



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Contribución a la movilidad sostenible mediante la integración de un
aerogenerador como sistema de recuperación de energía para
vehículos eléctricos

Autor: María Cabrero Carabel

Director: Antonio Gutiérrez González

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Contribución a la movilidad sostenible mediante la integración de un aerogenerador como
sistema de recuperación de energía para vehículos eléctricos
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: María Cabrero Carabel

Fecha: 24 / 07 / 2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Antonio Gutiérrez González

Fecha: 24 / 07 / 2024

Contribución a la movilidad sostenible mediante la integración de un aerogenerador como sistema de recuperación de energía para vehículos eléctricos

Autor: Cabrero Carabel, María.

Director: Gutiérrez González, Antonio.

Entidad Colaboradora: Blowind

RESUMEN DEL PROYECTO

Se ha analizado y desarrollado un aerogenerador con el objetivo de ser incorporado en vehículos eléctricos y actuar como sistema de recuperación de energía eólica. Se han analizado las necesidades energéticas y se ha realizado un balance energético simulando distintos casos de conducción. Se ha estudiado la localización del aerogenerador que minimice el impacto aerodinámico y maximice la eficiencia de la energía cinética capturada. Se ha realizado un posible diseño de la turbina mediante sus simulaciones fluidodinámicas y se ha diseñado un soporte para anclarlo al chasis del vehículo.

Palabras clave: movilidad sostenible, recuperación de energía, vehículos eléctricos, aerogenerador, turbina Savonius, análisis aerodinámico, análisis estructural, eficiencia energética, simulación.

1. Introducción

La movilidad sostenible es una prioridad global, y los vehículos eléctricos (VE) juegan un papel crucial en esta transición. Este proyecto explora la integración de un aerogenerador como sistema de recuperación de energía para VE, buscando mejorar su eficiencia y autonomía. La idea es captar energía cinética del flujo de aire durante la conducción y convertirla en electricidad, contribuyendo así a la sostenibilidad y reducción de emisiones.

2. Definición del Proyecto

El objetivo principal del proyecto es explorar la viabilidad de utilizar un sistema de microturbinas y generador como sistema de recuperación de energía en vehículos para posteriormente plantear un esquema de diseño del mismo. Esto incluye la evaluación de las necesidades energéticas del vehículo, la localización óptima del aerogenerador para

minimizar el impacto aerodinámico, y el diseño tanto de la turbina como de su soporte estructural. Se busca maximizar la eficiencia energética y garantizar la integridad estructural del sistema.

3. Descripción del modelo

El estudio se ha dividido en diferentes modelos, tanto analíticos como de elementos finitos. Se ha modelado la física del movimiento de un vehículo mediante sus ecuaciones matemáticas en Excel, donde se han planteado los escenarios y procesado los datos. Por otro lado, se ha modelado mediante elementos finitos un vehículo para realizar análisis aerodinámicos, al igual que para el modelo de la turbina. Las simulaciones de la estructura de la turbina se han llevado a cabo también mediante el mismo software, Ansys Discovery.

4. Resultados

Los resultados del proyecto incluyen:

- Una ubicación óptima del aerogenerador que equilibra la mínima interferencia aerodinámica con la máxima eficiencia de recuperación de energía. Se concluye que la instalación de la turbina en el parachoques delantero apenas afecta al rendimiento aerodinámico del vehículo, por lo que sería la mejor opción.
- El balance energético detallado que muestra las condiciones en las cuales el aerogenerador recupera energía de manera eficiente, con una mayor recuperación de energía en una conducción interurbana y un mayor ahorro económico.
- El diseño optimizado de la turbina Savonius de dos palas obtenido es aquel de mayor radio de separación entre las palas. Se ha diseñado una carcasa específica para la turbina cuya apertura de entrada de aire ha sido optimizada mediante simulaciones de flujo en Ansys. El ángulo de apertura que permite el mayor flujo de aire y, por ende, el mayor torque, se ha determinado como el diseño más eficiente. Este enfoque ha permitido maximizar la captura de energía cinética y mejorar el rendimiento general del sistema de recuperación de energía.

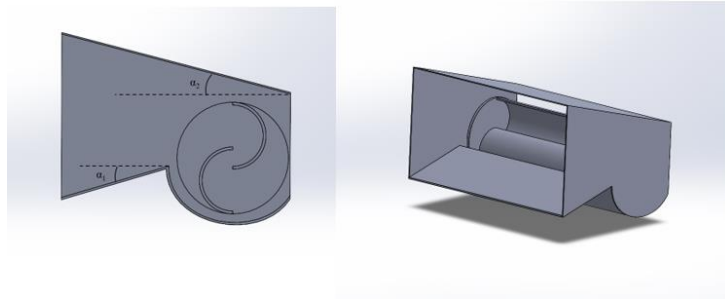


Imagen 1 - Modelo definitivo de turbina y carcasa

- El diseño del soporte de la turbina Savonius ha sido sometido a simulaciones estructurales con diversas masas y espesores para asegurar su capacidad de carga. Se han analizado los desplazamientos máximos, las tensiones y los factores de seguridad en cada caso. Los resultados han demostrado que, incluso en los peores casos, el soporte mantenía un factor de seguridad. El soporte es estructuralmente sólido y puede soportar las cargas esperadas sin comprometer su integridad.

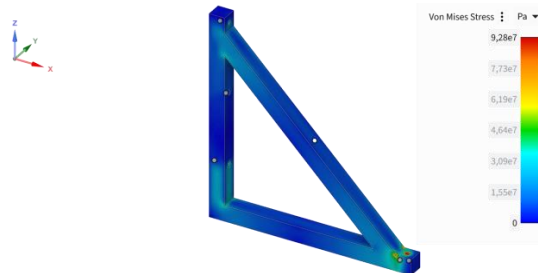


Imagen 2 - Resultados estructurales para acero espesor mínimo del soporte

5. Conclusiones

El estudio teórico confirma que la integración de un aerogenerador en vehículos eléctricos es viable y puede mejorar significativamente su eficiencia energética. Es necesario contrastar los resultados e hipótesis con experimentos reales. El diseño de la turbina Savonius y su soporte estructural cumple con los requisitos de rendimiento y seguridad, demostrando que este sistema puede contribuir a la movilidad sostenible. Los resultados sugieren que, con un diseño y una implementación adecuados, es posible recuperar una cantidad considerable de energía, mejorando así la autonomía de los vehículos eléctricos.

Contribution to Sustainable Mobility through the Integration of a Wind Turbine as an Energy Recovery System for Electric Vehicles.

Author: Cabrero Carabel, María.

Supervisor: Gutiérrez González, Antonio.

Collaborating Entity: Blowind

ABSTRACT

A wind turbine has been analyzed and developed with the goal of being incorporated into electric vehicles to act as a wind energy recovery system. The energy needs have been analyzed, and an energy balance has been conducted by simulating different driving scenarios of a vehicle. The location of the wind turbine has been studied to minimize aerodynamic impact and maximize the efficiency of captured kinetic energy. A potential design for the turbine has been developed through fluid dynamic simulations, and a support structure has been designed to anchor it to the vehicle chassis.

Keywords: sustainable mobility, energy recovery, electric vehicles, wind turbine, Savonius turbine, aerodynamic analysis, structural analysis, energy efficiency, simulation.

1. Introduction

Sustainable mobility is a global priority, and electric vehicles (EVs) play a crucial role in this transition. This project explores the integration of a wind turbine as an energy recovery system for EVs, aiming to enhance their efficiency and range. The idea is to capture kinetic energy from the airflow during driving and convert it into electricity, thereby contributing to sustainability and emission reduction.

2. Project definition

The main objective of the project is to explore the feasibility of using a microturbine and generator system as an energy recovery system in vehicles and to propose a design scheme for it. This includes evaluating the energy needs of the vehicle, determining the optimal location for the wind turbine to minimize aerodynamic impact, and designing both the turbine and its structural support. The goal is to maximize energy efficiency and ensure the structural integrity of the system.

3. Model description

The study has been divided into different models, both analytical and finite element. The physics of vehicle motion has been modeled using mathematical equations in a spreadsheet (Excel), where scenarios have been presented and data processed. Additionally, a vehicle model has been created using finite element analysis for aerodynamic studies, as well as for the turbine model. Structural simulations of the turbine have also been conducted using the same software, Ansys Discovery.

4. Results

The project's results include:

- **Optimal Location:** The wind turbine's optimal location balances minimal aerodynamic interference with maximum energy recovery efficiency. It is concluded that installing the turbine on the front bumper barely affects the vehicle's aerodynamic performance, making it the best option.

- **Energy Balance:** A detailed energy balance shows the conditions under which the wind turbine recovers energy efficiently, with greater energy recovery during interurban driving, leading to more significant economic savings.

- **Turbine Design Optimization:** The optimized design for the two-blade Savonius turbine features the largest separation radius between the blades. A specific housing for the turbine has been designed, with its air intake opening optimized through flow simulations in Ansys. The air intake angle that allows the maximum airflow and, consequently, the highest torque has been identified as the most efficient design. This approach has maximized the capture of kinetic energy and improved the overall performance of the energy recovery system.

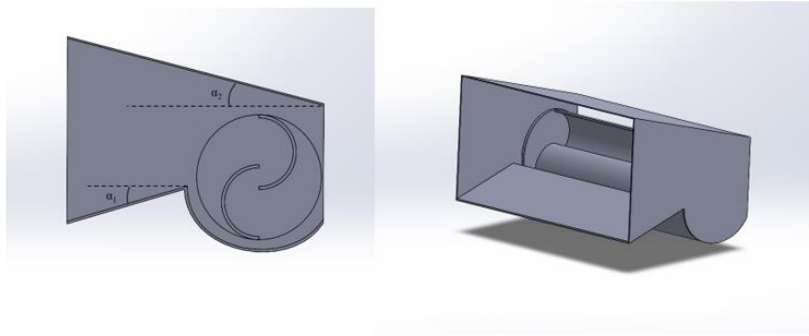


Figure 1 – Final model of housing and turbine

- The design of the structural support for the Savonius turbine has been subjected to structural simulations with various masses and thicknesses to ensure its load-bearing capacity. Maximum displacements, stresses, and safety factors were analyzed in each case. The results demonstrated that, even in the worst scenarios, the support maintained a safety factor. These findings confirm that the support is structurally sound and can withstand the expected operational loads without compromising its integrity.

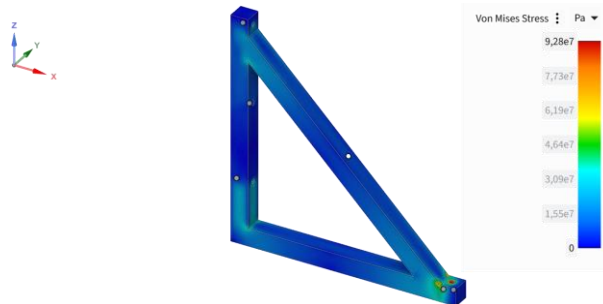


Figure 2 - Structural results for steel minimum thickness of the support

5. Conclusions

The theoretical study confirms that the integration of a wind turbine in electric vehicles is viable and can significantly improve their energy efficiency. It is necessary to validate the results and hypotheses with real experiments. The design of the Savonius turbine and its structural support meets the performance and safety requirements, demonstrating that this system can contribute to sustainable mobility. The results suggest that, with proper design and implementation, it is possible to recover a considerable amount of energy, thus improving the range of electric vehicles.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Transición energética.....	7
1.1 Contextualización.....	7
1.2 Objetivos de la transición energética.....	7
1.3 El vehículo eléctrico.....	9
Capítulo 2. Propuestas tecnológicas	12
2.1 Soluciones a la autonomía de las baterías	12
2.2 Extensores de rango.....	13
2.2.1 Energía eólica	14
2.2.2 Energía solar.....	15
2.2.3 Amortiguador regenerativo de alcance extendido	16
2.2.4 Frenado regenerativo de rango extendido	17
Capítulo 3. El aerogenerador como sistema de recuperación de energía en vehículos 19	19
3.1 Estado del arte y revisión de la literatura existente	20
3.2 Análisis aerodinámico de vehículo.....	22
3.2.1 Modelo de vehículo y turbina.....	23
3.2.2 Simulación.....	25
3.2.3 Conclusiones.....	38
3.3 Energía recuperable por la turbina: Balance energético.....	38
3.3.1 Primer escenario	40
3.3.2 Segundo escenario.....	42
3.3.3 Análisis de fuerzas.....	43
3.3.4 Cálculos balance energético	49
3.3.5 Resultados	52
3.3.6 Análisis de sensibilidad	54
Capítulo 4. La turbina	59
4.1 Selección de la turbina	59
4.1.1 El rotor	59
4.1.2 Diseño de las palas.....	62
4.1.3 Optimización de la relación de solapamiento	64

4.1.4 Optimización del diseño de la carcasa.....	71
Capítulo 5. Diseño y análisis estructural del soporte	75
5.1 Diseño del soporte	75
5.1.1 Requisitos del diseño	75
5.1.2 Materiales.....	76
5.1.3 Modelo.....	77
5.2 Análisis estructural	79
5.2.1 Condiciones de contorno	79
5.2.2 Simulación de cargas	81
5.2.3 Resultados del análisis	84
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	97
Capítulo 7. Bibliografía.....	99

Índice de figuras

Figura 1 - Configuración del extensor de rango empleando la energía del viento [7]	14
Figura 2 – Esquema básico de aprovechamiento de energía eólica en coches y camiones [8]	15
Figura 3 - Configuración del extensor de rango empleando energía solar [7]	16
Figura 4 - Configuración sistema frenado regenerativo en modo generador [7].....	18
Figura 5 - Configuración sistema frenado regenerativo en modo motor [7].....	18
Figura 6 - Dimensiones vehículo base.....	23
Figura 7 - Modelos empleados en la simulación de vehículos	24
Figura 8 - Área proyectada del vehículo caso C.....	24
Figura 9 - Coeficiente aerodinámico de diferentes tipos de vehículos.....	25
Figura 10 - Simplificación geometría rueda	26
Figura 11 - Corrección de aristas inexactas en el modelo del vehículo	26
Figura 12 - Creación de parches de contacto rueda-suelo	27
Figura 13 - Dimensiones volumen de control (lateral) del modelo del vehículo	28
Figura 14 - Dimensiones volumen de control (frontal) del modelo del vehículo	28
Figura 15 - Dimensiones volumen de control (perspectiva) del modelo del vehículo	29
Figura 16 - Malla tetraédrica global generada en el modelo del vehículo	33
Figura 17 - Detalle de la malla en zonas de curvatura y proximidad en el modelo del vehículo	33
Figura 18 - Distribución de velocidad del aire alrededor del vehículo sin turbina	34
Figura 19 - Líneas de flujo vehículo sin turbina.....	35
Figura 20 - Contorno de velocidades del vehículo con turbina en la parrilla frontal.....	35
Figura 21 - Líneas de flujo del vehículo con turbina en la parrilla frontal.....	35
Figura 22 - Contorno de velocidades del vehículo con turbina en el techo	36
Figura 23 - Líneas de flujo del vehículo con turbina en la parrilla frontal.....	36
Figura 24 - Tipos de rotor Savonius [28]	60
Figura 25 - Fuerzas que actúan sobre un rotor Savonius de dos palas [30]	62
Figura 26 - Parámetros turbina Savonius [28].....	63

Figura 27 - Otros parámetros de un rotor Savonius [31].....	64
Figura 28 - Vista isométrica del modelo turbina con carcasa.....	65
Figura 29 - Vista corte lateral con el parámetro modificado en la simulación turbina con carcasa	66
Figura 30 - Volumen de control del modelo de la turbina.....	67
Figura 31 – Representación condiciones de contorno en Ansys Discovery del modelo de turbina.....	68
Figura 32 - Malla generada del modelo de la turbina.....	69
Figura 33 - Contorno de velocidades del modelo de turbina e = 60 mm	71
Figura 34 - Vista corte lateral con los parámetros modificados en la simulación de turbina	72
Figura 35 - Contorno de velocidades del modelo de carcasa definitivo.....	74
Figura 36 - Modelo definitivo de turbina y carcasa.....	74
Figura 37 - Vista isométrica del soporte.....	78
Figura 38 - Vista isométrica ensamblaje	79
Figura 39 - Vista frontal ensamblaje	79
Figura 40 - Condición pared fija entre soporte y chasis en Ansys Discovery.....	80
Figura 41 - Restricciones de movimiento en la unión soporte y carcasa	81
Figura 42 – Introducción de la fuerza 1 en el soporte	82
Figura 43 - Introducción de la fuerza 2 en el soporte	83
Figura 44 - Introducción del momento creado por la turbina en el soporte	83
Figura 45 - Tamaño de elemento de malla	84
Figura 46 – Visualización áreas con resolución insuficiente (en rojo).....	85
Figura 47 – Imagen ampliada de las áreas no captadas con precisión	85
Figura 48 - Características aluminio 6061.....	87
Figura 49 – Desplazamiento del soporte caso original para aluminio.....	88
Figura 50 - Tensiones de Von Mises del soporte en el caso original para aluminio	89
Figura 51 - Tensiones de Von Mises del soporte en el caso más desfavorable (caso 5) para aluminio.....	89

Figura 52 – Tensiones del soporte en la sección más desfavorable del caso 5 para el aluminio	89
Figura 53 - Características acero S275	90
Figura 54 - Desplazamientos del soporte caso original para acero	92
Figura 55 - Tensiones de Von Mises del soporte en el caso original para acero.....	92
Figura 56 – Tensiones de Von Mises del soporte en el caso más desfavorable (caso 5) para acero.....	93
Figura 57 – Tensiones del soporte en la sección más desfavorable del caso 5 para acero..	93
Figura 58 - Resultado análisis estructural del soporte para el caso más desfavorable (e = 4 mm).....	94
Figura 59 – Deformada del modo 1 de la simulación modal en Ansys Discovery	96

Índice de tablas

Tabla 1 - Área proyectada de los tres modelos de vehículos.....	24
Tabla 2 - Condiciones de contorno análisis externo sobre vehículo	29
Tabla 3 - Resultados análisis de convergencia de malla	32
Tabla 4 - Estadística y calidad de las mallas simuladas en el modelo del vehículo.....	33
Tabla 5 - Resultados análisis aerodinámico	37
Tabla 6: datos escenario de conducción 1	40
Tabla 7: datos escenario de conducción 2	42
Tabla 8 - Parámetros del vehículo	51
Tabla 9 - Parámetros de la turbina.....	51
Tabla 10 - Resultados balance energético	52
Tabla 11. Resultados análisis económico	54
Tabla 12. Análisis de la energía recuperable en función del rendimiento y el área de la turbina para el escenario 1	54
Tabla 13. Análisis de la energía recuperable en función del rendimiento y el área de la turbina para el escenario 2	55
Tabla 14. Energía recuperable en función de la masa del vehículo	55
Tabla 15. Ahorro económico en función del precio de la energía.....	57
Tabla 16. Ahorro económico en función de la vida útil del vehículo	58
Tabla 17 - Condiciones de contorno simulación turbina.....	68
Tabla 18 – Estadística y calidad de malla simulada del modelo de la turbina	69
Tabla 19. Resultados simulación de cada modelo de turbina.....	70
Tabla 20 - Resultados simulación modificando ángulo de la tapa inferior de la carcasa....	72
Tabla 21 - Resultados simulación modificando ángulo de la tapa superior de la carcasa...	73
Tabla 22 - Distintos casos de la simulación de la simulación del soporte	86
Tabla 23 - Resultados simulación del soporte para aleación de aluminio.....	88
Tabla 24 - Resultados simulación del soporte para acero	91
Tabla 25 - Resultados simulación variando el espesor del soporte	94

Capítulo 1. TRANSICIÓN ENERGÉTICA

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN

La conciencia global sobre la urgencia de abordar los desafíos medioambientales se ha elevado a unos niveles muy altos. La transición hacia una vida más sostenible se ha convertido en una necesidad y el epicentro de esta transformación se encuentra en la transición energética. Este cambio marca un futuro en el que la sostenibilidad, la eficiencia y la independencia energética serán fundamentales.

La transición energética engloba el cambio progresivo de un sistema energético basado en el uso de fuentes de energías convencionales, como pueden ser los combustibles fósiles, hacia fuentes de energía de bajas emisiones de carbono, basado en fuentes más sostenibles y renovables [\[1\]](#).

La transición energética no solo se ha vuelto necesaria para salvar al planeta de los efectos producido por el cambio climático. Si bien es cierto que las fuentes renovables reducen la contaminación, este cambio también ofrece una gran oportunidad para la economía, provocando un crecimiento de ciertos empleos y el desarrollo social de aquellas comunidades que se encuentren involucradas. La continua lucha contra la pobreza energética en algunas zonas y las inversiones realizadas para garantizar que todo el mundo tenga acceso a la energía limpia son una gran oportunidad de desarrollo para las comunidades.

1.2 OBJETIVOS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Los principales objetivos de esta transición son [\[2\]](#):

- Mitigación del calentamiento global: es esencial para evitar consecuencias como cambios climáticos extremos o el aumento del nivel del mar.
- Neutralidad Climática en la Unión Europea para 2050: este objetivo implica que las emisiones de CO₂ liberadas deben ser compensadas por acciones que retiren la misma cantidad de dióxido de carbono del ambiente, contribuyendo así a un equilibrio climático.
- Cambio estructural del sistema energético: se busca dar un mayor objetivo a las energías renovables, reduciendo progresivamente la dependencia de las energías de origen fósil y favoreciendo así fuentes más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.
- Promoción del consumo eficiente: fomentar un cambio de hábitos en las personas hacia modelos más eficientes energéticamente.
- Adopción de la economía circular: para acabar con el consumo y producción en exceso las empresas deben adoptar un modelo de producción basado en la reutilización, renovación y reciclaje de los materiales.

Todos los países deben realizar una transición hacia energías limpias, renovables, eficiencia energética y conseguir una buena gestión de la agricultura, transporte, edificación, etc. Como se ha comentado, uno de los objetivos es reducir en un 80 % las emisiones de CO₂ para el año 2050 respecto a los niveles de 1990, como se puede observar en el gráfico 1.

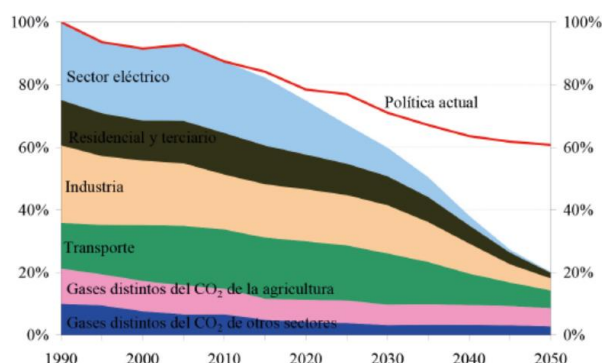


Gráfico 1 - Posible reducción de gases de efecto invernadero en la UE [3]

Cabe destacar que el transporte y la agricultura son los sectores que más se oponen a esa reducción, pero a su vez son de gran relevancia y eso ha hecho que se hayan especificado políticas e instrumentos exclusivos para estos sectores. Sin duda, la transición energética es un camino imprescindible hacia energías de mayor eficiencia energética y más limpias, en el que las políticas del transporte serán fundamentales.

1.3 EL VEHÍCULO ELÉCTRICO

El sector de mayor consumo de la Unión Europea es el transporte. A diferencia de otros sectores, este no ha disminuido en los últimos años. El consumo de energía de los ciudadanos para la movilidad en sus propios vehículos supone más del 75 % del consumo total del transporte en carretera y de las emisiones de los gases de efecto invernadero [\[4\]](#). Por ello, la movilidad en carretera resulta un foco de atención para la estrategia de sostenibilidad.

La movilidad sostenible desempeña un papel crucial en la mejora de la eficiencia y el impacto medio ambiental. Ese objetivo se ha ido consiguiendo mediante un mayor empleo del transporte público o una mayor ocupación en los vehículos privados. Para alcanzar una movilidad de bajas emisiones es necesario la optimización del sistema de transporte y la mejora de su eficacia, el incremento del uso de energías alternativas de emisiones bajas para el transporte y, por último, el avance de vehículos de emisión cero.

El vehículo eléctrico (VE) es un factor clave para la transición energética, logrando una descarbonización del sector transporte. Este sector es responsable de aproximadamente la mitad de la contaminación de las grandes ciudades [\[5\]](#), está caracterizado por un gran impacto ambiental al tener un elevado consumo de combustibles fósiles. Es esencial la promoción de vehículos de carretera eficientes para así alcanzar el objetivo de reducir las emisiones e implantar una infraestructura para los combustibles alternativos.

El VE es impulsado por electricidad, la cual se puede generar a partir de fuentes renovables, reduciendo así significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los vehículos de combustión interna. Además, impulsa la necesidad de generar más electricidad a partir de las fuentes renovables, acelerando el camino hacia un sistema energético más sostenible. Por otro lado, también impulsa la investigación y desarrollo de ciertas tecnologías de almacenamiento de energía beneficiando al sistema eléctrico.

Sin embargo, para seguir avanzando en los objetivos de una movilidad sostenible y que estos cambios puedan llegar a todo el mundo y así suponer una revolución automovilística, existen ciertos aspectos que deben evolucionar. La transición hacia los vehículos eléctricos presenta varios desafíos que se comentarán a continuación.

En primer lugar, la infraestructura de carga al no estar tan desarrollada como las estaciones de servicio para vehículos de combustión interna. La instalación de estas estaciones lleva mucho tiempo y requiere de grandes inversiones.

La autonomía de estas baterías también supone un gran desafío. Aunque la autonomía de los vehículos eléctricos ha mejorado, sigue habiendo preocupaciones sobre la distancia que se puede recorrer con una sola carga y el tiempo que lleva recargar estas baterías completamente. En la actualidad, tienen una autonomía entre 200 y 350 kilómetros los vehículos de gama media. Hay modelos que pueden llegar hasta los 750 kilómetros. Aumentar progresivamente estas cifras ayudará a reducir las recargas y permitirá a los usuarios a planificar desplazamientos mucho más largos sin suponer ningún obstáculo.

A pesar de las mejoras en la eficiencia y la disminución de los costes de fabricación de las baterías, el precio final de los vehículos eléctricos suele ser mayor a los de combustión interna. Esa barrera de entrada sigue siendo un obstáculo, aunque luego los costes de mantenimiento a lo largo del tiempo sí que pueden llegar a ser menores.

Por otro lado, para respaldar una adopción de este tipo de vehículos, se van a necesitar inversiones significativas en la infraestructura energética, incluyendo la generación de

electricidad y expansión de redes eléctricas. Resulta también importante la gestión de las baterías al final de su vida útil, para el reciclaje de estas, gestión de residuos y que así se reduzca el impacto medioambiental.

Por último, la fabricación de baterías de iones de litio, usadas para los VE, depende de materiales como el cobalto, litio y níquel. La disponibilidad escasa y costes de estos materiales pueden llegar a influir en la producción y precios, ya que son considerados minerales críticos.

Capítulo 2. PROPUESTAS TECNOLÓGICAS

Este proyecto se va a centrar principalmente en el problema de la autonomía de las baterías, que representa uno de los mayores desafíos en la transición hacia el vehículo eléctrico. Se van a presentar diversas soluciones que han sido propuestas a lo largo de los años para abordar este obstáculo.

2.1 SOLUCIONES A LA AUTONOMÍA DE LAS BATERÍAS

Existen diversas propuestas tecnológicas y desarrollos para abordar el problema de la autonomía en vehículos eléctricos.

En primer lugar, se persigue un desarrollo de la química de baterías en busca de aumentar la capacidad de estas y así aumentar su eficiencia energética. Las baterías actuales de iones de litio se caracterizan por su rápido ciclo de descarga. Por ello, se instalan en los coches supercondensadores, capaces de almacenar y liberar energía eléctrica, con buenos parámetros especialmente a bajas temperaturas. La gestión del funcionamiento de un supercondensador con una batería de iones de litio requiere el uso de un sistema híbrido de almacenamiento de energía (HESS) con una estrategia de gestión adecuadamente desarrollada [\[6\]](#).

Algunas tecnologías, como baterías en estado sólido, podrían ofrecer mejoras en la densidad de energía y tiempo de carga. A su vez, mantener una temperatura óptima es crucial para la vida útil de estas. Sistemas avanzados de gestión térmica pueden mejorarlo, especialmente cuando las condiciones de temperatura son extremas.

Algunos desarrollos en tecnologías de carga rápida buscan reducir el tiempo necesario para la recarga de las baterías, incluyendo sistemas de carga de alta potencia y mejoras en las baterías. Sistemas de carga inalámbrica buscan facilitar esa recarga de baterías

sin cables o conectores físicos. También es esencial las mejoras en la eficiencia aerodinámica, la reducción del peso y optimización de los sistemas de transmisión para así aumentar la autonomía.

En el contexto de mejorar la autonomía de las baterías en vehículos eléctricos, se introduce el término extensores de rango, sistemas que pueden cargar la batería mientras el vehículo está en movimiento y amplían la autonomía de este sin la necesidad de parar a recargar. Una línea de investigación donde se pueden encontrar soluciones innovadoras que buscan abordar uno de los principales desafíos en la adopción masiva de vehículos eléctricos, la limitada distancia que pueden recorrer en una sola carga.

2.2 EXTENSORES DE RANGO

A lo largo de este apartado se va a explorar cómo los extensores de rango se han convertido en un papel importante para superar la barrera de la autonomía. Se analizará el funcionamiento y el impacto que pueden tener en la aceleración de la transición hacia una movilidad más sostenible.

Un extensor de rango es un sistema o dispositivo diseñado para aumentar la autonomía de un vehículo eléctrico al ser capaz de proporcionar la energía adicional cuando la batería principal se está agotando, ya sea mediante generación de electricidad a bordo del vehículo o mediante tecnologías de carga inalámbrica mientras se desplaza el vehículo. Los principales componentes son el generador y el motor de combustión interna o externa. Su funcionamiento se inicia si el estado de carga de la batería cae por debajo de un nivel específico. En ese caso, el motor recarga la batería proporcionando electricidad o impulsando el vehículo, continuando así con su funcionamiento.

Numerosas investigaciones utilizan fuentes de energía renovables para la extensión de autonomía. Se ha empleado energía solar o eólica, incluso la energía de vibración de los vehículos que circulan por una carretera en mal estado [\[7\]](#).

2.2.1 ENERGÍA EÓLICA

Una de las principales soluciones es la implementación de una turbina eólica que aprovecha la energía del viento del vehículo en movimiento. Mientras el vehículo circula por la carretera, el aire fluye para impulsar la turbina. Según un estudio llevado a cabo por Niranjana, cuando el vehículo se desplaza a 90 km/h la turbina genera 1000 W, concluyendo que la eficiencia de esta turbina varía según el tamaño y diseño de las palas [7].

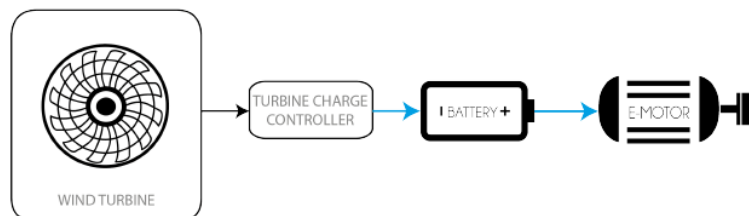


Figura 1 - Configuración del extensor de rango empleando la energía del viento [7]

El vehículo cuando se desplaza experimenta dos tipos de resistencias al viento, la resistencia por fricción, debida a la viscosidad del aire, y resistencia por forma, debida a la variación de la presión del aire en la parte delantera y trasera del vehículo. La energía eólica es empleada para extraer potencia y así producir electricidad para poder cargar la batería del VE.

Sin embargo, esta solución innovadora debe tener en cuenta no crear ningún componente de fuerza o empuje opuesto al sentido en el que viaja el vehículo. El diseño no debe aumentar la resistencia aerodinámica del vehículo hasta tal punto que la recuperación de energía sea ineficaz.

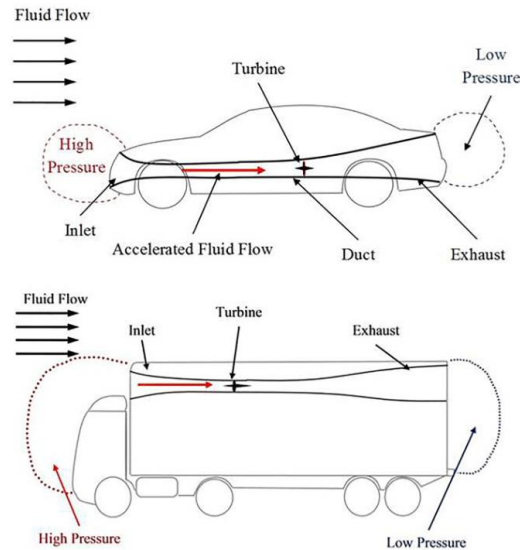


Figura 2 – Esquema básico de aprovechamiento de energía eólica en coches y camiones [8]

2.2.2 ENERGÍA SOLAR

La energía fotovoltaica puede ser una fuente de energía eficaz para los VE. Las principales ventajas de usar la energía solar es que es gratuita y abundante, pero también tiene numerosas limitaciones como las condiciones meteorológicas y la radiación solar.

Es necesaria la maximización del rendimiento puesto que el espacio disponible en el vehículo para implementar los paneles solares es limitado. Hay que realizar una evaluación de la contribución de energía solar para hacer un análisis de los beneficios de este diseño, teniendo en cuenta el coste. En una investigación realizada se demostró que el panel en el techo de un turismo alcanzó en un día soleado una potencia máxima de 165 W. mientras que instalado en el capó del turismo se alcanzó una potencia de 75 W [9].

Las células solares fotovoltaicas absorben la luz solar y la convierten en corriente eléctrica, generando así electricidad. Las distintas empresas de vehículos favorecen los sistemas de almacenamiento de energía solar por su seguridad, rendimiento económico y al obtenerse la energía de manera sostenible.

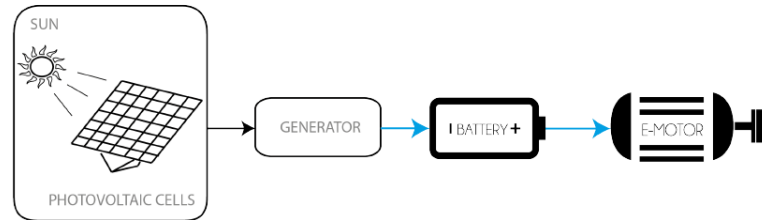


Figura 3 - Configuración del extensor de rango empleando energía solar [7]

2.2.3 AMORTIGUADOR REGENERATIVO DE ALCANCE EXTENDIDO

El amortiguador es un componente importante en la suspensión de un vehículo y su función es filtrar las vibraciones que se pueden producir en el vehículo cuando circula por carreteras en mal estado. Esa energía de vibración se disipa mediante fricción hidráulica y calor a través de los amortiguadores. Estos amortiguadores regenerativos se pueden clasificar en tres categorías dependiendo de sus principios de funcionamiento [10]:

- Electromagnéticos: convierte la energía cinética de las oscilaciones verticales en electricidad mediante inducción electromagnética.
- Hidráulicos: empleando un movimiento oscilatorio recoge la energía para impulsar el generador.
- Mecánicos: son supercondensadores los encargados de extender la duración de la batería. Se desarrolló de manera rápida puesto que tienen una eficiencia y potencia promedio mayor.

Algunas facetas de los amortiguadores regenerativos no están claras y se deben mejorar dos aspectos, en primer lugar, aún no ha sido diseñado el sistema de almacenamiento de la energía generada. En segundo lugar, resulta difícil encontrar una eficiencia que consiga a su vez cierta simplicidad estructural.

2.2.4 FRENADO REGENERATIVO DE RANGO EXTENDIDO

En momentos de desaceleración el motor del VE puede funcionar como generador y así cargar la batería. El par de frenado que generan los frenos permite capturar la energía cinética del vehículo en el proceso de desaceleración, mejorando la eficiencia energética de este. Ese par de frenado se puede generar mediante frenos de fricción y regenerativos, tanto juntos como por separado [\[11\]](#).

La energía cinética se transforma en eléctrica, cargando a su vez las baterías. El motor eléctrico tiene una función de autogeneración energética. Para reducir las pérdidas es necesaria una estrategia de control adecuada, dado que algunas pueden reducir la ineficiencia en caso de una ligera pérdida de recuperación de energía de frenado. Por ello, afecta de manera positiva a la prolongación de la vida útil de la batería, además de garantizar la seguridad de frenado y recuperar la máxima energía [\[12\]](#).

El VE con transmisión mecánica automática tiene una eficiencia de transmisión mayor ya que utiliza un proceso de frenado compuesto. Dependiendo de las marchas de transmisión la fuerza de frenado variará. La marcha se puede cambiar mientras el vehículo frena, por lo que permite un funcionamiento eficiente del motor mientras recupera la energía de frenado. Este método mejora la economía y puede garantizar seguridad y estabilidad del frenado [\[7\]](#).

Se trata de una tecnología en desarrollo que aún debe mostrar todo su potencial. A continuación, en las figuras 4 y 5, se pueden observar dos imágenes que indican el funcionamiento de este sistema, tanto en modo motor como generador.

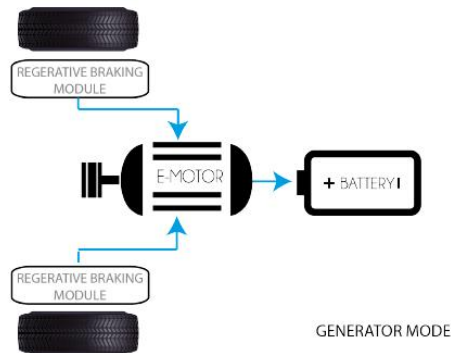


Figura 4 - Configuración sistema frenado regenerativo en modo generador [7]

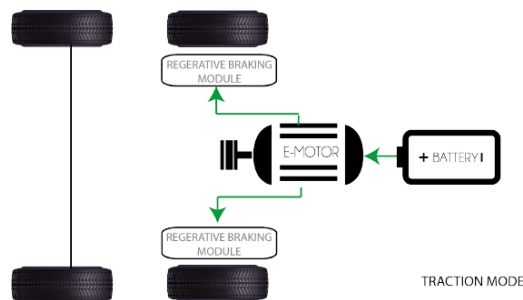


Figura 5 - Configuración sistema frenado regenerativo en modo motor [7]

Los extensores de rango comentados anteriormente son los más desarrollados hasta ahora. Existen más que no se han desarrollado tanto hasta ahora como microturbinas de gas, pilas de combustible, motor termoacústico, etc. El objetivo de este proyecto es diseñar uno de esos extensores de rango, en concreto un aerogenerador como sistema de recuperación de energía. Este se encuentra dentro de los extensores de rango que aprovechan la energía cinética del viento para aumentar la autonomía del vehículo eléctrico.

Capítulo 3. EL AEROGENERADOR COMO SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN VEHÍCULOS

Un aerogenerador puede actuar recuperando la energía de una forma similar al frenado regenerativo. Este puede ser instalado de dos modos: como recuperador de energía y como sistema que aprovecha la fuerza aerodinámica. La cantidad de energía del vehículo cambia si la velocidad de este se modifica.

En este capítulo se analiza la viabilidad teórica de utilizar un aerogenerador como sistema de recuperación de energía para la recarga de las baterías de un vehículo eléctrico en movimiento. Se evalúa cómo afecta al rendimiento aerodinámico del vehículo, así como a la fuerza aerodinámica o de arrastre para valorar si la idea es práctica de implementar.

En primer lugar, se realiza un análisis aerodinámico de un vehículo para ver el impacto de añadir una turbina en diferentes posiciones. Posteriormente se realiza un balance energético con las fuerzas necesarias para mover un vehículo en diferentes escenarios de circulación junto con la potencia recuperable por la turbina en las mismas condiciones.

Por último, se realiza una propuesta de diseño para llevar a cabo la parte mecánica de dicho sistema, es decir, la turbina y la tobera de conducción del flujo, así como los anclajes al chasis del vehículo.

3.1 ESTADO DEL ARTE Y REVISIÓN DE LA LITERATURA EXISTENTE

Existen diferentes estudios hasta la fecha que analizan diversos apartados relacionados con el tema de estudio, como el aspecto aerodinámico, el estudio de balance energético, distintos tipos de turbinas y generadores, o también el control de potencia de la máquina eléctrica. En los trabajos [13] y [14] se presenta y analiza un estudio de viabilidad de la aplicación de un sistema de recuperación de energía fluida mediante aerogeneradores para la carga de baterías de vehículos eléctricos en movimiento. Se evalúa el ahorro que se puede conseguir con sus dos posibles modos de funcionamiento: como dispositivo de recuperación de energía y como sistema de aprovechamiento de la fuerza aerodinámica. En estos trabajos se han analizado diferentes casos prácticos, con distintos modos de conducción, para cuantificar la energía teórica recuperada de la aerodinámica del vehículo. Los resultados muestran claramente las ventajas de utilizar la tecnología propuesta, especialmente en vehículos eléctricos y con mejores resultados en los escenarios de frenada y en el de diferencia de velocidades relativas del vehículo y el medio.

Además, es importante también mencionar en este informe diversos proyectos que se han llevado a cabo en relación con los vehículos eléctricos propulsados únicamente por el viento. En este sentido, los más conocidos y que mejores resultados obtuvieron fueron Ventomobile [15], Greenbird [16] y Blackbird [17], donde se demostró que con un determinado diseño de sistemas es posible que el viento empuje algo más rápido de lo que él mismo se desplaza. Por otro lado, con el Proyecto Eolo de Colombia [18] se construyó el primer vehículo 100 % eléctrico que aprovechaba la energía cinética del viento para almacenar energía en las baterías y así usarlo como un dispositivo de aumento de autonomía.

En el aspecto aerodinámico, se pueden encontrar diferentes estudios donde se realizan análisis fluidodinámicos mediante software (CFD) para analizar el efecto que puede tener el incorporar un aerogenerador a un vehículo en términos de resistencia aerodinámica.

En [19], [20] y [21] se desarrollan estudios que presentan evaluaciones sobre el rendimiento aerodinámico de un vehículo con un sistema aerogenerador acoplado,

analizando diferentes posiciones y tipos de turbina, para su uso en vehículos eléctricos con el objetivo de obtener la mayor energía posible del viento durante el desplazamiento y convertirla en energía eléctrica. Estos estudios muestran la importancia de la disposición del sistema ya que puede afectar a las características del aire alrededor del vehículo, así como al rendimiento aerodinámico. Sin embargo, también se demuestra que la instalación del aerogenerador en el frontal del vehículo (o cualquier lugar donde no se aumente la superficie frontal del mismo) no afecta de manera significativa en la eficiencia aerodinámica del vehículo, obteniendo resultados muy similares, ya que de esta manera se minimiza la resistencia aerodinámica.

El trabajo [22] se basa en el concepto de cargar las baterías de un vehículo eléctrico cuando está en movimiento, utilizando la energía del viento que se produce por el movimiento relativo entre el vehículo y el aire que lo rodea. Las turbinas eólicas pueden montarse en la estructura de la carrocería del vehículo para generar electricidad de tal manera que no creen ninguna fuerza de arrastre adicional (más allá de la fuerza de arrastre existente debido al área frontal y la fricción de la superficie) sobre el vehículo. En el artículo se presenta un análisis aerodinámico detallado de la estructura del vehículo junto con el patrón de flujo y la turbina eólica. Se presenta un diseño cuyas simulaciones demuestran que experimenta prácticamente la misma cantidad de resistencia aerodinámica en comparación con el modelo original, pero la adición de turbinas puede dar la posibilidad de capturar energía que ofrecerá beneficios para el vehículo. En el estudio estiman que con el concepto presentado puede ser posible aumentar el kilometraje de un vehículo eléctrico hasta un 20 % - 25 %.

En [23] se realiza igualmente un análisis aerodinámico de un vehículo y una turbina eólica instalada en el frontal de este, con el objetivo de extraer parte de la energía cinética del viento generada durante el movimiento. En este contexto, se observó que la ganancia de energía gracias al aerogenerador colocado en el vehículo es superior a la pérdida de energía inducida por la turbina eólica. Se determina que este hecho contribuye positivamente a la prolongación de la distancia recorrida con una sola carga.

3.2 ANÁLISIS AERODINÁMICO DE VEHÍCULO

Con el objetivo de analizar el impacto que tendría situar una turbina en el vehículo en movimiento conviene analizar en qué medida afecta al rendimiento aerodinámico y a la fuerza de resistencia del vehículo mediante un estudio computacional fluidodinámico (CFD). Se pretende medir la variación en la resistencia aerodinámica del vehículo en un análisis de flujo externo y decidir en qué lugar tiene menor impacto la incorporación de dicha turbina con el objetivo de poder producir energía eléctrica para la recarga de baterías.

La fuerza de arrastre experimentada por el vehículo es la fuerza de resistencia ejercida por el fluido que fluye sobre el mismo, tanto por presión como por viscosidad, fuerza que debe superar el vehículo para avanzar. La resistencia aerodinámica es por tanto un efecto indeseado en la dinámica de vehículos porque aumenta el consumo energético, por lo que hay que tratar de minimizar tal efecto. Típicamente es conveniente trabajar con algún número adimensional, el coeficiente de resistencia aerodinámica, que depende de la fuerza de resistencia aerodinámica (o fuerza de arrastre F_D), de la densidad ρ del fluido, la velocidad v del fluido, así como el área frontal proyectada A del vehículo en la dirección del flujo:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Este coeficiente es un valor adimensional que cuantifica la resistencia al arrastre de un objeto, así que cuando este valor es bajo, indica que el objeto tiene menos resistencia aerodinámica. El coeficiente de resistencia aerodinámica o de arrastre depende de la forma y posición del objeto (área proyectada) y las propiedades del fluido (tipo de fluido, densidad, velocidad, etc.). Si tiene un valor bajo indica que el objeto tiene menor resistencia aerodinámica.

El coeficiente permanece prácticamente constante independientemente de la velocidad para velocidades por encima de aproximadamente 90 km/h, rango en el cual los esfuerzos relacionados con la aerodinámica son predominantes, siendo la principal fuente de consumo energético para un motor [\[21\]](#).

3.2.1 MODELO DE VEHÍCULO Y TURBINA

Se ha modelado un vehículo tipo furgoneta y un volumen de turbina que pueda llegar a maximizar el espacio disponible sin comprometer la propia estructura y espacio del vehículo, así como el diseño original.

El tamaño del vehículo base es de 1,96 m x 2,01 m x 4,68 m y el volumen de la turbina es el equivalente a un cilindro de 0,4 m de diámetro y 1 m de longitud. Para este análisis se hace la simplificación de modelar únicamente el volumen que ocupa la turbina, sin una forma de álabes específica y sin aplicar rotación, esta hipótesis se puede encontrar en algunos estudios como el publicado por Sofian Mohd, Nurhayati Rosly, Rexca A.Jamit, Syariful.S Shamsudin y Aslam Abdullah [19].

Para ello se proponen tres modelos de vehículos: vehículo base sin turbina (A); con incorporación de la turbina en el frontal del vehículo (B); con la turbina en la parte superior (C). Estos vehículos son modelados mediante software CAD SolidWorks con el fin de evaluar la mejor posición del aerogenerador. Se han utilizado herramientas de croquis, extrusión y redondeados. Conviene aclarar que se han modelado de manera sencilla para tener un modelo topológicamente válido para la simulación. En la figura 6 y la figura 7 se pueden ver las dimensiones descritas:

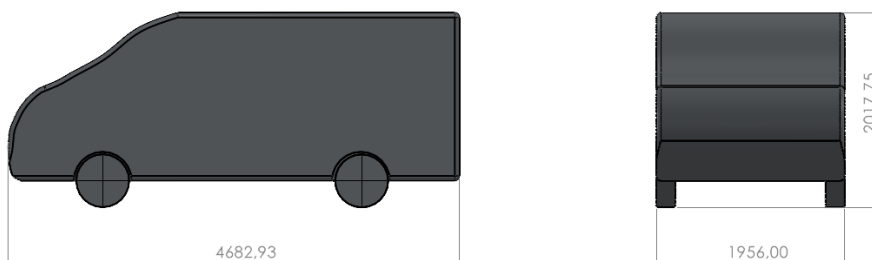


Figura 6 - Dimensiones vehículo base

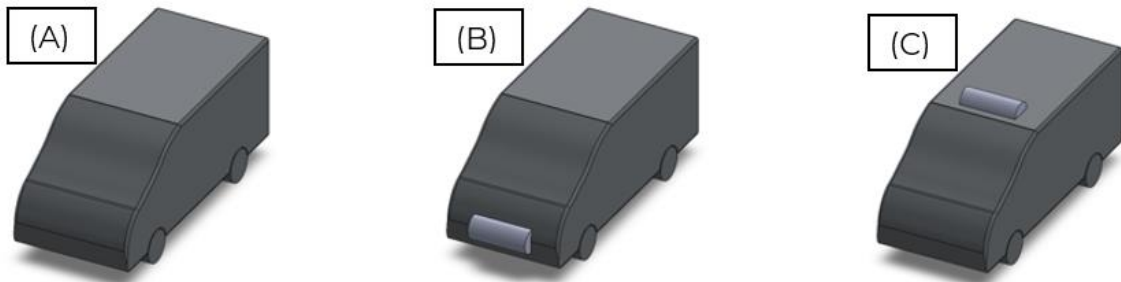


Figura 7 - Modelos empleados en la simulación de vehículos

Se mide el área frontal de cada uno de los tres modelos utilizando el software CAD, como se muestra en la figura 8, dando los datos que se muestran en la tabla 1:

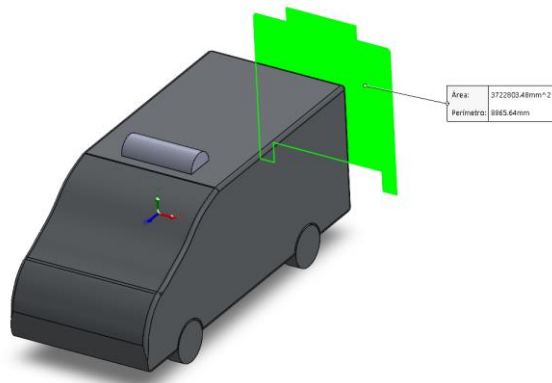


Figura 8 - Área proyectada del vehículo caso C

Tabla 1 - Área proyectada de los tres modelos de vehículos

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Área frontal proyectada, A [m^2]	3,52	3,52	3,72

Se puede observar que con el modelo B no se aumenta la superficie frontal del vehículo con respecto al modelo base A, pero con el modelo C, al tener la turbina la turbina

en la parte superior del mismo se incrementa en un 5,7 %. Esto debe tener un impacto al calcular la fuerza o coeficiente aerodinámico.

Teniendo en cuenta las dimensiones planteadas de la furgoneta y otras referencias bibliográficas, se puede esperar obtener un coeficiente aerodinámico entre 0,35 y 0,5, como se aprecia en la figura 9 [24]:

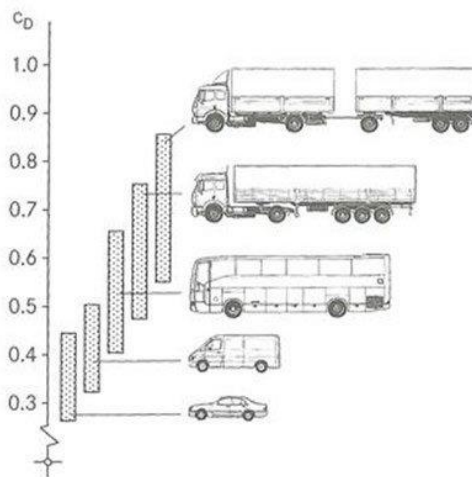


Figura 9 - Coeficiente aerodinámico de diferentes tipos de vehículos

3.2.2 SIMULACIÓN

Una vez planteado los diferentes modelos se prepara la simulación fluidodinámica (CFD), donde los tres modelos se simulan bajo condiciones y parámetros iguales. Para ello se importan los modelos al software Ansys Discovery, una herramienta de diseño basada en simulación que combina simulación física instantánea, simulación de alta fidelidad y modelado geométrico interactivo [25].

3.2.2.1 Preparación del modelo

Antes de realizar la simulación se revisa el modelo CAD para tratar de simplificar posibles geometrías que no afecten al comportamiento del fluido y corregir ciertas

imprecisiones. Algunos ejemplos son el relleno de huecos, figura 10, o la corrección de aristas inexactas, figura 11:

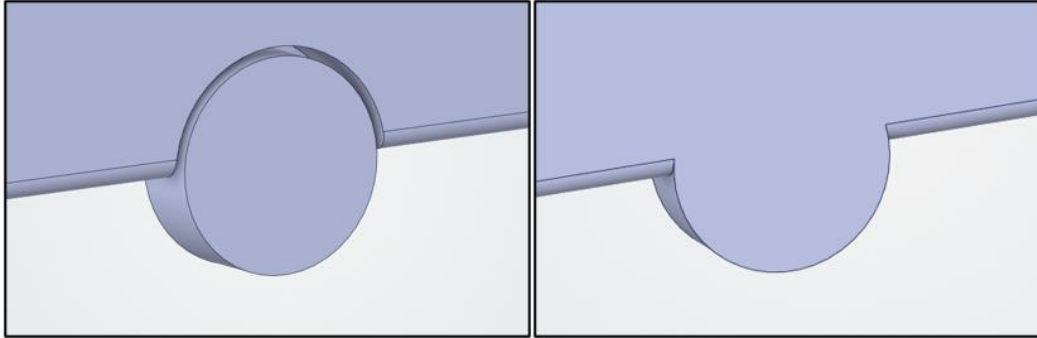


Figura 10 - Simplificación geometría rueda

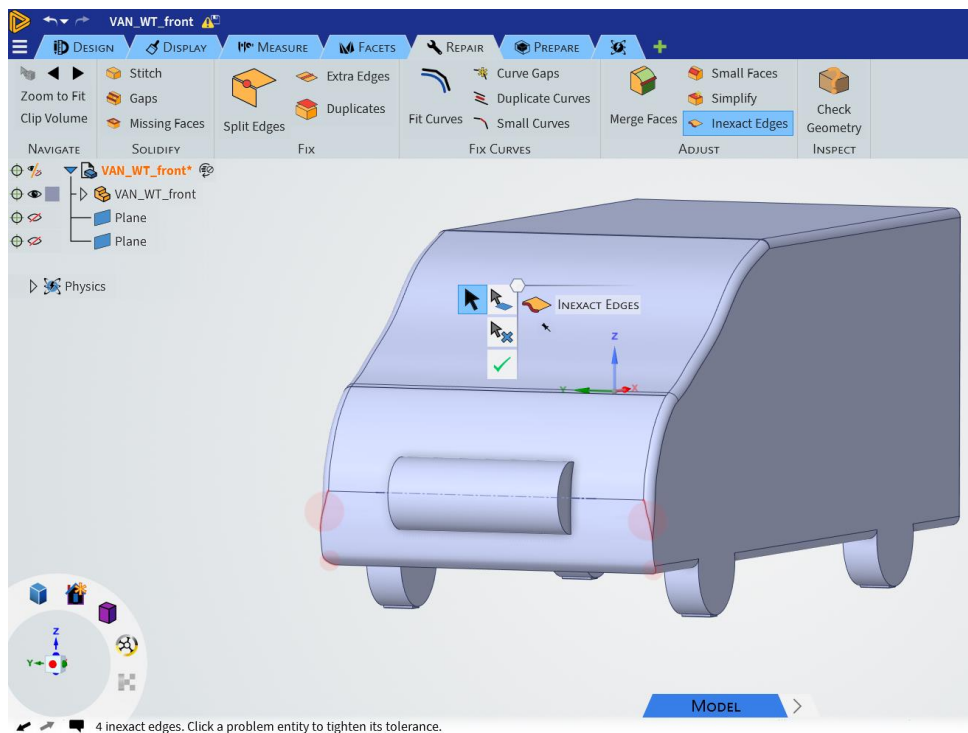


Figura 11 - Corrección de aristas inexactas en el modelo del vehículo

Por otro lado, para este modelo concreto analizado, se tienen zonas de contacto entre las ruedas y el suelo que dan lugar a zonas de borde con formas afiladas. Esto conduce a la formación de elementos de mala calidad en esas regiones a la hora de realizar el mallado. Para evitar esto, se crean parches de contacto entre las ruedas y el suelo como se ve en la figura 12:

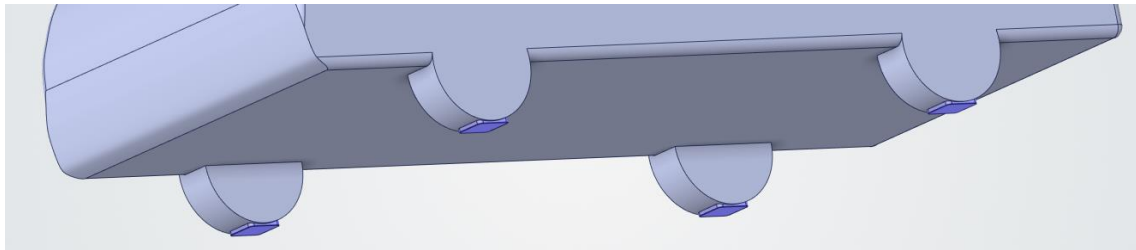


Figura 12 - Creación de parches de contacto rueda-suelo

3.2.2.2 Volumen de control y condiciones de contorno

El volumen de control o dominio de cálculo es un prisma rectangular. Los planos en los límites del dominio son ortogonales a los ejes del sistema de coordenadas cartesiano. En análisis externos como es el caso de este estudio, el dominio de cálculo cubre el espacio circundante del modelo.

Para las dimensiones de este volumen se tienen en cuenta ciertas recomendaciones, con el objetivo de que las perturbaciones introducidas por la presencia de la geometría no interfieran con los límites impuestos. El dominio computacional es diseñado para replicar las condiciones de una carretera abierta.

Aguas arriba del cuerpo se recomienda tener al menos dos veces la longitud del propio cuerpo. Aguas abajo, generalmente el cuerpo arroja una estela de flujo, por lo que se recomienda una longitud de al menos 5 veces la dimensión del cuerpo en esa dirección. De manera similar, normalmente se recomienda dejar un espacio aproximado de 2 veces el ancho del cuerpo en cada lado para permitir la desviación local del flujo [\[26\]](#).

Otro parámetro para definir y evaluar las dimensiones del volumen de control viene dado por el *blockage ratio*, definido como el radio entre el área proyectada del modelo y la sección del dominio, debiendo ser típicamente inferior al 5 %.

El volumen de control empleado se muestra en las figuras 13, 14 y 15, siendo la longitud de referencia $L = 4,68$ m la longitud del vehículo:

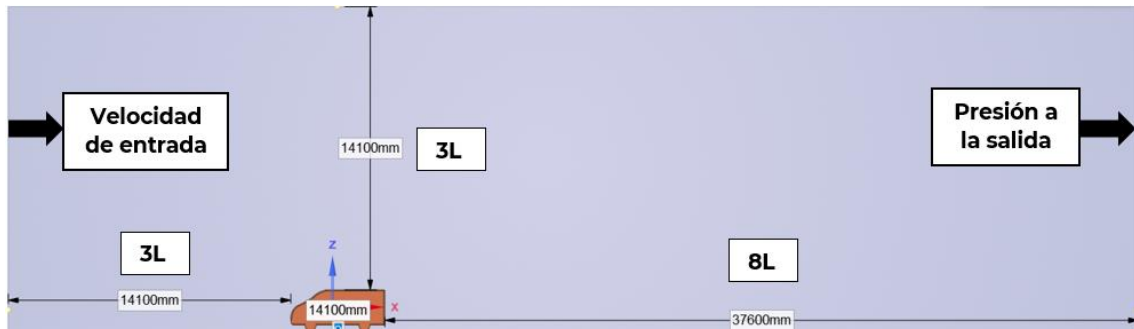


Figura 13 - Dimensiones volumen de control (lateral) del modelo del vehículo

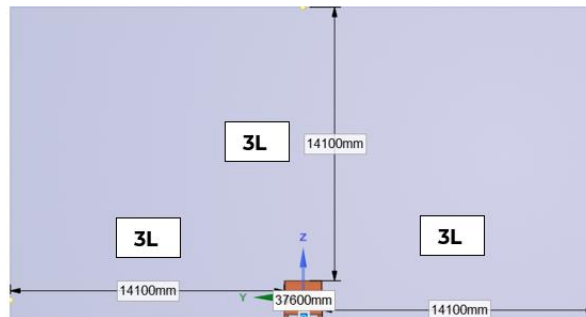


Figura 14 - Dimensiones volumen de control (frontal) del modelo del vehículo

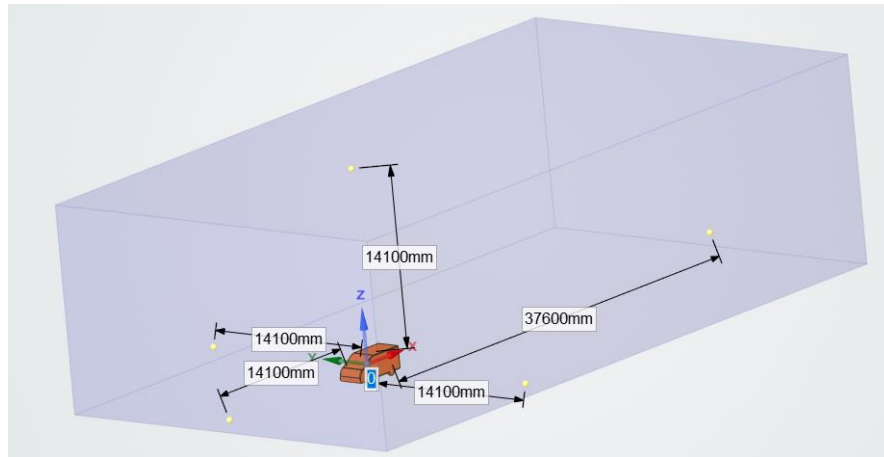


Figura 15 - Dimensiones volumen de control (perspectiva) del modelo del vehículo

El plano inferior del volumen de control, que corresponde al suelo y superficie de contacto del vehículo, tiene una condición de *No slip (stationary)*, así como el contorno del vehículo, donde el fluido se pega a la pared. Las otras paredes tienen condición de *Free slip*, donde la componente normal de la velocidad es cero. Cabe la posibilidad de modelar el suelo con condición de *translation*, imponiendo la velocidad de entrada del viento, pero en ese caso los resultados no varían.

El resto de las condiciones de contorno y valores de referencia se muestran en la tabla 2:

Tabla 2 - Condiciones de contorno análisis externo sobre vehículo

Velocidad de entrada	27,8 m/s
Presión a la salida	Presión atmosférica
Pared inferior y vehículo	No slip
Paredes laterales y superior	Free slip
Fluido	Aire
Densidad	1,16 kg/m ³
Viscosidad	1,832 x 10 ⁻⁵ Pa·s
Modelo de turbulencia	k-omega SST

Como aclaración, la condición de presión a la salida se especifica como 0 Pa, es una presión manométrica que indica la diferencia entre la presión absoluta o real y la presión atmosférica.

Ansys Discovery utiliza los modelos Reynolds-Averged Navier-Stokes (RANS) para resolver los flujos turbulentos, que resuelven ecuaciones de transporte adicionales para turbulencias e introducen una viscosidad turbulenta (también conocida como viscosidad turbulenta) en la simulación para imitar el efecto de la turbulencia, un enfoque de modelado adecuado para muchas aplicaciones de ingeniería.

El modelo elegido es el k-omega SST. Los modelos k-omega suelen ser mejores para predecir la separación de flujos, y esta es una de las razones por las que el modelo k-omega SST se encuentra entre los modelos más utilizados para flujos aerodinámicos. Este modelo permite una resolución más precisa del comportamiento de la capa límite a medida que se refina la resolución cercana a la pared.

3.2.2.3 Mallado

Para la resolución del modelo se utiliza una malla tetraédrica, utilizando el autoajuste de calidad para zonas de baja fidelidad que ofrece el software Ansys Discovery. La función para generar la malla es proximidad y curvatura, lo que refina las zonas donde hay mayor curvatura, así como zonas que puedan estar próximas entre sí.

Para tener una idea de la malla generada se monitorizan algunas estadísticas para cada caso, como el número de elementos y el número de nodos. Además, se monitoriza la calidad de los elementos, métrica de calidad compuesta que oscila entre 0 y 1. Esta métrica se basa en la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de los bordes en los elementos 3D. Un valor de 1 indica un cubo perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo.

$$Quality = C[volumen/\sqrt{[\sum(longitud\ borde)^2]^3}]$$

Siendo $C = 124,070765802$ para los elementos tetraédricos.

También se monitoriza la calidad ortogonal media, siendo un valor cercano a 0 peor y cercano a 1 mejor. Este valor es el mínimo entre la ortogonalidad y $(1 - \text{oblicuidad de la celda})$, medidas que determinan cuánto de cerca de lo ideal es una cara o celda.

Antes de computar las simulaciones se realiza un análisis de sensibilidad de la malla, evaluando la convergencia de algún parámetro de interés, en este caso la fuerza de resistencia aerodinámica. Con esto, se puede asegurar que la malla no tiene influencia en los resultados y que se está resolviendo con una malla adecuada.

Se realiza un cálculo de estado estable (estacionario), para determinar las características del fluido que no varían con el tiempo. En cuanto a la convergencia, se especifica como *engineering convergence*, es decir, los valores de presión, velocidad y temperatura se monitorean para cada condición de flujo, y la temperatura y presión se monitorean para cada condición de la pared. Cuando estas cantidades monitoreadas se hayan estabilizado, la solución se determina como completa.

Para resolver los modelos se utiliza el solver de Ansys Discovery LiveGX. El solver LiveGX usa la tecnología de la GPU que permite obtener soluciones de manera más rápida sin comprometer la precisión. Si se utiliza el solucionador de GPU, una pauta aproximada es que se requiere 1 GB de memoria de GPU por cada millón de elementos en el modelo, por lo que se puede hacer uso de esta tecnología y aprovechar sus ventajas.

A continuación, en la tabla 3, se muestra un análisis de sensibilidad de la malla, donde se ha ido haciendo una simulación del modelo A de la furgoneta (modelo sin turbina), monitorizando la convergencia de la fuerza aerodinámica. Además, se muestran los parámetros de calidad mencionados, así como número de elementos y nodos.

Tabla 3 - Resultados análisis de convergencia de malla

Fidelidad malla	1	2	3	4	5
Número de elementos	5,16e4	1,63e5	2,36e5	6,86e5	2,18e6
Número de nodos	1,2e5	3,91e4	5,71e4	1,81e5	5.29e5
Calidad media elementos	0,745	0,736	0,741	0,698	0,738
Calidad ortogonal media	0,732	0,741	0,747	0,754	0,778
Fuerza aerodinámica F_d [N]	733	617	588	558	546
Diferencia (%)	-	16 %	5 %	5 %	2 %

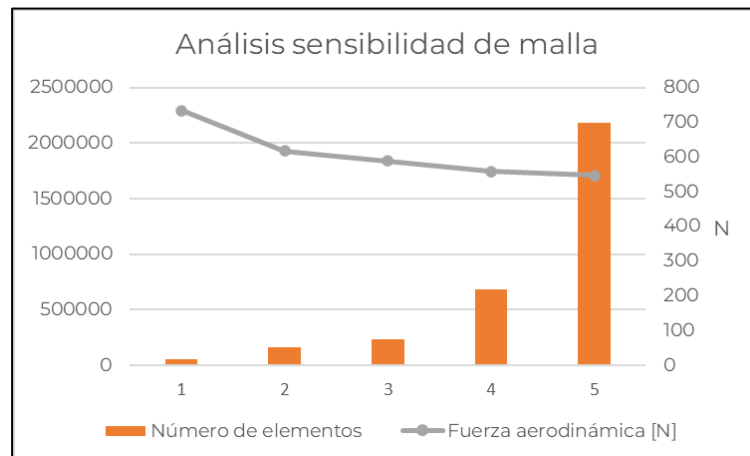


Gráfico 2 – Análisis de convergencia de malla

En el gráfico 2 se puede apreciar cómo en la iteración 5 se aumenta a más del doble el número de elementos consiguiendo una diferencia de solamente el 2 %, por lo que se estima como una malla adecuada para continuar las simulaciones.

En la tabla 4 se muestran los valores de la malla en los tres modelos analizados con el último nivel de fidelidad de malla analizado:

Tabla 4 - Estadística y calidad de las mallas simuladas en el modelo del vehículo

	A	B	C
Número de elementos	2,18e6	2,22e6	2,18e6
Número de nodos	5,29e5	5,43e5	5,3e5
Calidad malla	0,738	0,736	0,738

En la figura 16 y figura 17 se puede apreciar la malla con elementos tetraédricos generada, así como la capa límite, pudiendo apreciar cómo es más fina en aquellas zonas de curvatura y proximidad:

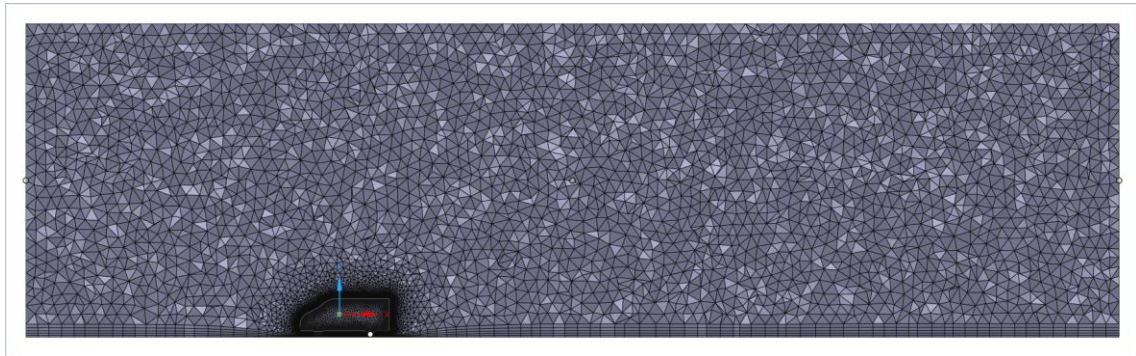


Figura 16 - Malla tetraédrica global generada en el modelo del vehículo

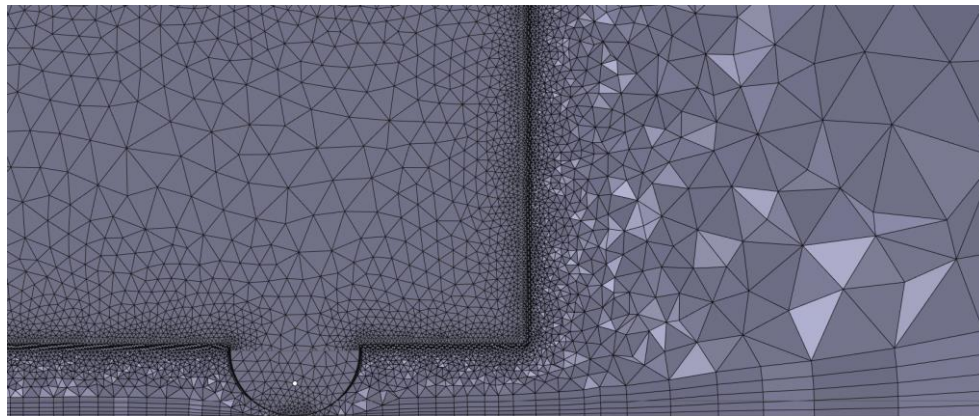


Figura 17 - Detalle de la malla en zonas de curvatura y proximidad en el modelo del vehículo

3.2.2.4 Resultados simulación

Se analiza las características del flujo externo alrededor del cuerpo del vehículo con el objetivo de evaluar el rendimiento aerodinámico del mismo cuando la turbina es colocada en diferentes posiciones. Los modelos se resuelven utilizando el siguiente hardware: GPU NVIDIA GeForce RTX 4070 de 75,9 Gb.

Las figuras 18 y 19 muestran la distribución de velocidad y líneas de flujo alrededor del vehículo sin ninguna turbina instalada. Se puede observar que el aire comienza a frenarse gradualmente hacia la parte delantera del vehículo, pero se vuelve a acelerar al llegar a la parrilla frontal hasta el nivel del techo. Después se frena de nuevo en la parte trasera del vehículo cuando se produce la separación del flujo. Se puede apreciar que la mayor velocidad se encuentra en la parte superior del vehículo. Esta es una de las razones por las que muchos diseñadores e inventores propusieron la instalación de la turbina en el techo del vehículo, la alta velocidad del viento en esa área ayuda a rotar la turbina a máxima velocidad y por tanto generar más electricidad.

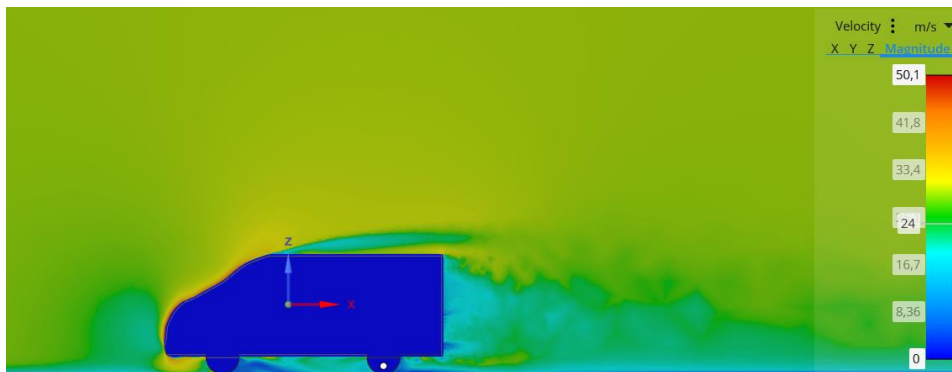


Figura 18 - Distribución de velocidad del aire alrededor del vehículo sin turbina

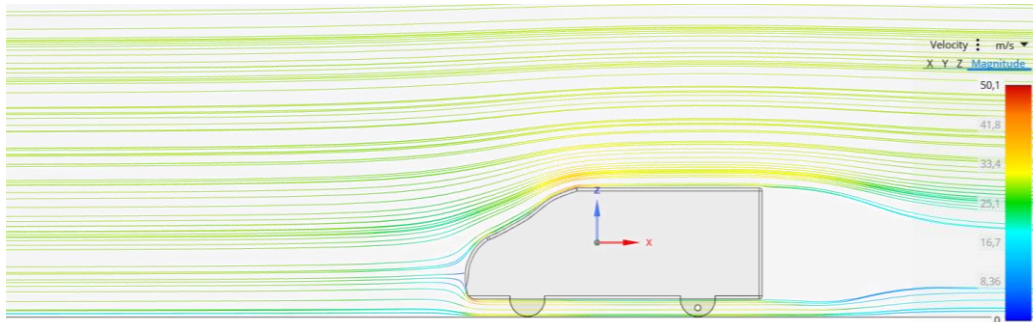


Figura 19 - Líneas de flujo vehículo sin turbina

En las figuras 20 y 21 se muestra el contorno de velocidad del aire alrededor del vehículo con la turbina montada en la parrilla frontal. Se puede observar que la distribución de velocidad es similar a la del vehículo base de la imagen anterior. Esto indica que la instalación de la turbina en el frontal del vehículo no afecta de manera considerable el rendimiento aerodinámico general del vehículo.

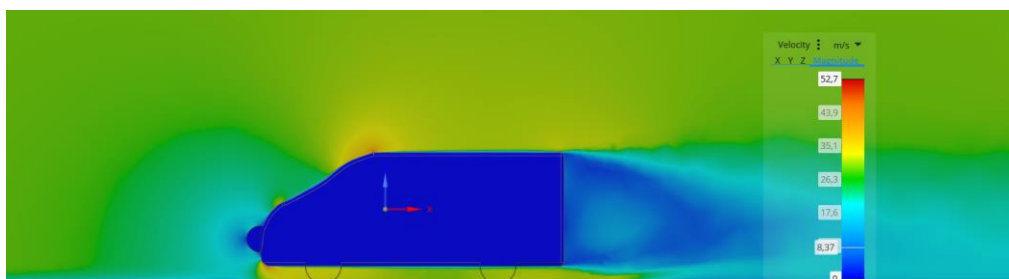


Figura 20 - Contorno de velocidades del vehículo con turbina en la parrilla frontal

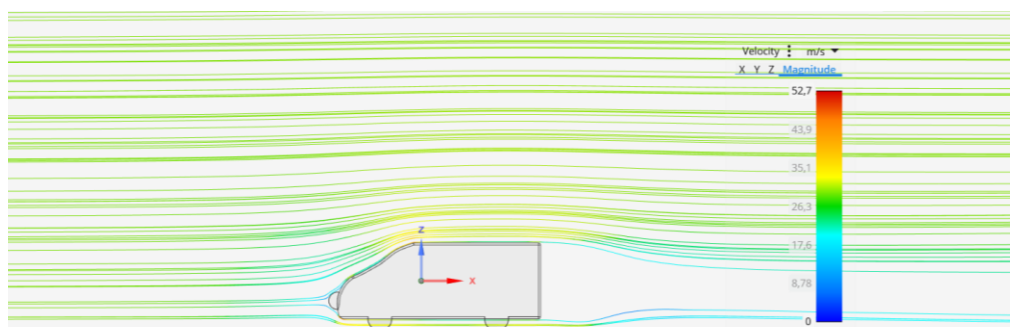


Figura 21 - Líneas de flujo del vehículo con turbina en la parrilla frontal

A diferencia del caso anterior, la instalación de la turbina en la parte superior del vehículo sí que muestra cambios significativos en el rendimiento aerodinámico del vehículo, causando cambios en la distribución de velocidad alrededor del vehículo al aumentar las zonas de baja velocidad, como se puede observar en la distribución de velocidades de la figura 22 y las líneas de flujo en la figura 23.

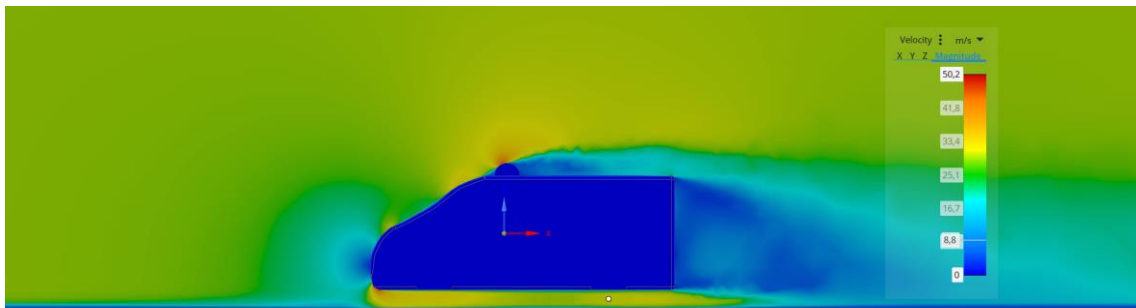


Figura 22 - Contorno de velocidades del vehículo con turbina en el techo

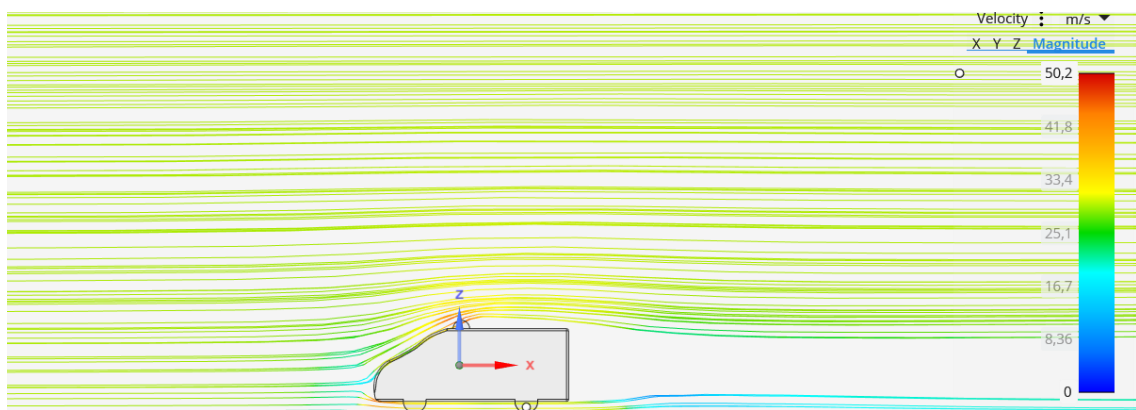


Figura 23 - Líneas de flujo del vehículo con turbina en la parrilla frontal

En la tabla 5 se muestran los resultados de coeficiente aerodinámico basados en las fuerzas aerodinámicas resistivas obtenidas en cada simulación según las diferentes posiciones de la turbina en el vehículo.

Tabla 5 - Resultados análisis aerodinámico

Posición	Sin turbina (Modelo A)	Parte frontal (Modelo B)	Parte superior (Modelo C)
Área frontal proyectada, A [m^2]	3,52	3,52	3,72
Fuerza aerodinámica, F_d [N]	546	549	631
Coficiente aerodinámico, C_d	0,346	0,348	0,378

En primer lugar, el coeficiente aerodinámico es proporcional a la fuerza aerodinámica, por lo que valores más altos de fuerza resistiva implican valores mayores de dicho coeficiente adimensional. Además, como se mencionó previamente en el apartado 3.1, los coeficientes aerodinámicos están en el orden esperado para dicho tipo de vehículo.

Al introducir la turbina en la parte frontal del vehículo no se observa gran cambio, solo un aumento del 0,6 %. Un cambio más significativo se puede apreciar en la propuesta de la turbina en el techo del vehículo, donde aumenta un 9,25%.

Además del rendimiento aerodinámico del vehículo, habría que analizar otros aspectos. Hay que valorar el hecho de tener menores velocidades en el área frontal del vehículo para analizar si el sistema fuese a funcionar de manera eficiente a esas velocidades o si, por el contrario, sería mejor idea aprovechar las altas velocidades en la parte superior del vehículo. Esto último afectaría la aerodinámica del vehículo, incrementando la resistencia y, por tanto, aumentando teóricamente el consumo energético para mover el vehículo.

Otro aspecto para tratar, que no es objeto de este trabajo, es el generador eléctrico y su eficiencia, ya que habría que analizar si este elemento pudiese generar suficiente potencia eléctrica para ser usado por los sistemas del vehículo.

3.2.3 CONCLUSIONES

A parte de los dos factores principales que influyen en la fuerza de resistencia, que son el vehículo y la velocidad a la que se desplaza, se puede observar que la instalación de una turbina puede influir en esta fuerza. En la simulación se ha obtenido un coeficiente aerodinámico del vehículo sin turbina 0,346, que corresponde al coeficiente aproximado de una furgoneta.

Se puede concluir que la instalación de la turbina en el parachoques delantero apenas afecta al rendimiento aerodinámico del coche, el inconveniente es que el viento tendrá una baja velocidad en esa sección. Sin embargo, la instalación de la turbina en el techo, aunque pueda ser muy eficaz debido a la alta velocidad del viento en esa zona, afecta considerablemente al rendimiento aerodinámico del vehículo, haciendo que aumente más de un 9%. Un aumento de la fuerza de resistencia de la furgoneta provocará un aumento de la potencia consumida por el vehículo para desplazarse.

Por último, en la instalación del sistema de turbina eólica también hay que tener en cuenta el valor estético puesto que afectará a la apariencia del vehículo. Por todo lo comentado anteriormente, la ubicación óptima de la turbina será en el parachoques delantero del vehículo.

3.3 ENERGÍA RECUPERABLE POR LA TURBINA: BALANCE ENERGÉTICO

En este apartado se hace un estudio de las fuerzas que actúan durante el movimiento del vehículo con el objetivo de hacer un balance energético y evaluar la turbina como sistema

de recuperación de energía. Se analiza la viabilidad de instalar la turbina analizando las ganancias en sus dos posibles modos de funcionamiento: como sistema de recuperación de energía durante las frenadas (similar a un KERS) y como sistema que usa las fuerzas aerodinámicas.

Un vehículo en movimiento está sujeto a la fuerza del flujo de viento, creando una fuerza de resistencia aerodinámica. La energía eólica generada durante el movimiento podría ser recuperada mediante un uso apropiado de microturbinas, lo que ayudaría a generar energía eléctrica para la demanda del vehículo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que introducir estas microturbinas en el vehículo puede incrementar las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el mismo, como se vio en el capítulo anterior, incrementando por tanto la energía consumida para mover el vehículo y siendo por ende contraproducente.

Así pues, un aspecto clave es determinar la diferencia del coeficiente aerodinámico del vehículo con y sin turbinas y plantear un balance energético con el resto de las fuerzas actuantes durante el movimiento del vehículo, para comprobar si el cómputo total da visos de viabilidad en el uso de esta tecnología.

Hay que recalcar que el principio de diseño se debe basar en intentar aprovechar de una manera eficiente las corrientes de aire que el vehículo ya ha generado, capturándolas dentro del vehículo de tal manera que no impongan una resistencia adicional en la dirección de propulsión del vehículo. Adicionalmente, el principio de funcionamiento debe enfocarse en aumentar la presión en la parte trasera, lo que reducirá la fuerza de arrastre.

Para realizar el análisis es necesario plantear un ciclo de funcionamiento típico del vehículo y el motor, en el que se tengan en cuenta paradas, aceleraciones, distintas velocidades, etc. representando la realidad operativa. En estos ciclos se determina la energía consumida por un vehículo, necesaria para el propio movimiento y por otro lado la energía recuperable por el sistema aerogenerador. En los siguientes apartados se van a plantear distintos escenarios de conducción.

3.3.1 PRIMER ESCENARIO

Este primer escenario va a simular una conducción urbana, experimentando aceleraciones, desaceleraciones, velocidad constante, paradas, pendientes ascendentes y descendentes. El tiempo total del ciclo es de 1217 s (20,3 min), con una distancia recorrida de 9,1 km y una velocidad máxima de 50 km/h. Los datos de los diferentes intervalos se observan en la Tabla 6:

Tabla 6: datos escenario de conducción 1

Tramo	Tiempo t (s)	t acumulado	V inicial (km/h)	V final (km/h)
Aceleración	8	8	0	15
Subida 30%	7	15	15	15
V constante	12	27	15	15
Subida 30%	10	37	15	15
Deceleración	9	46	15	0
Parada	32	78	0	0
Aceleración	7	85	0	45
V constante	22	107	45	45
Deceleración	10	117	45	0
Parada	31	148	0	0
Aceleración	12	160	0	50
V constante	22	182	50	50
Deceleración	32	214	50	15
Aceleración	31	245	15	50
V constante	33	278	50	50
Deceleración	15	293	50	0
Parada	27	320	0	0
Aceleración	20	340	0	30
V constante	12	352	30	30
Deceleración	32	384	30	0
Parada	28	412	0	0
Aceleración	13	425	0	20
V constante	33	458	20	20
Deceleración	19	477	20	0
Parada	25	502	0	0
Aceleración	20	522	0	20

EL AEROGENERADOR COMO SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN VEHÍCULOS

Aceleración	3	525	20	25
Aceleración	5	530	25	50
V constante	40	570	50	50
Deceleración	14	584	50	0
Parada	24	608	0	0
Aceleración	6	614	0	20
Aceleración	7	621	20	25
Aceleración	7	628	25	50
V constante	40	668	50	50
Deceleración	16	684	50	0
Parada	20	704	0	0
Aceleración	16	720	0	50
Subida 30%	20	740	50	50
V constante	45	785	50	50
Bajada 5%	18	803	50	50
Deceleración	4	807	50	40
Deceleración	6	813	40	0
Aceleración	8	821	0	15
Subida 30%	5	826	15	15
V constante	7	833	15	15
Subida 30%	12	845	15	15
Deceleración	11	856	15	0
Parada	25	881	0	0
Aceleración	12	893	0	50
V constante	26	919	50	50
Deceleración	35	954	50	20
Aceleración	28	982	20	50
V constante	30	1012	50	50
Parada	25	1037	50	0
Aceleración	14	1051	0	50
V constante	26	1077	50	50
Deceleración	37	1114	50	30
Aceleración	31	1145	30	50
V constante	30	1175	50	50
Deceleración	7	1182	50	25
Deceleración	10	1192	25	0
Parada	25	1217	0	0

3.3.2 SEGUNDO ESCENARIO

El segundo escenario corresponde a una conducción interurbana, con un tiempo de conducción mucho más largo que en el escenario anterior, siendo el tiempo total de 6172 s (1,7 h), una distancia recorrida de 198 km y una velocidad máxima de 120 km/h. Las características de cada intervalo se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: datos escenario de conducción 2

Tramo	Tiempo t (s)	t acumulado	V inicial (km/h)	V final (km/h)
Aceleración	20	20	0	80
Aceleración	15	35	80	120
V constante	100	135	120	120
Subida 5%	25	160	120	120
V constante	500	660	120	120
Bajada 5%	25	685	120	120
Deceleración	20	705	120	70
Aceleración	15	720	70	100
V constante	70	790	100	100
Subida 5%	30	820	100	30
Deceleración	15	835	30	20
Aceleración	15	850	20	60
Aceleración	20	870	60	120
V constante	350	1220	120	120
Subida 5%	27	1247	120	120
V constante	550	1797	120	120
Deceleración	15	1812	120	80
V constante	250	2062	80	80
Deceleración	15	2077	80	70
V constante	45	2122	70	70
Aceleración	25	2147	70	110
Aceleración	15	2162	110	120

V constante	200	2362	120	120
Bajada 5%	40	2402	120	100
V constante	35	2437	100	100
Subida 5%	25	2462	100	120
V constante	3650	6112	120	120
Deceleración	15	6127	120	100
Deceleración	25	6152	100	50
Deceleración	20	6172	50	0

3.3.3 ANÁLISIS DE FUERZAS

Para realizar el balance energético del vehículo en movimiento es necesario conocer las fuerzas actuantes en el mismo en cada momento, pues entran en juego otras fuerzas además de la ya mencionada fuerza de resistencia aerodinámica.

Conociendo estas fuerzas se calcula la potencia y la energía consumida en cada uno de los intervalos de cada escenario, que pueden ser: velocidad constante sin pendiente, aceleración sin pendiente, deceleración sin pendiente, velocidad constante con pendiente ascendente, aceleración pendiente ascendente, deceleración pendiente descendente, velocidad constante pendiente descendente, aceleración pendiente descendente y deceleración pendiente descendente.

El cálculo de las fuerzas en el conjunto se basa en la 2ª Ley de Newton, es decir, que la sumatoria de fuerzas actuantes es igual a la masa por la aceleración del sistema (fuerza de inercia, F_i):

$$\Sigma F_x = m \cdot a_x$$

donde x es la dirección del movimiento.

El sumatorio de fuerzas puede expresarse como la diferencia entre la fuerza de tracción del vehículo menos las fuerzas resistentes:

$$\Sigma F_x = F_{tracción} - F_{resistentes}$$

En este sentido se pueden dar 3 casos:

- 1) $> 0 \rightarrow$ *aceleración* : $a_x > 0$
- 2) $= 0 \rightarrow$ *velocidad constante* : $a_x = 0$
- 3) $< 0 \rightarrow$ *desaceleración* : $a_x < 0$

Las fuerzas resistentes son la fuerza de rodadura producida por el contacto del neumático con el pavimento, la fuerza aerodinámica y la fuerza del peso proyectado en la dirección del movimiento:

$$F_{resistentes} = F_r + F_a + F_w$$

Por tanto, se puede expresar como:

$$F_{tracción} = F_{resistentes} + F_i$$

Y finalmente la fórmula que se utiliza para el cálculo:

$$F_{tracción} = F_r + F_a + F_w + F_i$$

En cuanto a la fuerza de tracción, esta se puede interpretar de dos maneras según el valor que tenga, como fuerza del motor para avanzar de una manera determinada o como fuerza de frenada, que se puede dar en desaceleraciones o en algunas bajadas:

$$F_{tracción} > 0 \rightarrow F_{tracción} \equiv F_{motor}$$

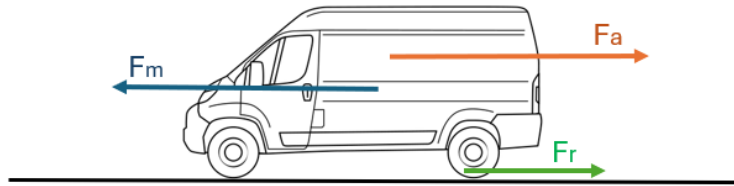
$$F_{tracción} < 0 \rightarrow F_{tracción} \equiv F_{freno}$$

Es importante mencionar que la fuerza de inercia es una fuerza que se produce en sentido opuesto a la aceleración (o desaceleración). En este caso no se ha planteado con signo negativo porque se tiene en cuenta en el sumatorio vectorial de fuerzas, como se puede

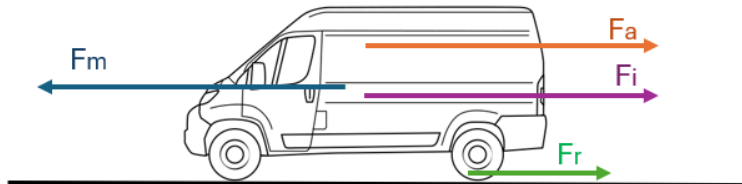
EL AEROGENERADOR COMO SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN VEHÍCULOS

ver en las imágenes siguientes, que representan diferentes escenarios de circulación con las diferentes fuerzas actuantes:

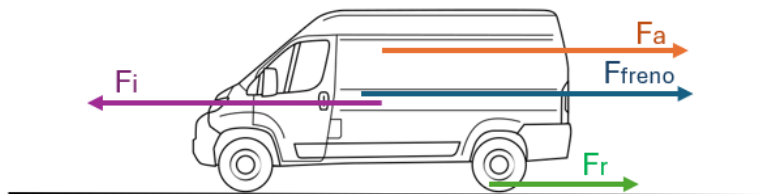
Caso 1: Velocidad constante sin rampa



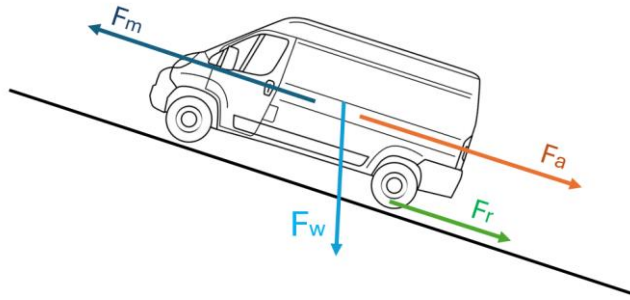
Caso 2: Aceleración sin rampa



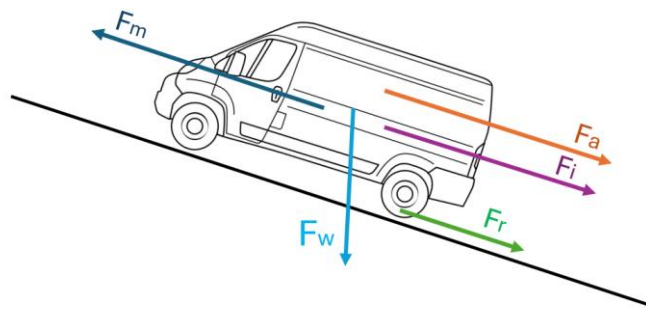
Caso 3: Deceleración sin rampa



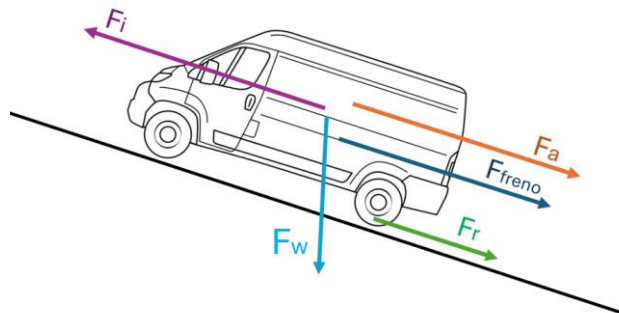
Caso 4: Velocidad constante rampa ascendente



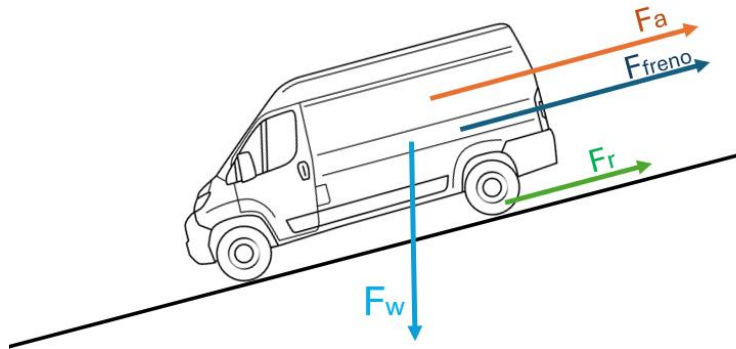
Caso 5: Aceleración rampa ascendente



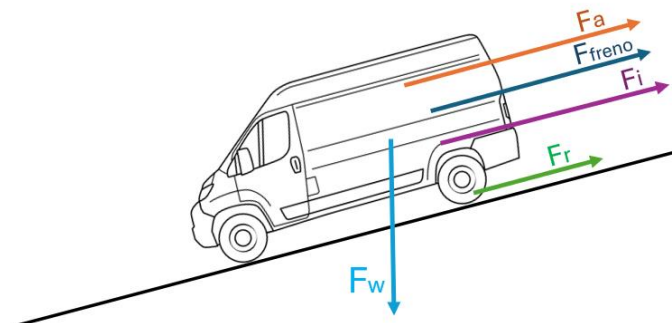
Caso 6: Deceleración rampa ascendente



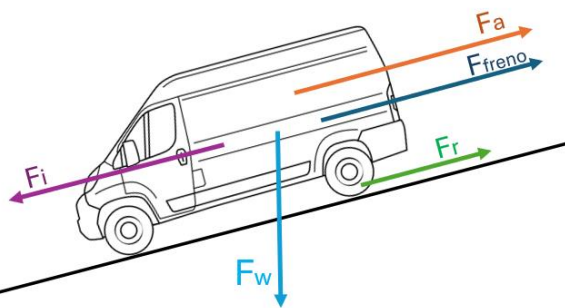
Caso 7: Velocidad constante rampa descendente



Caso 8: Aceleración rampa descendente



Caso 9: Deceleración rampa descendente



La formulación de las fuerzas de inercia y resistivas se detallan a continuación:

$$F_i = m \cdot a$$

$$F_r = f_r \cdot w \cdot \cos \theta = f_r \cdot m \cdot g \cos \theta$$

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

$$F_w = w \cdot \sin \theta = m \cdot g \cdot \sin \theta$$

Donde cada termino se corresponde con:

F_m = Fuerza motor

F_{freno} = Fuerza de frenado

$F_{tracción}$ = Fuerza de tracción

F_i = Fuerza de inercia

F_r = Fuerza de rodadura

F_a = Fuerza aerodinámica

F_w = Peso proyectado en la dirección del movimiento

Otros datos empleados en los cálculos posteriores:

m = Masa del vehículo

v = Velocidad del vehículo

g = Gravedad

a = Aceleración del vehículo

f_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura

θ = Ángulo de la pendiente (inclinación de la carretera)

C_d = Coeficiente aerodinámico

ρ = Densidad del aire

A = Área proyectada del coche

Hay que mencionar que para el cálculo de la fuerza aerodinámica solo se tiene en cuenta la velocidad del vehículo y no la velocidad del viento, pues se asume que en un determinado trayecto esta influencia puede ser positiva y negativa de manera indeterminada. Por tanto, no se expresa con el termino $(v \pm v_0)^2$ que se puede encontrar en alguna literatura.

Para el cálculo del coeficiente de resistencia por rodadura se utiliza la propuesta de la referencia [24], dando dependencia a este factor de la velocidad del vehículo, aumentando con la velocidad de la siguiente manera:

$$f_r = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{160}\right)$$

3.3.4 CÁLCULOS BALANCE ENERGÉTICO

Una vez calculadas todas las fuerzas actuantes sobre el vehículo descritas en el apartado anterior se calcula la energía consumida total, calculada tramo a tramo:

$$E_{cons} = \int_0^T P_{tracción} \cdot dt \approx \sum_{i=1}^N P_i \cdot \Delta_t$$

Donde T es el tiempo total del ciclo, N el número total de tramos y Δ_t el intervalo de tiempo de cada uno de los tramos.

La potencia es un término instantáneo que se aproxima teniendo en cuenta la velocidad media de cada uno de los tramos:

$$P_i = F_{tracción} \cdot v_{media}$$

Para el cálculo de la energía total consumida se tienen en cuenta el valor de todos los tramos, incluso aquellos tramos en los que la fuerza de tracción es negativa, es decir, se frena y desacelera, ya que esta energía se utilizará a favor como sistema de recuperación en vez de ser disipada en forma de calor:

$$E_{cons} = E_{motor} + E_{frenada}$$

Siendo:

$$E_{motor} = \int_{F_{tracción} \geq 0} P_{tracción} \cdot dt > 0$$

$$E_{frenada} = \int_{F_{tracción} < 0} P_{tracción} \cdot dt < 0$$

Además de esta energía regenerada por la frenada hay que calcular la energía recuperada por la turbina aprovechando las corrientes de aire y la pérdida inducida por aumento de resistencia aerodinámica. La potencia recuperable por la turbina viene descrita mediante la siguiente expresión:

$$P_{turbina} = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot v^3$$

Donde:

η : rendimiento total del sistema aerogenerador

A_t : área frontal de la turbina

v : velocidad del viento

Siendo el rendimiento:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$$

Donde:

η_1 : rendimiento de la turbina

η_2 : rendimiento del generador eléctrico

η_3 : rendimiento del multiplicador/sistema mecánico

Esta potencia recuperable por la turbina se traduce en energía siguiendo la misma base descrita anteriormente, utilizando la velocidad media en cada tramo y haciendo el sumatorio de cada uno de ellos.

Por otro lado, la fuerza aerodinámica adicional que induce la incorporación de la turbina en el vehículo viene dada por:

$$F_{a-turbina} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (C_{dB} - C_{dA}) \cdot A \cdot v^2$$

Donde

C_{dA} : coeficiente aerodinámico del vehículo sin turbina

C_{dB} : coeficiente aerodinámico del vehículo con turbina

Igualmente, se utiliza la velocidad media de cada tramo para calcular la potencia y posteriormente se calcula el sumatorio de energías en cada intervalo de tiempo.

Los datos que se utilizan para los parámetros del vehículo se muestran en la tabla 8:

Tabla 8 - Parámetros del vehículo

A [m ²]	C _{dA}	C _{dB}	ρ [kg/m ³]	m [kg]	g [m/m ²]
3,52	0,346	0,348	1,25	2000	9,81

Además, los datos relativos a la turbina se reflejan en la tabla 9:

Tabla 9 - Parámetros de la turbina

A _t [m ²]	η ₁	η ₂	η ₃
3,52	0,593	0,98	0,9

3.3.5 RESULTADOS

A continuación, en la tabla 10, se presentan los resultados obtenidos en ambos escenarios de circulación, indicando la energía necesaria del motor para mover el vehículo, la recuperada mediante la frenada, la recuperada aprovechando la energía eólica producida y la inducida por la propia resistencia aerodinámica de la turbina.

Tabla 10 - Resultados balance energético

	Escenario 1		Escenario 2	
E_{motor} [kWh]	1,52		64,05	
$E_{frenada}$ [kWh]	(0,41)		(0,34)	
E_{cons} [kWh]	1,11	27,15 %	63,71	0,53 %
$E_{turbina-pérdidas}$ [kWh]	(0,0015)		(0,26)	
$E_{turbina-recuperada}$ [kWh]	0,0398		7,69	
$E_{turbina-total}$ [kWh]	0,0383	3,46 %	7,43	11,66 %

Con los resultados obtenidos se pueden sacar algunas conclusiones:

- En el escenario 1, escenario urbano, la importancia de un sistema de recuperación de energía en la frenada cobra bastante peso e interés, representando una recuperación energética del 27 %. Sin embargo, el sistema de microturbinas para aprovechar las corrientes del viento solo tendría un aporte del 3,46 % extra de energía sobre el total.
- Para el escenario 2, escenario interurbano, solo se recupera un 0,53 % de la energía del motor durante la frenada. Pero en este caso, el sistema propuesto de microturbinas sí es relevante, ofreciendo una recuperación teórica del 11,66 %

sobre la energía consumida total. Este resultado preliminar indica que se podría estudiar más en profundidad el sistema, pues su beneficio se traduciría en torno a un 10 % más de autonomía, que para ciertos vehículos podría suponer realizar ciertas rutas que en la actualidad no es posible.

Además del análisis técnico, se ha realizado un análisis económico para evaluar los ahorros generados por la recuperación de energía mediante la turbina instalada. Este análisis incluye los siguientes cálculos:

- Ahorro por trayecto: a partir de un precio aproximado de la energía en España hoy en día, se ha multiplicado por la energía recuperada, para así obtener los euros por kilovatio ahorrados.
- Ahorro por kilómetro: para obtener un valor más representativo, se ha calculado dividiendo el ahorro por trayecto entre la distancia recorrida en cada escenario.
- Ahorro durante la vida útil del vehículo: el ahorro por kilómetro se ha multiplicado por la vida útil estimada para una furgoneta. Este cálculo proporciona el ahorro económico total que se puede esperar durante la vida útil del vehículo.

Este enfoque permite visualizar de manera clara y cuantificable los beneficios económicos a largo plazo en caso de implementar un sistema de recuperación de energía mediante una turbina, Los resultados detallados se presentan en la tabla 11. Este análisis económico se ha complementado posteriormente con un análisis de sensibilidad donde las variables son el precio de la energía o vida útil del vehículo para proporcionar una visión más completa de los posibles beneficios y retornos de inversión en diferentes condiciones.

Tabla 11. Resultados análisis económico

	Escenario 1	Escenario 2
Precio de la energía (€/kW)	0,4	0,4
Vida útil vehículo (km)	400000	400000
Ahorro por trayecto (€)	0,017	2,97
Ahorro por kilómetro (€/km)	0,002	0,015
Ahorro total	756,45	6002,36

3.3.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el objetivo de entender mejor cómo diferentes valores afectan a la energía recuperada por la turbina instalada en el vehículo, así como para tener en cuenta posibles aproximaciones de las hipótesis planteadas (coeficiente aerodinámico con turbina, dimensiones y rendimiento de la turbina, vida útil del vehículo, precio de la energía, etc.), se han realizado varios análisis de sensibilidad. Estos ayudan a identificar las condiciones bajo las cuales la instalación de la turbina es más efectiva y rentable.

En primer lugar, se ha evaluado cómo varía la energía recuperada al modificar el rendimiento y el área de la turbina, permitiendo visualizar cómo pequeñas mejoras en el rendimiento y el área pueden aumentar significativamente esa energía. Estos resultados se observan para los distintos escenarios en la tabla 12 y tabla 13.

Tabla 12. Análisis de la energía recuperable en función del rendimiento y el área de la turbina para el escenario 1

		Rendimiento de la turbina			
		0,423026	0,473026	0,523026	0,573026
Área turbina (m ²)	0,3	0,025	0,028	0,031	0,035
	0,35	0,030	0,033	0,037	0,041
	0,4	0,034	0,038	0,043	0,047
	0,45	0,039	0,044	0,048	0,053
	0,5	0,043	0,049	0,054	0,059

Tabla 13. Análisis de la energía recuperable en función del rendimiento y el área de la turbina para el escenario 2

		Rendimiento de la turbina			
		0,423026	0,473026	0,523026	0,573026
Área turbina (m ²)	0,3	4,41	4,96	5,51	6,06
	0,35	5,18	5,82	6,47	7,11
	0,4	5,96	6,69	7,43	8,16
	0,45	6,74	7,56	8,39	9,21
	0,5	7,51	8,43	9,35	10,27

La masa del vehículo influye en las fuerzas que actúan sobre él y, por tanto, en la energía recuperada. Es útil para entender el impacto de posibles variaciones de carga del vehículo o para diferentes modelos de vehículos. A mayor masa, menor es la energía que se podría recuperar.

Tabla 14. Energía recuperable en función de la masa del vehículo

Masa vehículo (kg)	Energía relativa recuperable	
	Escenario 1	Escenario 2
2000	2,83 %	11,60 %
2300	2,51 %	11,09 %
2500	2,11 %	10,62 %
2700	1,73 %	10,18 %
2900	1,40 %	9,78 %

En los siguientes gráficos se muestra la energía recuperada en función del coeficiente aerodinámico del vehículo. Esta gráfica permite identificar a partir de qué valor la instalación de la turbina deja de ser rentable. Para el escenario 1 deja de recuperarse energía con un valor de 0,406 y para el escenario 2 para un valor de 0,404.

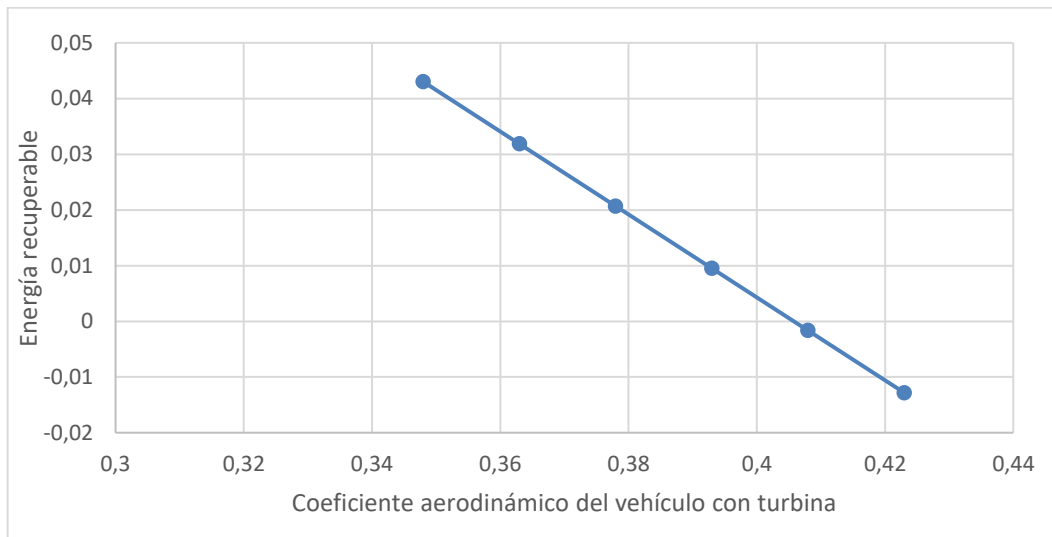


Gráfico 3 - Variación de la energía recuperada en función del coeficiente aerodinámico en el escenario 1

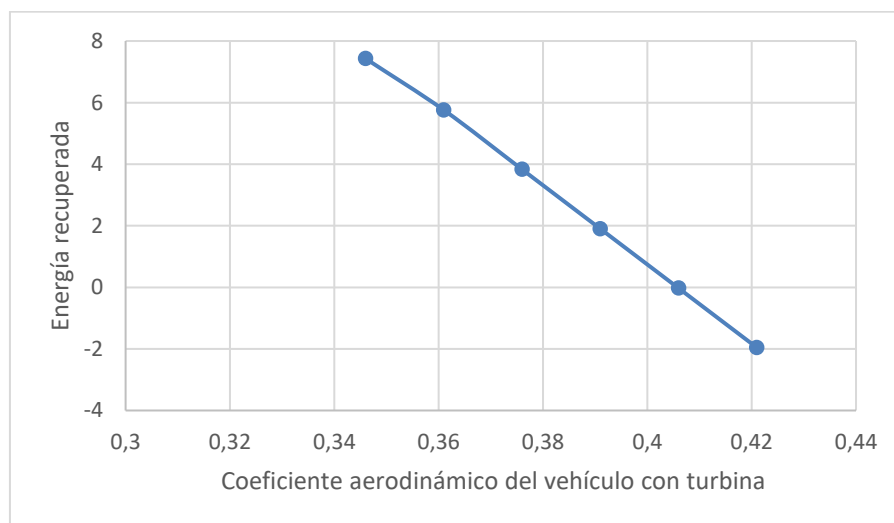


Gráfico 4 - Variación de la energía recuperada en función del coeficiente aerodinámico en el escenario 2

Estos análisis no solo permiten optimizar el diseño del aerogenerador, sino que también proporcionan una base sólida para la toma de decisiones sobre la implementación de este sistema bajo distintas condiciones.

Por último, se ha analizado cómo varía el ahorro económico en función de los diferentes precios de la energía, que resulta esencial para entender el impacto de fluctuaciones en el mercado energético sobre la rentabilidad de implementar este sistema. Se ha calculado el ahorro económico para unos precios de la energía desde bajos hasta altos. Los resultados de la Tabla 15 muestran cómo el ahorro económico aumenta a medida que el precio de la energía incrementa.

Tabla 15. Ahorro económico en función del precio de la energía

Precio energía (€)	Ahorro económico (€)	
	Escenario 1	Escenario 2
0,3	567,34	4501,77
0,35	661,89	5252,07
0,4	756,45	6002,36
0,45	851,01	6752,66
0,5	945,57	7502,95

Otro análisis se centra en cómo afecta la vida útil del vehículo al ahorro económico. Se consideran distintas duraciones de vida del vehículo, desde valores máximos a mínimos. Los resultados de la Tabla 16 indican que el ahorro económico aumenta con una mayor vida útil del vehículo, un vehículo con una vida más larga tiene más tiempo para recuperar la energía y generar ahorros. No obstante, un aspecto importante a considerar es el potencial de reutilización de la turbina. La vida útil del vehículo puede finalizar, pero esto no implica necesariamente que la turbina deba ser descartada, está diseñada para tener una durabilidad superior a la vida útil promedio de un vehículo. Esto reduce significativamente los costos asociados con la compra de una nueva turbina y maximizar el retorno de la inversión inicial.

Tabla 16. Ahorro económico en función de la vida útil del vehículo

Vida útil vehículo (km)	Ahorro económico (€)	
	Escenario 1	Escenario 2
400000	756,45	6002,36
350000	661,89	5252,07
300000	567,34	4501,77
250000	472,78	3751,48
200000	378,23	3001,18

Capítulo 4. LA TURBINA

4.1 SELECCIÓN DE LA TURBINA

4.1.1 EL ROTOR

La selección del tipo de turbina es un paso crucial en el diseño de un sistema de recuperación de energía para vehículos eléctricos. Se han considerado varios tipos de turbinas eólicas, teniendo en cuenta factores como la eficiencia, la simplicidad del diseño, y la adaptabilidad a las condiciones de flujo de aire alrededor de un vehículo en movimiento.

Se ha analizado en primer lugar la turbina multipala americano, un rotor de eje horizontal que cuenta con un gran número de palas, entre 12 y 24. Este es capaz de generar un torque alto a bajas revoluciones por minuto y puede operar de manera eficiente a bajas velocidades. Entre sus inconvenientes, cabe destacar su gran peso y tamaño, debido a la cantidad de palas que posee, esto puede hacer que no sea idónea para su instalación en un vehículo. Además, la multiplicidad de palas puede aumentar la resistencia aerodinámica. El mantenimiento puede ser complicado y costoso [\[27\]](#).

Por otro lado, el rotor Savonius es una opción ideal para aplicaciones en vehículos debido a sus características. Este tipo de rotor es un dispositivo de arrastre que funciona bien en condiciones de baja velocidad del viento, no necesitando un mecanismo adicional de arranque, y tiene la capacidad de capturar el viento en entornos turbulentos que se encuentran alrededor de un vehículo en movimiento. Destaca por la simplicidad de diseño, facilitando su fabricación y mantenimiento.

A pesar de que la turbina multipala americano tiene ciertas ventajas, como su alta capacidad de torque a bajas revoluciones por minuto, su complejidad y peso la hacen menos adecuada para la aplicación en vehículos eléctricos. La turbina Savonius, con su diseño simple, adaptabilidad a condiciones de viento turbulento y menor impacto aerodinámico, es la opción más práctica y eficiente para este proyecto.

Es necesario destacar que existen varios tipos de rotores Savonius:

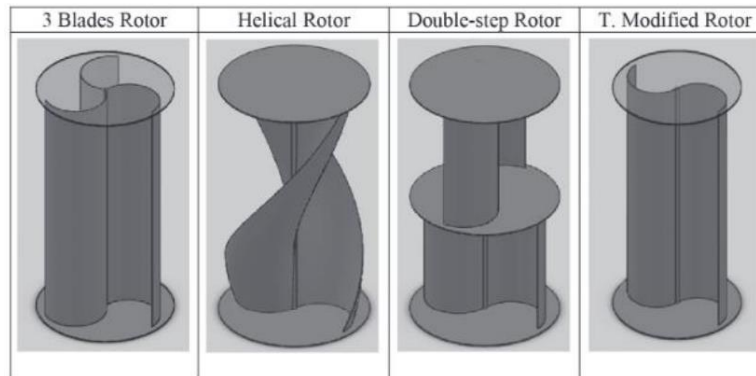


Figura 24 - Tipos de rotor Savonius [28]

En un estudio realizado por Argemiro Palencia Díaz [29], se concluyó que el rotor de 3 palas tiene un menor rendimiento, con unos bajos valores de torque. Un mayor número de palas puede llegar a reducir la velocidad de giro, distanciándose de su velocidad de diseño específica. En cambio, los rotores tradicionales de 2 palas presentan un rendimiento superior. Estos rotores generan un mayor torque y mantienen una velocidad de giro adecuada, optimizando la recuperación de energía.

Con dos palas se obtiene un mayor coeficiente de potencia, la razón es que al aumentar el número de palas aumenta el tamaño de la superficie de arrastre, aumentando así el par negativo, haciendo que el par neto de las palas de la turbina disminuya [30]. Su diseño es sencillo, lo que facilita su fabricación y mantenimiento. El rotor que mayor rendimiento tiene es el rotor helicoidal, tanto de coeficiente de potencia como de par, pero su diseño es muy complejo, lo que complica su implementación y aumenta los costos de fabricación y mantenimiento. La elección final ha sido un rotor de 2 palas modificado puesto que proporciona un equilibrio óptimo entre eficiencia, simplicidad de construcción y facilidad de implementación.

En el gráfico 3 se puede observar una comparativa de diferentes tipos de turbinas Savonius, donde se muestra el coeficiente de potencia $C_P = P_{\text{turbina}} / P_{\text{viento}}$, que mide la

potencia aprovechable por la turbina respecto a la disponible en el viento, y la relación TSR (Tip Speed Ratio) = v_{pala} / v_{viento}

En esta figura se puede observar como la turbina de 2 palas es una de las que mejor rendimiento ofrece en los diferentes regímenes de giro. Cabe mencionar que la gráfica mostrada corresponde a un diseño concreto de turbina, sin embargo, el C_p puede llegar a variar entre el 10 % y el 35 % para este tipo de turbina, según la literatura existente.

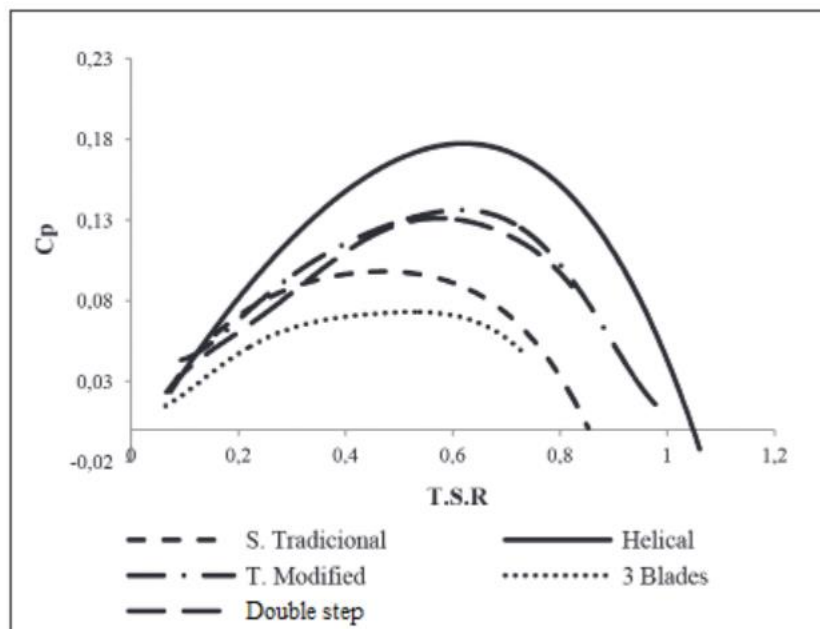


Gráfico 5 - Valores C_p según el tipo de rotor [28]

El rotor Savonius de dos palas consiste en un eje conectado a dos palas curvadas de forma semicilíndrica ubicadas de manera opuesta entre sí. Este diseño hace que el viento choque con ambas palas produciendo una fuerza de arrastre diferencial que es la que permite el giro de la turbina. Las fuerzas ejercidas sobre la pala cóncava y convexa son diferentes, haciendo que el conjunto gire alrededor del eje. Esto se traduce como una disminución de la eficiencia de la turbina, ya que parte de la energía del viento se pierde empujando la pala

convexa. Este sistema tiene el inconveniente de presentar una sobre presión en el interior de las zonas cóncavas al no poder salir el aire, perjudicando el rendimiento; el sistema queda mejorado separando ambas palas y dejando un hueco entre ambas para que se exista un flujo de aire [27].

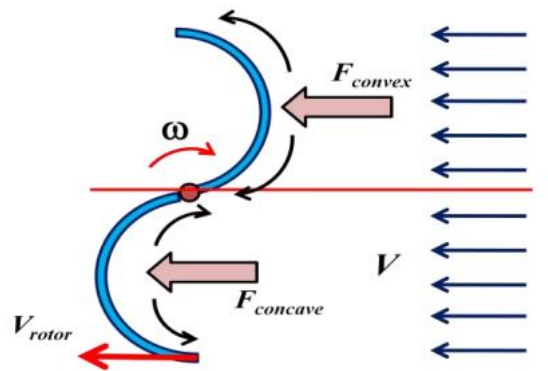


Figura 25 - Fuerzas que actúan sobre un rotor Savonius de dos palas [30]

En este trabajo, para mejorar el efecto indeseado de la incidencia del viento sobre la pala convexa, se diseñará un conducto de entrada o tobera que conducirá el flujo de aire solo hacia la pala cóncava o activa.

Como la aplicación de esta turbina supone una única dirección de viento principalmente, la del avance del vehículo, este sistema de entrada cobra sentido.

4.1.2 DISEÑO DE LAS PALAS

El espaciado entre las palas del rotor Savonius es un factor crítico que influye en su rendimiento y eficiencia. Un espaciado adecuado asegura que el flujo de aire se dirija de manera óptima a través del rotor, maximizando la cantidad de energía recuperada. Para determinar el espaciado óptimo, se han considerado los siguientes aspectos:

- **Relación de Solapamiento (Overlap Ratio):** La relación de solapamiento, definida como la distancia entre los bordes interiores de las dos palas dividida

por el diámetro del rotor debe ser cuidadosamente seleccionada. Un solapamiento adecuado permite que el aire fluya suavemente entre las palas, mejorando la eficiencia aerodinámica del rotor. Es importante identificar la relación de solapamiento ideal para maximizar la eficiencia del rotor. El espaciado entre las palas e recomendado es $1/6$ del diámetro de las palas [28]. Sin embargo, se va a realizar un estudio posteriormente para identificar la relación de solapamiento óptima.

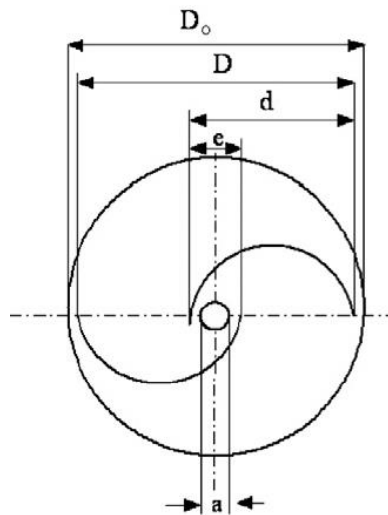


Figura 26 - Parámetros turbina Savonius [28]

- **Ángulo del arco de la pala:** Es el ángulo ϕ que se observa en la figura 27 y este también afecta al rendimiento. Se ha elegido un ángulo de 180 grados entre las palas, ya que permite una captación eficiente del viento y una operación suave del rotor. Típicamente es el ángulo que mejor funciona con la mayoría de los diseños de este tipo de turbina.

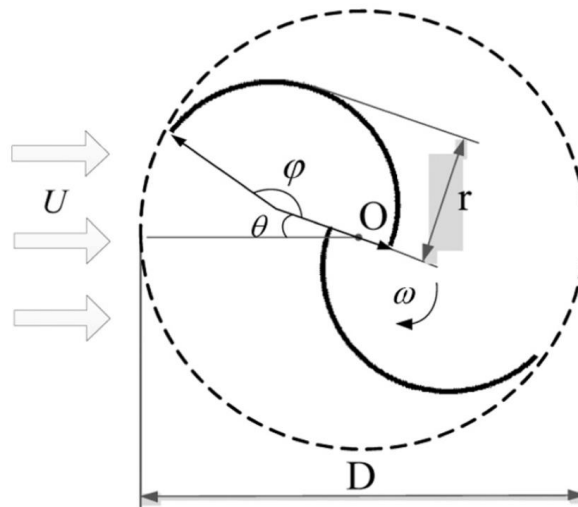


Figura 27 - Otros parámetros de un rotor Savonius [31]

4.1.3 OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE SOLAPAMIENTO

Se han realizado simulaciones de CFD con Ansys Discovery para modelar el flujo de aire a través del rotor y optimizar el espaciado entre las palas. Estas simulaciones ayudan a visualizar las corrientes de aire e identificar configuraciones que minimicen las pérdidas aerodinámicas y maximicen la recuperación de energía.

4.1.3.1 Modelos

Para realizar el análisis, se han diseñado cuatro modelos diferentes de la turbina Savonius, variando el overlap ratio entre las palas.

Con el objetivo de mejorar aún más el rendimiento de la turbina Savonius, se ha decidido montar la turbina dentro de una carcasa. Esta carcasa está diseñada para dirigir el viento de manera que solo incida en el álabe superior de la turbina, disminuyendo la fuerza ejercida sobre el álabe inferior. Este diseño busca aumentar la fuerza neta generada por la turbina y, por ende, su eficiencia. En definitiva, la carcasa se ha diseñado para cumplir con los siguientes objetivos:

- Dirección del Viento: guiar el flujo de viento para que incida predominantemente en el álabe superior de la turbina.
- Reducción de Turbulencias: minimizar las turbulencias alrededor del álabe inferior para reducir las fuerzas en dirección contraria.
- Aumento de la Fuerza Neta: maximizar la fuerza neta generada por la turbina, incrementando así el torque y la eficiencia global.

Para este primer apartado, donde se analiza el overlap ratio, se han tomado unos valores constantes para el conducto de entrada (ángulos igual a 0°). El modelo considerado se muestra en las siguientes imágenes, donde se ha ido modificando el parámetro e , considerando 4 modelos:

- **Modelo 1:** Sin separación entre las palas ($e = 0$).
- **Modelo 2:** Con una separación de 20 mm entre las palas.
- **Modelo 3:** Con una separación de 40 mm entre las palas.
- **Modelo 4:** Con una separación de 60 mm entre las palas.

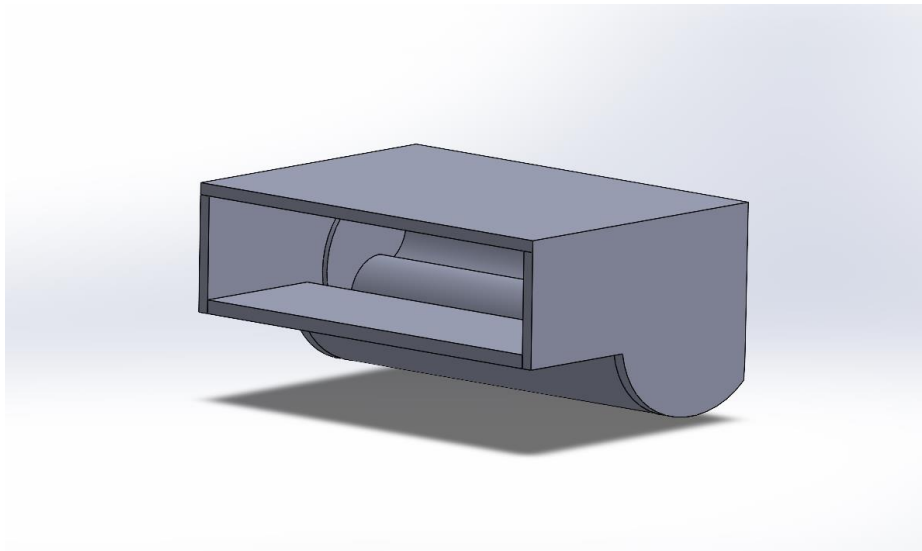


Figura 28 - Vista isométrica del modelo turbina con carcasa

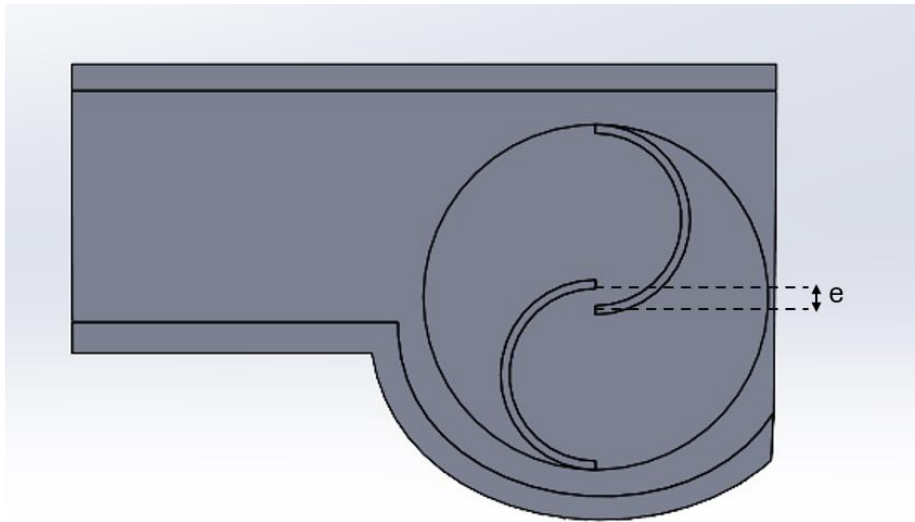


Figura 29 - Vista corte lateral con el parámetro modificado en la simulación turbina con carcasa

Estos modelos se han simulado bajo las mismas condiciones de flujo de viento para evaluar el impacto de la variación del overlap ratio en el rendimiento de la turbina.

Las simulaciones han permitido analizar el comportamiento del flujo de aire alrededor de las palas y medir parámetros clave como la velocidad del aire a través de la turbina, las fuerzas aerodinámicas actuando sobre las palas y el torque generado por cada diseño.

4.1.3.2 Preparación del modelo

Se ha realizado un estudio estacionario de la turbina. El volumen de control creado es un prisma rectangular. Los planos en los límites del dominio son ortogonales a los ejes del sistema de coordenadas cartesiano. Para las dimensiones del volumen de control, al igual que se ha hecho en el apartado 3.2.2.2, se han tenido en cuenta ciertas recomendaciones, con el objetivo de que las perturbaciones introducidas por la presencia de la geometría no interfieran con los límites impuestos. En este caso las dimensiones del volumen de control, observado en la figura 29, son 4340 x 2529 x 5818 mm (ancho x alto x profundidad).

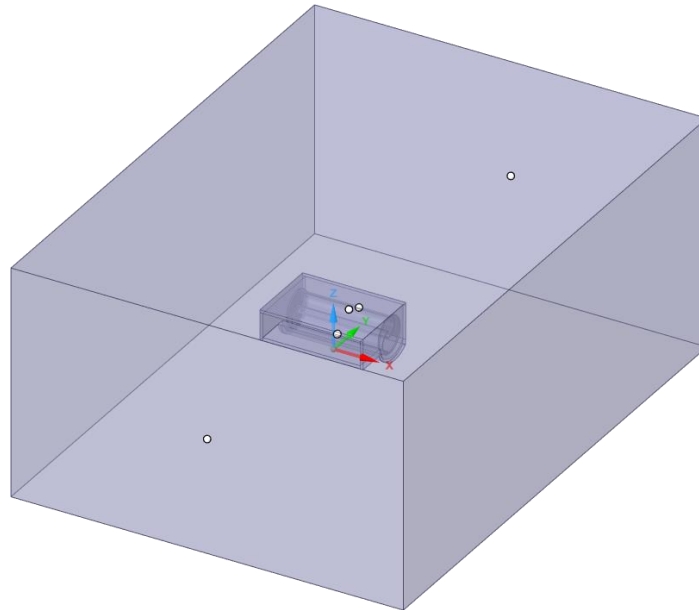


Figura 30 - Volumen de control del modelo de la turbina

Se ha creado un dominio de flujo alrededor de cada modelo para simular el movimiento del aire. Este dominio incluye una región aguas arriba y aguas abajo de la turbina para así capturar de manera adecuada el desarrollo del flujo. Respecto a las condiciones de contorno:

- **Entrada de Flujo (Inlet):** se ha definido una velocidad de viento constante de 27 m/s en la entrada del dominio de flujo, representando las condiciones típicas a las que estaría expuesta la turbina y que han sido ensayadas en el apartado 3.2.
- **Salida de Flujo (Outlet):** se ha establecido una condición de presión ambiental en la salida del dominio para permitir que el aire fluya libremente.
- **Superficies de las Palas:** se ha aplicado una condición de pared sin deslizamiento a las superficies de las palas de la turbina, simulando la interacción del aire con las palas.

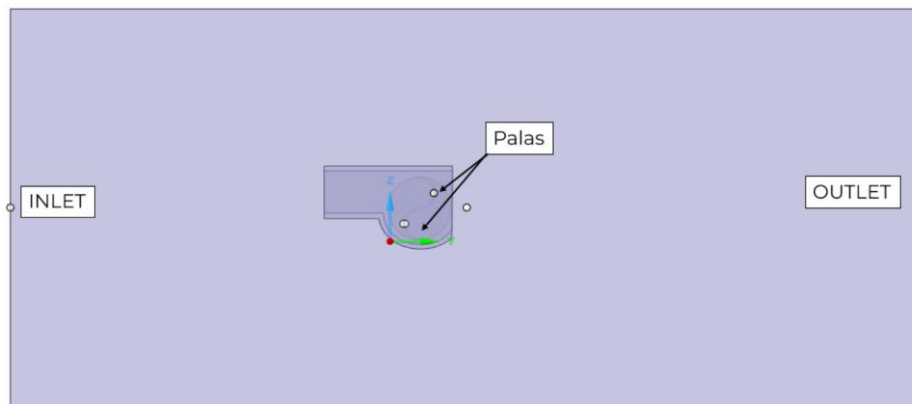


Figura 31 – Representación condiciones de contorno en Ansys Discovery del modelo de turbina

Todas las características de la simulación se recogen en la tabla 17.

Tabla 17 - Condiciones de contorno simulación turbina

Velocidad de entrada	27,8 m/s
Presión a la salida	Presión atmosférica
Fluido	Aire
Densidad	1,16 kg/m ³
Viscosidad	1,832 x 10 ⁻⁵ Pa·s
Modelo de turbulencia	k-omega SST

Las otras paredes (las del volumen de control) tienen una condición de *Free slip* donde la componente normal de la velocidad es cero.

4.1.3.3 Mallado

Se ha creado una malla de alta calidad para el dominio de simulación, asegurando una representación precisa de la geometría de la carcasa y de la turbina. Se ha utilizado una malla con elementos tetraédricos, utilizando el autoajuste de calidad para zonas de baja

fidelidad que ofrece el software Ansys Discovery. Refinándose en las zonas de mayor curvatura, como las proximidades de las palas de la turbina y los bordes de la carcasa, para capturar con precisión las características del flujo de aire y las fuerzas aerodinámicas.

En la tabla 18 se muestran los valores de la malla con el último nivel de fidelidad de malla analizado, con el que se alcanzaba la convergencia de los resultados. Cabe recordar que el valor de la calidad de la malla oscila entre 0 y 1. Un valor de 1 indica un elemento perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo:

Tabla 18 – Estadística y calidad de malla simulada del modelo de la turbina

Número de elementos	1,32e6
Número de nodos	2,5e5
Calidad malla media	0,828

En la figura 32 se puede apreciar la malla con elementos tetraédricos generada, así como las zonas de capa límite, siendo más fina en aquellas zonas de curvatura.

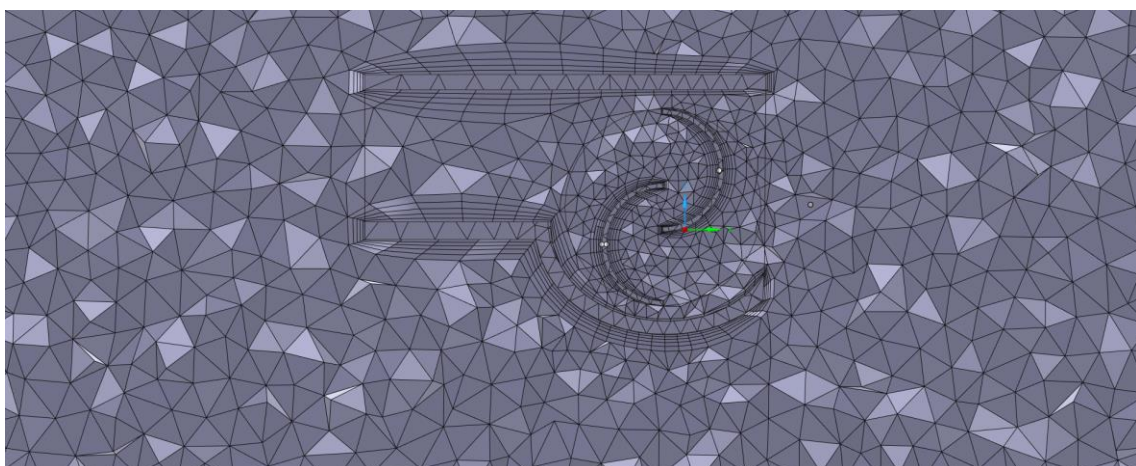


Figura 32 - Malla generada del modelo de la turbina

4.1.3.4 Resultados

La tabla 19 recoge los resultados de la simulación para cada modelo. Se ha obtenido la fuerza que actúa en el álabe superior y las fuerzas que actúan sobre las dos caras del álabe inferior por incidencia directa y por recirculación. El torque viene dado por la fuerza neta que actúa, teniendo en cuenta que la fuerza de la pala inferior tiene signo negativo, multiplicada por la distancia del centro de gravedad de las palas al eje, d , como se observa en la siguiente ecuación:

$$\text{Torque} = \Sigma F_x \cdot d$$

Tabla 19. Resultados simulación de cada modelo de turbina

e [m]	0	0,02	0,04	0,06
Distancia a eje, d [m]	0,0975	0,09	0,085	0,08
$F_{x \text{ sup}}$ [N]	88,1	93,5	97,5	99,2
$F_{x \text{ inf 1}}$ [N]	58,4	65	68,4	74,1
$F_{x \text{ inf 2}}$ [N]	23,5	-3,29	-19,3	-31,2
ΣF_x [N]	6,2	31,79	48,4	56,3
Torque [Nm]	0,6045	2,8611	4,114	4,504

Basado en los resultados obtenidos, se ha determinado que la configuración con una separación de 0,06 m entre las palas del rotor Savonius proporciona el mayor torque. Esto se debe a que esta separación permite una mejor canalización del flujo de aire, minimizando las turbulencias y optimizando la generación de fuerza de arrastre y sustentación. Este ajuste maximiza la eficiencia del rotor al generar el mayor torque, lo cual es crucial para la recuperación de energía en el sistema implementado en vehículos eléctricos. La elección de esta separación asegura un rendimiento superior y una mejor integración en el diseño general del vehículo. En la figura 33 se puede observar el contorno de velocidades del modelo elegido de la turbina.

Además de la resultante del torque, se ha comparado la velocidad en la punta de la pala de la turbina, siendo el mayor valor para la turbina con mayor torque, teniendo un valor de 30 m/s.

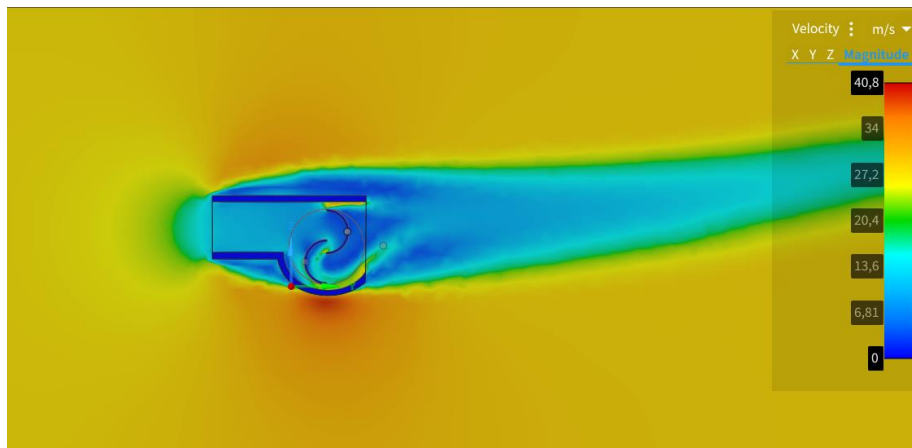


Figura 33 - Contorno de velocidades del modelo de turbina $e = 60$ mm

4.1.4 OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA CARCASA

En este apartado, se presenta el proceso de optimización del diseño de la carcasa para la turbina Savonius, una vez que se ha determinado el valor de la variable del overlap ratio, la cual permanece constante para este bloque de simulaciones. Para ello se han realizado modificaciones en los ángulos de apertura de las tapas inferior y superior de la carcasa. El objetivo principal de esta optimización es mejorar la eficiencia aerodinámica de la turbina, asegurando que reciba el máximo flujo de aire posible y minimizando las fuerzas adversas. El objetivo de este apartado es estudiar el ángulo de incidencia. Sin embargo, el espesor de la carcasa se ha modelado de una manera tal que se evite una lámina delgada que haga tener que incluir un refinamiento de malla en tal sólido.

4.1.4.1 Simulación

Para analizar el efecto de la tapa inferior y superior de la carcasa en el rendimiento de la turbina, se han realizado varias simulaciones variando el ángulo de apertura de la tapa inferior α_1 y posteriormente el superior α_2 , observado en la figura 34.

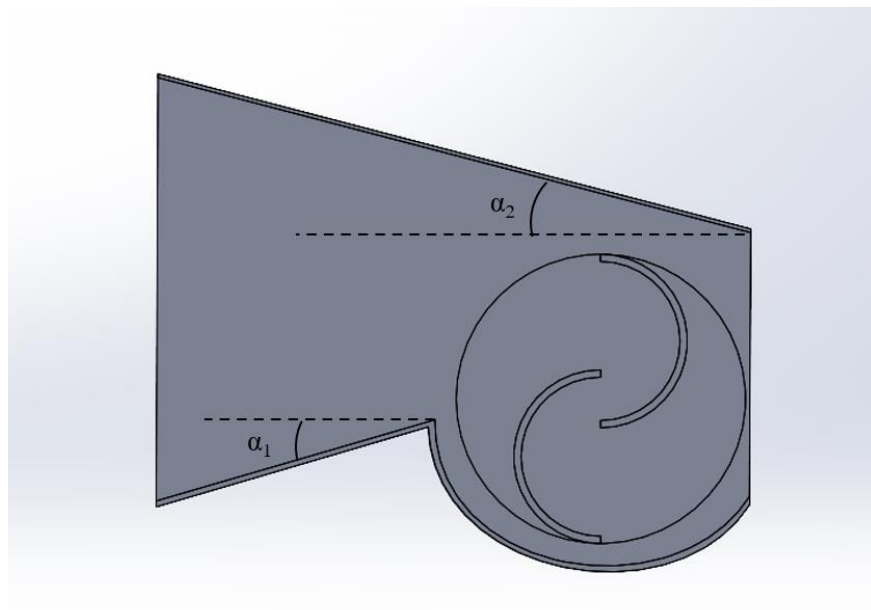


Figura 34 - Vista corte lateral con los parámetros modificados en la simulación de turbina

Se han simulado ocho casos, desde una apertura inicial hasta un ángulo total de 16 grados para cada tapa. La simulación modificando el ángulo α_1 de la tapa inferior se observa en la tabla 20.

Tabla 20 - Resultados simulación modificando ángulo de la tapa inferior de la carcasa

Ángulo (°)	2	4	6	8	10	12	14	16
F_x sup. [N]	100	100	100	99,8	101	99,9	101	99,9
F_x inf. 1 [N]	59,6	56,8	56,1	51,7	51,2	51,4	49,7	48,1
F_x inf. 2 [N]	-39,2	-32,5	-32	-30,1	-32,6	-30,3	-30,5	-30,3
ΣF_x [N]	79,6	75,7	75,9	78,2	82,4	78,8	81,8	82,1
Torque [Nm]	6,368	6,056	6,072	6,256	6,592	6,304	6,544	6,568

Los resultados han mostrado cómo la variación del ángulo de apertura de la tapa inferior afecta la dirección y la velocidad del flujo de aire. El mayor torque se obtiene con la mayor apertura de la tapa, por lo tanto, eligiendo una apertura de 16° de la tapa inferior, a continuación, se simula la variación de α_2 de la tapa superior. Los resultados se observan en la tabla 21:

Tabla 21 - Resultados simulación modificando ángulo de la tapa superior de la carcasa

Ángulo (°)	2	4	6	8	10	12	14	16
F_x sup. [N]	102	102	101	102	105	106	104	105
F_x inf. 1 [N]	47,5	45,4	44,9	46	48,2	47,2	45,4	53,7
F_x inf. 2 [N]	-31,3	-28,6	-25,7	-24,7	-26,3	-24,3	-25,3	-20
ΣF_x [N]	85,8	85,2	81,8	80,7	83,1	83,1	83,9	71,3
Torque [Nm]	6,864	6,816	6,544	6,456	6,648	6,648	6,712	5,704

A partir de los resultados obtenidos, se ha determinado que el ángulo de apertura óptimo tanto para la tapa inferior como para la tapa superior es aquel que maximice el rendimiento y la eficiencia de la turbina. Teniendo en cuenta los resultados, para asegurar que la turbina sea capaz de crear el mayor momento posible, se ha optado por elegir la configuración con un ángulo de apertura de 16° para la tapa inferior y 14° para la superior. Una mayor apertura permite que entre el máximo volumen de aire, lo cual es fundamental para generar suficiente torque y potencia en la turbina. Con aperturas menores podría haber una mayor resistencia y turbulencia dentro de la carcasa. Es por eso que se elige aquel ángulo de apertura mayor y a su vez que cree mayor torque. El contorno de velocidades del modelo definitivo seleccionado se puede observar en la figura 35, el cual inducía mayor velocidad del aire en la punta de la pala, igual a 36,5 m/s, mayor que la velocidad sin ángulo de entrada.

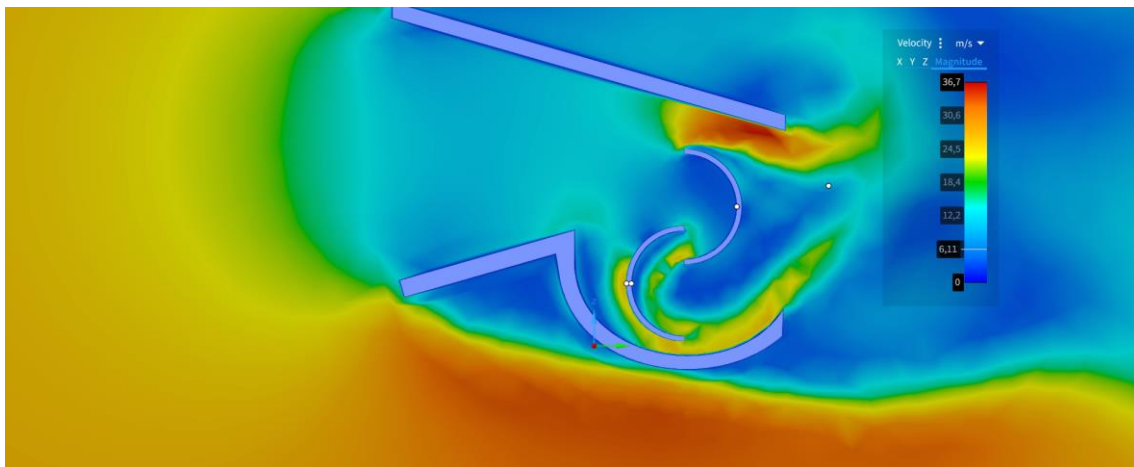


Figura 35 - Contorno de velocidades del modelo de carcasa definitivo

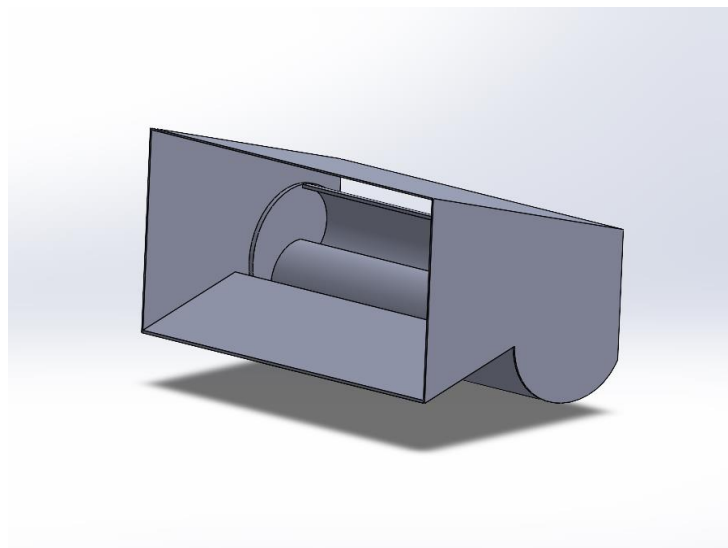


Figura 36 - Modelo definitivo de turbina y carcasa

Capítulo 5. DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SOPORTE

Para la implementación efectiva de la turbina Savonius en el vehículo eléctrico, es fundamental diseñar un soporte fiable. Este soporte debe garantizar la estabilidad y el correcto funcionamiento de la turbina, resistiendo las cargas y fuerzas generadas durante la conducción. Además, resulta fundamental realizar análisis estructurales detallados para evaluar la integridad y resistencia del soporte bajo diferentes condiciones de carga. Hay que destacar que en este apartado se analiza estructuralmente el soporte de la turbina, pero no la turbina y la carcasa en sí, la cual se ha diseñado a nivel geométrico y se tomará como una variable de entrada, con diferentes pesos, para diferentes casos estructurales del soporte.

5.1 DISEÑO DEL SOPORTE

5.1.1 REQUISITOS DEL DISEÑO

Para diseñar el soporte de la turbina es esencial definir claramente los requisitos y especificaciones que debe cumplir el soporte. A continuación, se detallan algunos de estos requisitos y especificaciones:

- Resistencia a cargas: el soporte debe ser capaz de soportar tanto el peso de la turbina y del propio soporte, cargas estáticas, como las fuerzas dinámicas generadas por el funcionamiento de la turbina y el movimiento del vehículo durante la conducción.

- Integración en el vehículo: debe integrarse de manera segura y efectiva con la estructura del vehículo sin comprometer su integridad. Debe diseñarse para ocupar un espacio mínimo y ubicarse en una posición que no interfiera con el funcionamiento del vehículo ni con la seguridad de los pasajeros.
- Simplicidad de montaje: debe permitir una instalación sencilla y rápida, con un mínimo de modificaciones en el vehículo. Además, tiene que ser fácil de acceder para realizar inspecciones y mantenimientos periódicos, sin ser necesario desmontar otros componentes del vehículo.
- Seguridad: no tiene que comprometer la seguridad de los ocupantes del vehículo en caso de colisión. Debe garantizar un funcionamiento seguro y fiable bajo todas las condiciones operativas previstas.
- Fabricación y coste: se tiene que poder fabricar el soporte con tecnologías y procesos de fabricación estándar, sin ser necesario equipos caros. El diseño y los materiales deben garantizar la viabilidad económica de la implementación.

5.1.2 MATERIALES

Para la selección de materiales para el soporte de la turbina se deben considerar varios factores clave, como peso, resistencia, durabilidad, costo y facilidad de fabricación. Los materiales seleccionados deben ser lo suficientemente ligeros para no aumentar significativamente el peso del vehículo, ya que su eficiencia energética se vería afectada. Deben tener una alta resistencia mecánica y durabilidad para garantizar la seguridad y la longevidad del soporte. Teniendo en cuenta esos factores y las características de los materiales, a continuación, se describen las posibilidades de los materiales seleccionados:

- Aleación de aluminio: presenta un peso ligero, es conocido por su baja densidad, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde el peso es un factor crítico. Es

resistente a la corrosión y ofrece una buena relación resistencia-peso. Además, el aluminio es fácil de mecanizar, soldar y formar, lo que lo hace adecuado para la fabricación de soportes complejos.

- Acero: ofrece una alta resistencia mecánica, lo que garantiza la integridad estructural del soporte. Por ejemplo, el acero inoxidable es muy duradero y resistente a la corrosión, aunque es más pesado que el aluminio. A pesar de ser más pesado, el acero es generalmente más económico que otros materiales de alta resistencia.

Estos dos materiales y sus aleaciones son ampliamente usados en la industria automotriz.

5.1.3 MODELO

En este apartado se presenta el diseño del soporte para la turbina Savonius, elaborado utilizando SolidWorks. La creación de un modelo CAD detallado es un paso crucial en el desarrollo del soporte, ya que permite visualizar el diseño, realizar ajustes precisos y preparar el modelo para análisis estructurales y de fabricación.

El objetivo del modelo es asegurar que el soporte cumpla con todos los requisitos técnicos y de integración con el vehículo. Además, el modelo va a facilitar la realización de simulaciones y pruebas virtuales para optimizar el diseño antes de proceder a la fabricación física.

El soporte se ha diseñado con una triangulación de perfiles tubulares cuadrados para maximizar la rigidez estructural mientras se minimiza el peso y facilita la fabricación. Este incluye tres taladros en la sección superior que permiten una conexión segura con la carcasa de la turbina. Estos taladros están alineados para distribuir uniformemente las cargas y evitar concentraciones de tensión. En la base del soporte, se incluye un taladro para la fijación al chasis del vehículo. Este punto de anclaje asegura que el soporte permanezca firmemente en su lugar durante el funcionamiento de la turbina. El diseño permite un fácil desmontaje y

mantenimiento del soporte y la turbina, facilitando las reparaciones y reemplazos cuando sea necesario. Se ha desarrollado el modelo del soporte en SolidWorks, como se muestra en la figura 37:

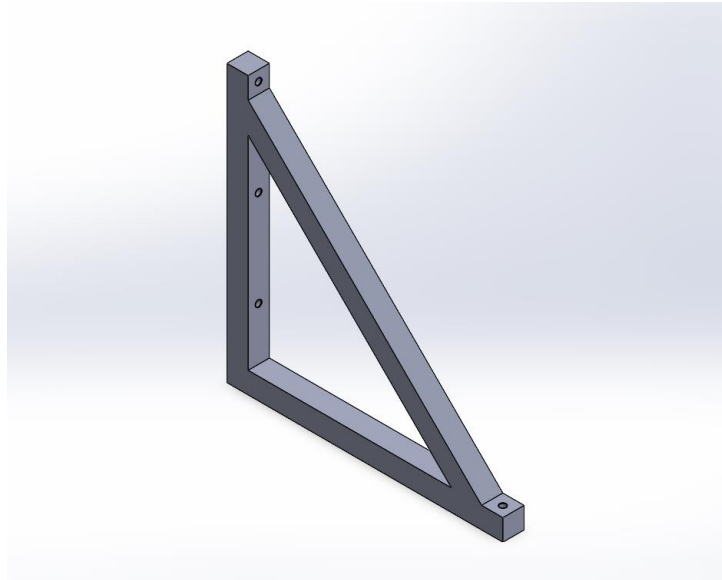


Figura 37 - Vista isométrica del soporte

El soporte está diseñado para ser colocado dentro del chasis de la furgoneta. Se fija mediante pernos que atraviesan el taladro del soporte y los correspondientes orificios en el chasis. La carcasa de la turbina se ensambla al soporte utilizando tornillos que pasan a través de los taladros en el soporte, garantizando una conexión rígida y estable. Se necesitarán dos soportes, uno a cada lado de la carcasa. El ensamblaje se muestra en la figura 38 y figura 39.

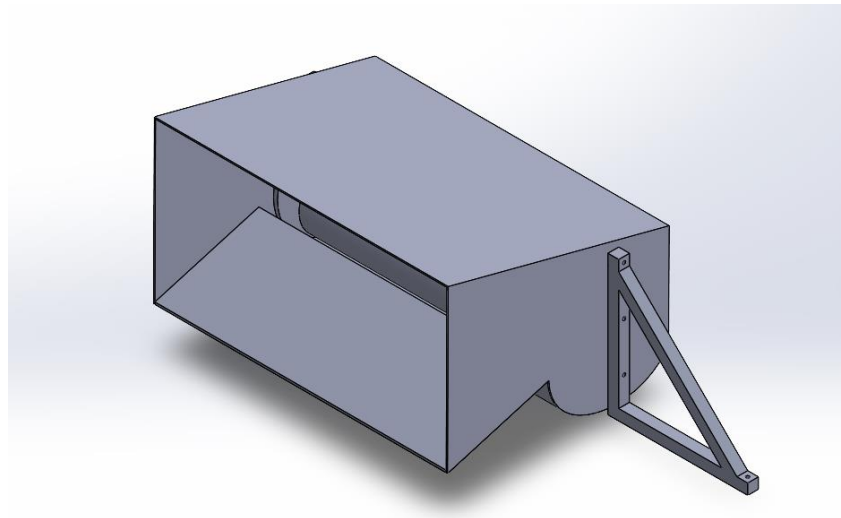


Figura 38 - Vista isométrica ensamblaje

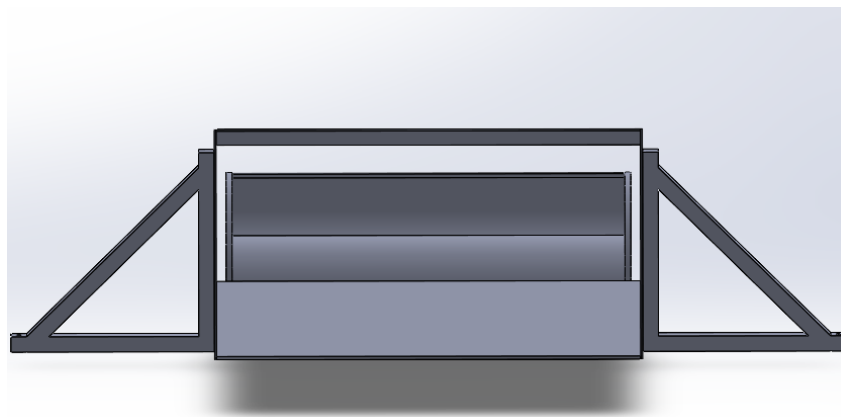


Figura 39 - Vista frontal ensamblaje

5.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

5.2.1 CONDICIONES DE CONTORNO

Resulta fundamental la definición de las condiciones de frontera en las simulaciones para representar de manera precisa la interacción entre el soporte y la turbina. Al tener una

situación de cargas simétrica, la incidencia del viento, se modela el modelo simétrico, es decir, un solo soporte, con la mitad de la carga que induce la turbina.

En el taladro que une el soporte y el chasis del coche, se debe aplicar una condición de pared fija, no permitiendo el movimiento en ninguna dirección, incluyendo rotaciones. Esto es así porque se presupone que el chasis no se deforma por esas zonas del vehículo. Esto simula que el punto de anclaje es rígido y no se mueven durante la conducción. Para ello se seleccionan las superficies interiores de los taladros y se asigna la condición de "Pared Fija" (Fixed Wall) en Ansys Discovery, como se muestra en la figura 40.

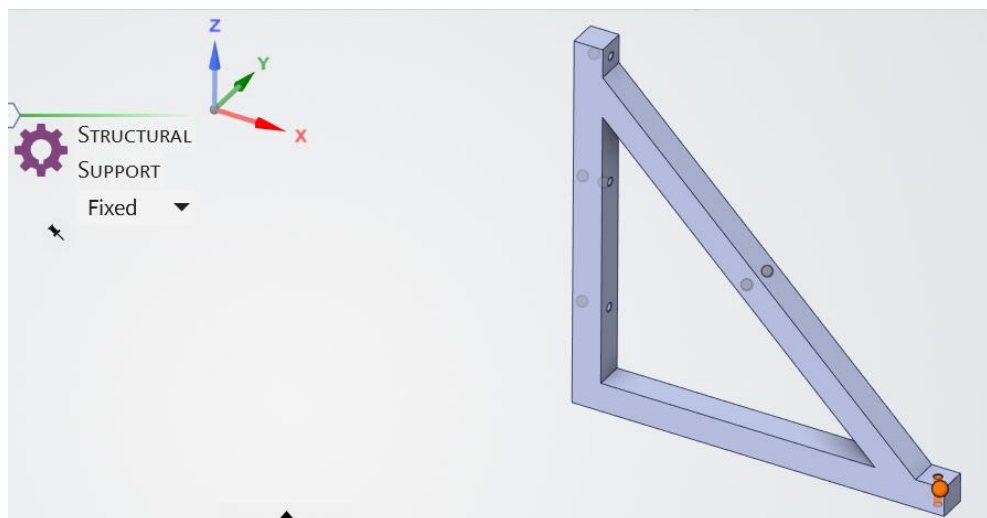


Figura 40 - Condición pared fija entre soporte y chasis en Ansys Discovery

En las uniones soporte y turbina hay que restringir el movimiento en el eje X, puesto que el ensamblaje es simétrico. La rotación en el eje Z e Y también es restringida, como se puede observar en la figura 41:

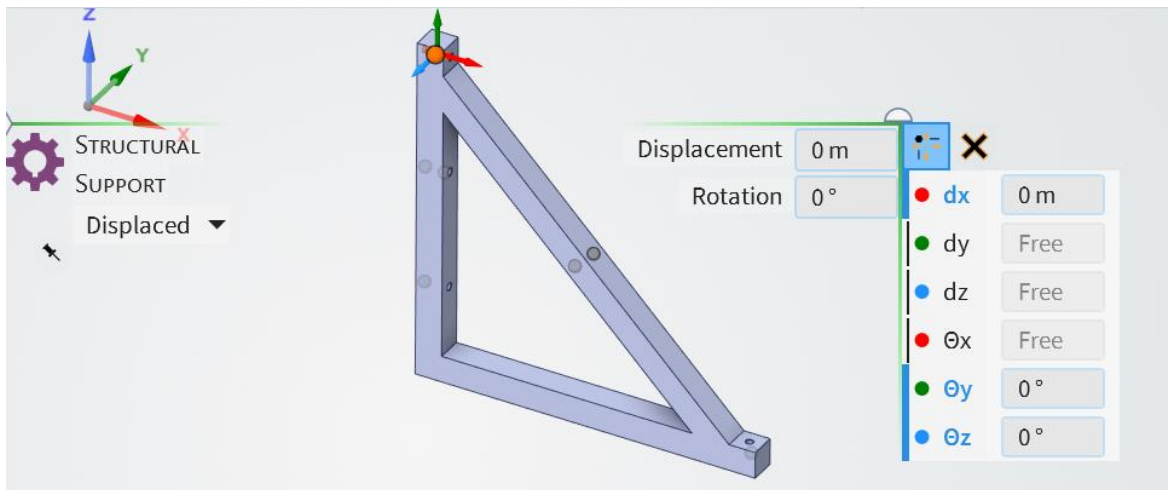


Figura 41 - Restricciones de movimiento en la unión soporte y carcasa

Estas condiciones de frontera asegurarán que el modelo en Ansys Discovery refleje adecuadamente la interacción entre el chasis, la turbina y el soporte.

5.2.2 SIMULACIÓN DE CARGAS

Es necesaria la realización de simulaciones para evaluar el comportamiento del soporte bajo diferentes tipos de cargas, incluyendo cargas estáticas como el peso de la turbina y el soporte) y cargas dinámicas, como las vibraciones y fuerzas generadas por el movimiento del vehículo y el funcionamiento de la turbina. En estos análisis las cargas de la dinámica del vehículo se aplican de manera estática, ya que no evaluamos las cargas en el tiempo, si no en un momento determinado.

Inicialmente la carcasa era un modelo preliminar por lo que los espesores no estaban optimizados y la masa de la turbina era muy alta. Se ha decidido disminuir el espesor de la chapa de la carcasa a 5 mm, obteniendo una masa de la turbina de 27 kg, un valor más coherente, que en cualquier caso se parametriza para evaluar su efecto ya que, además, hay elementos que no han sido analizados como rodamientos, ejes, tornillería, etc. que podrían variar algo esa estimación de peso.

En primer lugar, se han incluido dos fuerzas en un punto remoto, el cual es el centro de gravedad del conjunto. La aplicación de una fuerza en un punto remoto nos permite analizar la física del problema sin tener que modelar todo el conjunto y sus conexiones.

La primera fuerza incluida, F_1 , es el peso de la turbina y carcasa en sentido negativo del eje z.

$$F_1 = m \cdot g$$

La segunda fuerza va en sentido contrario al movimiento del vehículo simulando un caso de deceleración en una frenada brusca, que es donde puede observarse un mayor desplazamiento de la estructura. Los airbags de los turismos suelen saltar automáticamente si notan una deceleración que genere 3G [32], por lo que es necesario incluir la fuerza que va a crear, F_2 .

$$F_2 = 3 \cdot m \cdot g$$

Al pesar el modelo original 27 kg, F_1 tiene un valor de 132,435 N y F_2 de 397,305 N. Las fuerzas, aplicadas en centro de gravedad del conjunto (0,0145, -142, 46,8) mm, se pueden observar incluidas en Ansys Discovery en la figura 42 y figura 43.

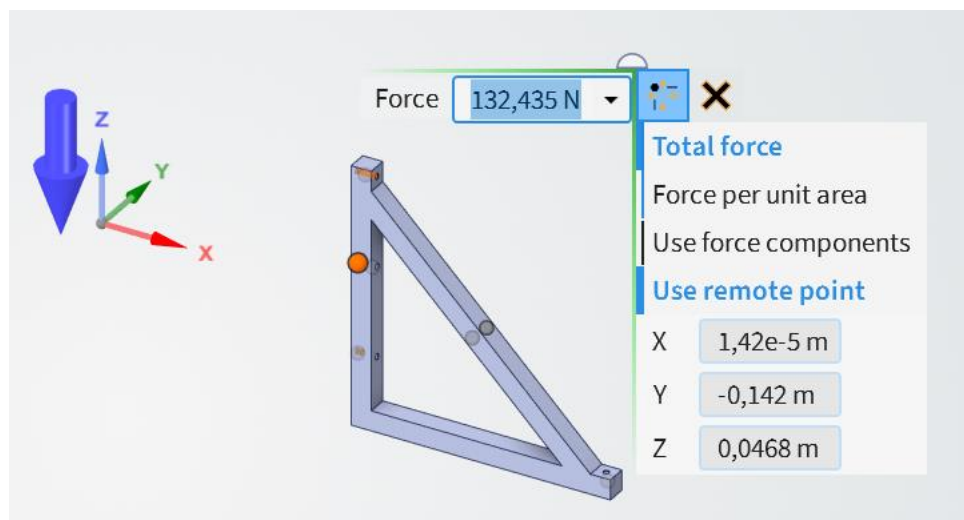


Figura 42 – Introducción de la fuerza 1 en el soporte

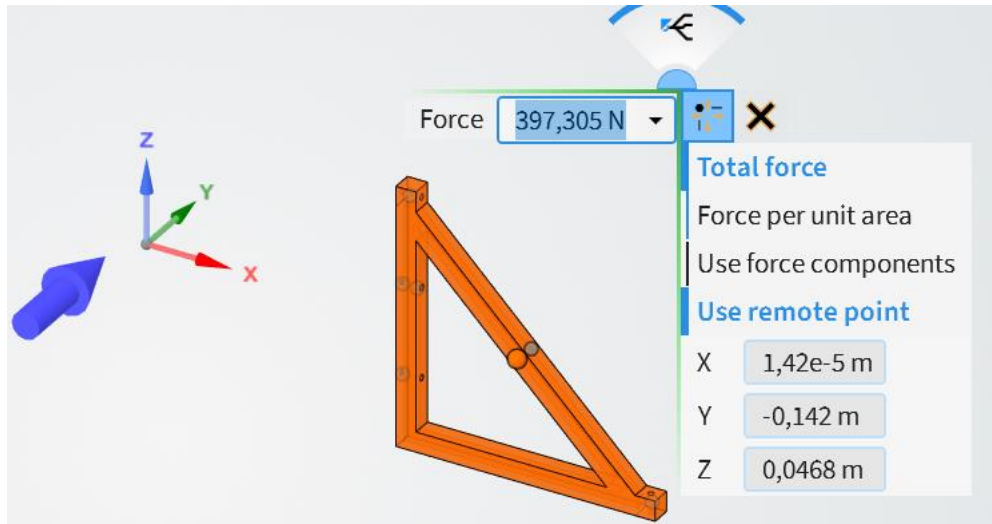


Figura 43 - Introducción de la fuerza 2 en el soporte

En segundo lugar, se debe incluir el momento obtenido en el capítulo anterior que se genera con la fuerza del viento en el sentido negativo del eje X, de valor 3,35 Nm, obtenido en la simulación del capítulo anterior para el modelo seleccionado de turbina y carcasa:

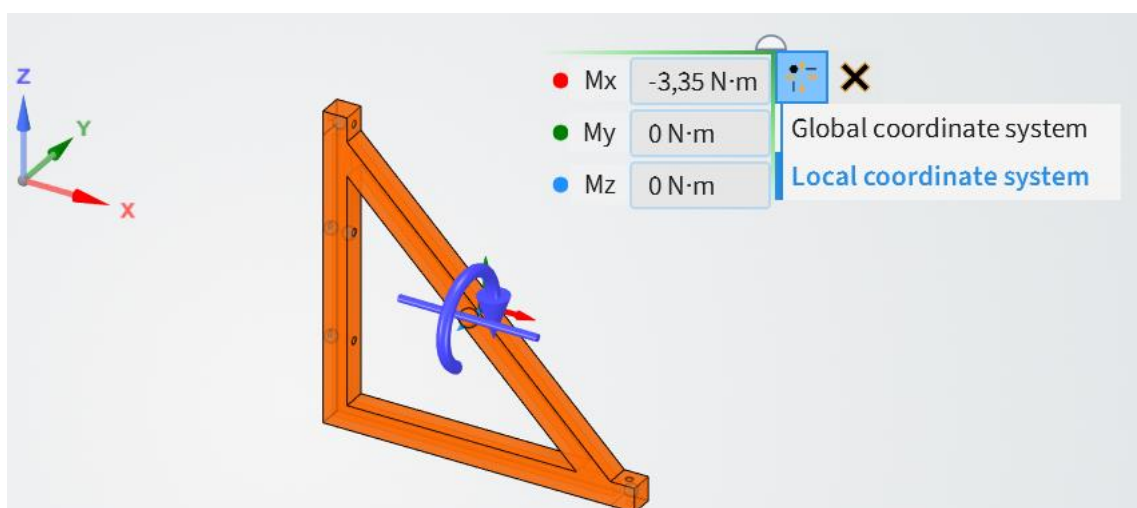


Figura 44 - Introducción del momento creado por la turbina en el soporte

5.2.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

El modelo es analizado utilizando el software Ansys Discovery. A diferencia de las simulaciones fluidodinámicas (CFD), para las simulaciones estructurales se decide utilizar la tecnología *meshless* de Ansys Discovery. Esta tecnología de simulación está basada en un diseño propietario de un algoritmo de discretización que elimina los altos tiempos de creación de malla y computación.

Esta discretización de elementos finitos tiene un enfoque basado en elementos tipo vóxel, especialmente diseñados para sacar el máximo rendimiento a la tecnología de resolución con GPU implementada en Ansys Discovery.

En la simulación estructural realizada en ANSYS Discovery, se ha generado una malla para analizar la integridad del soporte de la turbina. Se ha utilizado un tamaño de elemento de 0,77 mm, que se muestra en la figura 45, lo cual ha permitido captar adecuadamente la mayoría de los detalles de la estructura.

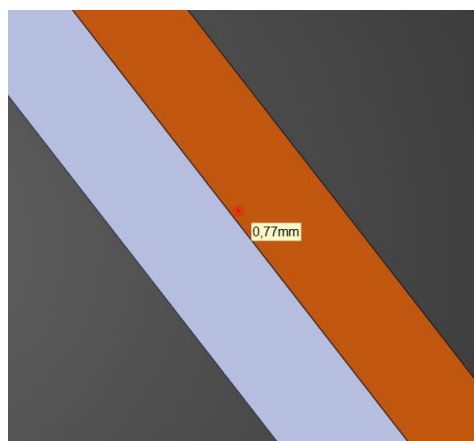


Figura 45 - Tamaño de elemento de malla

Sin embargo, se ha observado que algunas áreas, especialmente en las esquinas y bordes, no han sido captadas con la misma precisión y aparecen en rojo como se puede observar en las figuras 46 y 47. Se puede apreciar como con la fidelidad aplicada al modelo se puede captar la geometría.

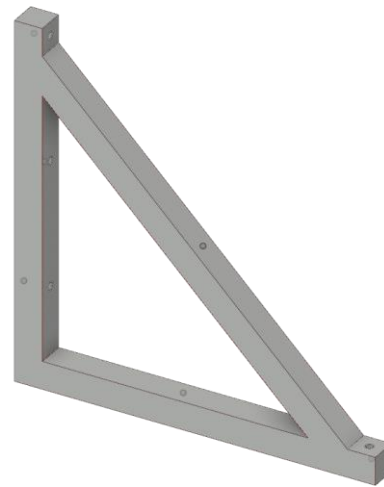


Figura 46 – Visualización áreas con resolución insuficiente (en rojo)

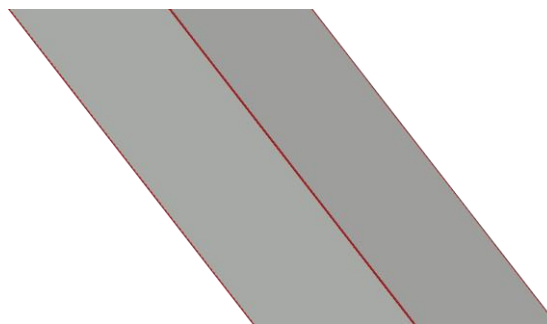


Figura 47 – Imagen ampliada de las áreas no captadas con precisión

Respecto a los resultados obtenidos, se van a evaluar las deformaciones en el soporte bajo diferentes condiciones de carga, además del análisis de las tensiones máximas y

mínimas para asegurar que los materiales seleccionados puedan soportar las cargas sin fallar. Es importante el cálculo de los factores de seguridad para determinar la fiabilidad.

Se han realizado las simulaciones para dos materiales, una aleación de aluminio y acero. Se ha parametrizado la masa de la carcasa para varios escenarios con diferentes valores de masa, con el fin de optimizar el diseño y asegurar que cumpla con los requisitos de resistencia y peso para diferentes versiones de la turbina o carcasa. Se parte de 10 kg hasta 40 kg de 10 en 10, incluyendo el valor inicial de la masa, como se puede observar en la tabla 22. Al variar la masa también varían las fuerzas F_1 y F_2 , ya que dependen de esta.

Tabla 22 - Distintos casos de la simulación de la simulación del soporte

Caso	Masa (kg)	F1	F2
1	10	49,05	147,15
2	20	98,1	294,3
3	27	132,435	397,305
4	30	147,15	441,45
5	40	196,2	588,6

5.2.3.1 Resultados para aleación de aluminio

Emplear una aleación de aluminio para el soporte de la turbina Savonius ofrece numerosas ventajas, incluyendo una alta relación resistencia-peso, excelente resistencia a la corrosión, buenas propiedades térmicas, facilidad de fabricación y sostenibilidad. La aleación de aluminio seleccionada ha sido la 6061 cuyas características pueden observarse en la figura 48.



Density		2,71e3 kg/m ³
Young's modulus		6,9e10 Pa
Poisson's ratio		0,33
Shear modulus		2,6e10 Pa
Bulk modulus		6,77e10 Pa
Tensile yield strength		2,59e8 Pa
Tensile ultimate strength		3,13e8 Pa

Figura 48 - Características aluminio 6061

Para cada escenario se han obtenido los resultados estructurales, tanto las tensiones y desplazamientos, como el factor de seguridad.

En primer lugar, las tensiones equivalentes de Von Mises, de utilidad cuando hay una combinación de cargas para materiales dúctiles (como es el caso), calculado en base a la combinación de las tensiones principales. El valor de esta tensión equivalente se utiliza para determinar si un determinado material empieza a plastificar y se calcula a partir de las tensiones principales con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

El factor de seguridad depende del límite elástico del material y de la tensión de Von Mises máxima de la pieza, se calcula como la relación del límite de elasticidad entre la tensión equivalente de Von Mises. La tensión de Von Mises es un buen predictor del fallo, especialmente para materiales dúctiles como el acero y el aluminio. El coeficiente debe ser mayor que 1 para que el diseño sea aceptable, menos de 1 significa que hay al menos una deformación permanente o si no una rotura [33].

Estos resultados se incluyen en la tabla 23. Las figuras 49 y 50 muestran la simulación para el caso 3, que es el original. Las figuras 51 y 52 muestran las tensiones de Von Mises para el caso 5, que es el más desfavorable.

Tabla 23 - Resultados simulación del soporte para aleación de aluminio

Caso	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión Von Mises máxima (MPa)	Factor de seguridad
1	0,749	38,80	6,69
2	1,21	63,10	4,11
3	1,53	80,10	3,23
4	1,67	87,40	2,96
5	2,13	112,00	2,32

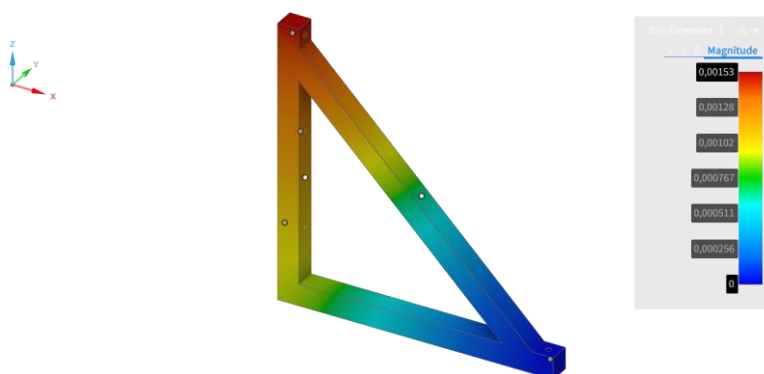


Figura 49 – Desplazamiento del soporte caso original para aluminio

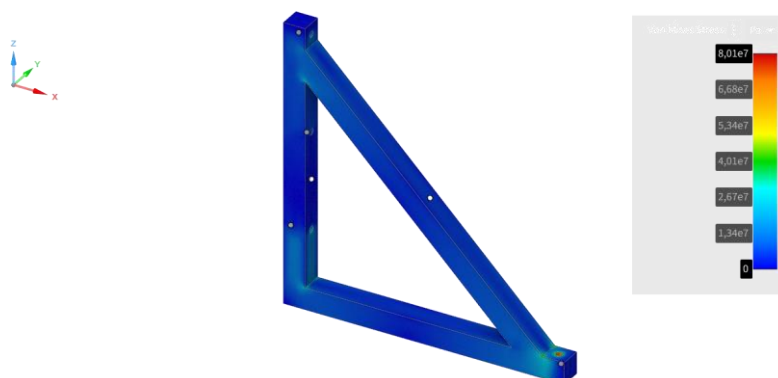


Figura 50 - Tensiones de Von Mises del soporte en el caso original para aluminio

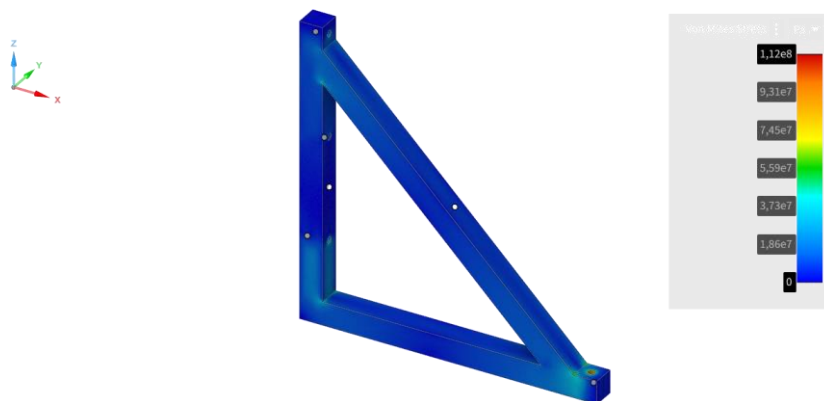


Figura 51 - Tensiones de Von Mises del soporte en el caso más desfavorable (caso 5) para aluminio

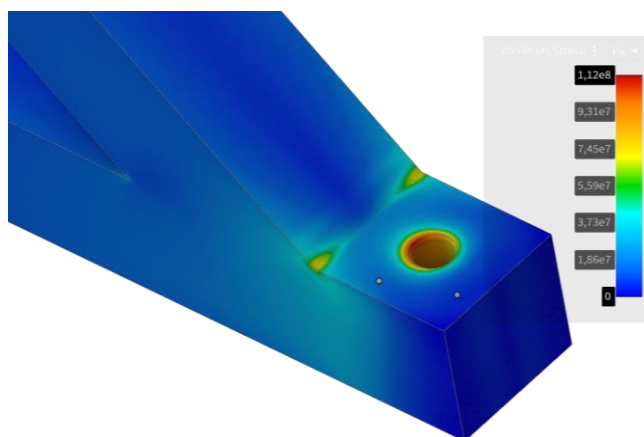


Figura 52 – Tensiones del soporte en la sección más desfavorable del caso 5 para el aluminio

A medida que la masa de la carcasa aumenta, tanto la tensión máxima como el desplazamiento máximo también aumentan. Este comportamiento indica que las fuerzas

internas y las deformaciones son mayores en los modelos con más masa. El aumento de la tensión y el desplazamiento con la masa sugiere que, aunque la estructura es más pesada, también es más susceptible a las fuerzas aplicadas.

El factor de seguridad disminuye con el aumento de la masa. El menor factor de seguridad obtenido en los escenarios analizados es 2,32, lo cual sigue siendo un valor aceptable, pero indica una reducción en la capacidad de la estructura para soportar cargas adicionales sin fallar. A pesar de que todos los diseños cumplen con los criterios de seguridad, hay una menor margen de seguridad en los diseños más pesados. Esto podría llevar a una menor tolerancia a condiciones de carga imprevistas o extremas.

5.2.3.2 Resultados para acero

El acero S275 es ideal para el soporte de la turbina debido a su alta resistencia mecánica, rigidez, y buena soldabilidad. Además, puede resistir la fatiga y la corrosión con tratamientos adecuados, ofreciendo una solución económica y duradera. Las características del acero que se ha empleado para la simulación se observan en la figura 53:



Density		7,85e3 kg/m ³
Young's modulus		2,1e11 Pa
Poisson's ratio		0,305
Shear modulus		8,05e10 Pa
Bulk modulus		1,79e11 Pa
Tensile yield strength		2,37e8 Pa
Tensile ultimate strength		4,23e8 Pa

Figura 53 - Características acero S275

Los resultados obtenidos en este caso se pueden apreciar en la tabla 24:

Tabla 24 - Resultados simulación del soporte para acero

CASO	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión Von Mises máxima (MPa)	Factor de seguridad
1	0,403	64,50	3,68
2	0,553	89,10	2,67
3	0,659	106,10	2,24
4	0,704	114,02	2,09
5	0,855	138,03	1,72

Comparando los casos más desfavorables, el análisis estructural del soporte de acero muestra que, aunque el factor de seguridad es menor (1,72) en comparación con la aleación de aluminio, el desplazamiento máximo es también menor. Esto indica que el soporte de acero es más rígido, tiene mayor módulo de Young y proporciona una mayor estabilidad estructural, aunque con un margen de seguridad más ajustado. Por lo tanto, el acero puede ser una opción viable si se prioriza la rigidez y estabilidad, pero se debe considerar cuidadosamente el margen de seguridad en el diseño final. La figura 54 y figura 55 muestran la simulación del análisis estructural para el caso 3, que es el original. En la figura 56 se observan los resultados para el caso más desfavorable. La sección que más sufre es aquella que va fijada al chasis a través de un perno, como se puede ver en la figura 57.

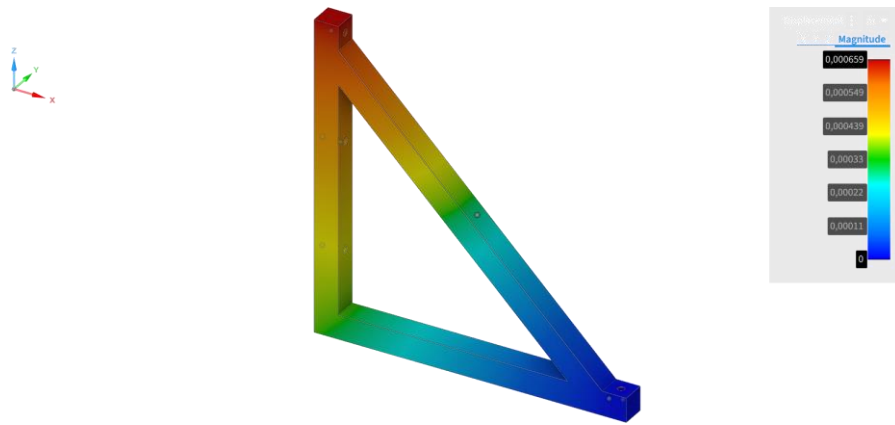


Figura 54 - Desplazamientos del soporte caso original para acero

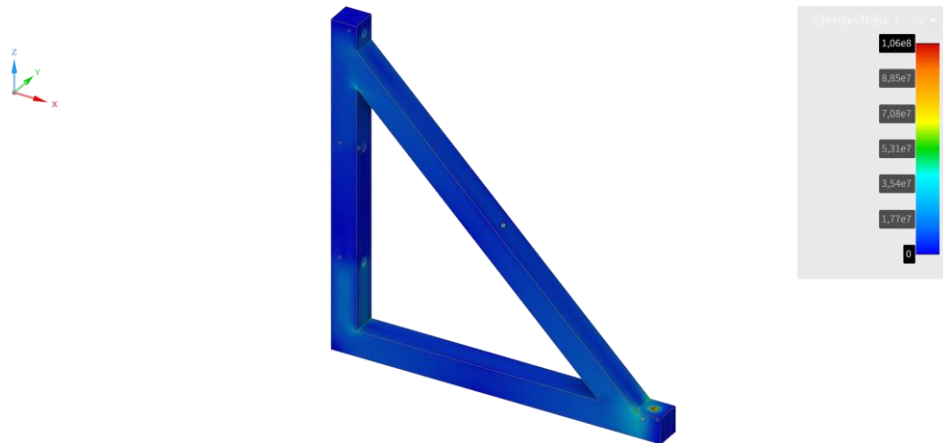


Figura 55 - Tensiones de Von Mises del soporte en el caso original para acero

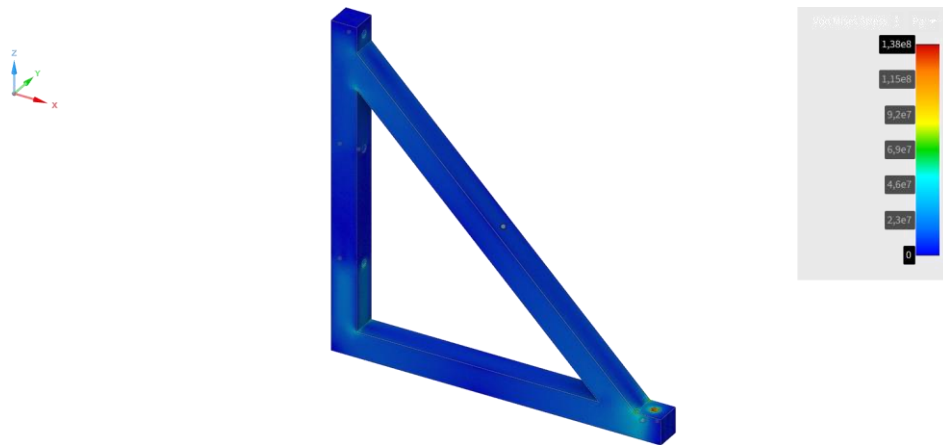


Figura 56 – Tensiones de Von Mises del soporte en el caso más desfavorable (caso 5) para acero

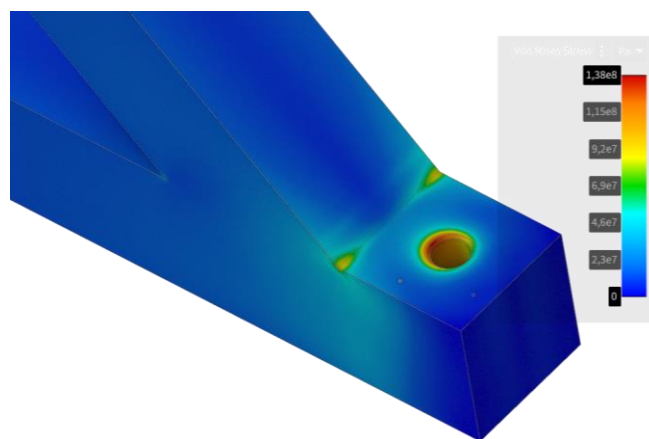


Figura 57 – Tensiones del soporte en la sección más desfavorable del caso 5 para acero

5.2.3.3 Análisis para distintos espesores del soporte

Para optimizar el diseño del soporte de la turbina Savonius, se realizaron análisis estructurales parametrizando el espesor del soporte, siendo el acero el material seleccionado y la masa la original, 27 kg. El espesor original del soporte era de 10 mm, y se estudiaron espesores adicionales de 8 mm, 6 mm y 4 mm. Los resultados se muestran en la tabla 25:

Tabla 25 - Resultados simulación variando el espesor del soporte

ESPESOR	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión Von Mises máxima (MPa)	Factor de seguridad
8 mm	0,78	110	2,16
6 mm	0,84	112	2,11
4 mm	0,98	117	2,02

El análisis indica que reducir el espesor del soporte de acero hasta 4 mm aún proporciona un factor de seguridad aceptable de 2,02 y un desplazamiento máximo de 0,98 mm. Esto demuestra que el soporte de 4 mm puede ser una opción viable, ya que mejora la eficiencia del material y reduce el peso sin comprometer significativamente la seguridad y estabilidad estructural.

Por lo tanto, al seleccionar el espesor adecuado del soporte de acero, se puede optimizar el diseño en términos de peso y costo, manteniendo un rendimiento estructural satisfactorio. La opción de 4 mm es recomendada siempre que se realicen validaciones adicionales en condiciones operativas para así poder asegurar su fiabilidad a largo plazo. Los resultados de la simulación se pueden ver en la figura 58.

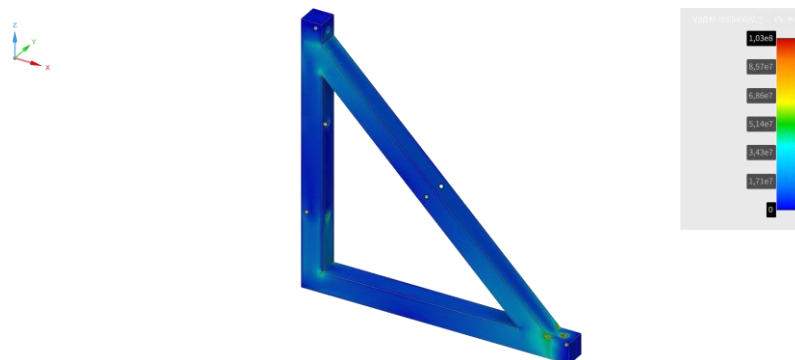


Figura 58 - Resultado análisis estructural del soporte para el caso más desfavorable ($e = 4$ mm)

5.2.3.4 Análisis modal

Por último, se realiza un análisis modal del modelo original para estudiar las frecuencias modales. El objetivo es verificar que el sistema no entre en resonancia bajo la carga cíclica de rotación de la turbina.

Además, si la frecuencia de la fuerza aplicada es menor que la frecuencia natural del sistema no hay amplificación dinámica y por tanto la amplitud de la respuesta será igual a la respuesta estática, que es como se ha planteado el análisis estructural. La explicación física es que, si la frecuencia de la fuerza es muy baja (en comparación con la frecuencia natural del sistema), la vibración (el desplazamiento) es tan lenta que la velocidad y la aceleración son muy bajas y por tanto se pueden despreciar. Por tanto, hay que tratar de diseñar el sistema para que trabaje en zona cuasi estática, ya que:

- Es suficiente con hacer un análisis estático para conocer la amplitud de la respuesta, lo que simplifica mucho el estudio del sistema.
- Se evita que el sistema trabaje cerca de la resonancia, y por tanto la amplitud de la respuesta se multiplique considerablemente aumentando las probabilidades de fallo.

Para calcular los modos y frecuencias, se plantea el problema de vibraciones libres no amortiguada, es decir, no se incluyen las cargas, solo las condiciones de contorno, como los soportes y fijaciones. Aunque se pueden obtener tantos modos y frecuencias como grados de libertad tenga el sistema, en este caso de estudio nos interesa la frecuencia natural del primer modo de vibración, pues será el modo al que el sistema se verá sometido durante el giro de la turbina.

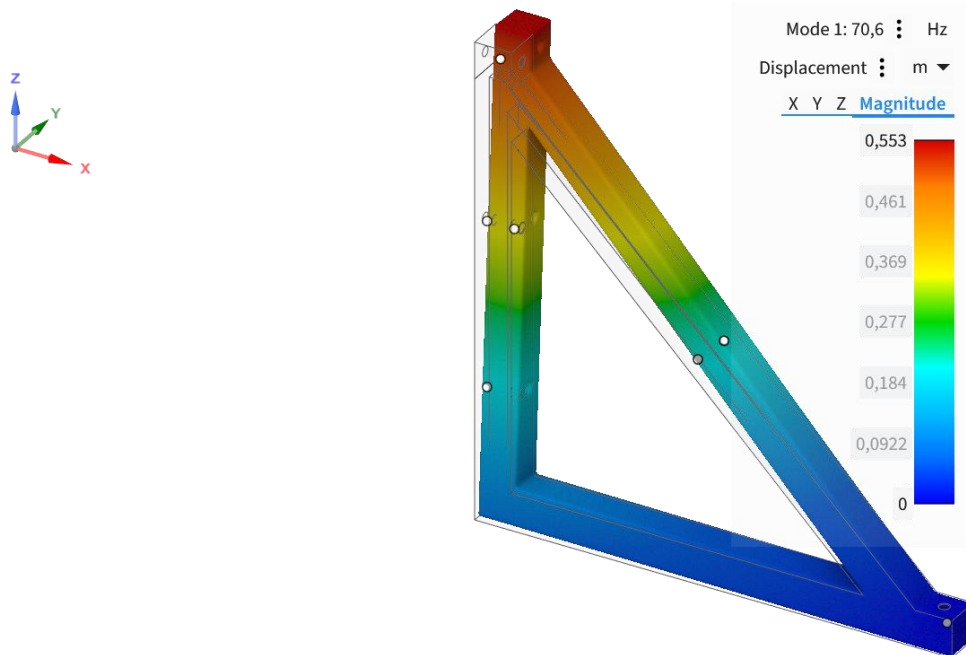


Figura 59 – Deformada del modo 1 de la simulación modal en Ansys Discovery

La frecuencia natural del sistema es de 70,6 Hz como se observa en la figura 59. Para que el sistema pudiera entrar en resonancia la turbina tendría que estar girando a 4236 rpm. A través de la empresa colaboradora se han obtenido algunos resultados de una turbina similar a la que se ha trabajado en este estudio. En esos casos, la velocidad en régimen de giro libre sin ninguna carga y en las mismas condiciones de circulación real está en torno a 1000 rpm, muy lejos de 4236 rpm, por lo que se puede afirmar que no entrará en resonancia.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El proyecto ha abordado posibilidad de integrar un aerogenerador como sistema de recuperación de energía en vehículos eléctricos, con el objetivo de contribuir a la movilidad sostenible.

En primer lugar, en base a los resultados obtenidos en el análisis aerodinámico del vehículo, se ha determinado que el coeficiente aerodinámico del vehículo sin turbina es de 0,346. La instalación de la turbina en el parachoques delantero afecta mínimamente al rendimiento aerodinámico, pero el viento en esta área tiene baja velocidad. En cambio, la instalación en el techo aumenta el coeficiente aerodinámico en más de un 9%, afectando negativamente la eficiencia del vehículo. La ubicación óptima de la turbina es en el parachoques delantero, considerando tanto la eficiencia aerodinámica como el impacto estético.

Aunque la ubicación en el parachoques delantero es menos eficiente en términos de velocidad del viento, la menor penalización aerodinámica y la estética hacen de esta posición la mejor opción. Futuras investigaciones podrían explorar diseños que optimicen aún más la captura de viento en esta ubicación.

Respecto al apartado 3.2 del balance energético del vehículo, se ha obtenido que en el escenario urbano se puede recuperar el 27% de la energía durante la frenada y un 3,46% adicional con la turbina. En el escenario interurbano, se recupera un 0,53% de la energía en la frenada y un 11,66% con la turbina, lo que podría aumentar la autonomía del vehículo en aproximadamente un 10%. Por ello, el sistema de recuperación de energía es más efectivo en escenarios interurbanos. Sin embargo, la baja recuperación en el escenario urbano sugiere la necesidad de explorar combinaciones de tecnologías de recuperación energética para optimizar el rendimiento en todos los entornos de conducción.

Sobre el diseño de la turbina Savonius, en el capítulo 4, la configuración con una separación de 0,06 m entre las palas del rotor Savonius proporciona el mayor torque. El ángulo de apertura óptimo de la carcasa en la que se va a insertar la turbina es de 16 grados en la tapa inferior y 14 grados en la tapa superior, maximizando el volumen de aire entrante y el torque generado. La elección de la separación entre palas y el diseño de la carcasa son cruciales para maximizar la eficiencia del sistema. Las simulaciones muestran resultados prometedores, pero se recomienda realizar experimentos físicos para validar estos diseños y asegurar que se mantenga el rendimiento en condiciones reales de operación.

Por último, en el diseño del soporte y la realización de análisis estructurales, tras la elección de una triangulación de perfiles tubulares cuadrados, se ha hecho una parametrización de la masa de la turbina y carcasa, para masas de 10 a 40 kg, y el soporte mantiene un factor de seguridad considerable en todos los casos.

Con espesores de soporte parametrizados de 4 mm a 10 mm, incluso el espesor más bajo proporciona un factor de seguridad y desplazamiento máximos aceptables. El soporte estructural diseñado es robusto y puede adaptarse a diferentes cargas y espesores, asegurando la viabilidad del sistema en un entorno real. No obstante, se sugiere realizar pruebas de carga en prototipos para validar las simulaciones y ajustar el diseño según sea necesario.

El proyecto demuestra que la integración de un aerogenerador en vehículos eléctricos es técnicamente viable y puede mejorar la eficiencia energética y la autonomía. Para una implementación real, se recomienda realizar análisis experimentales para validar los resultados obtenidos mediante simulaciones y asegurar la fiabilidad y eficiencia del sistema en condiciones operativas. Esto incluiría validar el sistema en un vehículo en entorno real y sería incluyendo un generador eléctrico para evaluar la potencial ganancia energética.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Enel Green Power, the platform dedicated to renewables | Enel Green Power (Internet). ¿Qué entendemos por transición energética? Disponible en: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/transicion-energetica> (último acceso el 24 de julio de 2024)
- [2] Tunergía, "Transición energética: Qué es, objetivos, causas y mucho más," *Tunergía / Vive la energía a lo grande*. [Internet]. Disponible en: <https://www.tunergia.es/post/transicion-energetica>. (último acceso el 25 de julio de 2024).
- [3] E. González Fernández, "Cambio climático y transición energética," *Revista Digital del Cedex*, 2018. [Fuente: Comisión Europea, 2011].
- [4] E. Álvarez Pelegry, "Transición energética y transporte: El papel de las energías alternativas y las convencionales," *Economía Industrial*, no. 411, pp. 21, 2019.
- [5] Energía y Sociedad, "¿Por qué el vehículo eléctrico?," *Energía y Sociedad*. Disponible online: <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/4-1-por-que-el-vehiculo-electrico/>. (último acceso el 25 de julio de 2024).
- [6] R. Xiong, Y. Duan, J. Cao, and Q. Yu, "Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle," *Applied Energy*, vol. 217, pp. 153-165, Feb. 2018. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.128.
- [7] D. S. Puma-Benavides, J. Izquierdo-Reyes, J. D. D. Calderon-Najera, and R. A. Ramirez-Mendoza, "A Systematic Review of Technologies, Control Methods, and Optimization for Extended-Range Electric Vehicles," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, p. 7095, 2021. doi: 10.3390/app11157095

- [8] O. Goushcha, R. Felicissimo, A. H. Danesh-Yazdi, and Y. Andreopoulos, "Exploring harnessing wind power in moving reference frames with application to vehicles," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 9, 2019, doi: 10.1177/1687814019865689.
- [9] F. A. Tiano, G. Rizzo, M. Marino, and A. Monetti, "Evaluation of the potential of solar photovoltaic panels installed on vehicle body including temperature effect on efficiency," *eTransportation*, vol. 5, p. 100067, 2020. doi: 10.1016/j.etrans.2020.100067
- [10] Z. Zhang, X. Zhang, W. Chen, Y. Rasim, W. Salman, H. Pan, Y. Yuan, and C. Wang, "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicles," *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 177–188, 2016. Corrección publicada en vol. 254, p. 113634, 2019.
- [11] C. Qiu, G. Wang, M. Meng, and Y. Shen, "A novel control strategy of regenerative braking system for electric vehicles under safety critical driving situations," *Energy*, vol. 149, pp. 329-340, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.02.046
- [12] H. Liu, Y. Lei, Y. Fu, and X. Li, "An optimal slip ratio-based revised regenerative braking control strategy of range-extended electric vehicle," *Energies*, vol. 13, no. 6, p. 1526, 2020. doi: 10.3390/en13061526
- [13] F. Rubio and C. Llopis-Albert, "Analysis of the Use of a Wind Turbine as an Energy Recovery Device in Transport Systems," *Mathematics*, vol. 9, p. 2265, 2021, doi: 10.3390/math9182265.
- [14] F. Rubio and C. Llopis-Albert, "Viability of Using Wind Turbines for Electricity Generation in Electric Vehicles," *Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 115-126, May 2019, doi: 10.4995/muse.2019.11743.
- [15] Wind-Powered 'Ventomobile' Places First in Race; University of Stuttgart, Germany, 2008. Disponible

- online: <https://www.sciencedaily.com/releases/2008/08/080827104702.htm>
(último acceso 22 de julio de 2024)
- [16] Wind-Powered Car Breaks Record; BBC News; 27 marzo 2009. Disponible online: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/7968860.stm> (último acceso el 22 de julio de 2024).
- [17] For Sale: Record-Breaking Downwind Cart. Low Miles, Newer Propeller; Barry, K. 2013. Disponible online: <https://www.wired.com/2013/06/downwind-cart-for-sale/> (último acceso el 22 de julio de 2024)
- [18] Meet Eolo, A Wind-Powered EV From Colombia; Iamrenew.com; 27 agosto 2018. Disponible online: [Meet Eolo, A Wind-Powered EV From Colombia \(iamrenew.com\)](http://iamrenew.com) (último acceso el 22 de julio de 2024).
- [19] Mohd, Sofian & Rosly, Nurhayati & A. Jamit, Rexca & Shamsudin, Syariful & Abdullah, Aslam. (2014). An Evaluation of Drag Coefficient of Wind Turbine System Installed on Moving Car. Applied Mechanics and Materials. 660. 689-693. 10.4028/www.scientific.net/AMM.660.689.
- [20] B. Fotso, C. Feudjio Nguéfack, R.-C. Talawo, and M. Fogue, "Aerodynamic analysis of an electric vehicle equipped with horizontal axis Savonius wind turbines," Int. J. Recent Trends Eng. Res., vol. 5, 2019, doi: 10.23883/ijtrr.2019.5057.lkaxl
- [21] C. Feudjio Nguéfack, B. E. Fotso, and M. Fogue, "Optimization of the position of Savonius turbines mounted on a hybrid vehicle by CFD analysis," Int. J. Green Energy, vol. 19, pp. 1-18, 2021, doi: 10.1080/15435075.2021.1961262.
- [22] S. M. Ferdous, W. Khaled, B. Ahmed, S. Salehin, and E. G. Ovy, "Electric Vehicle with Charging Facility in Motion using Wind Energy," in Proc. 11th Int. Conf. on Electronics, Computer and Communications, 2011, pp. 3629. doi: 10.3384/ecp110573629.

- [23] E. El, C. Yildiz, B. Dandil, and A. Yildiz, "Effect of wind turbine designed for electric vehicles on aerodynamics and energy performance of the vehicle," *Thermal Science*, vol. 26, pp. 2907-2917, 2022. doi: 10.2298/TSCI2204907E.
- [24] H. Chowdhury, R. Juwono, M. Zaid, R. Islam, B. Loganathan, and F. Alam, "An experimental study on the effect of various deflectors used for light trucks in Indian subcontinent," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 34-39, 2019. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.115.
- [25] "Ansys Discovery | 3D Product Simulation Software," Ansys, Inc. Disponible online: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>. (último acceso 22 de julio de 2024).
- [26] "IdealSimulations," CFD Computational Domain. Disponible online: <https://www.idealsimulations.com/cfd-computational-domain>. (último acceso 22 de julio de 2024).
- [27] J. Cristóbal, "Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical," Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Disponible online: <https://www.uv.es/~navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogen-vertical.pdf>. (último acceso 22 de julio de 2024).
- [28] A. Diago, "Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico," Master's thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, 2018. Disponible online: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diago%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20aerogenerador%20Savonius%20para%20uso%20dom%C3%A9stico.pdf>. (último acceso 24 de julio de 2024).
- [29] A. Palencia Díaz, G. Jiménez Pajaro, and K. Utria Salas, "Computational model of Savonius turbine," *Ingeniare Rev. Chil. Ing.*, vol. 23, no. 3, pp. 406-412, 2015. Disponible online: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052015000300009&lng=es&nrm=iso. (último acceso 24 de julio de 2024).

- [30] Z. Mao and W. Tian, "Effect of the blade arc angle on the performance of a Savonius wind turbine," **Advances in Mechanical Engineering**, vol. 7, no. 5, pp. 1-10, May 2015, doi: 10.1177/1687814015584247.
- [31] Z. Mao and W. Tian, "Effect of the blade arc angle on the performance of a Savonius wind turbine," **Advances in Mechanical Engineering**, vol. 7, no. 5, pp. 1-10, May 2015, doi: 10.1177/1687814015584247.
- [32] "La fuerza G en los coches," Lavaplust, 2023. Disponible online: <https://www.lavaplus.es/blog/la-fuerza-g-en-los-coches/> (último acceso 24 de julio de 2024).
- [33] "Safety Factor Calculation Concept," Autodesk Fusion 360. Disponible online: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ESP/?guid=SIM-SAFETY-FACTOR-CALC-CONCEPT> (último acceso 24 julio 2024).