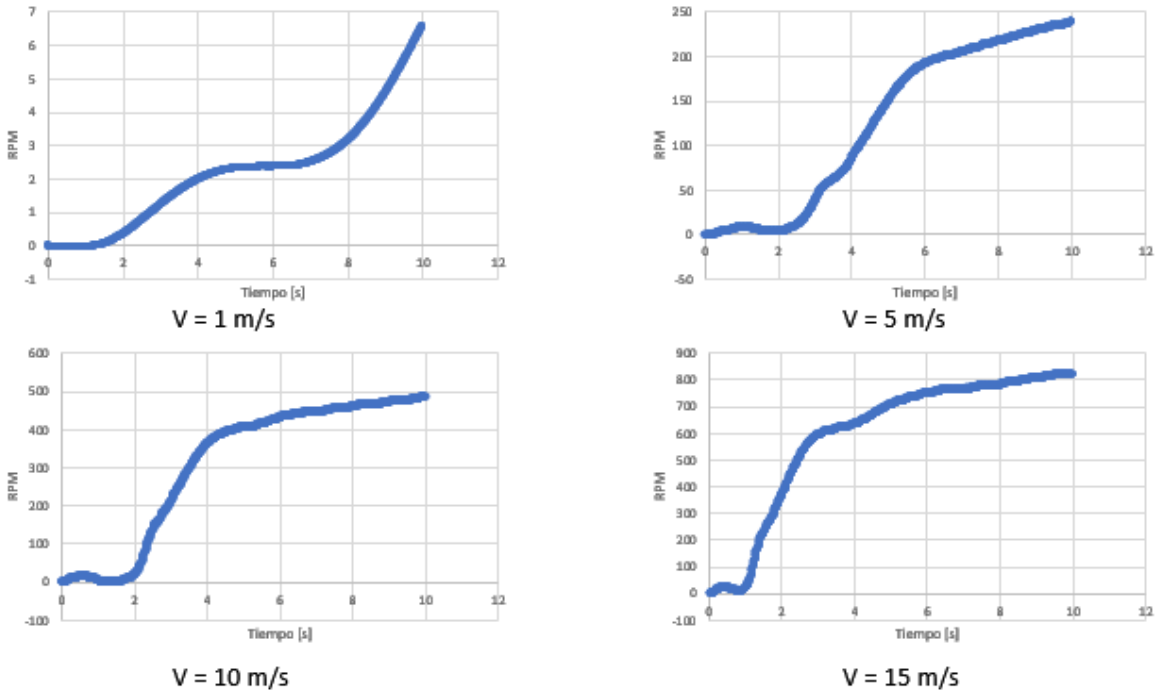

Figura 9.5. Velocidad rotacional vs tiempo obtenida de la simulación de una turbina para cada velocidad de entrada.

Respecto a la Figura 9.5, se observa un aumento de las RPM a medida que se aumenta la velocidad de entrada al túnel. Las curvas suelen tener una difícil partida en los primeros dos segundos, sin embargo luego de esto la curva se torna empinada hasta cierto punto, donde después toma una menor inclinación, pero aun aumentando las RPM.

Un factor importante en el estudio de las turbinas es la turbulencia, y ver como se ve afectada por distintos niveles. Es por eso que las siguientes simulaciones se realizarán variando la intensidad de la turbulencia, manteniendo constante la velocidad de entrada en 10 [m/s]. En la Tabla 9.2 se muestra el detalle de las simulaciones.

Geometría						
Cantidad de turbinas		1				
Túnel	Alto [mm]	500				
	Ancho [mm]	600				
	Largo [mm]	1500				
Cilindro	Alto [mm]	250				
	Diámetro [mm]	150				
Ubicación turbina		¼ del túnel				
Material						
Turbina		Fibra de carbono en epóxico				
Túnel		Aire				
Cilindro		Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 272,835 [kg.mm2]				
Condiciones de borde						
Velocidad de entrada (normal) [m/s]		10				
Presión estática de salida [Pa]		0				
Paredes		Slip/Symmetry (deslizamiento)				
Solve						
Solution mode		Transient				
Time Step Size		0,01				
Time steps to run		1000				
Flujo						
Compresibilidad		Incompresible				
Advección		ADV 5				
Turbulencia	Modelo	k-epsilon				
	Intensity	1%	5%	10%	15%	20%

Tabla 9.2. Parámetros para resolver la simulación de una turbina variando la intensidad de turbulencia.

Los resultados obtenidos se presentan en las Figura 9.6, 9.7 y 9.8.

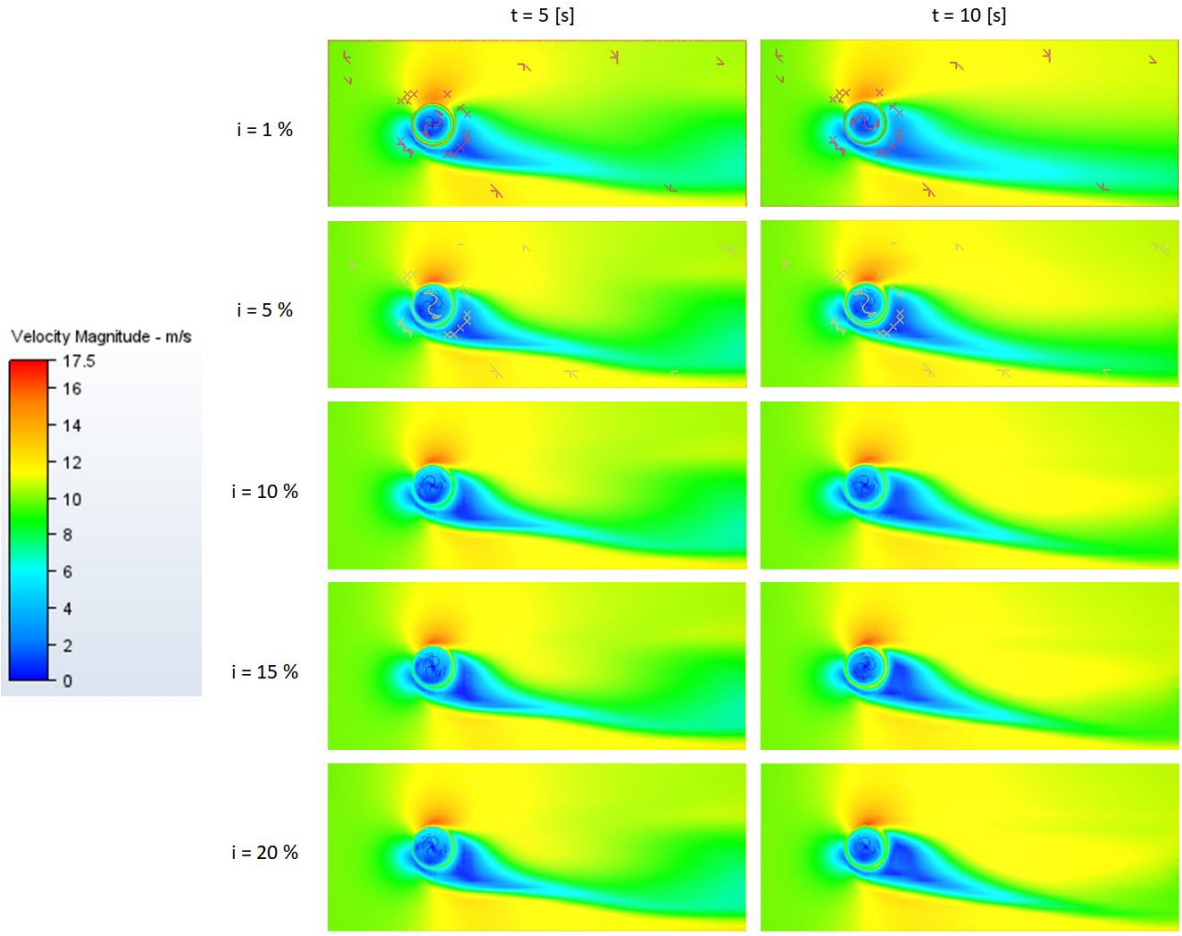

Figura 9.6. Perfiles de velocidad variando la intensidad de turbulencia para la simulación de una turbina, a los 5 [s] y 10 [s].

Observando los perfiles de velocidad, no se aprecian diferencias a los 5 segundos, y en los 10 segundos ocurre algo similar, a excepción del perfil de 1% de intensidad, el cual muestra una estela un poco más larga.

Con respecto a los perfiles de presión se muestra una leve diferencia también en los perfiles de 1% de intensidad, donde los puntos donde se concentran las máximas y mínimas presiones son de un color más intenso, lo que implicaría tener una mayor diferencia de presiones, y por ende una mayor potencia.

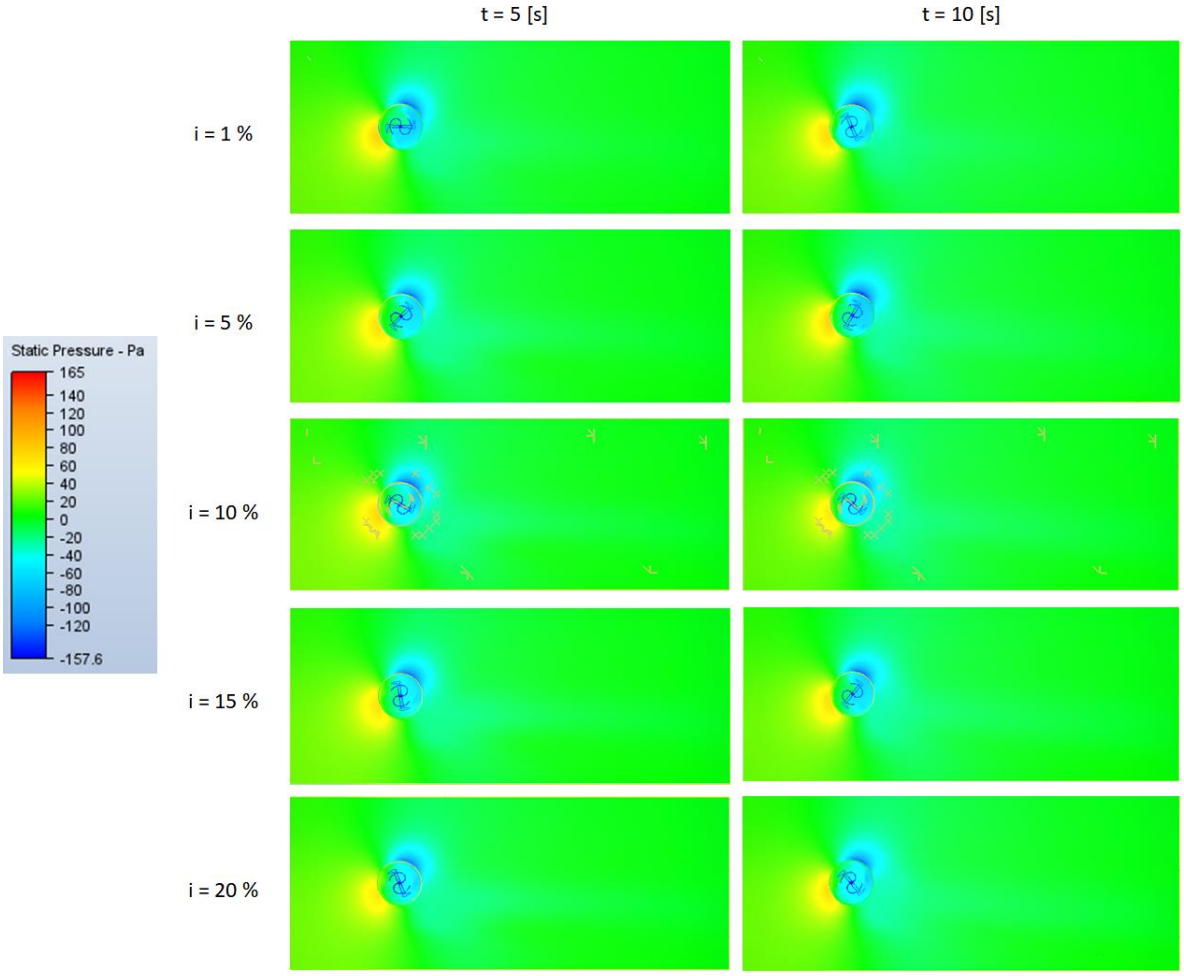

Figura 9.7. Perfiles de presión variando la intensidad de turbulencia para la simulación de una turbina, a los 5 [s] y 10 [s].

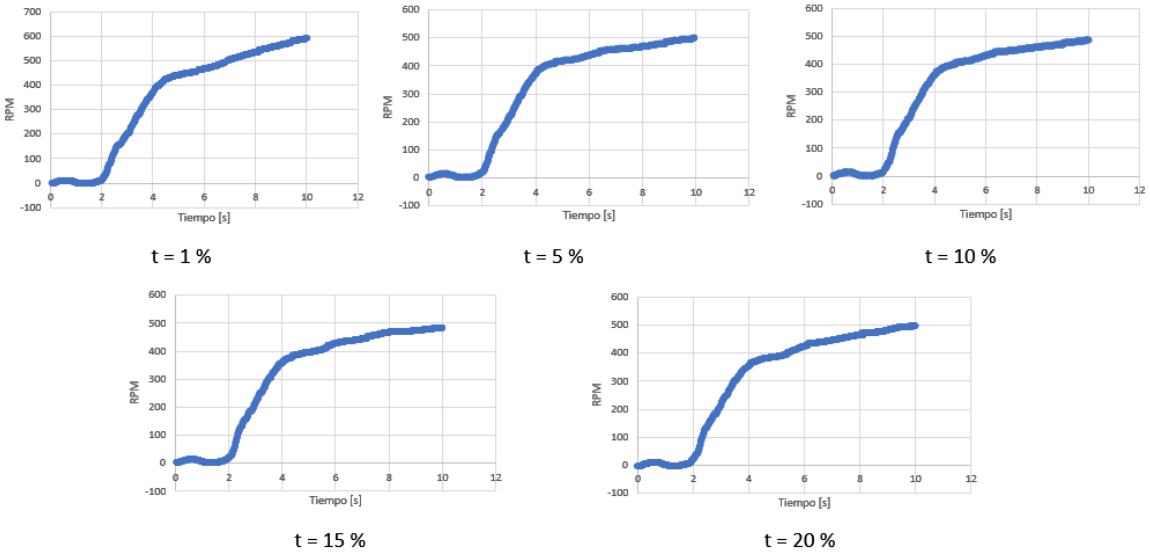

Figura 9.8. Velocidad rotacional vs tiempo obtenida de la simulación de una turbina para cada intensidad de turbulencia.

Se observa un perfil similar para un 5%, 10%, 15% y 20%, donde a los 2 segundos la curva empieza a tomar valores más elevados hasta llegar a cerca de 500 RPM. Se observa una diferencia con el gráfico de 1% de intensidad, ya que si bien la forma de la curva es similar a las demás, esta llega a cerca de 600 RPM.

Dado que las diferencias más notorias se registraron para 1% de intensidad, y las demás intensidades poseen valores similares, para las siguientes simulaciones se utilizará una turbulencia de 10% de intensidad, ya que no se ve que afecten demasiado los resultados.

9.2. Análisis distancia entre turbinas

En el panel propuesto se tienen 4 columnas de turbinas una al lado de otra, por lo que la distancia entre ellas podría ser un factor interesante de simular, ya que se pueden afectar entre sí. A continuación a la turbina que se estaba simulando anteriormente se le agregara una turbina a cada lado a la misma distancia, como se muestra en la Figura 9.9. Esta distancia irá cambiando entre cada simulación, como se presenta en el detalle de la Tabla 9.3. Además el ancho del túnel irá cambiando, de acuerdo con la distancia entre turbina que se esté trabajando, manteniendo constante la distancia a los bordes. En este análisis se trabajará con una velocidad de entrada e intensidad de turbina constante, a diferencia de los casos anteriores

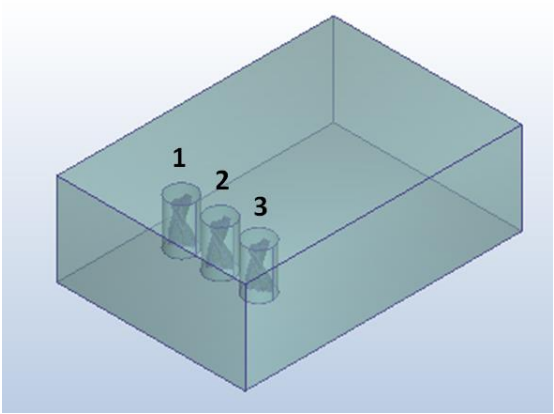

Figura 9.9. Disposición de las turbinas dentro del túnel para la simulación de distancia entre turbinas.

Geometría					
Cantidad de turbinas		3			
Distancia entre centros		210	230	250	270
Túnel	Alto [mm]	500			
	Ancho [mm]	1020	1060	1100	1140
	Largo [mm]	1500			
Cilindros	Alto [mm]	250			
	Diámetro [mm]	150			
Ubicación turbina		¼ del túnel			
Material					
Turbina		Fibra de carbono en epóxico			
Túnel		Aire			
Cilindros		Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 272,835 [kg.mm2]			
Condiciones de borde					
Velocidad de entrada (normal) [m/s]		10			
Presión estática de salida [Pa]		0			

Paredes		Slip/Symmetry (deslizamiento)
Solve		
Solution mode		Transient
Time Step Size		0,01
Time steps to run		1000
Flujo		
Compresibilidad		Incompresible
Advección		ADV 5
Turbulencia	Modelo	k-epsilon
	Intensity	10%

Tabla 9.3. Parámetros para resolver la simulación de distancia entre turbinas.

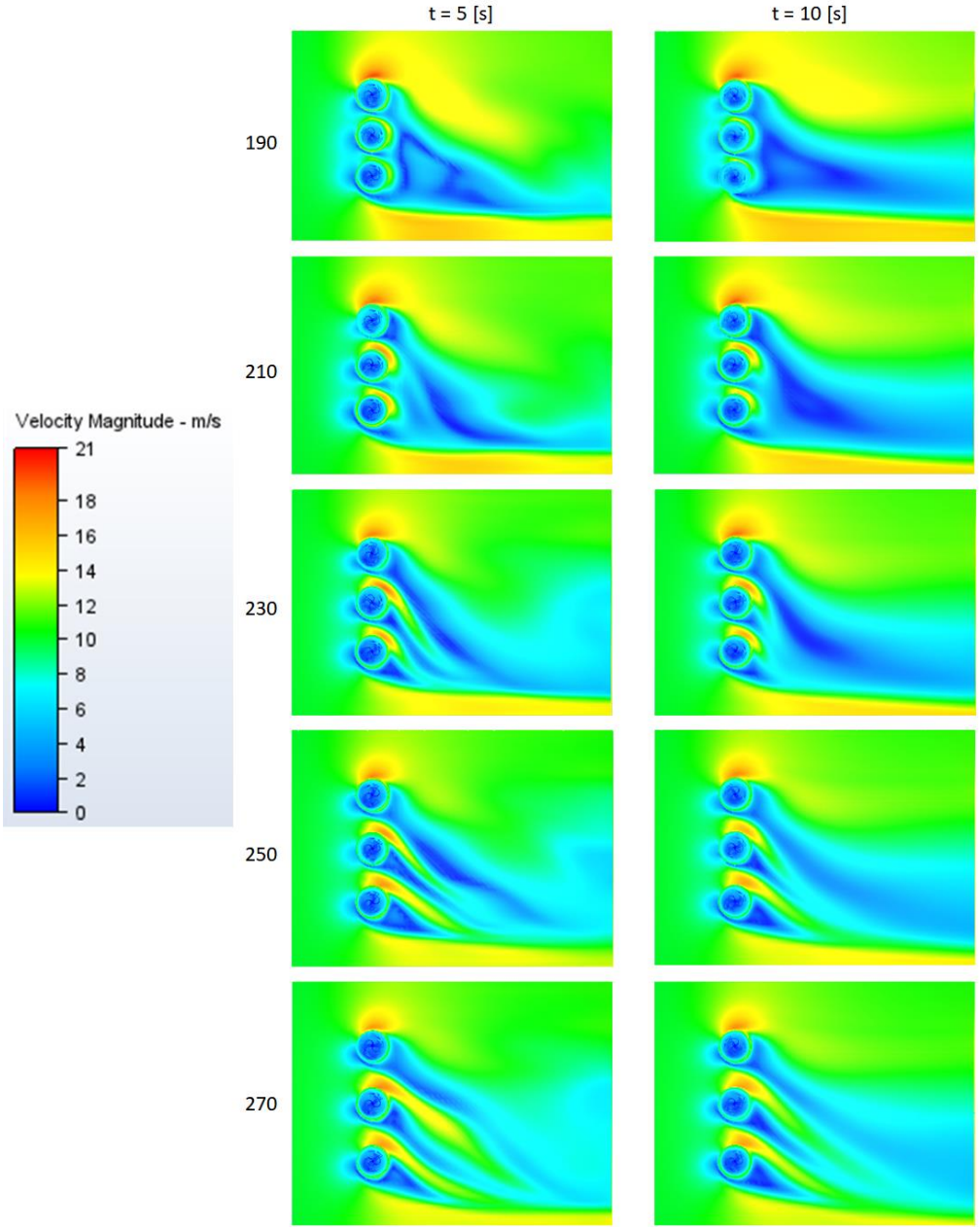

Figura 9.10. Perfiles de velocidad variando la distancia entre las turbinas, a los 5 [s] y 10 [s].

De la Figura 9.10. podemos ver que las estelas de los perfiles se curvan hacia abajo al igual que lo hacían en la simulación de una turbina, pero dado que son tres esta curva se ve más pronunciada. Además, dado esto las estelas tienden a juntarse, en especial para menores distancias entre turbinas. En los costados entre las turbinas se observan puntos rojizos, que es donde más alta es la velocidad, a excepción de los perfiles de una distancia de 190 [mm]. En los perfiles de 10 segundos se ve un flujo más desarrollado, en el cual se ve que el ancho de la estela en conjunto es menor a medida que se disminuye la distancia entre las turbinas.

Es importante destacar que si bien no se ve que las estelas afecten otras turbinas, la simulación se realiza bajo un caso hipotético donde se supone un flujo normal a la entrada del túnel, en un caso real el flujo de viento puede venir en cualquier dirección, por lo que si el viento llega en un ángulo muy pronunciado, la estela producida por una turbina puede afectar directamente las demás de la fila.

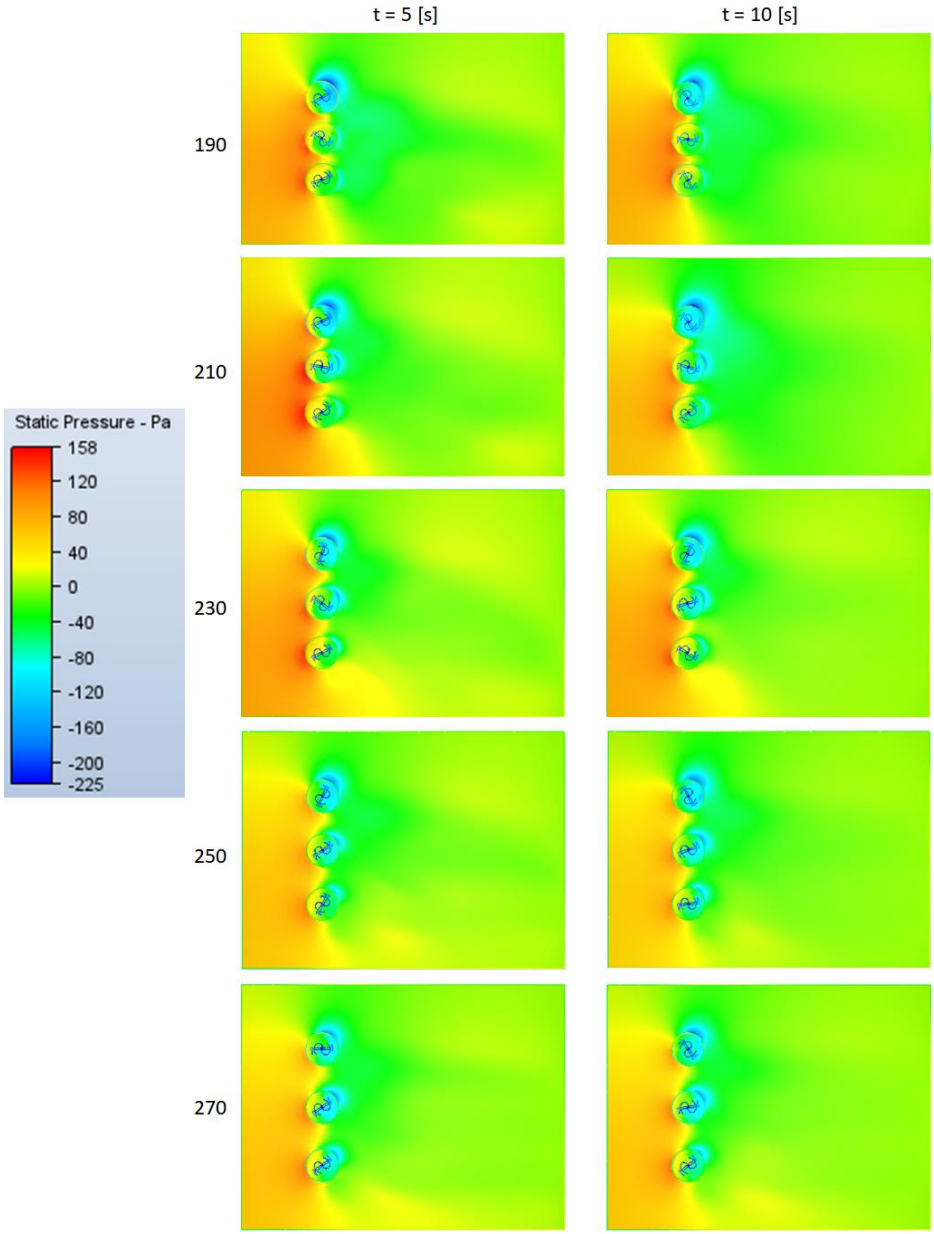

Figura 9.11. Perfiles de presión variando la distancia entre las turbinas, a los 5 [s] y 10 [s].

Al igual que en las simulaciones para una turbina, los puntos de máxima presión se encuentran antes de entrar en la turbina, de color rojizo en las imágenes. Y el de mínima presión se encuentra en el lado opuesto de la turbina. La línea que une ambos puntos se encuentra con una leve inclinación respecto de la horizontal debido al giro. En la Figura 9.11 estos puntos poseen mayores valores (o menores en el caso de presiones negativas) a medida que se disminuyen las distancias entre las turbinas.

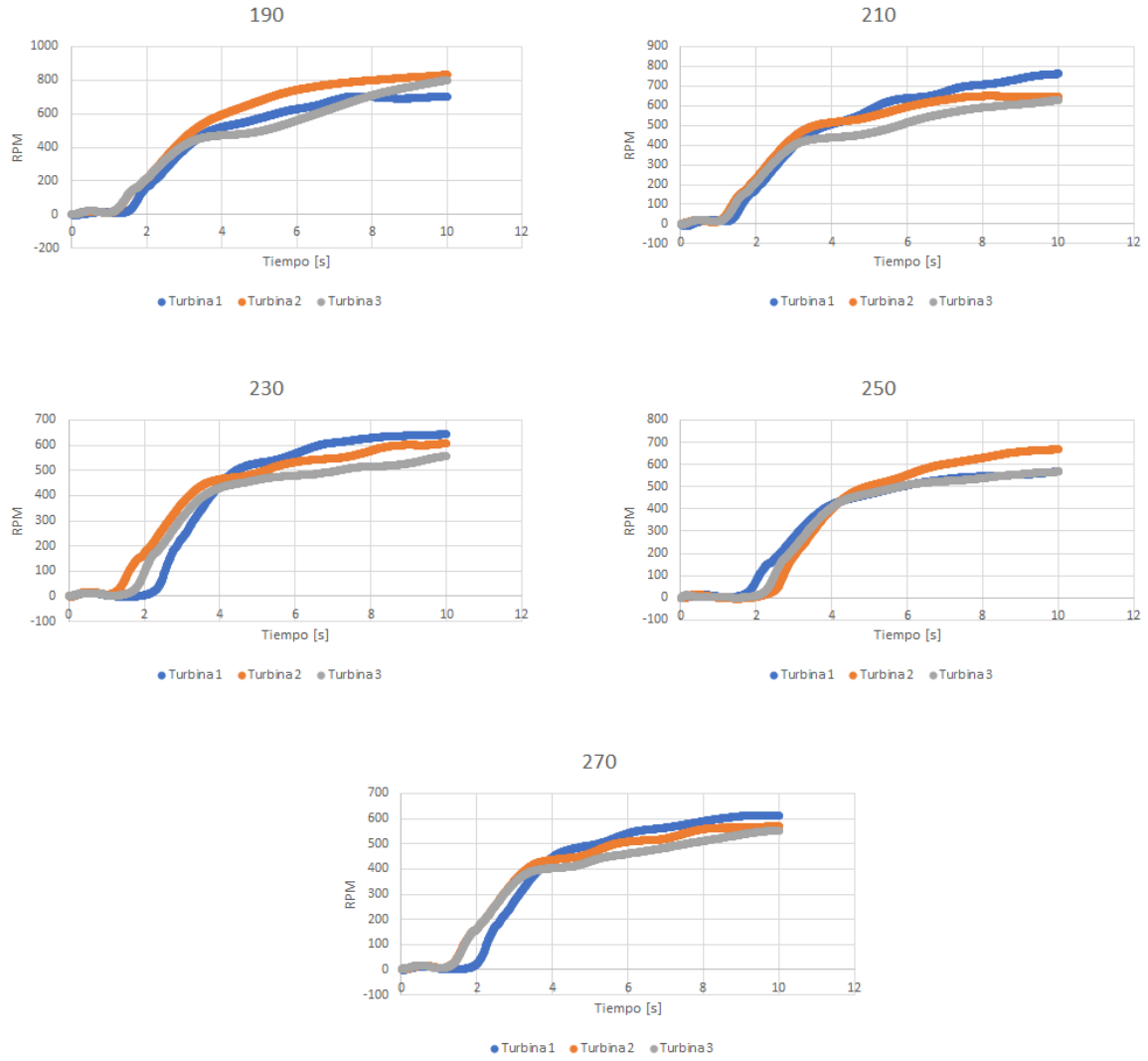

Figura 9.12. Velocidad rotacional vs tiempo para cada distancia entre turbinas.

Respecto a la velocidad rotacional observada en la Figura 9.12, como era de esperar, se aprecia que las turbinas no rotan exactamente iguales. Un aspecto importante de notar es lo que demora en tomar una pendiente las curvas, ya que lo que se busca es que las turbinas tomen mayores RPM los más rápido posible, ya que así producirán más rápido energía. Dado esto, y los análisis de los perfiles de presión y velocidad, se puede descartar el caso de 230, 250 y 270 [mm].

Observando los gráficos de 190 y 210 [mm], se ve que ambos empiezan a tomar mayores RPM antes de los dos segundos, siendo el de 210 [mm] levemente mejor. Por otro lado, vemos que en el caso de 190 [mm], dos de las turbinas llegan a 800 RPM y una a 700 RPM, y en 210 [mm], una llega a 800

RPM y dos a 650 RPM, lo que daría cierta ventaja al caso de 190 [mm]. Sin embargo si se observan las curvas en conjunto, el caso 210 [mm] es mejor ya que las diferencias entre las curvas de las tres turbinas son menores, es decir las RPM entre las tres son más parecidas, lo cual es más interesante para el panel eólico.

9.3. Análisis columna de turbinas individuales

Una vez evaluada la distancia hacia los lados de la turbina, es decir la distancia horizontal, se evaluará la distancia vertical. En los prototipos propuestos se tienen dos arreglos diferentes para las columnas, uno de ellos es donde las turbinas giran individualmente, por lo que se analizará a través de 3 simulaciones cual es el caso más favorable, como se muestra en la Figura 9.13. Las simulaciones se realizarán bajo las mismas condiciones, y la distancia vertical entre las turbinas será de 150, 175 y 200 [mm] respectivamente.

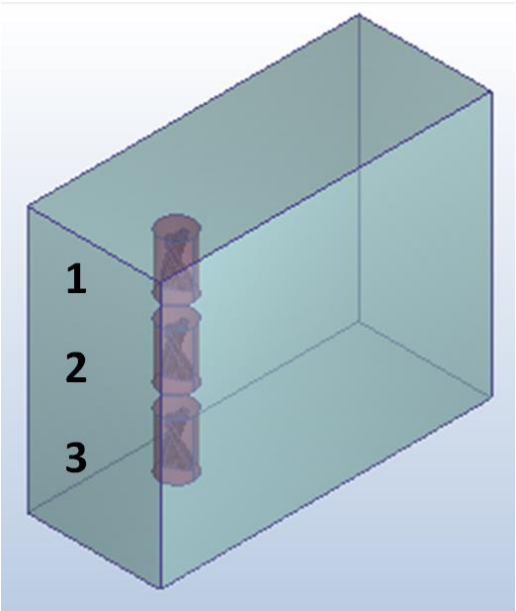

Figura 9.13. Disposición de las turbinas dentro del túnel para la simulación de columnas de turbinas individuales.

Geometría				
Cantidad de turbinas		3		
Distancia entre turbinas		150	175	200
Túnel	Alto [mm]	1200	1250	1300
	Ancho [mm]	600		
	Largo [mm]	1500		
Cilindros	Alto [mm]	250		
	Diámetro [mm]	150		
Ubicación turbina		¼ del túnel		
Material				
Turbina		Fibra de carbono en epóxico		
Túnel		Aire		
Cilindros		Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 272,835 [kg.mm2]		
Condiciones de borde				
Velocidad de entrada (normal) [m/s]		10		

Presión estática de salida [Pa]		0
Paredes		Slip/Symmetry (deslizamiento)
Solve		
Solution mode		Transient
Time Step Size		0,01
Time steps to run		1000
Flujo		
Compresibilidad		Incompresible
Advección		ADV 5
Turbulencia	Modelo	k-epsilon
	Intensity	10%

Tabla 9.4. Parámetros para resolver la simulación de columnas de turbinas individuales.

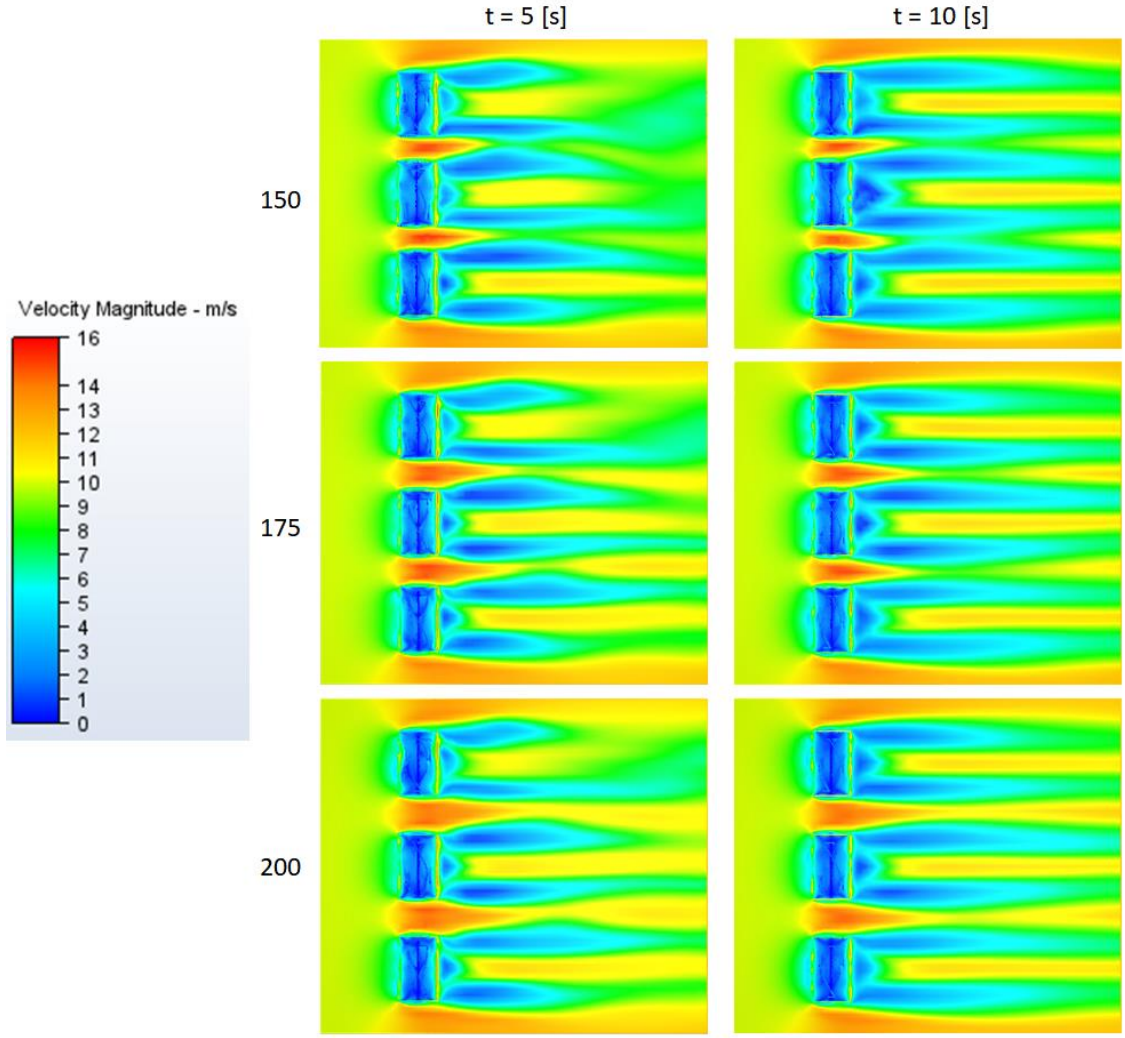

Figura 9.14. Perfiles de velocidad variando la distancia vertical entre las turbinas, a los 5 [s] y 10 [s].

En la Figura 9.14 se ve en los perfiles de 5 [s] que las estelas no son estables como para los de 10 [s]. A diferencia que las simulaciones anteriores, dado que se analiza la distancia vertical se optó por mostrar un plano vertical. En esta vista se observa que cada turbina genera tres estelas, una en el centro, que prácticamente no se alcanza a desarrollar, y dos en los extremos más largas. Las estelas

de los perfiles no presentan grandes diferencias, sin embargo se observa que mientras menor es la distancia, la estela superior de una turbina tiende a juntarse con la inferior de la turbina de arriba, por lo que no sería recomendable una menor distancia.

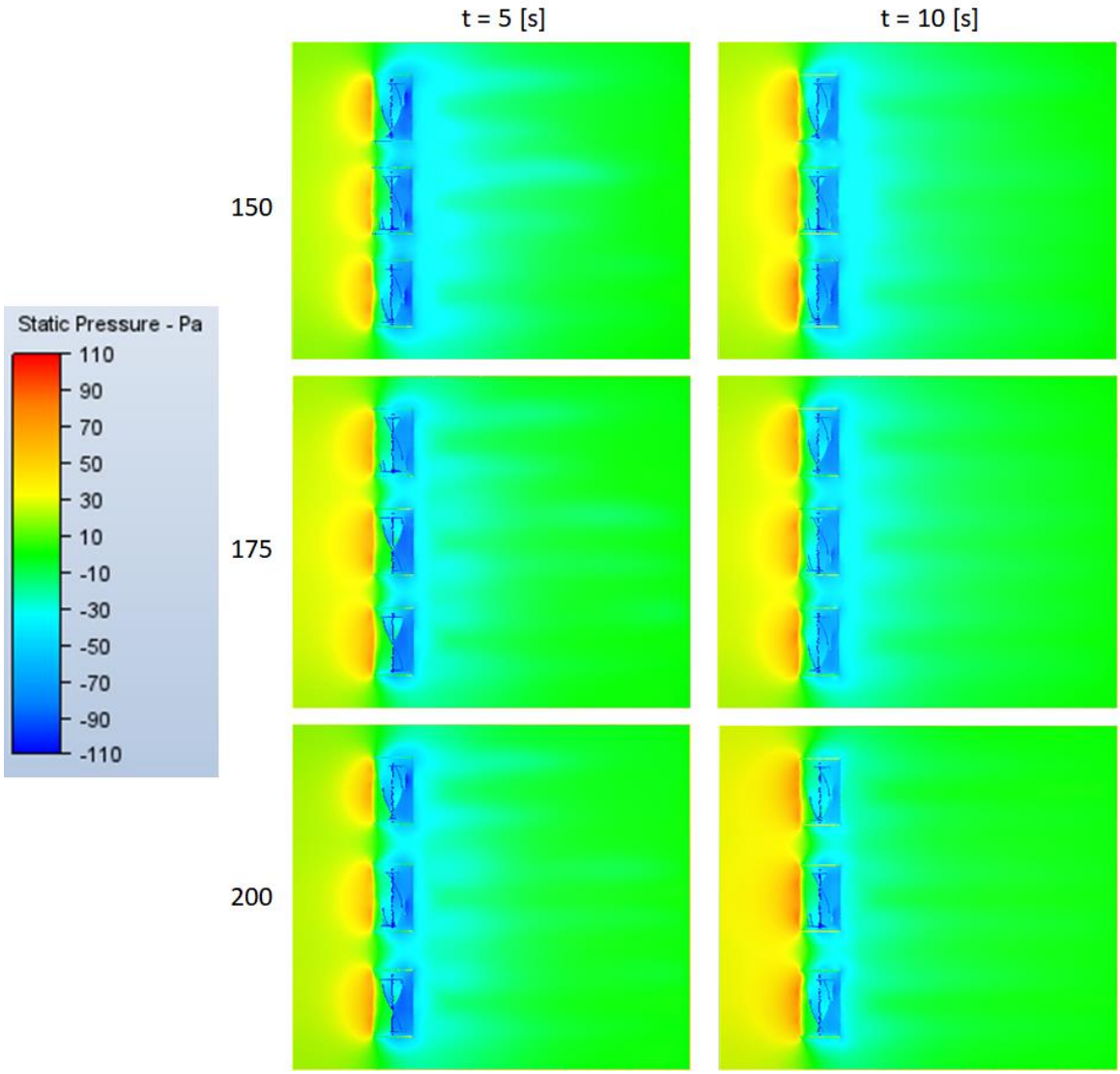

Figura 9.15. Perfiles de presión variando la distancia vertical entre las turbinas, a los 5 [s] y 10 [s].

Respecto a los perfiles de presión no se aprecian grandes diferencias, sin embargo si se observa en detalle se puede ver que la máxima y mínima presión se presenta en el perfil de 150 [mm] y 10 [s].

En la Figura 9.16 se observa que la turbina 1 en los tres casos se demora alrededor de 3 [s] en partir, a diferencia de la turbina 3, que demora entre 1 a 1,5 [s]. Ahora bien, en el caso de la turbina 2, para la simulación de 150 [mm] se demora más de dos segundos, y los otros dos menos de 2 [s], por lo que se puede descartar el caso de 150 [mm], ya que además la turbina 1 llega solo a 430 RPM. Centrándonos en los otros dos casos, no se aprecian grandes diferencias entre sí, sin embargo al mirar los números la simulación 175 [mm] llega a RPM un poco más elevadas, además se ve que las curvas son más homogéneas que en el otro caso. Por estas razones se escoge una distancia de 175 [mm] entre las turbinas verticalmente.

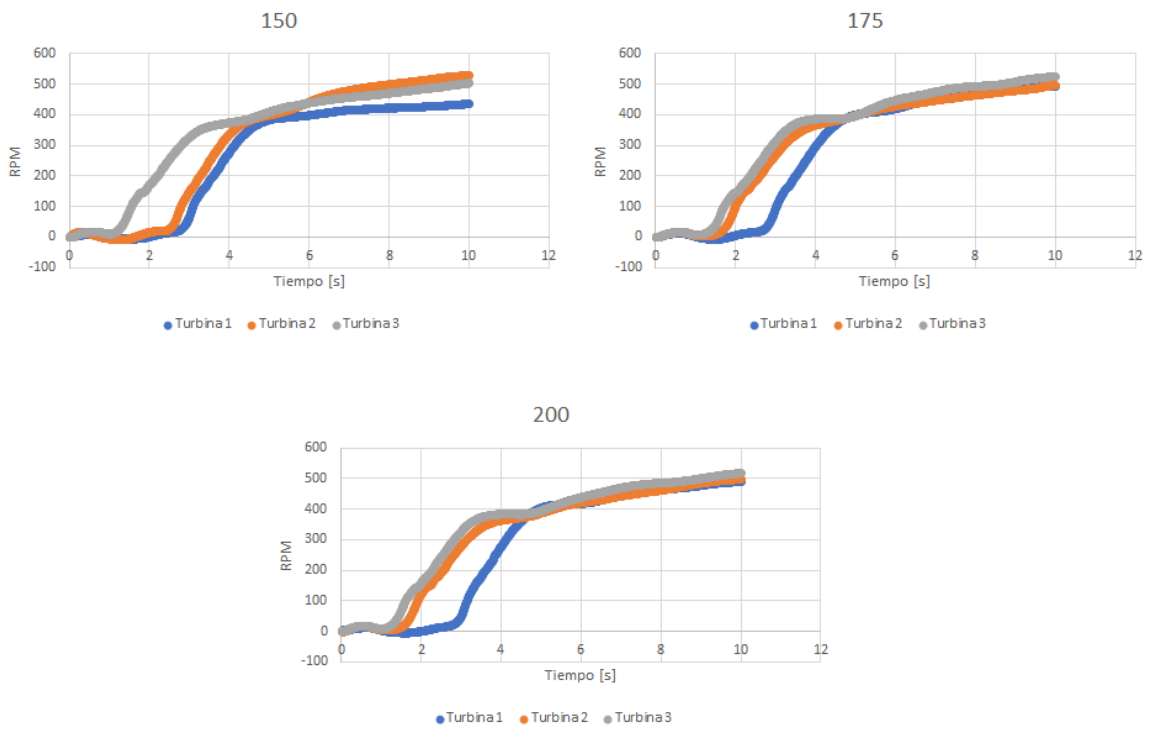

Figura 9.16. Velocidad rotacional vs tiempo para cada distancia vertical entre turbinas.

9.4. Análisis columna de turbinas en un mismo eje

Como en el caso anterior se analizó la distancia vertical entre turbinas individualmente, a continuación se evaluará lo mismo, pero en base al segundo arreglo, donde las turbinas van unidas en un mismo eje, de manera que todas giran al mismo tiempo. En este caso se utilizarán igualmente tres turbinas, las cuales se unirán a través de unas conexiones del mismo material, que irán variando su tamaño a 10, 20 y 40 [mm] respectivamente, como se muestra en la Figura 9.17.

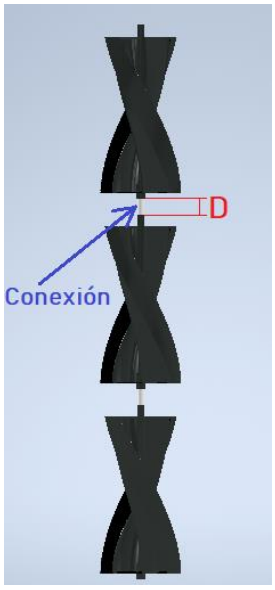

Figura 9.17. Forma de conexión entre las turbinas para la simulación de columna de turbinas en un mismo eje.

Geometría				
Cantidad de turbinas		3		
Túnel	Alto [mm]	964	984	1024
	Ancho [mm]	600		
	Largo [mm]	1500		
Cilindro	Alto [mm]	714	734	774
	Diámetro [mm]	150		
Conexión (D) [mm]		10	20	40
Ubicación turbina		¼ del túnel		
Material				
Turbina		Fibra de carbono en epóxico		
Conexión		Fibra de carbono en epóxico		
Túnel		Aire		
Cilindro		Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 818,520 [kg.mm2]	Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 818,531 [kg.mm2]	Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 818,553 [kg.mm2]
Condiciones de borde				
Velocidad de entrada (normal) [m/s]		10		
Presión estática de salida [Pa]		0		
Paredes		Slip/Symmetry (deslizamiento)		
Solve				
Solution mode		Transient		
Time Step Size		0,01		
Time steps to run		1000		
Flujo				
Compresibilidad		Incompresible		
Advección		ADV 5		
Turbulencia	Modelo	k-epsilon		
	Intensity	10%		

Tabla 9.5. Parámetros para resolver la simulación de columna de turbinas en un eje.

En los perfiles de la Figura 9.18, se observa que ocurre lo mismo que con las estelas que en el caso anterior, donde se formaban 3 estelas por turbinas. Sin embargo es diferente, ya que al estar las tres unidas es como si fuera una sola turbina, formando una estela central de un gran ancho, y dos en los extremos, de menor ancho, pero más larga, ya que no se alcanza a ver el termino en la imagen. Las diferencias son sutiles pero viendo las estelas centrales de los perfiles de 10 [s], se alcanza a ver que a medida que el tamaño de la conexión aumenta, también lo hace la estela.

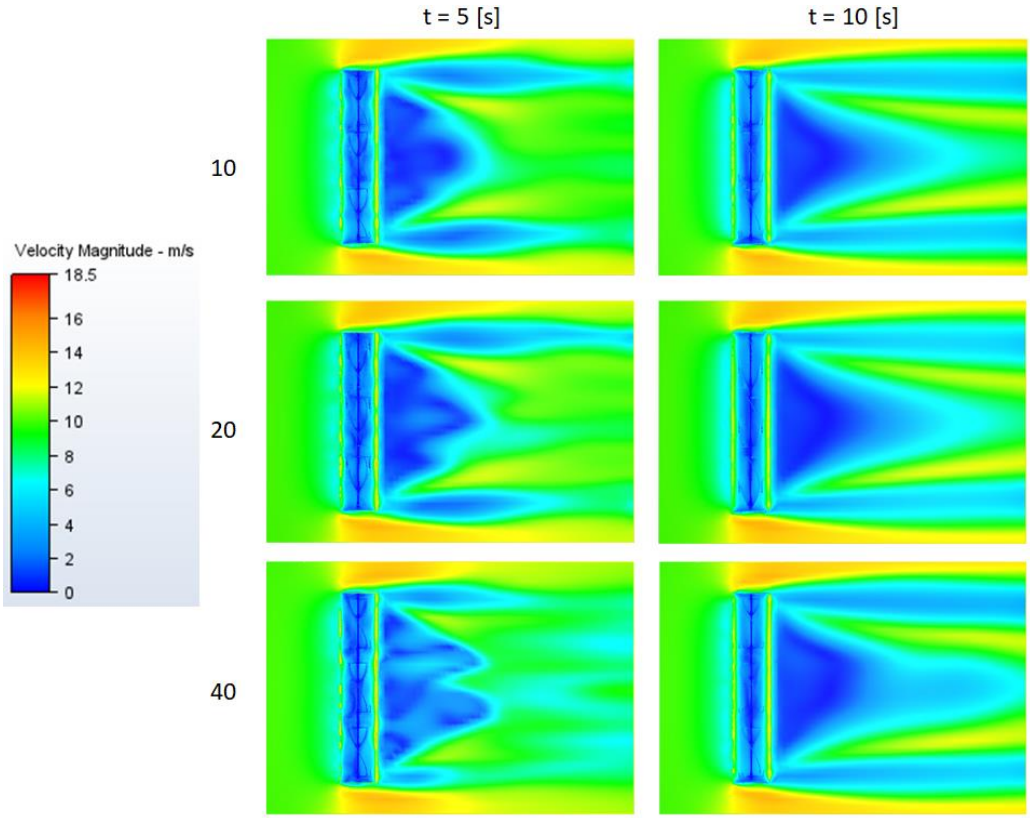

Figura 9.18. Perfiles de velocidad variando el tamaño de la conexión entre turbinas, a los 5 [s] y 10 [s].

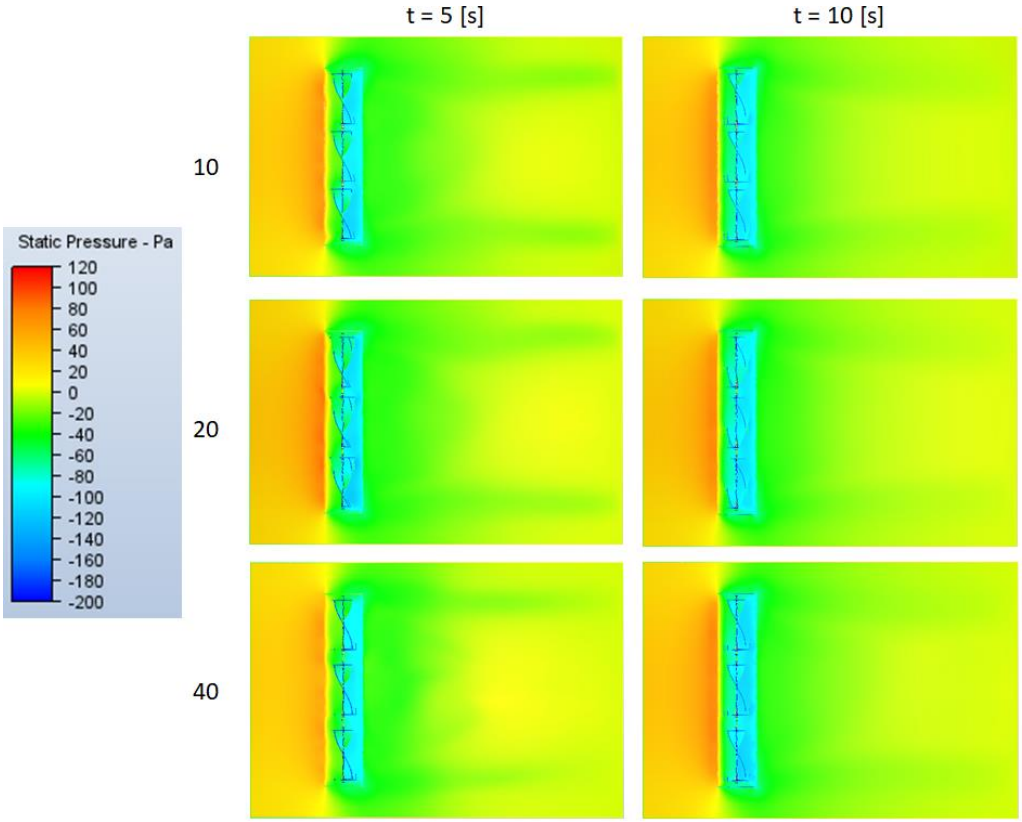

Figura 9.19. Perfiles de presión variando el tamaño de la conexión entre turbinas, a los 5 [s] y 10 [s].

Los seis perfiles de la Figura 9.19 no presentan grandes diferencias entre sí, a excepción del caso de 40 [mm] en 5 [s], donde la parte de máxima presión tiene un color más suave que los demás, que presentan un tono más rojizo.

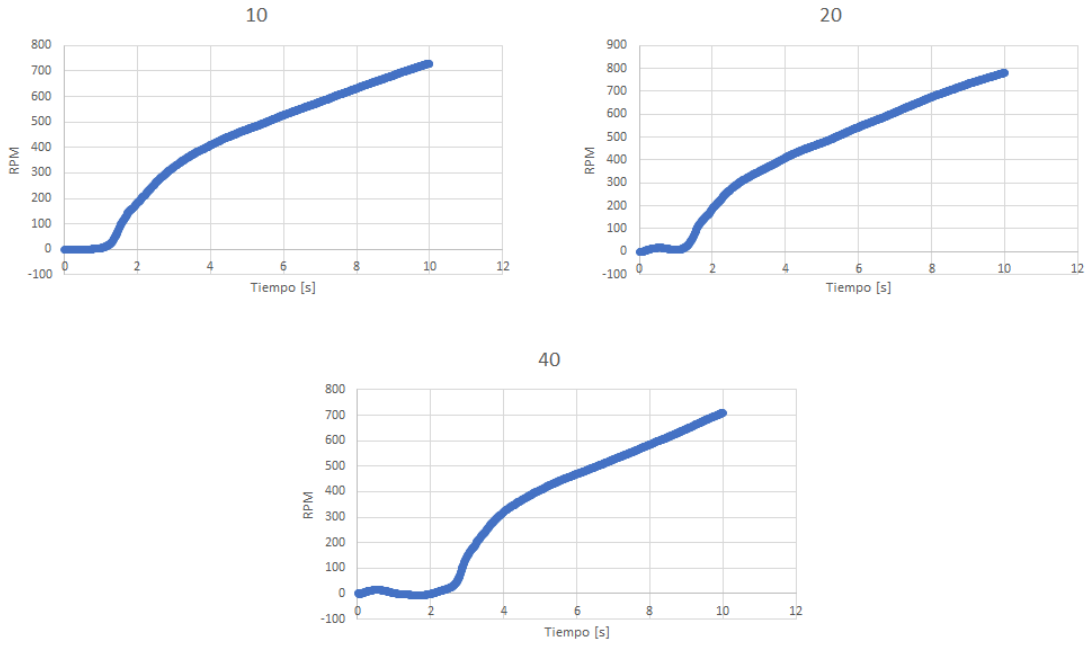

Figura 9.20. Velocidad rotacional vs tiempo para cada tamaño de conexión entre turbinas.

En la Figura 9.20, las diferencias entre las curvas son más notorias, en la conexión de 40 [mm] las turbinas se demoran más de 2 [s] en partir, por lo que se puede descartar. La conexión de 10 y 20 [mm] tienen una partida similar, de alrededor de 1,5 [s], pero la diferencia entre ellas está en las RPM alcanzadas. La conexión de 20 [mm] llega casi a 800 RPM, mientras que la de 10 [mm] solo sobrepasa los 700 RPM. De esta manera, la mejor elección en este caso es una conexión de 20 [mm] de tamaño.

9.5. Simulación de los paneles

En las secciones anteriores se realizaron simulaciones, respecto a las dos configuraciones propuestas, para encontrar los parámetros geométricos que permitan la optimización del panel. Una vez analizadas las simulaciones y escogidos estos parámetros, se dará lugar a las simulaciones del panel completo, es decir las 16 turbinas que componen los paneles propuestos.

En el Capítulo 7 se propusieron 4 configuraciones para el panel eólico, sin embargo en el Capítulo 8, debido a las simulaciones estáticas realizadas, se descartaron dos de ellas, por lo que a continuación se realizarán dos simulaciones, una correspondiente a la configuración de acople individual doble, y la otra correspondiente a la configuración de acople por columnas doble.

El panel eólico se simulará bajo las mismas condiciones estándar que se utilizaron anteriormente, es decir velocidad de entrada de 10 [m/s], presión estática de salida igual a cero, entre otras. Lo que cambiará en este caso es la geometría a simular.

9.5.1. Configuración de acople individual doble

Para esta configuración la geometría contará con 16 turbinas independientes, es decir, sin ningún tipo de conexión entre ellas. En la Figura 9.21 se puede observar la geometría a simular, la cual está diseñada a partir de los parámetros escogidos de las simulaciones anteriores, 210 [mm] de distancia

lateral entre centros, y 175 [mm] de distancia vertical. Además, las turbinas se encuentran numeradas para poder identificar el desempeño de cada una en los resultados.

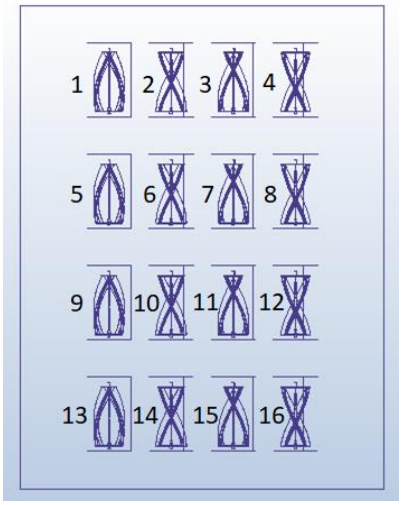

Figura 9.21. Geometría de la configuración acople individual doble a simular. Al lado de cada turbina aparece un número para identificarlas.

Las medidas del túnel en este caso sufren una pequeña variación, aumentando su largo de 1500 [mm] a 1800 [mm], debido a que también aumenta el ancho y el alto, ya que la geometría que se simulara es de mayor envergadura. Por esta razón, el panel deberá quedar ubicado a -450 [mm] del centro, para cumplir con la posición a ¼ del panel.

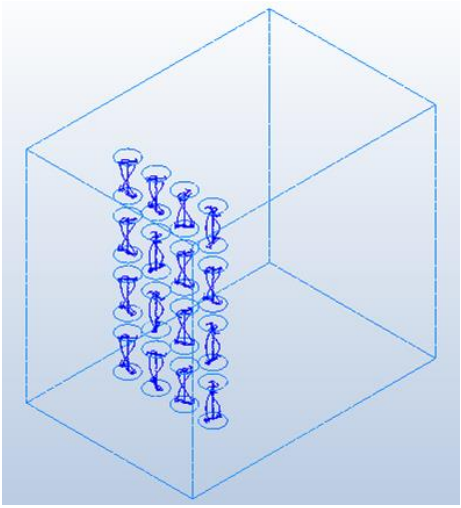

Figura 9.22. Disposición del panel acople individual doble dentro del túnel.

A continuación en la Tabla 9.6 se detallan los parámetros para ejecutar la simulación.

Geometría		
Cantidad de turbinas		16
Distancia entre turbinas [mm]	Lateral entre centros	210
	Vertical	175
Túnel	Alto [mm]	1625
	Ancho [mm]	1230
	Largo [mm]	1800

Cilindros	Alto [mm]	250
	Diámetro [mm]	150
Ubicación turbina		¼ del túnel
Material		
Turbina		Fibra de carbono en epóxico
Túnel		Aire
Cilindros		Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 272,835 [kg.mm2]
Condiciones de borde		
Velocidad de entrada (normal) [m/s]		10
Presión estática de salida [Pa]		0
Paredes		Slip/Symmetry (deslizamiento)
Solve		
Solution mode		Transient
Time Step Size		0,01
Time steps to run		1000
Flujo		
Compresibilidad		Incompresible
Advección		ADV 5
Turbulencia	Modelo	k-epsilon
	Intensity	10%

Tabla 9.6. Parámetros para resolver la simulación de la configuración de acople individual doble.

Dado que son 16 turbinas funcionando independientemente, en la Figura 9.23 se muestran 4 gráficos, de forma de ver claramente los desempeños de las turbinas. En cada gráfico las curvas aparecen ligadas a un número, el cual viene a corresponder al que se asoció con cada turbina en la Figura 9.21.

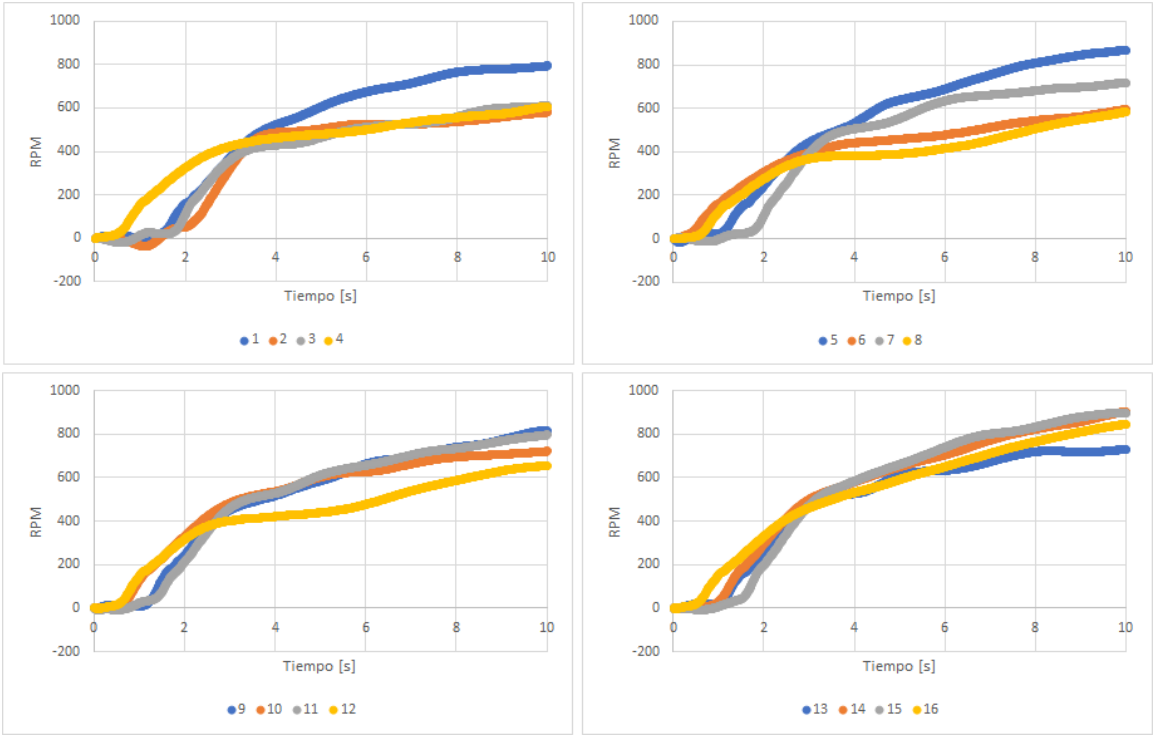

Figura 9.23. Velocidad rotacional vs tiempo de cada turbina para la simulación de la configuración de acople individual doble.

Si se compara cada curva de la Figura 9.23 con el desempeño de una turbina bajo condiciones similares, como es el caso de 10 [s] en la Figura 9.5, donde la turbina después de 10 [s] llega a una velocidad rotacional de alrededor de 500 RPM, las turbinas del panel superan esa velocidad, siendo la mínima cercana a 600 RPM, tal como se muestra en la Figura 9.24, donde se ve una matriz asociada a la posición de cada turbina con las RPM máximas a las que llega cada una. Por lo que se podría afirmar que la asociación de las turbinas tiende a potenciar el desempeño de cada una.

793	579	609	605
868	594	717	583
818	721	796	656
730	903	898	845

Figura 9.24. Matriz con las RPM a las que llega cada turbina a los 10 [s]. Las posiciones en las que están los valores corresponden a la misma posición en la que se encuentra cada turbina. Además, los valores se encuentran asociados a una escala de colores, donde los máximos corresponden al verde, y los mínimos al rojo.

En la matriz, observando los colores, se puede notar que las turbinas inferiores y de la primera hilera de la izquierda poseen valores más altos, y estos van descendiendo a medida que suben y hacia la derecha. Por lo que se puede decir que las turbinas superiores y las de la derecha son las más afectadas por el desempeño del conjunto. Sin embargo el panel en su totalidad tiene un desempeño mejor de los esperado.

Otro aspecto que comparar, con la curva de una turbina, es la partida. En este caso también se ve una mejora, ya que para una turbina la partida es de alrededor de los 2 [s], y en el panel todas bajan ese tiempo.

9.5.2. Configuración de acople por columnas doble

Al igual que en la configuración anterior, la geometría contará con 16 turbinas, sin embargo estás no serán independientes, ya que estarán conectadas entre sí, en un mismo eje, como se vio en el apartado 9.4, pero en este caso se conectarán 4 turbinas en vez de 3. Como se escogió en esa misma sección, la conexión de las turbinas será de un largo de 20 [mm] para optimizar el panel, y la distancia entre centros, al igual que el caso anterior, será de 210 [mm].

En la Figura 9.25 se muestra la geometría a simular, y el número correspondiente a cada columna para posterior análisis.

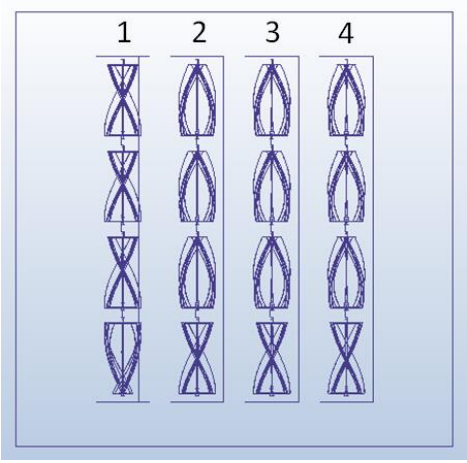

Figura 9.25. Geometría de la configuración acople por columnas doble a simular. Arriba de cada columna de turbinas aparece un número para identificarlas.

Las medidas del túnel, al igual que en la otra configuración, sufren una pequeña variación, aumentando su largo de 1500 [mm] a 1800 [mm], quedando como se muestra en la Figura 9.26.

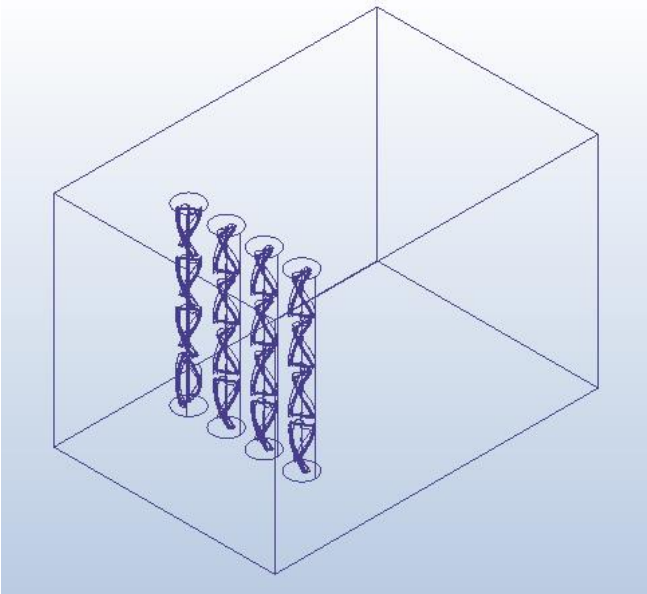

Figura 9.26. Disposición del panel acople por columnas doble dentro del túnel.

A continuación en la Tabla 9.6 se detallan los parámetros para ejecutar la simulación.

Geometría		
Cantidad de turbinas		16
Túnel	Alto [mm]	1226
	Ancho [mm]	1230
	Largo [mm]	1800
Cilindro	Alto [mm]	976
	Diámetro [mm]	150
Distancia entre centro lateral [mm]		210
Conexión [mm]		20
Ubicación turbina		¼ del túnel
Material		
Turbina		Fibra de carbono en epóxico
Conexión		Fibra de carbono en epóxico
Túnel		Aire
Cilindro		Región rotatoria libre (0,-1,0): Inercia = 1091,395 [kg.mm2]
Condiciones de borde		
Velocidad de entrada (normal) [m/s]		10
Presión estática de salida [Pa]		0
Paredes		Slip/Symmetry (deslizamiento)
Solve		
Solution mode		Transient
Time Step Size		0,01
Time steps to run		1000
Flujo		
Compresibilidad		Incompresible

Advección		ADV 5
Turbulencia	Modelo	k-epsilon
	Intensity	10%

Tabla 9.7. Parámetros para resolver la simulación de la configuración de acople por columnas doble.

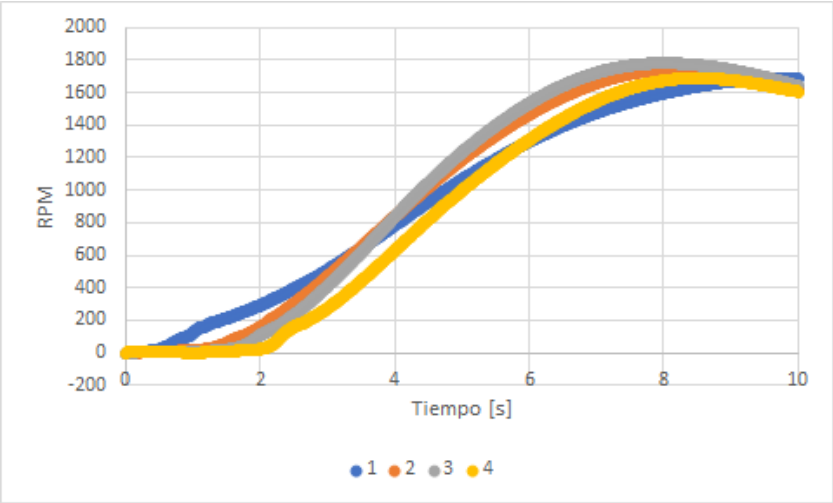

Figura 9.27. Velocidad rotacional vs tiempo de cada turbina para la simulación de la configuración de acople por columnas doble.

En la sección 9.4 se analizó una columna de 3 turbinas bajo las mismas condiciones. El desempeño de esa columna se muestra en la Figura 9.20, específicamente para el caso de 20 [mm], donde la curva llega a un máximo de 800 RPM, y tiene una partida de menos de 2 segundos. En la simulación del panel completo, se añadió otra turbina a la columna, lo cual, viendo la Figura 9.27, mejora con creces el desempeño, logrando doblar las RPM, llegando a un máximo de alrededor de 1700.

Las curvas de la Figura 9.27, llegan a un máximo cerca de los 8 [s] y luego tienen un leve descenso, sin embargo los valores a los 10 [s] siguen siendo el doble de lo obtenido con tres turbinas.

En este caso las curvas son más homogéneas, es decir se obtienen valores muy similares en las cuatro columnas, a diferencia de la configuración anterior, donde las turbinas poseen diferencias de hasta 300 RPM. Por otro lado, la partida es diferente para cada columna, siendo el orden de partida igual al orden de izquierda derecha, y los valores son menores o iguales a dos segundos. Por lo que igualmente se considera que esta configuración posee un desempeño mejor de los esperado.

10. Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue diseñar y probar computacionalmente un panel eólico modular que pudiera aprovechar vientos de bajas y medianas velocidades. Lo anterior, a partir de los trabajos previos de Ricardo Sanzana y Jonathan Maldonado, donde se diseñó y se probó computacional y experimentalmente la microturbina híbrida a utilizar, que es una mezcla del rotor Savonius y Darrieus, lo cual permite aprovechar tanto la fuerza de sustentación como la de arrastre para su funcionamiento.

Para diseñar el panel se utilizó el software Autodesk Inventor Professional 2022, y se realizó, en primera instancia, una investigación del estado del arte de paneles eólicos, los cuales en su mayoría fueron registros de patentes de diseños afines. A partir de ellas se realizaron 4 prototipos, basados en el diseño de EOGU, y las patentes de Donald Kelly, Giles Rodway y Valod Menaskanian, principalmente. La diferencia entre los cuatro paneles radicó, por un lado, en la cantidad de alternadores, ya sean dos (en la parte inferior y superior) o solo uno (en la parte inferior), de esta manera se denominó doble o simple. Por otro lado, también existía una diferencia en la forma en que se acoplan las microturbinas, las que pueden ser individualmente o en un mismo eje. De esta manera, se obtuvieron los prototipos o configuraciones: acople individual simple, acople por columnas simple, acople individual doble, y acople por columnas doble.

Estos prototipos fueron analizados a través de una simulación estática, realizada en el módulo Stress Analysis del mismo software de diseño, para ello se seleccionó plástico ABS para las turbinas, ya que fue uno de los materiales utilizados en los trabajos anteriores. Además, se utilizó aluminio para el marco del panel y el alternador, y también ABS para las conexiones entre turbinas cuando fue necesario.

En las simulaciones estáticas se advirtieron concentraciones de esfuerzos en algunas zonas de las turbinas, las cuales se propuso corregir cambiando a un material con mejores propiedades mecánicas, como es la fibra de carbono en epóxico, además, también permitiría buscar un material definitivo para su futura fabricación. Al realizar nuevamente las simulaciones con el nuevo material, se apreciaron notorias mejorías respecto a las anteriores. Las concentraciones de esfuerzos son más bajas, y se aumentan los factores de seguridad, de manera que son aceptables. Sin embargo, siguen existiendo puntos de altas tensiones, principalmente en los prototipos que poseían un solo alternador, tanto individualmente como las que estaban unidas en un mismo eje, por lo que se decide descartarlos antes de pasar a las simulaciones de dinámica de fluidos, quedando solamente la configuración de acople individual doble y acople por columnas doble.

Otro detalle que se advirtió está relacionado con el diseño de la microturbina, ya que donde se solían presentar los mayores esfuerzos era en la parte inferior de los álabes, de lo cual se concluyó que esto ocurría al no haber unión entre estos y el eje, por lo que se modificó el diseño original de la turbina, agregando justamente una conexión que permitiera disminuir los esfuerzos producidos en la zona. Así, se realizaron las últimas simulaciones estáticas, que incluía las turbinas modificadas en los paneles, para analizar si ocurría una mejoría, lo cual si sucedió, por lo que se conservaron las modificaciones realizadas.

En el marco teórico, se estudió el fenómeno de la estela, ya que el viento luego de pasar por los aerogeneradores se ralentiza. En los paneles, debido a la distribución de las turbinas, se realizaron simulaciones de dinámica de fluido para ver como afecta la distancia entre ellas, y encontrar los parámetros adecuados para conformar el panel, de forma que fenómenos como la estela no afecten el

desempeño. Para esto, se utilizó el software Autodesk CFD 2021, y se simularon diferentes geometrías, desde 0 a 10 segundos, dentro de un túnel de viento virtual, que dieron lugar a cinco análisis, donde se estudió el perfil de velocidad, el perfil de presión, y el gráfico de RPM vs tiempo, en cada caso.

La primera geometría en ser simulada fue la turbina por sí sola, para ver su nuevo comportamiento debido a la modificación del diseño. El primer análisis consistió en cuatro simulaciones donde se varió la velocidad de entrada al túnel, y se observó su desempeño, el cual fue comparado posteriormente. El segundo análisis también utilizó la misma geometría, pero esta vez la velocidad se mantuvo constante, y se utilizó como variable la intensidad de turbulencia del viento, simulando en total cinco intensidades. De este análisis, se concluyó que la turbulencia no generaba cambios significativos entre una simulación y otra, por lo que para las siguientes ésta se mantuvo constante, con una intensidad de turbulencia del 10%.

El tercer análisis consistió en simular tres turbinas, una al lado de la otra, y se tomó como variable la distancia entre ellas. Se simularon en total cinco distancias, donde la de 210 [mm] fue la que presentó mejores resultados. Esta distancia sirve tanto para la configuración de acople individual doble como la de acople por columnas doble.

El cuarto análisis fue enfocado a la configuración de acople individual doble, ya que lo que se simuló fueron tres turbinas, una arriba de la otra, variando la distancia vertical entre ellas. Se realizaron tres simulaciones, con 150, 175 y 200 milímetros, donde la distancia que presentó mejores resultados fue la 175 [mm].

Y finalmente en el quinto análisis, enfocado a la configuración de acople por columnas doble, se varió el tamaño de la conexión que une a las turbinas en un mismo eje. Al igual que los dos análisis anteriores, la geometría contó con tres turbinas, es decir se simuló una columna de tres turbinas, con una conexión de 10, 20 y 40 [mm] de alto, donde la que presentó mejores resultados fue la de 20 [mm].

A partir de los parámetros que se seleccionaron en cada análisis, se realizaron dos simulaciones finales que contaron con la cantidad total de turbinas propuestas para los paneles, es decir 16. Las simulaciones sirvieron para ver el comportamiento final que tuvieron los paneles optimizados. En el panel con la configuración de acople individual doble, se observaron las turbinas por separado, donde cada una tuvo un desempeño mejor que la turbina simulada por si sola, por lo que esta configuración se acepta. Por otro lado, en el panel con la configuración de acople por columnas doble, se observó las cuatro columnas por separado, donde cada una llegó a unas RPM mayores que el triple de los logrado con una turbina, por lo que este panel también se acepta, y ambos se proponen para trabajos futuros.

La razón de no proponer solo una configuración es para esperar otros posibles resultados, ya sea de nuevas simulaciones computacionales, como de ensayos experimentales, y así hacer un análisis general. Se propone realizar simulaciones variando la dirección del viento, ya que en estos ensayos solo se trabajó con viento perpendicular al panel, y en condiciones reales, el viento podría llegar en cualquier orientación. Además, para ver la posibilidad de su utilización industrialmente, donde se ubicarían varios paneles en un lugar acotado, se propone un ensayo variando la distancia entre paneles, ya sea uno detrás del otro o hacia los lados.

Referencias

[1] Data and statistics. 07/07/2020, de International Energy Agency Sitio web: https://www.iea.org/data- and- statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Electricity&year=2017

[2] World development indicators. 07/07/2020, de The World Bank Sitio web: https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators#

[3] Energías Renovables. 07/07/2020, de Acciona Sitio web: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/

[4] (2020). Capacidad instalada. 14/07/2020, de Energía Abierta Sitio web: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/

[5] Martínez, R. (2019). Chile avanza hacia una matriz energética limpia. 07/07/2020, de Agencia de Sostenibilidad energética Sitio web: https://www.agenciase.org/2019/02/28/chile-avanza-hacia-una-matriz-energetica-limpia/

[6] Data and statistics. 07/07/2020, de International Energy Agency Sitio web: https://www.iea.org/data- and- statistics?country=CHILE&fuel=Energy%20transition%20indicators&indicator=CO2%20emissions%20by%20energy%20source

[7] (2019). Desventajas de la energía eólica. 27/07/2020, de Twenergy Sitio web: https://twenergy.com/energia/energia-eolica/desventajas-de-la-energia-eolica/

[8] Energía eólica. 07/07/2020, de Aprende con energía Sitio web: https://www.aprendeconenergia.cl/energia-eolica/

[9] El desarrollo de la energía eólica en Chile. 07/07/2020, de Aprende con energía Sitio web: https://www.aprendeconenergia.cl/el-desarrollo-de-la-energia-eolica-en-chile/

[10] Santana, C. (2014). Energías Renovables en Chile el potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé. 07/07/2020, de Ministerio de Energía Sitio web: http://4echile.cl/4echile/wp-

content/uploads/2017/03/Energias-Renovables-en-Chile-El-potencial-eolico-solar-e-hidroele%CC%81ctrico-de-Arica-a-Chiloe.pdf

[11] Ehrlich, R. (2013). Renewable Energy A First Course. Boca Raton, Estados Unidos: CRC Press

[12] Sanzana, R. (2017). Diseño, fabricación y prueba de un microaerogenerador híbrido multipropósito (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

[13] Laboratorio Nacional de Energía Renovable (2007). Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad. 07/07/2020, de Departamento de energía, EE.UU. Sitio web: https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/42070.pdf

[14] O-Wind turbine. 07/07/2020, de The James Dyson Award Sitio web: https://www.jamesdysonaward.org/2018/project/o-wind-turbine/

[15] (2019). Turbina O-Wind, la microturbina esférica que captura el viento en cualquier dirección. 07/07/2020, de EcoInventos Sitio web: https://ecoinventos.com/turbina-o-wind/

[16] (2017). Mini turbina eólica portátil que se pliega como un paraguas. 27/07/2020, de EcoInventos Sitio web: https://ecoinventos.com/pequena-turbina-portatil-que-se-pliega-como-un-paraguas/

[17] EOGU, El panel eólico. 27/07/2020, de The James Dyson Award Sitio web: https://www.jamesdysonaward.org/es-ES/2018/project/eogu/

[18] Hong Kong Micro Wind Turbine Arrays. 31/08/2020, de Renewable Energy UK Sitio web: http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/hong-kong-micro-wind-turbine-arrays/

[19] Modeler, M. (2014). Plastic Modular Micro Wind Turbine Array by Motorwavegroup. 31/08/2020, de 3D Warehouse Sitio web: https://3dwarehouse.sketchup.com/model/6e2c63b57e7f6f031681a637b68c2e0b/Plastic-Modular-Micro-Wind-Turbine-Array-by-Motorwavegroup

[20] Watson, S., Moro, A., Reis,V., Baniotopoulos, C., Barth, S., Bartoli, G.,… Wiser, R. (2019). Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 113. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109270

[21] Fernández, S. (2016). La turbina eólica multirotor de Vestas produce su primer kWh. 31/08/2020, de Diario Renovables Sitio web: https://www.diariorenovables.com/2016/07/la-turbina-eolica-multirotor-de-vestas.html

[22] Beldimano, A. (1932). US1876595A. Estados Unidos.

[23] O'Malley, M. J. (1969). US3426214A. Estados Unidos.

[24] Kelly, D. A. (1980). US4220870A. Estados Unidos.

[25] Heronemus, W. (2006). US7075189B2. Estados Unidos.

[26] Grumazescu, M. (2007). WO2007143816A1. OMPI (PCT)

[27] Yeh, C. L. (2009). US20090072543A1. Estados Unidos.

[28] Bahari, H. (2011). US20110006535A1. Estados Unidos.

[29] Rodway, G. H. (2012). US8912679B2. Estados Unidos.

[30] Dominguez, R. (2016). ES2576001B1. España.

[31] Clemo, D. (2017). US20170321657A1. Estados Unidos.

[32] Menaskanian, V. (2017). US20170298907A. Estados Unidos.

[33] Lentini, P. (2019). US10451044B1. Estados Unidos.

[34] About the IEC. 17/08/2020, de International Electrotechnical Commission Sitio web: https://www.iec.ch/about/

[35] TC 88 Wind energy generation systems. 17/08/2020, de International Electrotechnical Commission Sitio web: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0::::FSP_ORG_ID:1282

[36] Quiénes somos. 17/08/2020, de Instituto Nacional de Normalización Sitio web: https://www.inn.cl/quienes-somos

[37] NCh2946/2:2005. 17/08/2020, de Instituto Nacional de Normalización Sitio web: https://ecommerce.inn.cl/nch29462200544970

[38] Castaño, J. (2016). Multifisica computacional: interacción fluido-estructura. 31/08/2020, de Cartif Sitio web: https://blog.cartif.com/multifisica-computacional-interaccion-fluido-estructura/

[39] (2016). Modelado de problemas de interacción fluido-estructura con COMSOL 31/08/2020, de Addlink Software Científico Sitio web: https://www.addlink.es/noticias/comsol/2616-modelado-de-problemas-de-interaccion-fluido-estructura-con-comsol

[40] Equipe ESSS. (2016). Dinámica de Fluidos Computacional: ¿que es? 31/08/2020, de ESSS Sitio web: https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/

[41] Araujo, E. (2017) Métodos numéricos para simulación en la ingeniería 01/11/2021, de ESSS Sitio web: https://www.esss.co/es/blog/metodos-numericos-para-simulacion-en-la-ingenieria/

[42] Antón, J. (2012) Simulación numérica de interacción fluido-estructura (Tesis de pregrado). universidad Carlos III de Madrid, Madrid

[43] García, J. G. (2013) Evaluación aeroelástica de generadores eólicos (Tesis de posgrado). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

[44] Milborrow, D. J. (1980). The performance of arrays of wind turbines. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 5(3-4), 403–430. https://doi.org/10.1016/0167-6105(80)90044-6

[45] Sáenz, S. (2013). Modelos Agregados de Parques Eólicos (Proyecto fin de carrera) Universidad de Sevilla.

[46] Eraso, O. (2008). Procesos de manufactura. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

[47] Groover, M. P. (2007). Fundamentos de Manufactura Moderna. México, D. F, México: McGraw-Hill/Interamericana

[48] PLA Ácido poliláctico. 25/09/2020, de Mexpolímeros Sitio web: https://www.mexpolimeros.com/pla.html

[49] Baraniuk, C. (2018) Cómo se fabrican y para qué se utilizan las turbinas más grandes del mundo 01/11/2021, de BBC News Sitio web: https://www.bbc.com/mundo/noticias-43632069

[50] Maldonado, J. (2020). Diseño, fabricación y pruebas de un microaerogenerador híbrido multipropósito (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

[51] Análisis de elementos finitos 03/05/2021, de Autodesk Sitio web: https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/finite-element-analysis

[52] Autodesk Help (2014) Realización de análisis de tensión estática 03/05/2021, de Autodesk Sitio web: https://knowledge.autodesk.com/es/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ESP/Inventor-Help/files/GUID-0C611437-B3EA-4EF4-809A-2DA68A27B32C-htm.html

[53] Autodesk Help (2014) Tensión equivalente o de Von Mises 03/05/2021, de Autodesk Sitio web: https://knowledge.autodesk.com/es/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ESP/Inventor-Help/files/GUID-C787792D-BBB1-41A7-BBD7-CBCABCBE7C01-htm.html

[54] Autodesk Help (2014) Coeficiente de seguridad 03/05/2021, de Autodesk Sitio web: https://knowledge.autodesk.com/es/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ESP/Inventor-Help/files/GUID-D541AE00-F9FB-4B7E-A595-402219353010-htm.html

[55] Instituto Nacional de Normalización. (1971). Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones (NCh 0432.Of71). Santiago, Chile.

[56] Medrano Hernández, J.A., & Moreno Figueredo, C. (2019). Análisis sobre la influencia de la turbulencia en la producción energética de las turbinas eólicas 01/11/2021, de Scielo. Sitio web: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012019000100053&lng=es&tlng=es.