

Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio de viabilidad para el Desarrollo de Sistemas
de Generación Eléctrica mediante Turbinas con Flujo
de Aire Forzado

Autor: María Elena Pérez Macías

Tutor: Juan Manuel González Ramírez

**Dpto. Organización Industrial
y Gestión de Empresas II
Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio de viabilidad para el Desarrollo de Sistemas de Generación Eléctrica mediante Turbinas con Flujo de Aire Forzado

Autor:

María Elena Pérez Macías

Tutor:

Juan Manuel González Ramírez

Profesor asociado

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Máster: Estudio de viabilidad para el Desarrollo de Sistemas de Generación Eléctrica mediante Turbinas con Flujo de Aire Forzado

Autor: María Elena Pérez Macías

Tutor: Juan Manuel González Ramírez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

*A mis abuelos, por seguir
acompañándome en el camino.*

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi tutor Juan Manuel González Ramírez, su tiempo y dedicación a lo largo de este tiempo además de su paciencia por las largas esperas que le he hecho pasar.

Gracias a mis compañeros de máster, su apoyo en las interminables horas de estudio, en los largos días de biblioteca y tras el COVID, las charlas por teléfono a pesar de la distancia.

Agradecer a mi familia, en especial a mis padres y a mi hermano Sergio, por su apoyo incondicional en cualquier situación y en cualquiera de mis ideas peregrinas. Aún recuerdo vuestras caras cuando os dije que dejaba Madrid y empezaba este máster.

A mis amigas que, sin saberlo, me han dado el mayor de los apoyos, siempre han creído en mí y nunca han juzgado ninguno de mis pasos. Gracias.

Y, por último, pero no menos importante, a Pedro, por su cariño, amor y paciencia durante todo este tiempo. Gracias por acompañarme y hacer que la vida sea un poco más bonita.

María Elena Pérez Macías

Sevilla, 2022

La finalidad de este documento, es llevar a cabo un estudio de viabilidad para el desarrollo de sistemas de generación eléctrica mediante turbinas con flujo de aire forzado. El flujo de aire forzado estudiado, es el efecto pistón, que se produce con la circulación de los trenes metropolitanos en los túneles y estaciones de metro.

Para hacer este estudio lo más parecido a la realidad posible, se han tomado los parámetros proporcionados por Metro Madrid de las estaciones existentes para su modelización y cálculo de su capacidad generativa. Tras ver la capacidad de generación y la elección del lugar de colocación de los aerogeneradores, se han estudiado diferentes posibilidades que ofrece el mercado de la energía minieólica.

Basándose en un aerogenerador que cumple las características propuestas se realiza un estudio de viabilidad económica para el autoconsumo de la estación de metro calculando la rentabilidad de la producción energética a 25 años tras su instalación.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Ilustraciones	xvi
1 Objetivos del Proyecto	1
2 Introducción y antecedentes	3
2.1. <i>Medidas adoptadas en Europa</i>	5
2.2. <i>Estado actual y medidas adoptadas en España</i>	7
3 Energía Eólica	11
3.1. <i>Evolución histórica de la energía eólica y los aerogeneradores</i>	12
3.2. <i>Producción de la energía eólica y componentes</i>	16
3.3. <i>Ventajas y desventajas de la energía eólica</i>	19
3.4. <i>Marco internacional y europeo del uso de energía eólica.</i>	20
3.5. <i>Marco nacional del uso de energía eólica.</i>	22
4 Legislación Vigente	25
5 Modelización del Flujo de Aire	27
5.1 <i>Estado del arte</i>	27
5.2 <i>Software empleado</i>	28
5.3 <i>Proceso y parámetros de modelización</i>	28
5.4 <i>Resultados obtenidos</i>	33
5.4.1 <i>Gráficos de velocidad</i>	33
5.4.2 <i>Conclusiones</i>	36
6 Estudio de Aerogeneradores	37
6.1 <i>Estado del arte</i>	37
6.2 <i>Elección del tipo de Aerogenerador</i>	40
6.2.1 <i>Turbinas de eje horizontal</i>	40
6.2.2 <i>Turbinas de eje vertical</i>	41
6.3 <i>Propuestas técnicas</i>	42
6.3.1 <i>Aerogenerador 0,60 City de WindSide</i>	42
6.3.2 <i>Aerogenerador ST-3500 de SmartTwister</i>	43
6.3.3 <i>Aerogenerador Atlas X de TESUP</i>	44
6.4 <i>Estudio de viabilidad y valoración económica</i>	45
7 Conclusiones	51
Anexos	53
1. <i>Croquis sección tipo</i>	54
2. <i>Planos de la sección tipo</i>	55
3. <i>Trenes C7000</i>	56
4. <i>Trenes C8000</i>	57

5. <i>Trenes C9000</i>	58
6. <i>Cálculo de la rentabilidad del proyecto</i>	59
Referencias	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros modelización	31
Tabla 2. Ubicación puntos de estudio	32
Tabla 3. Consumo anual línea 10 Metro Madrid	45
Tabla 4. Estimación del consumo diario de las estaciones L10	45
Tabla 5. Frecuencia de paso de los trenes de la línea 10	45
Tabla 6. Trenes que circulan por sentido y por tramos horarios	46
Tabla 7. Inversión inicial aerogeneradores	47
Tabla 8. Gastos Iniciales de instalación	48
Tabla 9. Aportación económica inicial	48
Tabla 10. Producción y ahorro de 1 año con aerogeneradores	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Evolución del precio del MWh eléctrico.	3
Ilustración 2. Evolución del precio del MWh de gas.	3
Ilustración 3. Representación de energías renovables.	4
Ilustración 4. Objetivos 2020 en la UE y países miembros.	5
Ilustración 5. Evolución de los objetivos de 2030	6
Ilustración 6. Evolución del consumo de energía primaria en España	7
Ilustración 7. Consumo de energía primaria en España 2019	7
Ilustración 8. Consumo Energía Primaria Renovable 2019	8
Ilustración 9. Evolución de la producción bruta de energía	8
Ilustración 10. Producción de Energía y grado de Autoabastecimiento 2000-2019	9
Ilustración 11 Consumo de energía final por sectores 2000-2019	9
Ilustración 12. Consumo de energía final por sectores 2019	10
Ilustración 13. Aerogeneradores para la producción de hidrogeno renovable	11
Ilustración 14. Dios griego Eolo	12
Ilustración 15. Embarcación de vela egipcia	12
Ilustración 16. Embarcación de vela actual	12
Ilustración 17. Molinos de Nashtifan (Irán)	13
Ilustración 18. Molinos de Campo de Criptana (Ciudad Real, España)	13
Ilustración 19. Turbina eólica de Charles Brush (1880s)	14
Ilustración 20. Turbina eólica de Poul La Cour Askov	14
Ilustración 21. Aerogenerador NASA de Clayton (EEUU)	15
Ilustración 22. Aerogeneradores Offshore Dinamarca	15
Ilustración 23. Estructura de un aerogenerador de Iberdrola	16
Ilustración 24. Detalle parte superior de un aerogenerador Iberdrola	16
Ilustración 25. Funcionamiento parque eólico de Iberdrola	17
Ilustración 26. Funcionamiento energía minieólica Enair	18
Ilustración 27. Energía eólica por continente	20
Ilustración 28. Energía eólica países >10GW en Europa	20
Ilustración 29. Generación de energía eólica para escenario Net Zero	21
Ilustración 30. Capacidad generadora eólica para el escenario Net Zero	21
Ilustración 31. Ratio generación/demanda (%) y generación (GWh) en 2021 por CCAA	22
Ilustración 32. Estructura de la generación anual de energía renovable peninsular 2021	22
Ilustración 33. Evolución anual de la potencia instalada	23
Ilustración 34. Potencia eólica instalada por CCAA	23
Ilustración 35. Generación eólica por CCAA	24
Ilustración 36. Estaciones Línea 10 Metro Madrid	28
Ilustración 37. Croquis diseño sección tipo.	28

Ilustración 38. Geometría túnel de metro	29
Ilustración 39. Geometría estación de metro	29
Ilustración 40. Modelo tren C7000	30
Ilustración 41. Dimensiones del modelo tren C7000	30
Ilustración 42. Geometría tren metro	30
Ilustración 43. Geometría modelo	31
Ilustración 44. Ubicación puntos de estudio.	32
Ilustración 45. Gráfico 1 - Velocidades en la estación	33
Ilustración 46. Gráfico 2 – Velocidades en paredes	33
Ilustración 47. Gráfico 3 – Velocidades en mediana	34
Ilustración 48. Gráfico 4 - Velocidades en zona de railes.	34
Ilustración 49. Gráfico 5 - Velocidades en punto de salida.	35
Ilustración 50. Gráfico 6 - Velocidades en puntos medios.	35
Ilustración 51. Gráfico 7 - Velocidades en puntos de llegada.	36
Ilustración 52. Prototipo turbinas de eje vertical en paredes de metro	37
Ilustración 53. Prototipo proyecto MACE	37
Ilustración 54. Prototipo Turbinas Tunel Energy	38
Ilustración 55. Turbina Enlil DeveciTech	39
Ilustración 56. Prototipo pared eólica	39
Ilustración 57. Aerogeneradores de eje horizontal	40
Ilustración 58. Aerogeneradores de eje vertical.	41
Ilustración 59. Aerogenerador 0,60 City WS	42
Ilustración 60. Curva de potencia de ST-3500	43
Ilustración 61. Aerogenerador ST-3500 de SmartTwister	43
Ilustración 62. Aerogenerador ATLASX de TESUP	44
Ilustración 63. Curva de potencia de ATLASX	44
Ilustración 64. Velocidad de los puntos medios del túnel	46
Ilustración 65. Rentabilidad a 25 años	49

1 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Ningún viento es favorable para el que no sabe a dónde va.

Séneca

El objetivo del presente proyecto es analizar una fuente de energía limpia y renovable, como es la masa de aire desplazada por los trenes metropolitanos y considerar la viabilidad y economía de su uso para el autoabastecimiento de las propias estaciones. En el documento, se irán analizando pormenorizadamente todos los pasos que se han realizado hasta llegar a la conclusión final para su demostración.

Para poder comprender en el contexto económico y social en que se realiza el estudio, en primer lugar, se realiza un análisis de la crisis energética presente y de las fuentes de consumo de las que se obtiene la energía actualmente y su evolución histórica. Puesto que este análisis es escalable a todas las ciudades en las que se utilice esta clase de transporte y por la pertenencia de España a la unión europea y su influencia en materia de desarrollo y legislación sobre el país, se tendrá en cuenta tanto el marco nacional como el europeo para el estudio.

Debido a que la energía que este proyecto propone es energía eólica, se realiza un estudio histórico y evolutivo sobre la cuestión a fin de familiarizarse con la misma, apoyándose en todo momento en la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico que contempla la regulación administrativa, técnica y económica de la energía eléctrica en España y entre ellas contempla la eólica.

Con el fin de cuantificar la magnitud de generación del aire desplazado por el paso de los trenes metropolitanos, se realiza un estudio del efecto pistón y una modelización con el software de cálculo Ansys CFX. Los datos y parámetros utilizados son actuales y reales, han sido proporcionados por Metro Madrid y las hipótesis de cálculo están basadas en diferentes artículos y estudios de la comunidad científica que se analizan en el apartado correspondiente. Se realiza un estudio de la capacidad energética de este aire desplazado para su posterior aprovechamiento a través de turbinas.

Basándose en el flujo de aire disponible, se realiza un estudio de las diferentes formas de turbinas según su colocación y la incidencia de la masa de aire para poder escoger el diseño más óptimo. Este estudio se realiza en base a diferentes artículos y estudios de la comunidad científica que, se analizan en el apartado correspondiente.

Teniendo en cuenta estos resultados, se realiza un estudio de mercado de las posibles turbinas de eje vertical que podrían emplearse para la generación de esta energía. Tras la selección de varios modelos se procede al estudio de la capacidad energética real que puede generarse con los aerogeneradores seleccionados teniendo en cuenta las características proporcionadas por los fabricantes de las mismas. Con la capacidad de producción de cada turbina en la situación planteada, se realiza un estudio económico con distintas hipótesis para comprobar la viabilidad técnica y económica de la adopción de esta medida.

2 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La crisis energética actual, es una crisis sin precedentes en Europa, debido al aumento de los precios del gas y la electricidad. La falta de recursos asociada al uso de los combustibles fósiles, a la que se añade la complejidad de suministro por la actual guerra de Ucrania, hacen que las desigualdades que siempre han existido para acceder a la energía, sean mas acusadas y se necesite una pronta actuación con el fin de evitar una crisis de pobreza energética a nivel global.

Como ejemplo gráfico de lo anterior, se puede observar la evolución ascendente del precio del MWh en los últimos años, los datos de la energía eléctrica han sido obtenidos del Operador del Mercado Eléctrico de la Energía (OMIE, 2022) y los de la energía del gas del Mercado Ibérico del Gas (MIBGAS, 2022):

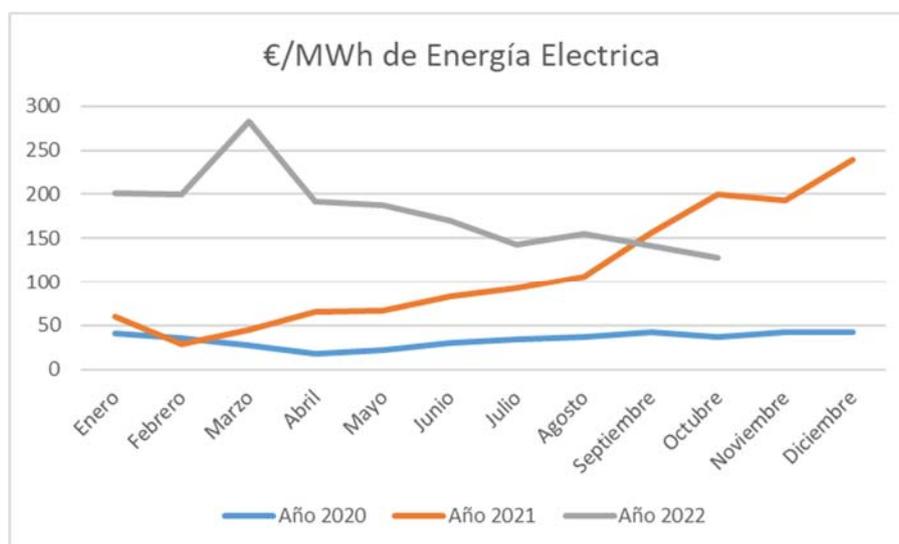


Ilustración 1. Evolución del precio del MWh eléctrico.
Fuente: Elaboración Propia

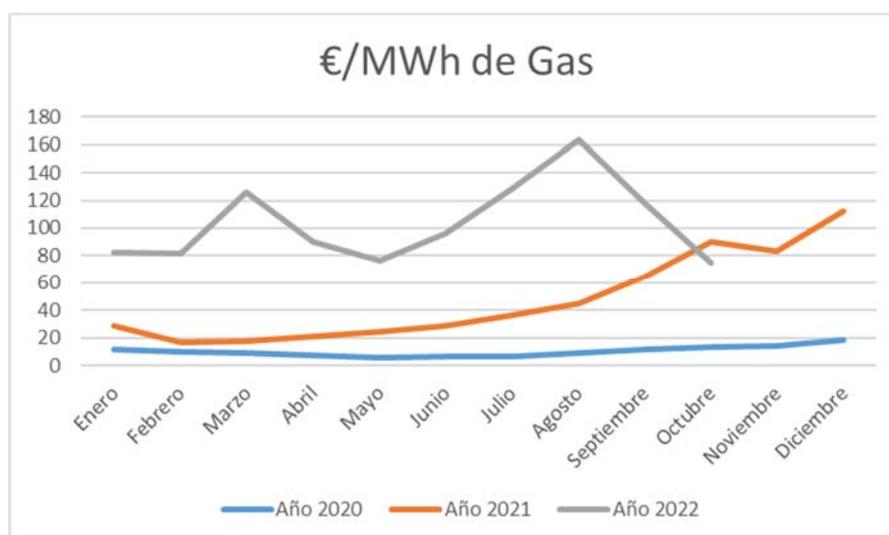


Ilustración 2. Evolución del precio del MWh de gas.
Fuente: Elaboración Propia

A pesar de que en las gráficas se puede ver una clara tendencia descendente en los últimos meses, los valores del precio de MWh están muy por encima del precio del histórico en el año 2020, en el cual también se produjo una crisis mundial debida a la pandemia de COVID-19 que paralizó el mundo.

La situación actual requiere de una transición hacia fuentes de suministro sostenibles y renovables, afortunadamente, ya se emplean muchas de las mismas por lo que la transición, debe centrarse en acelerar este proceso de cambio hacia la sostenibilidad.



Ilustración 3. Representación de energías renovables.

Fuente: <https://solarplak.es/>

Entre las principales ventajas obtenidas del uso de energías renovables se encuentran:

- ✔ La eliminación de la dependencia actual a los combustibles fósiles,
- ✔ El uso continuado de las mismas, que las convierten en fuentes prácticamente inagotables de energía.
- ✔ El reducido impacto negativo sobre el medio ambiente (en algunos casos, incluso llegando a ser nulo) que hace que sean consideradas energías limpias.
- ✔ La producción local de las energías, pudiendo generar y utilizar las mismas sin depender de suministros externos o internacionales de los grandes productores de combustibles fósiles

En la actualidad se cuenta con diferentes tipos de energías renovables para la producción energética sostenible, las más utilizadas, son las siguientes:

- Energía eólica: basada en el aprovechamiento de la energía cinética de las masas de aire. En la actualidad se utiliza el viento que se produce por las corrientes de aire que circulan libremente en el exterior. Su aprovechamiento se realiza a través de aerogeneradores conectados a redes de transformación y distribución. El objeto de este estudio es el aprovechamiento de las masas de aire que se producen de manera forzada en espacios cerrados.
- Energía solar: obtenida a partir del aprovechamiento de las radiaciones electromagnéticas procedentes de la energía solar a través de células fotoeléctricas que se ubican en paneles fotovoltaicos y colectores solares térmicos.
- Energía hidráulica o hidroeléctrica: obtenida del aprovechamiento de la energía cinética del agua: corrientes, saltos y mareas. Se aprovecha a través de turbinas o tuberías conectadas a un alternador. Esta energía genera controversia ya que hay expertos que sostienen que no es completamente limpia debido a las implicaciones que tiene, como, por ejemplo, para su aprovechamiento a través de la apertura de compuertas de las presas, es necesaria una pérdida elevada de agua embalsada.
- Energía de la biomasa o biogás: producido por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica en un ambiente anaerobio (carente de oxígeno) a través de microorganismos y elementos acelerantes que mediante turbinas pueden generar energía eléctrica.

2.1. Medidas adoptadas en Europa

El objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles en pro de las energías renovables, es un objetivo global en el que están implicados los países del mundo desarrollado. Para contextualizar las medidas que se adoptan en España y su desarrollo, hay que tener en cuenta que su pertenencia a la Unión Europea y los objetivos globales de sostenibilidad de la misma, influyen en gran medida en el camino que se realiza.

Según el sitio web perteneciente a la Comisión Europea (Comisión Europea, 2022) los objetivos para el uso de energías renovables para 2020 tratados en la comisión “Energy 2020- A strategy for competitive, sustainable and secure energy” (COM/2010/0639) eran la reducción del 20% de los gases invernadero, que al menos el 20% de las energías consumidas, fuera proporcionada por fuentes renovables y conseguir un ahorro de energía del 20%. Los países miembros de la unión se comprometieron a estas cifras y cada país trazo un plan de acción para conseguirlos. Los planes incluían:

- ⊙ Objetivos individuales de energía renovable para la electricidad, sistemas de calentamiento y enfriamiento y sector del transporte.
- ⊙ Planes de combinación de distintas energías renovables.
- ⊙ Medidas políticas para lograr los objetivos a nivel nacional basándose en la cooperación de organismos locales, regionales y nacionales.
- ⊙ Plan de transferencia de energía o planificación de estrategias conjuntas con países vecinos.
- ⊙ Políticas nacionales para el desarrollo de los recursos basados en la energía procedente de la biomasa.
- ⊙ Medidas que garantizaran que el uso de los biocombustibles cumpliera los criterios de sostenibilidad de las energías renovables de la Unión europea.

Cada dos años, se iban reportando los datos obtenidos de cada país y el año 2020 se obtuvieron unos resultados muy satisfactorios: se superó la cifra del 20%, obteniendo que un 22% de las energías consumidas procedían de fuentes renovables.

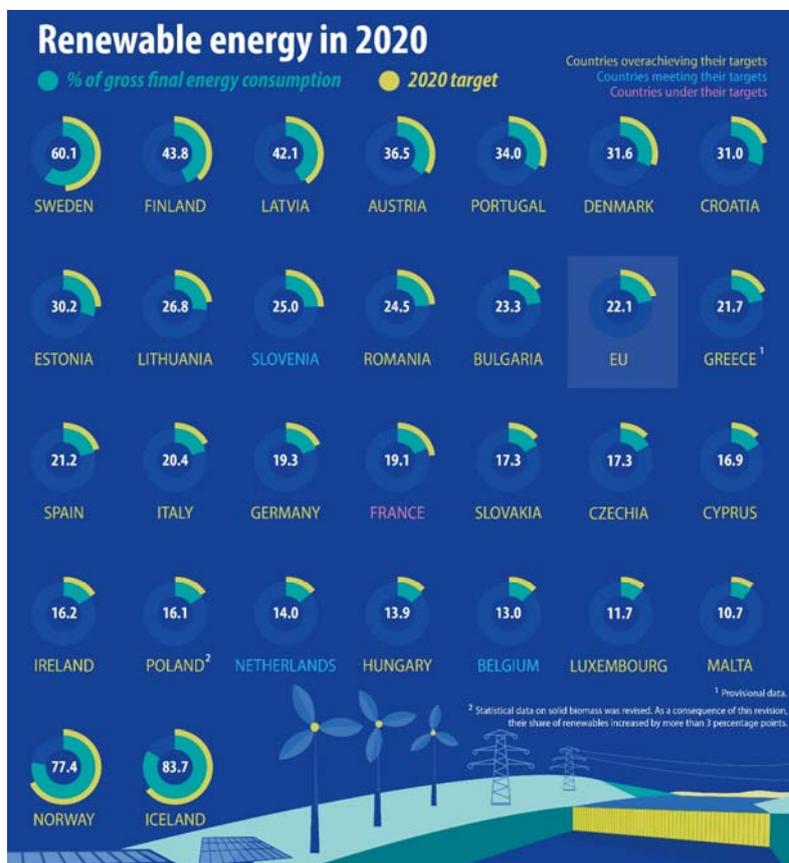


Ilustración 4. Objetivos 2020 en la UE y países miembros.

Fuente: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220119-1>

Los países que superaron ampliamente el objetivo son Noruega con un 77 % e Islandia con un 83%. En el otro lado nos encontramos los países que se han quedado bastante por debajo del objetivo como son Malta con un 11%, seguido de Luxemburgo con un 12% y Bélgica con un 13%. España se sitúa en los países levemente por encima de la media con un 21,2% conseguido.

Basándose en estos resultados tan esperanzadores, la Directiva de Energía Renovable de la Unión Europea (2018/2001/UE) estableció un nuevo objetivo para 2030 para que al menos el 32% del consumo energético de Europa proceda de fuentes renovables, este objetivo se pretendía revisar en 2023 con posibles mejoras.

En el año 2019 se realizó el “European Green Deal” que sentenció que las medidas tomadas en la directiva anterior debían ser más ambiciosas y proponía su pronta revisión. Basándose en estas apreciaciones, la reunión de la Comisión de 14 de julio de 2021 propone modificar la directiva existente sobre energías renovables y ampliar el objetivo del consumo energético a un 40% de fuentes de energía renovables.

Con todas estas modificaciones y la invasión de Ucrania por parte de Rusia, la Comisión se volvió a reunir el 18 de mayo de 2022 y propuso el plan REPowerEU, consistente en la reducción inmediata (hasta eliminación) de la dependencia de la UE de los combustibles fósiles provenientes de Rusia acelerando de este modo la transición. El plan REPowerEU tiene tres pilares: el ahorro energético real, la producción de energía limpia y sostenible y la diversificación de suministro energético de la UE. El objetivo de este plan coloca el objetivo de consumo energético en un ambicioso 45% de producción de fuentes de energía renovables. Este plan se encuentra sobre la mesa en la actualidad a la espera de ser aprobado o modificado.

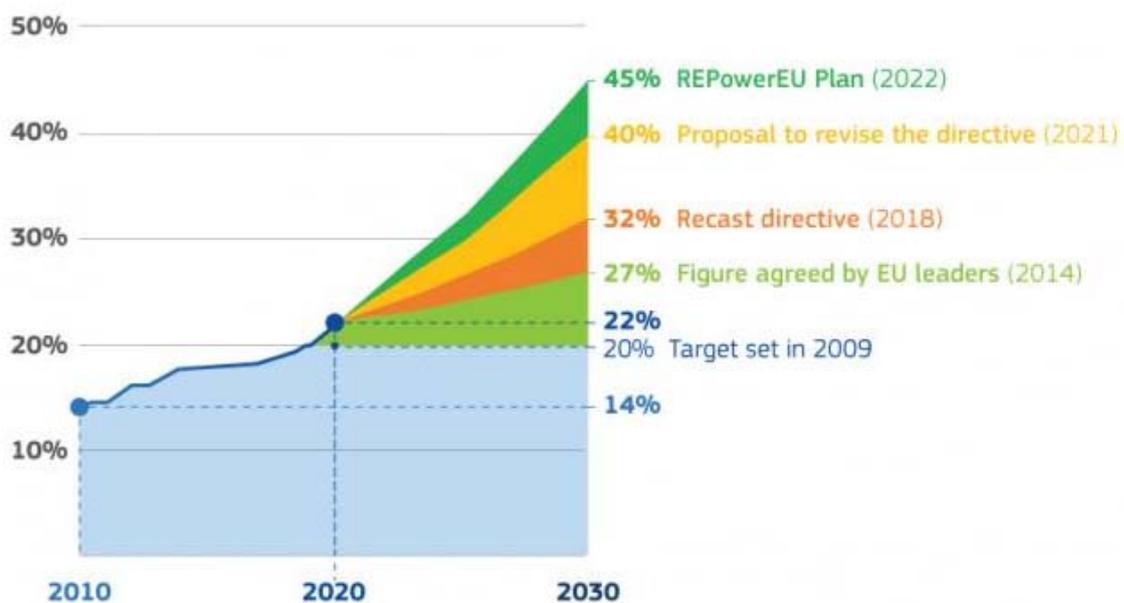


Ilustración 5. Evolución de los objetivos de 2030

Fuente: <https://ec.europa.eu/>

2.2. Estado actual y medidas adoptadas en España

Para conocer la situación actual y real de España y como han afectado las medidas tomadas desde la Unión Europea, se acude al Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2022) que plantea todas las medidas pasadas y actuales del ámbito nacional. Los últimos datos que recoge el MITERD, son los correspondientes al Libro de la Energía de 2019 (Libro de la Energía 2019, 2022), que presentan la situación más actualizada del país. La evolución del consumo de la energía sigue un patrón muy esperanzador, a continuación, se muestran los datos referidos a la energía primaria (con todo tipo de fines, incluidos los no energéticos)

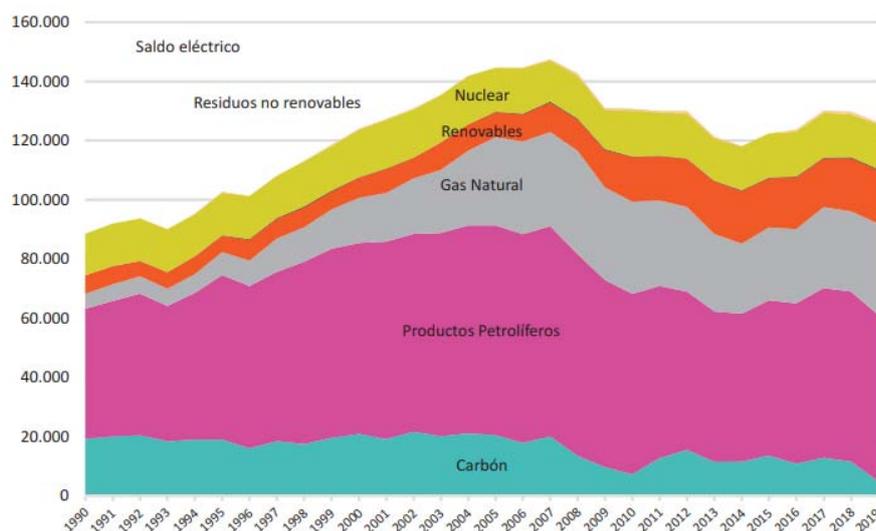


Ilustración 6. Evolución del consumo de energía primaria en España

Fuente: (Libro de la Energía 2019, 2022)

**El consumo energético se encuentra expresado en Ktep*

Como se puede apreciar, en los últimos años el descenso del uso del carbón y productos petrolíferos es muy elevado en pro del uso de renovables y gas natural. En España se posee una dependencia de los combustibles fósiles mucho mayor que la media de la unión europea llegando a un 79% en 2019 (sobre el 54% de la UE).

En el siguiente grafico se puede comprobar el estado del año 2019 pormenorizado de este consumo:

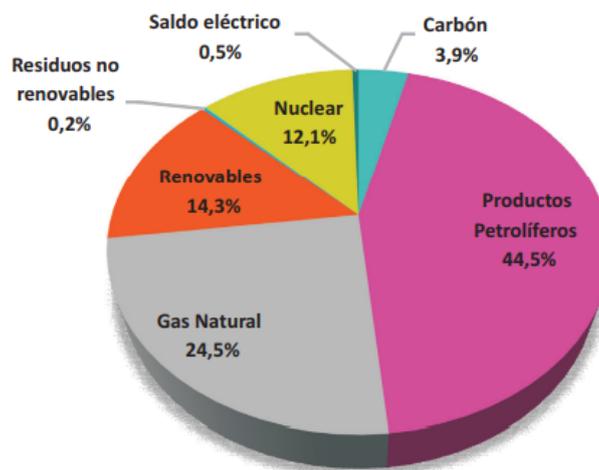


Ilustración 7. Consumo de energía primaria en España 2019

Fuente: (Libro de la Energía 2019, 2022)

Dentro de la energía renovable, existen diferentes preferencias en cuanto al uso de las mismas:

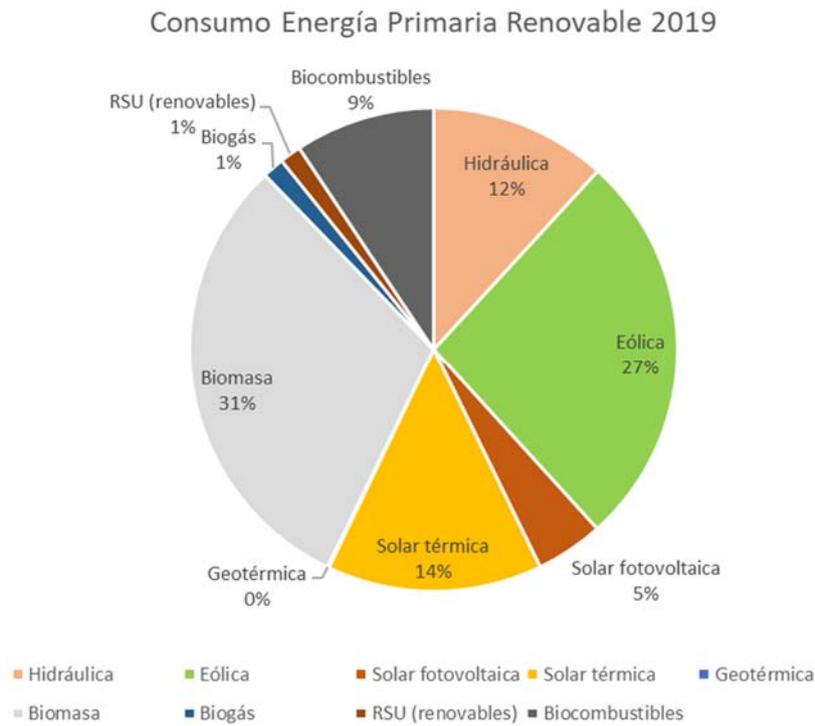


Ilustración 8. Consumo Energía Primaria Renovable 2019
Fuente: Elaboración Propia

Basándose en lo anterior, las más consumidas son la procedente de biomasa y la eólica, formando estas más del 50% del consumo total de renovables. No obstante, debemos tener en cuenta la capacidad de producción de energía real de cada fuente renovable:

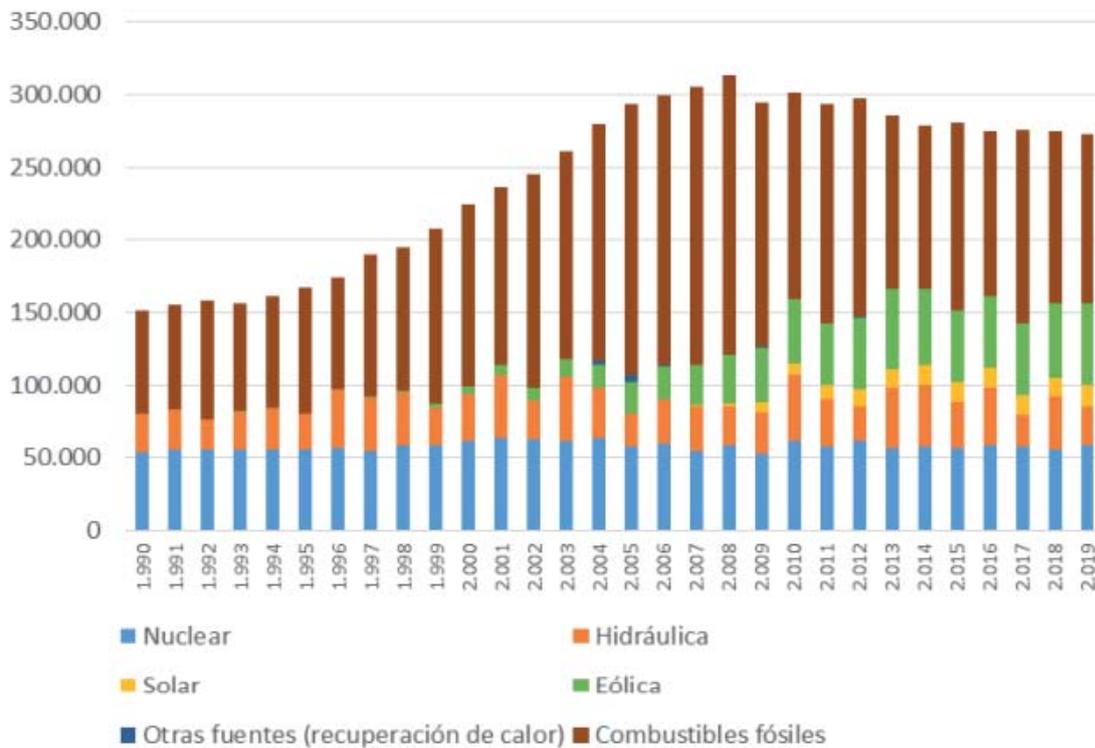


Ilustración 9. Evolución de la producción bruta de energía
Fuente: (Libro de la Energía 2019, 2022)

*La producción energética se encuentra expresada en GWH

Se hace notorio el avance que se comentaba anteriormente hacia la producción eólica, solar e hidráulica (energías renovables) y que el consumo de las mismas está limitado en parte por su capacidad de producción real. A continuación, se muestra un comparativo de la producción de energía en comparación con el grado de autoabastecimiento:

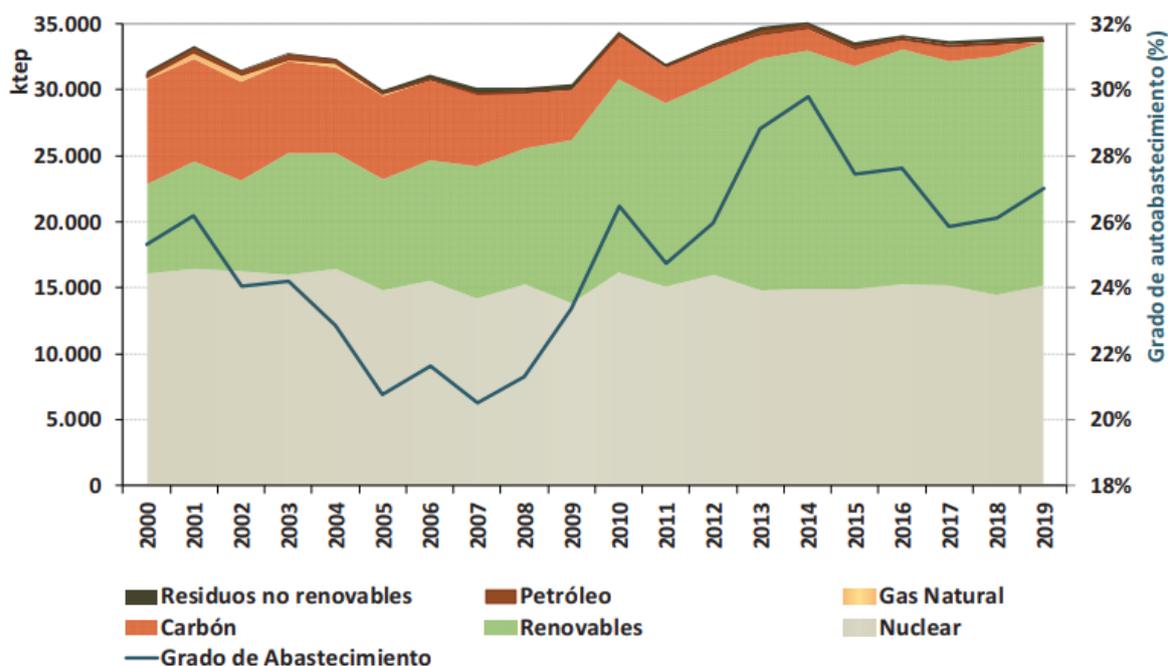


Ilustración 10. Producción de Energía y grado de Autoabastecimiento 2000-2019

Fuente: (Libro de la Energía 2019, 2022)

Para poder hacerse una idea de en qué se emplea la energía final (energía empleada únicamente en usos energéticos) en España y los principales consumidores son:

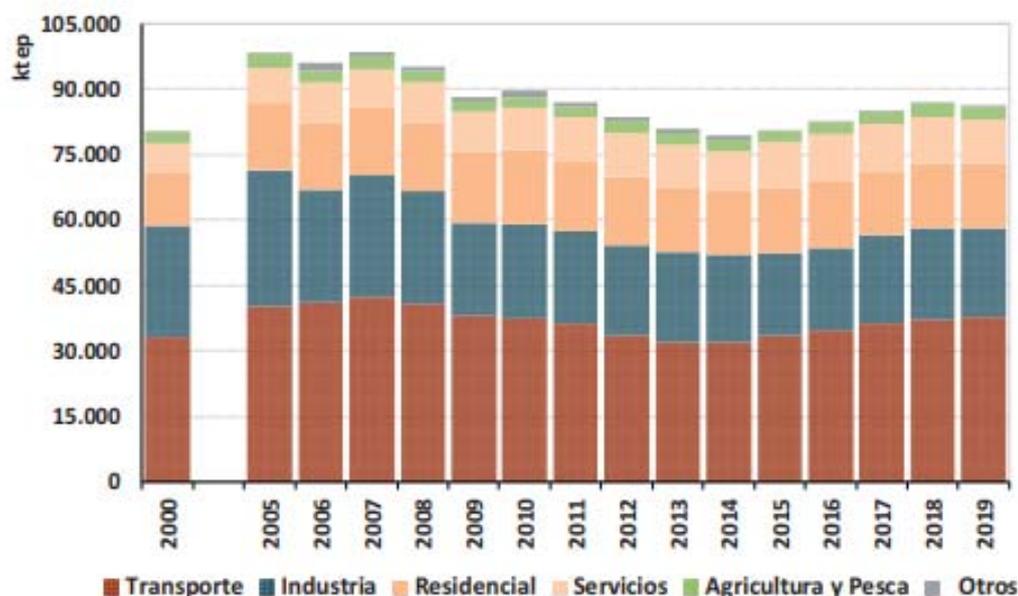


Ilustración 11 Consumo de energía final por sectores 2000-2019

Fuente: (Libro de la Energía 2019, 2022)

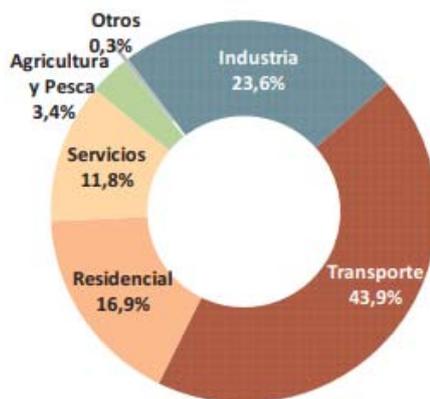


Ilustración 12. Consumo de energía final por sectores 2019

Fuente: (Libro de la Energía 2019, 2022)

En base a esto, los principales consumidores de las fuentes de energía son el sector del transporte y el sector de la industria, copando entre ambos más del 50% del consumo total.

Como ya se hizo con el objetivo de 2020, la UE demanda la redacción de planes nacionales a todos los estados miembros para poder comprobar cómo se van adoptando las medidas de transición hacia la sostenibilidad. La herramienta con la que se cuenta desde el gobierno para poner en marcha este tipo de medidas es el “Marco Estratégico de Energía y Clima” que consiste en:

- Ley 7/2001, de 20 de mayo, de cambio Climático y Transición Energética (LCCTE)
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC)
- Estrategia de Transición Justa y Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050

El PNIEC recoge alcanzar los siguientes objetivos:

- ⊙ Reducción de los gases de efecto invernadero hasta en un 23%
- ⊙ Mejora de la eficiencia energética en un 39,5%
- ⊙ Aumento del uso energético de renovables sobre energía final hasta un 42%
- ⊙ Generación eléctrica a través de energías renovables de un 74%

Teniendo una idea general del estado nacional e internacional de la energía y el uso de renovables, se procede a poner el foco de estudio en la energía eólica y su desarrollo para establecer las bases del objeto del presente trabajo.

3 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica, es una fuente de energía limpia y renovable que utiliza la energía cinética de las masas de aire para la producción eléctrica. Se dice que la energía eólica es una forma indirecta de energía solar ya que el calentamiento desigual de la superficie de la tierra genera diferentes presiones lo que produce el desplazamiento de estas masas de aire que producen el viento.

Se encuentra la existencia de dos tipos de energía eólica, en función del lugar donde se genere la electricidad:

- **Energía eólica terrestre (Onshore)**

Son aerogeneradores instalados en el terreno, normalmente en conjunto formando parques eólicos. Estos aerogeneradores tienen un gran potencial de generación (de 300 a 700 KW) y van conectados a la red de distribución eléctrica. Se ubican principalmente en zonas despejadas donde la influencia de los vientos sea lo suficientemente significativa como para dar una buena producción.

Dentro de este tipo de energía se encuentra también la minieólica, de uso doméstico o para fines de autoabastecimiento. Esta energía se obtiene de la instalación de pequeños aerogeneradores (capacidad menor a 100 KW) colocados en zonas aisladas donde el transporte de energía se hace complicado o zonas alejadas de la red eléctrica. Normalmente estos aerogeneradores son de tipo híbrido ya que se completan con una placa fotovoltaica en su parte superior para aprovechar toda la energía posible.

- **Energía eólica marina (Offshore)**

Son los aerogeneradores instalados en el mar, el funcionamiento es similar al caso anterior, la diferencia es que en alta mar se producen unos vientos muy superiores a los de la zona terrestre. Una de las ventajas, es que, en alta mar, el viento no encuentra ningún obstáculo por lo que la energía es mucho más eficiente a la hora del giro de las aspas.

La energía eólica tiene diferentes usos y aplicaciones para su aprovechamiento como son:

- Energía eléctrica: quizá es el aprovechamiento más extendido y en el primero que se piensa cuando se habla de este tipo de energía renovable. La energía cinética del viento, hace girar las aspas de los aerogeneradores lo cual se transforma en energía mecánica dando lugar a la energía eléctrica.
- Bombeo de agua: Se puede utilizar para la extracción de agua del subsuelo con el uso de aerobombas, se puede llegar a bombear 600 l de agua, capaces de abastecer zonas agrícolas extensas y de difícil acceso.
- Hidrogeno renovable: Esta energía se usa para producir una corriente eléctrica continua que produce hidrogeno renovable. Este tipo de elemento se utiliza en la producción de los llamados combustibles sintéticos o ecocombustibles.



Ilustración 13. Aerogeneradores para la producción de hidrogeno renovable

Fuente: <https://www.economista.es/energia/noticias/>

Datos obtenidos de la página de Repsol (Repsol, 2022)

3.1. Evolución histórica de la energía eólica y los aerogeneradores

El aprovechamiento de esta fuente de energía se ha dado desde la antigüedad. El nombre que recibe la energía “eólica” se debe al dios de la mitología griega Eolo, Señor de los Vientos, del que se dice que vivía en la isla de Eólia, que podía moverse por el mar. Desde esta isla, era responsable del control de las tempestades por la gracia de Zeus que le concedió el poder de aplacar y provocar vientos. Suele aparecer representado en la iconografía rodeado de remolinos.

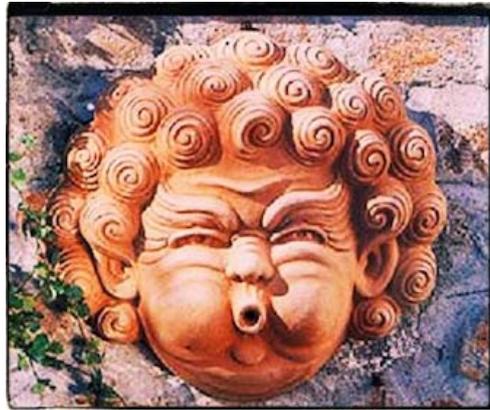


Ilustración 14. Dios griego Eolo

Fuente: <https://mitosyleyendascr.com/mitologia-griega/eolo/>

Entre los siglos VI y V a.C. el viento se aprovechaba para la navegación, por los pueblos comerciantes como los egipcios, fenicios y romanos, se llevaba a cabo mediante la impulsión de las velas para el avance de las embarcaciones.



Ilustración 15. Embarcación de vela egipcia

Fuente: <https://premiumenergia.es/historia-de-la-energia-eolica/>

Esta técnica se fue mejorando con el tiempo hasta la actualidad que se sigue utilizando este tipo de navegación, aunque ya a modo deportivo o recreativo y no por la necesidad de transporte.



Ilustración 16. Embarcación de vela actual

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Vela_\(deporte\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Vela_(deporte))

En el 200 a.C. aparecen los primeros molinos que se pueden datar, en la zona de Asia (China y Persia principalmente), se utilizaban para bombear agua y mover las piedras del molino que servían para triturar granos. Como se puede apreciar en la siguiente imagen, eran de eje vertical y tamaño reducido.



Ilustración 17. Molinos de Nashtifan (Irán)

Fuente: <https://www.findinterestingplaces.com/places/nashtifan-windmills>

En la Edad Media en Europa se empiezan a instalar molinos de viento, más sofisticados y eficientes que sus predecesores. Los molinos también tenían la finalidad de moler grano o bombear agua por lo que se colocaban en lugares estratégicos, cerca de ríos y arroyos o en mitad de una zona agraria. Este modelo se hizo mundialmente conocido gracias a la obra literaria Don Quijote del autor español Miguel de Cervantes. En la novela, el protagonista confunde estas instalaciones con gigantes y carga en combate contra ellos. Estos molinos fueron los precursores de los aerogeneradores actuales:



Ilustración 18. Molinos de Campo de Criptana (Ciudad Real, España)

Fuente: <https://www.abc.es/espana/castilla-la-mancha/guia-conocer-historia-tecnologia-molinos-viento>

En la década de 1880 aparecen las primeras turbinas eólicas, se instalaban principalmente en zonas rurales de Reino Unido y de Estados Unidos, donde fuera complicado el proporcionar energía eléctrica de otra manera. A continuación, se muestra el modelo representativo de la década, ideado por el inventor norteamericano Charles Brush.

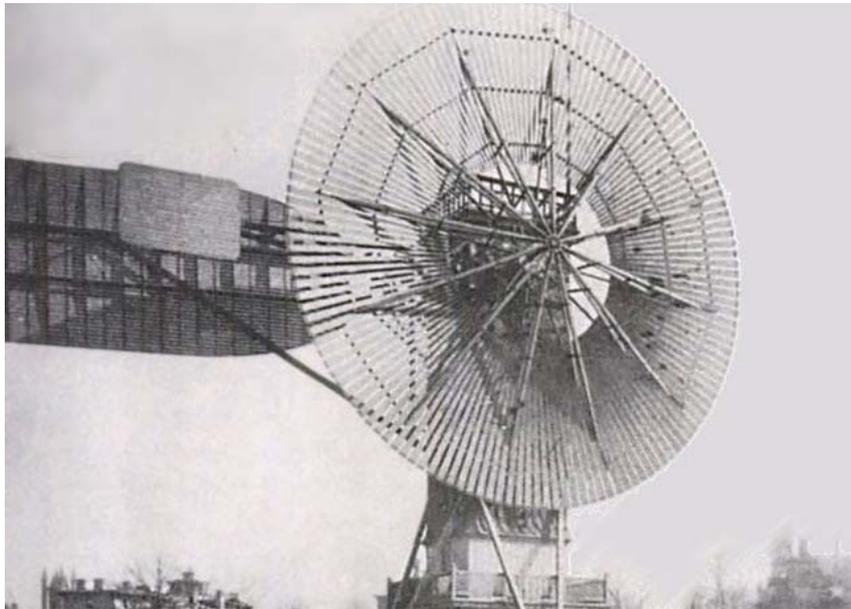


Ilustración 19. Turbina eólica de Charles Brush (1880s)

Fuente: <https://www.bloglenovo.es/los-nuevos-vecinos-del-campo-son-tecnologicos-y-vienen-a-darte-energia/>

En la década de 1890 surgen en Dinamarca los primeros aerogeneradores modernos, sin embargo, su desarrollo quedó en pausa priorizando otras fuentes de energía como la térmica y la hidráulica. El modelo siguiente es el ideado por el científico e inventor danés Poul La Cour Askov, como se aprecia se parece más a los molinos de viento de la Edad Media que al prototipo anterior.



Ilustración 20. Turbina eólica de Poul La Cour Askov

Fuente: <https://nordjyskemuseer.dk/udstillingen-om-poul-la-cour-og-brintlampen/>

A partir de la década de 1970, tras la crisis del petróleo, se produjo un cambio en el mercado energético, el precio de los combustibles fósiles era tan elevado que se buscaron fuentes de generar energía alternativa, por lo que la energía eólica volvió a ponerse sobre la mesa y comenzó su desarrollo que continua hasta el día de hoy. Uno de los aerogeneradores de la década fue el creado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos y la NASA, llamado MOD 0A, instalado en Clayton, Nuevo Méjico.



Ilustración 21. Aerogenerador NASA de Clayton (EEUU)

Fuente: <https://www.windsofchange.dk/WOC>

En la década de 1980 se inauguró el primer parque eólico de Europa en Kythnos (Grecia), con 5 aerogeneradores con una capacidad de 20 KW cada uno. Una década después se construye en Vindeby (Dinamarca) el primer parque eólico marino con tecnología offshore con 11 aerogeneradores con una capacidad de 450 KW cada uno. Este tipo de aerogeneradores y su situación abrió aún más las posibilidades de generación de energía limpia que se planteaban hasta la fecha.



Ilustración 22. Aerogeneradores Offshore Dinamarca

Fuente: <https://www.diariorenovables.com/2018/03/primer-parque-eolico-marino-del-mundo.html>

A partir de los años 2000 los aerogeneradores instalados eran muy parecidos a los que hay en la actualidad, la evolución de estos elementos pasa por hacerlos cada vez más eficientes y extender su implantación por el mundo como una de las mejores formas de generar energía limpia y renovable.

Desarrollo histórico basado en los datos de la página de Neoenergía (Neoenergía, 2022)

3.2. Producción de la energía eólica y componentes

Para la producción de energía con cualquiera de los usos descritos, a través de la potencia eólica, es necesario realizar una infraestructura que convierta la energía cinética del viento en energía eléctrica aprovechable.

La parte más llamativa de la generación de energía eólica son los aerogeneradores, en el apartado anterior se ha visto su evolución en el tiempo y a continuación se va a describir el funcionamiento de uno de ellos en la actualidad, si bien hay aerogeneradores de diferentes formas, todos tienen unos elementos principales comunes.

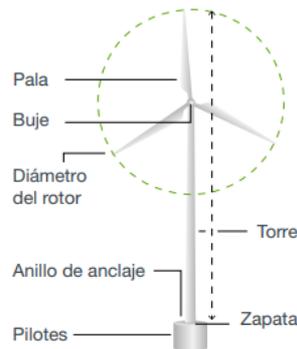


Ilustración 23. Estructura de un aerogenerador de Iberdrola
Fuente: (Iberdrola, 2022)

El aerogenerador se divide en 3 partes, empezando de manera ascendente se encuentra:

- ❖ **Cimentación:** la cimentación de los aerogeneradores puede ser de muchos tipos, por lo general es como la que se muestra en la imagen, con una zapata pilotada de grandes dimensiones. La cimentación es un elemento muy importante ya que debido a la esbeltez de la torre y las grandes cargas que ha de soportar la cabeza del aerogenerador, el anclaje al suelo es imprescindible para un funcionamiento óptimo, sin sufrir giros o pandeos.
- ❖ **Torre:** soporta la góndola y el rotor (parte superior), se une a la zona de cimentación mediante un anillo de anclaje y da continuidad a la estructura. Las alturas oscilan entre 80 y 120 m ya que las velocidades del viento son más elevadas cuanto más se alejan del suelo. Las torres en la actualidad son de tipo tubular, aunque en las primeras versiones eran de celosía, esta mejora se realizó pensando en el mantenimiento de los aerogeneradores y la seguridad de los técnicos.
- ❖ **Parte superior:** donde se encuentra el mecanismo real de funcionamiento de la energía eólica, las partes principales son la góndola y el rotor, pero está compuesta de muchos otros elementos como se ve en la siguiente imagen.

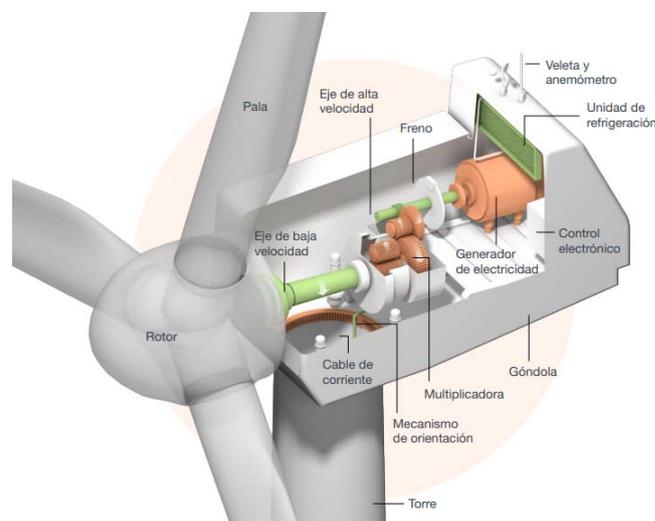


Ilustración 24. Detalle parte superior de un aerogenerador Iberdrola
Fuente: (Iberdrola, 2022)

Los elementos que componen la cabeza del aerogenerador son:

- **Góndola:** contiene los componentes del aerogenerador, se accede desde la torre por unas escaleras internas para poder realizar su mantenimiento.
- **Rotor:** compuesto por las palas (en este caso 3) y el buje que las une, capta la fuerza del viento y la convierte en energía mecánica a través de la rotación.
- **Multiplicadora:** une los ejes principales de alta y baja velocidad. El de baja velocidad capta el movimiento de las palas a 30 rpm y la multiplicadora eleva esa velocidad de giro a 1500 rpm transmitiéndola al eje de alta velocidad. El eje de alta velocidad está equipado con un freno de disco de emergencia que únicamente se utiliza de manera manual si falla el freno aerodinámico.
- **Generador:** convierte la energía mecánica transformada por el rotor y la multiplicadora en energía eléctrica.
- **Controlador electrónico:** Es el elemento que se encarga de que todos los demás estén en sintonía, monitoriza las condiciones de los aerogeneradores y controla el mecanismo de orientación.
- **Unidad de refrigeración:** utilizado para controlar y regular la temperatura del generador.
- **Mecanismo de orientación:** Activado por el controlador electrónico en función de la dirección del viento que capta la veleta. Únicamente se orienta unos pocos grados cada vez para captar mejor el flujo de aire.
- **Veleta y anemómetro:** la veleta es utilizada por el controlador y el mecanismo de orientación como se ha dicho anteriormente. El anemómetro es utilizado por el controlador para iniciar o para la actividad del rotor con los umbrales que tenga programados de forma más eficiente.

Normalmente los aerogeneradores no se encuentran instalados de manera individual, si no que se instalan en conjunto formando parques eólicos. El funcionamiento de los parques sigue el siguiente esquema:

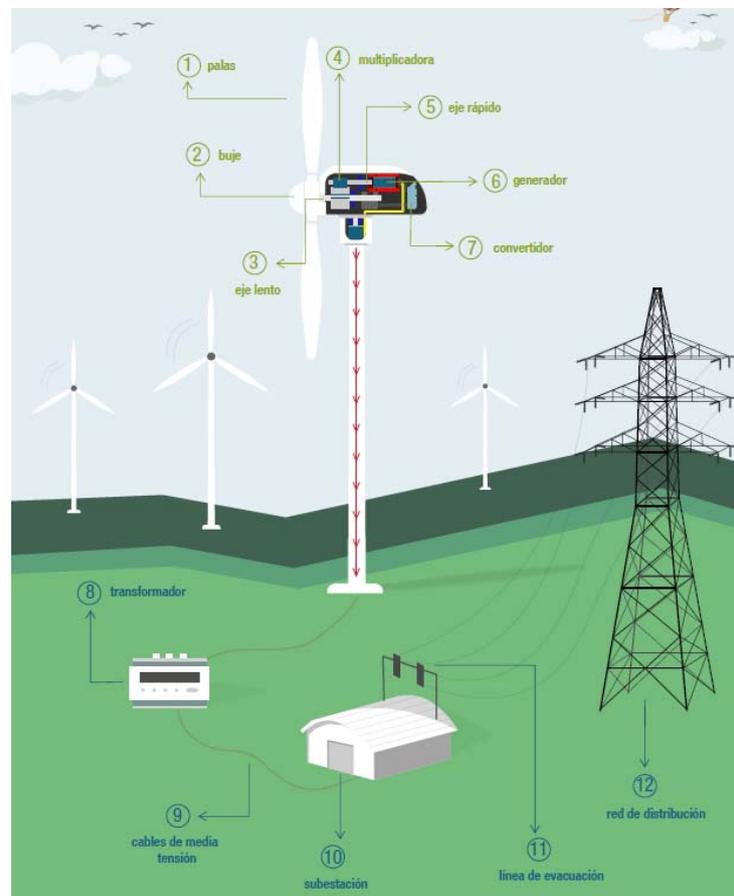


Ilustración 25. Funcionamiento parque eólico de Iberdrola
Fuente: (Iberdrola, 2022)

El proceso de generación de energía eléctrica en los parques eólicos comienza, como es lógico con el giro de las palas producido por el viento, unidas a la turbina con el buje. Las palas hacen girar el eje lento (girando ambos a la misma velocidad) que se conecta a un multiplicador, el cual eleva la velocidad de rotación del orden de 100 veces y la pasa al eje rápido. El generador hace que la rotación del eje rápido pase de energía cinética a energía eléctrica y esta la pasará al convertidor, que transforma la corriente continua generada en corriente alterna.

Esta corriente pasará por la torre por los cables de corriente que conectan la parte superior con el transformador, este eleva la tensión para poder transportar la corriente. Esta energía circula por cables de media tensión hasta llegar a la subestación donde se convierte en alto voltaje. Esta electricidad de alto voltaje pasa a la línea de evacuación que transfiere la electricidad a las instalaciones de la red de distribución. La red de distribución distribuye la electricidad a los puntos donde sea necesaria.

Los datos referentes a el funcionamiento de los aerogeneradores y los parques eólicos de Iberdrola ha sido obtenido de su web (Iberdrola, 2022)

Sin embargo, en este estudio, como se verá a continuación, se utilizan aerogeneradores propios de la energía minieólica o de autoconsumo, que a pesar de tener un funcionamiento similar a la de grandes dimensiones, tiene una serie de simplificaciones siguiendo este esquema:

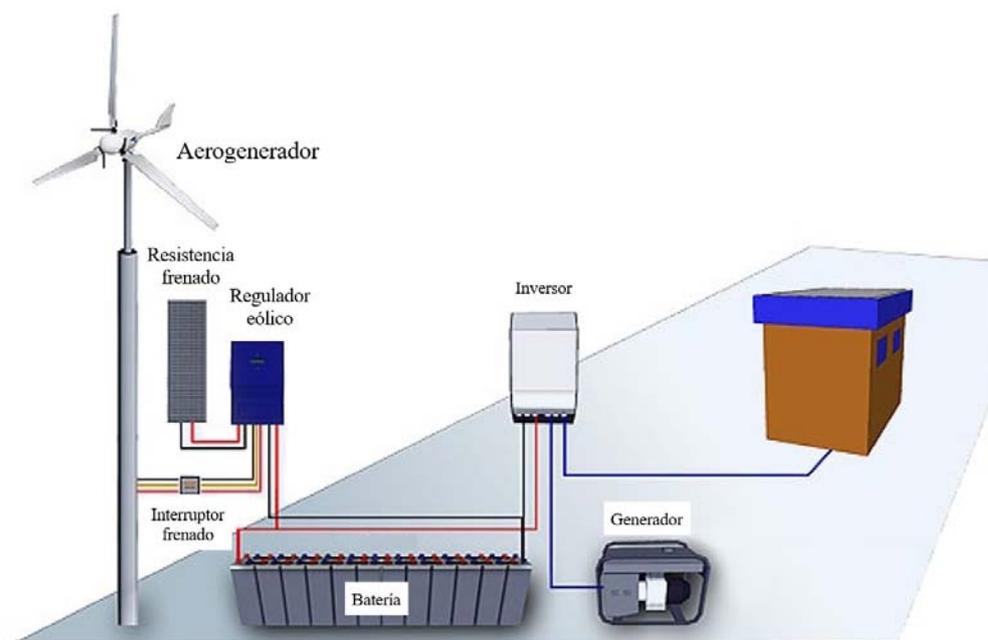


Ilustración 26. Funcionamiento energía minieólica Enair

Fuente: <https://www.enair.es/es/noticia/en-minieolica-las-grandes-empresas-eligen-enair>

En este caso, el proceso de producir energía con el aerogenerador se hace de manera externa, la energía cinemática se transmite desde el aerogenerador hacia unas baterías que hace la función de acumulador de energía, ya que toda la energía no puede ser consumida en el momento de su producción. Antes de pasar al sistema de distribución, pasa por un inversor que transforma la corriente continua en corriente alterna para que pueda ser utilizada. Una vez en el sistema de distribución se le da el destino asignado.

3.3. Ventajas y desventajas de la energía eólica

La decisión de realizar una instalación de energía eólica no ha de tomarse a la ligera y menos teniendo en cuenta la multitud de opciones de las que se dispone en la actualidad. Para su elección se han de tener en cuenta una serie de ventajas e inconvenientes que habrá que sopesar en cada caso. Como ventajas para su utilización se encuentran:

- ✔ Al proceder de una fuente renovable, posee una capacidad ilimitada de producción además de ser sostenible y no consumirse.
- ✔ Su producción no genera emisiones nocivas a la atmosfera por lo que no participa en el aumento del calentamiento global.
- ✔ Tiene unos costes de instalación y mantenimiento bajos comparados con otras fuentes de energía, esto unido a la rápida amortización de la inversión por su poder generador de electricidad, hace que sea una opción muy rentable.
- ✔ Genera puestos de trabajo, tanto en el momento de la instalación como durante su vida útil debido a su mantenimiento.
- ✔ Por su adaptabilidad a las características de la zona de implantación, puede ser instalada en zonas donde el tendido eléctrico no llega o su instalación es difícil y costosa. Este es un punto muy interesante en la producción de energía en países en vías de desarrollo.
- ✔ La energía minieólica puede ser instalada en prácticamente cualquier zona existente, aprovechando el rendimiento de cubiertas de edificios, zonas de tránsito de vehículos y personas e incluso en zonas aisladas.
- ✔ La tecnología de los aerogeneradores esta en continuo desarrollo por lo que, en unos años, la producción aun será más eficiente que en la actualidad.

Sin embargo, del mismo modo, también se encuentran inconvenientes:

- ✘ Al ser una energía de una fuente natural, está supeditada al clima, pudiendo existir días donde el viento sea muy bajo o demasiado alto y no se pueda producir energía. Esto hace que la planificación de la producción sea una labor muy complicada.
- ✘ Causan impacto ambiental en mayor o menor medida. Los parques eólicos ocupan unas grandes superficies en zonas rurales, que generan un gran impacto visual además de afectar a la avifauna de las zonas de instalación. En zonas de cría de aves o en trayectorias migratorias los aerogeneradores pueden provocar la muerte de algunos individuos.
- ✘ Requiere una inversión inicial muy elevada. En el caso de los parques eólicos es una inversión muy estudiada y suele recuperarse según lo previsto, pero en el caso de autoconsumo si no se ha realizado un estudio previo detallado, puede tardarse mucho en recuperarse la inversión.
- ✘ La tecnología está en constante avance lo que indica que los aerogeneradores existentes no son completamente eficientes.

A pesar de los inconvenientes mencionados, se trabaja a diario desde todas las empresas productoras y fabricantes de los aerogeneradores en la mejora de los modelos para poder solventar dichos errores. La energía eólica tiene tantas ventajas y capacidad productiva que la hace una de las mejores opciones sostenibles del mercado a nivel mundial.

3.4. Marco internacional y europeo del uso de energía eólica.

Una vez analizada la energía eólica y tras conocer el estado de las renovables en Europa en el apartado 2.1, se va a centrar la atención en el estado de esta tecnología en marco global y europeo. Según las últimas estadísticas de las que dispone la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, 2022) de 2021, la potencia instalada mundial de energía basada en el viento asciende a 823,5 GW de los cuales 769 GW (93%) pertenecen a la instalación de aerogeneradores Onshore frente a los 54 GW que pertenecen a Offshore.

Si se desglosa la información por continentes, se obtiene:

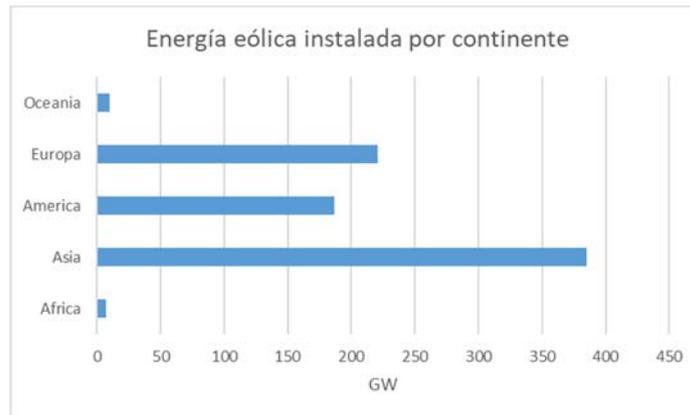


Ilustración 27. Energía eólica por continente
Fuente: Elaboración propia

Los continentes donde está más extendida la instalación de elementos para el aprovechamiento de energía eólica y, por tanto, con mayor capacidad productiva de la misma son Asia (385 GW) y Europa (220 GW), seguidos por el continente americano (186 GW), aunque cabe destacar que los datos de América pertenecen sobre todo a Norte América ya que en Centro América y Sur América la producción de este tipo de energía está aún poco extendida.

En Asia, el país con mayor instalación de energía eólica es China, con un 329 GW frente a los 385 GW del total de continente, esto hace que este país sea uno de los mayores productores de energía eólica a nivel mundial, muy por encima de cualquier otro. Otros países de Asia con una producción destacable son India con 40 GW, Japón con 4,4 GW y Vietnam con 4,1 GW.

En América el país con mayor instalación es Estados Unidos con 132 GW, seguido de Canadá con 14,3 GW y finalizando con México con 7,6 GW.

Si se pone el foco en Europa, se aprecia que los países con una producción por encima de los 10 GW son:

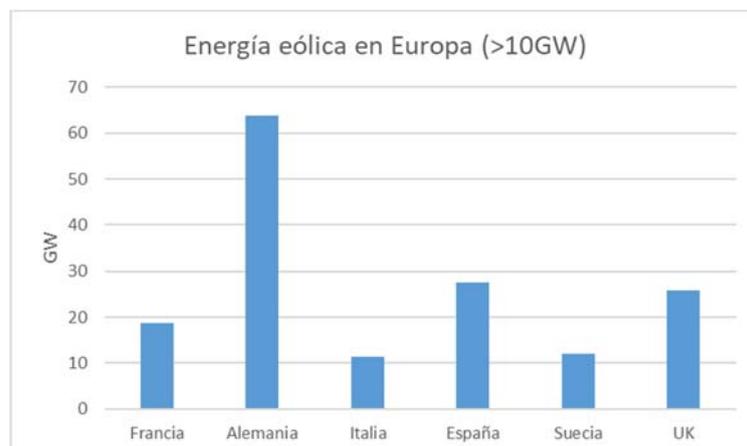


Ilustración 28. Energía eólica países >10GW en Europa
Fuente: Elaboración propia

El país con mayor instalación y capacidad de producción en Europa es Alemania llegando a 63,8 GW, seguido de España con 27,5 GW y Reino Unido con 27,7GW. Como se aprecia, la producción de energía mundial es satisfactoria y lleva un desarrollo muy prometedor.

La Agencia Internacional de la Energía (EIA, 2022), plantea el programa *Net Zero by 2050*, un proyecto internacional que pretende acabar con las energías que generen cualquier tipo de emisión y pasar a un abastecimiento energético limpio, renovable y económico. En este proyecto, los mayores productores de energía serían la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Concretamente la generación de energía eólica se plantea del siguiente modo:

Wind power generation in the Net Zero Scenario, 2010-2030

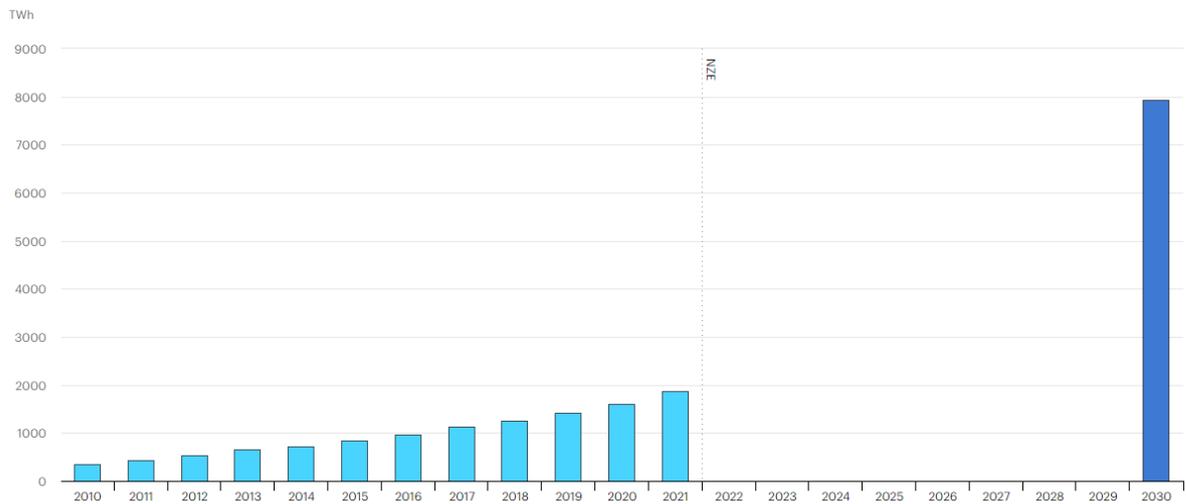


Ilustración 29. Generación de energía eólica para escenario Net Zero
Fuente: (EIA, 2022)

Se realiza unas propuestas muy ambiciosas y un estudio intensivo de la capacidad productiva de diferentes fuentes, encontrando que la capacidad eólica sigue la siguiente trayectoria, distinguiendo entre las fuentes onshore y offshore:

Wind power capacity in the Net Zero Scenario, 2010-2030

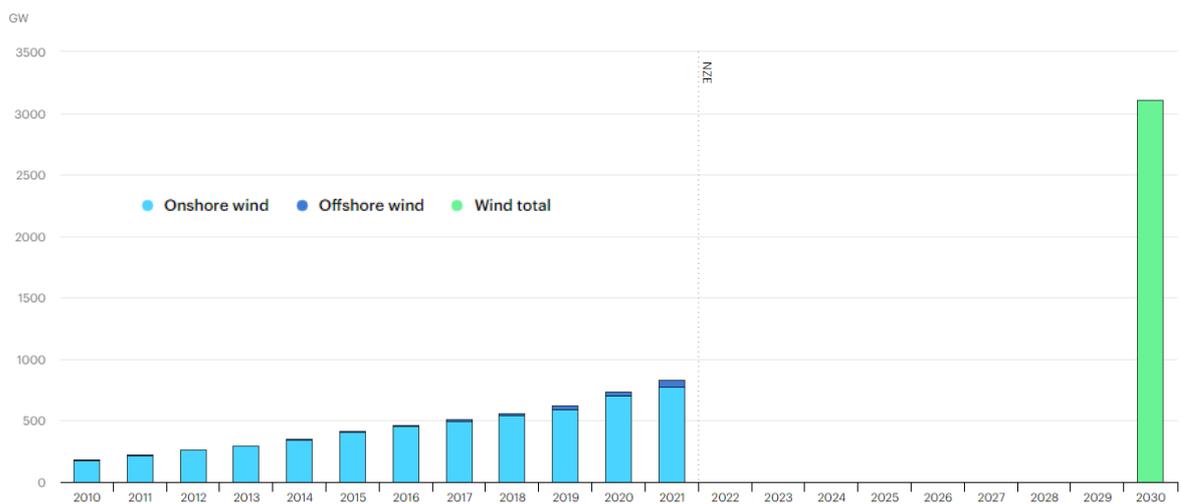


Ilustración 30. Capacidad generadora eólica para el escenario Net Zero
Fuente: (EIA, 2022)

3.5. Marco nacional del uso de energía eólica.

El potencial de energía eólica del que se dispone en España es muy superior al de otras zonas del mundo y, sin embargo, no se aprovecha del modo que se obtenga su máxima eficacia. Basándose en la información obtenida y en el avance de la implantación del uso de esta tecnología, este país cuenta con un futuro prometedor en la producción y aprovechamiento de esta energía.

A continuación, se muestra el balance energético de generación/demanda por comunidades autónomas del último informe del sistema de Red Eléctrica (REE, 2022) de 2021:



Ilustración 31. Ratio generación/demanda (%) y generación (GWh) en 2021 por CCAA

Fuente: (REE, 2022)

Este informe indica que la energía eólica en el ejercicio de 2021 es la tecnología de generación con más potencia instalada en el país con un total de 27,7 MW (un aumento de 2,8% respecto al año anterior) y representa la cuarta parte de la potencia total del sistema eléctrico peninsular. En este año, la producción ha supuesto el 49,5% del total de la energía renovable:

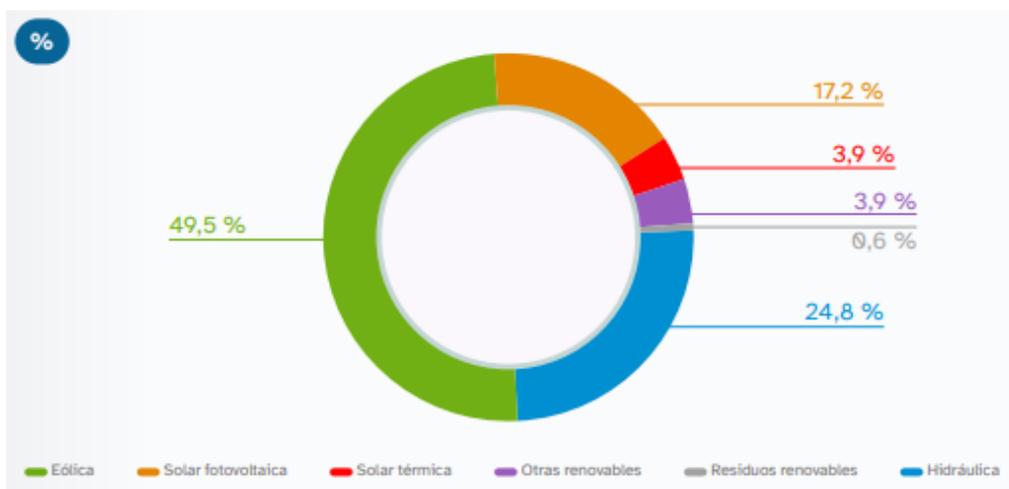


Ilustración 32. Estructura de la generación anual de energía renovable peninsular 2021

Fuente: (REE, 2022)

La evolución de la potencia instalada en España sigue el siguiente patrón en los últimos años, como se aprecia sigue ascendiendo anualmente:

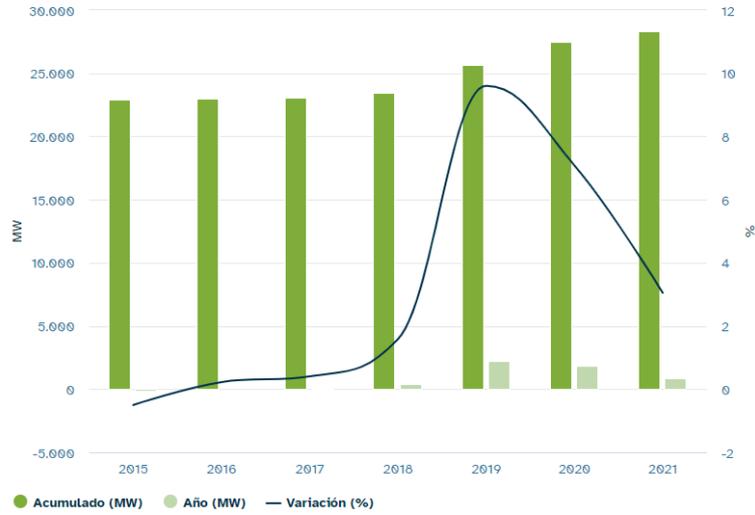


Ilustración 33. Evolución anual de la potencia instalada
Fuente: (REE, 2022)

La potencia eólica instalada por comunidad es la siguiente (a cierre de 2021):

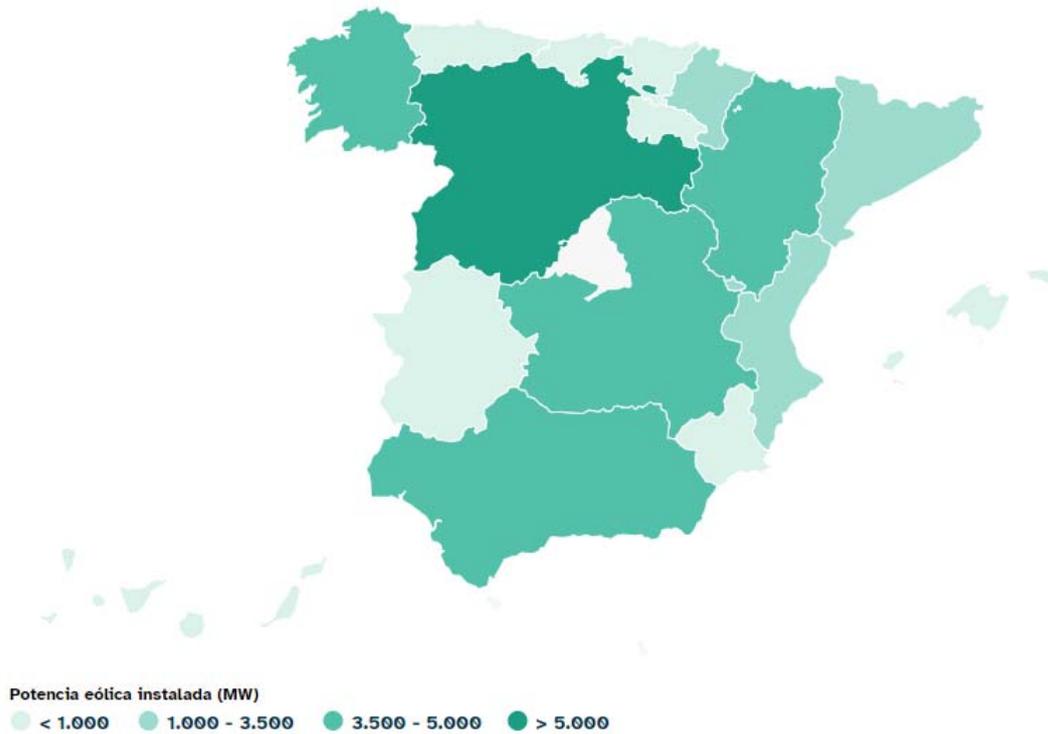


Ilustración 34. Potencia eólica instalada por CCAA
Fuente: (REE, 2022)

Y la generación eólica por comunidad es la siguiente:

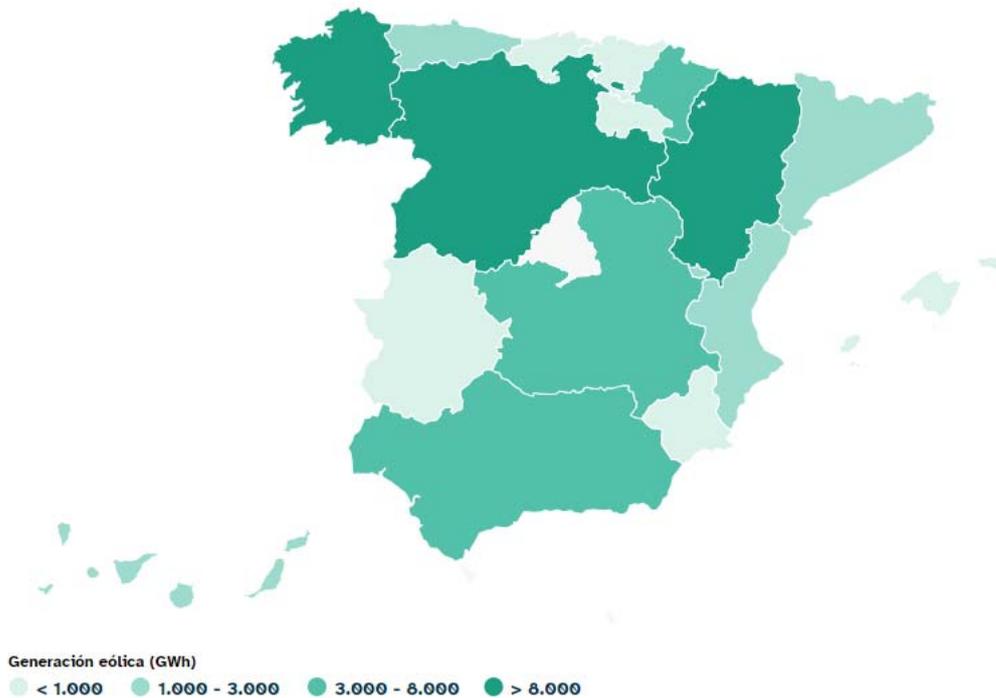


Ilustración 35. Generación eólica por CCAA

Fuente: (REE, 2022)

Castilla y León, al tener mayor instalación de potencia eólica (6.384 MW), posee también gran capacidad de generación eólica (13.255 GWh), generando el 21,9% de la energía eólica en España.

Aragón ha sido la comunidad con mayor proporción de generación eólica (10.253 GWh), con una instalación de potencia eólica (4.253 MW) menor que las de otras comunidades, pero con mejores resultados.

Las comunidades con peores números de potencia de instalación son Cantabria (35 MW) y Extremadura (39 MW), con generaciones eólicas asociadas proporcionales a estos datos (68 GWh y 125 GWh). Se considera necesario invertir en la mejora de las instalaciones de estas comunidades ya que Extremadura es una comunidad muy extensa y puede albergar parques eólicos y Cantabria por su cercanía al mar, tiene gran capacidad de generación eólica.

4 LEGISLACIÓN VIGENTE

La legislación vigente en España que regula los sistemas de producción eléctrica sostenible, es extensa y compleja, se va a procurar explicarla de la forma más resumida y sencilla posible para hacerse una idea de en qué consiste.

Para comenzar, cualquier proyecto de energía eólica, que se redacte en territorio nacional, debe cumplir la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, debido al contenido del Anexo I: Proyectos sometidos a la evaluación ambiental ordinaria regulada en el título II, capítulo II, sección 1ª. Este nos indica que estos proyectos son del Grupo 3. Industria energética, el cual recoge:

“i) Instalaciones para la utilización de la fuerza del viento para la producción de energía (parques eólicos) que tengan 50 o más aerogeneradores, o que tengan más de 30 MW o que se encuentren a menos de 2 km de otro parque eólico en funcionamiento, en construcción, con autorización administrativa o con declaración de impacto ambiental”

Se parte de la base que todos los tipos de energía a implantar deben cumplir la legislación relativa a los sistemas de generación eléctrica renovable (Energía MITERD, 2022) la cual se regula según lo siguiente:

- Orden ITC/1522/2007, de 24 de mayo por la que se establece la regulación de la garantía del origen de la electricidad procedente de fuentes de energías renovables y cogeneración de alta eficiencia.
- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, que regula la totalidad del sector.
- Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Orden TEC/1302/2018, de 4 de diciembre, por la que se establecen las disposiciones necesarias para instrumentar un sistema de ayudas a la inversión en instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en territorios no peninsulares y se determina la transferencia de 60 millones de euros procedentes del superávit eléctrico al presupuesto del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía con efectos del año 2017.
- Orden TEC/1314/2018, de 7 de diciembre, por la que se establecen las disposiciones necesarias para instrumentar un sistema de ayudas a la inversión en instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y se determina la transferencia de 60 millones de euros procedentes del superávit eléctrico al presupuesto del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía con efectos en el ejercicio presupuestario de 2018.
- Real Decreto-Ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores.
- Real Decreto-Ley 20/2018, de 7 de diciembre, de medidas urgentes para el impulso de la competitividad económica en el sector de la industria y el comercio en España.
- Orden TEC/1380/2018, de 20 de diciembre, por la que se establecen las bases reguladoras para la concesión de ayudas a la inversión en instalaciones de producción de energía eléctrica con tecnologías eólica y fotovoltaica situadas en los territorios no peninsulares cofinanciadas con Fondos Comunitarios FEDER.

- Real Decreto-Ley 17/2019, de 22 de noviembre, por el que se adoptan medidas urgentes para la necesaria adaptación de parámetros retributivos que afectan al sistema eléctrico y por el que se da respuesta al proceso de cese de actividad de centrales térmicas de generación.
- Real Decreto-Ley 12/2021, de 24 de junio, por el que se adoptan medidas urgentes en el ámbito de la fiscalidad energética y en materia de generación de energía, y sobre gestión del canon de regulación y de la tarifa de utilización del agua.
- Real Decreto-Ley 17/2021, de 14 de septiembre, de medidas urgentes para mitigar el impacto de la escalada de precios del gas natural en los mercados minoristas de gas y electricidad.
- Real Decreto-ley 29/2021, de 21 de diciembre, por el que se adoptan medidas urgentes en el ámbito energético para el fomento de la movilidad eléctrica, el autoconsumo y el despliegue de energías renovables.
- Real Decreto-ley 6/2022, de 29 de marzo, por el que se adoptan medidas urgentes en el marco del Plan Nacional de respuesta a las consecuencias económicas y sociales de la guerra en Ucrania.
- Real Decreto-Ley 10/2022, de 13 de mayo, por el que se establece con carácter temporal un mecanismo de ajuste de costes de producción para la reducción del precio de la electricidad en el mercado mayorista.
- Real Decreto-Ley 17/2022, de 20 de septiembre, por el que se adoptan medidas urgentes en el ámbito de la energía, en la aplicación del régimen retributivo a las instalaciones de cogeneración y se reduce temporalmente el tipo del Impuesto sobre el Valor Añadido aplicable a las entregas, importaciones y adquisiciones intracomunitarias de determinados combustibles.
- Real Decreto-Ley 23/2020, de 23 de junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica.

La normativa ha sido obtenida de la página web del Gobierno de España en su sección de normativa referente a energías renovables (Normativa MITERD, 2022).

5 MODELIZACIÓN DEL FLUJO DE AIRE

5.1 Estado del arte

El objeto de este trabajo, no es otro que intentar aprovechar una situación existente para generar energía limpia que, en la actualidad, está siendo desaprovechada por lo que se va a proceder a simular las condiciones existentes que se pueden encontrar en los túneles de metro para poder cuantificar el potencial del que se dispone para la instalación de aerogeneradores y su aprovechamiento.

En espacios cerrados, como es la red de metro, el aire que circula se encuentra semiconfinado por lo que su flujo de aire es forzado. En estas condiciones, se produce un efecto conocido como efecto pistón. Este efecto ha de ser tenido en cuenta en el cálculo ya que limita los valores que se puedan obtener del modelo planteado puesto que la situación con unas condiciones tan concretas, difiere del potencial que pudiera tener la misma situación al aire libre.

Para poder llevar a cabo la modelización se ha realizado una investigación acerca de los estudios existentes hasta la fecha del tema basándose en los que enfocaban el efecto en túneles de metro (Pang, y otros).

Por citar muy brevemente algunos de los trabajos en los que se apoya la investigación, se encuentra el experimento de 2007 (Kim & Kim, 2007) que compara los resultados de realizar la modelización con el software CFX con un modelo a escala que construyeron en un laboratorio de Corea dando como resultado una desviación de únicamente un 15% de los valores reales y los modelizados de velocidad y presión.

En 2008 se encuentra un estudio comparativo (Chi-Ji, Yew Khoy, & Chia-Wei, 2008) entre un metro real y un modelo simulado en SES en el que se demuestra que en los conductos de alivio de más de 60 m de longitud se puede utilizar satisfactoriamente el viento producido por el efecto pistón denominado viento de pistón.

El efecto pistón además de tener gran potencial, puede utilizarse para mejorar la ventilación de los túneles aprovechando el viento de pistón en lugar de fuentes de energía externa. Encontramos un estudio nacional (López González, Galdo Vega, Fernandez Oro, & Blanco Marigorta, 2014) en el que se utiliza un modelo realizado con FLUENT que utiliza este viento para el ahorro energético, así mismo encontramos un TFM realizado en la Universidad de Oviedo (Yañez Coto, 2015) en él se analiza este efecto que combina la distancia de separación entre estaciones y el coeficiente de bloqueo. Más reciente, también se pueden encontrar estudios que se basan no solo en la modelización, si no en el propio flujo de aire y sus características producidos por el efecto (Wanfu, Peng, Wuqin, Shichang, & Haihao, 2019).

Este efecto también tiene sus desventajas, ya que al ser tan brusco, es molesto en algunos túneles y algunas zonas donde el diseño no es lo suficientemente eficiente, por lo que se encuentran estudios sobre la mejora de este efecto sobre los usuarios (Cross, Hughes, Ingham, & Ma, 2017).

En la actualidad se encuentra en conferencias el análisis del ahorro energético (Jialu, Huixingi, Xinyi, & Luoxin, 2022) que produce el uso del viento del efecto pistón en el sistema de ventilación y el sistema de calefacción y aire acondicionado de los túneles y las estaciones, aspecto muy interesante a tener en cuenta en todo el desarrollo de la presente propuesta.

Como se puede apreciar, la literatura sobre este tema es muy variada y amplia. Para el modelo propuesto a continuación, se ha comprobado que no entrasen en conflicto dichos estudios y el modelo obtenido y alguno de los artículos han resultado de gran utilidad para el desarrollo del trabajo.

5.2 Software empleado

Para la modelización de los túneles de metro y las estaciones, se va a utilizar el software Ansys CFX, con la licencia proporcionada por la Escuela.

Este software se basa en la aplicación del método de volúmenes finitos a través de distintos tamaños de mado, utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes y las ecuaciones de continuidad. Da la posibilidad de emplear sólidos de inmersión y recrear los cálculos empleando un estudio dinámico de los elementos que lo forman.

5.3 Proceso y parámetros de modelización

Para el proceso de modelización, en primer lugar, hay que crear la geometría del túnel, la estación y los trenes que circulan por las mismas. Para poder hacer un supuesto lo más acercado a la realidad posible, se ha solicitado información a Metro Madrid a través de su portal de transparencia (Metro Madrid, 2022). Se proporcionaron una serie de datos, si bien no todos, puesto que las limitaciones de la información que se pueden proporcionar pasan por Seguridad Nacional, los suficientes para poder trabajar. En base a la información obtenida se ha optado por modelizar el tramo de la Línea 10 entre la estación de Tribunal y la de Alonso Martínez, un tramo recto de unos 500 m de longitud entre estaciones.



Ilustración 36. Estaciones Línea 10 Metro Madrid

Fuente: <https://www.planometromadrid.org/>

La información recibida, si bien ha sido muy útil, no ha sido todo lo completa que se necesitaría por lo que algunos parámetros y dimensiones han sido estimados en base al dibujo de la sección inicial recibida. Para mayor grado de detalle, las secciones utilizadas para la modelización y sus medidas se encuentran como planos en el apartado de anexos. Para tener una imagen más visual de la sección se ha realizado este croquis ilustrativo (Anexo 1).

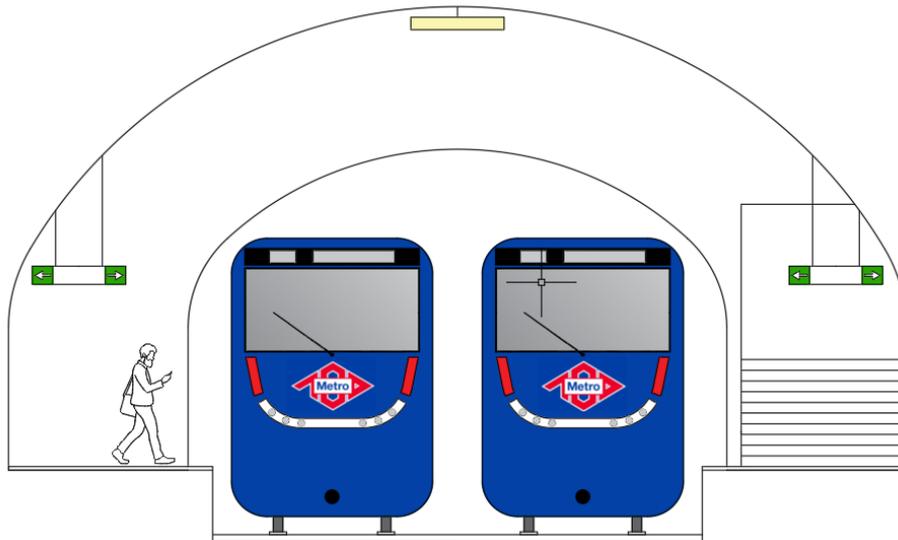


Ilustración 37. Croquis diseño sección típica.

Fuente: Elaboración propia

Se comienza con la creación de la sección del túnel, en este caso, al tratarse de Metro Madrid, posee la característica forma asociada al método belga o método clásico de Madrid (detalles y dimensiones en Anexo 2).

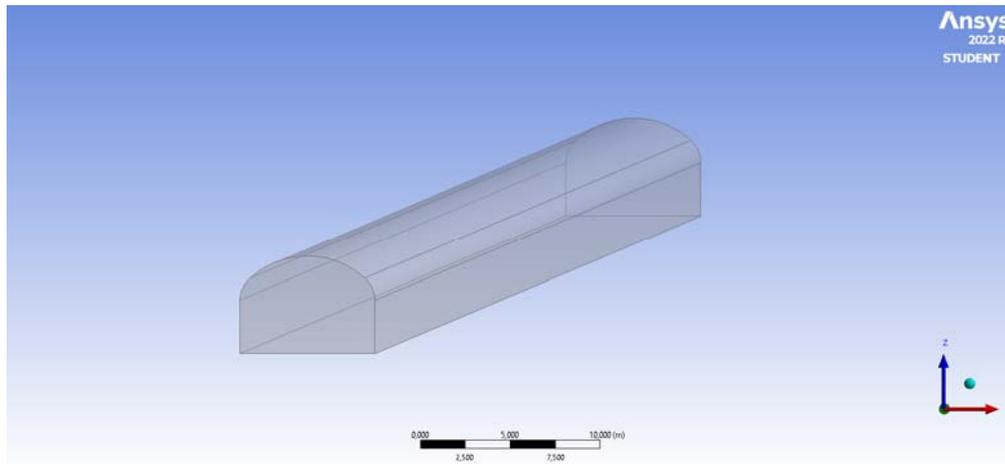


Ilustración 38. Geometría túnel de metro

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño de la estación, puesto que cada una de las estaciones de Metro Madrid, tiene unas características propias, se ha optado por el diseño de una lo más sencilla posible estandarizándola, basándose en la forma del túnel de metro anterior y dimensionándola para poder albergar a los pasajeros. Se ha tenido en cuenta que tenga una entrada/salida en cada uno de los andenes para acceder y salir de la plataforma (detalles y dimensiones en Anexo 2).

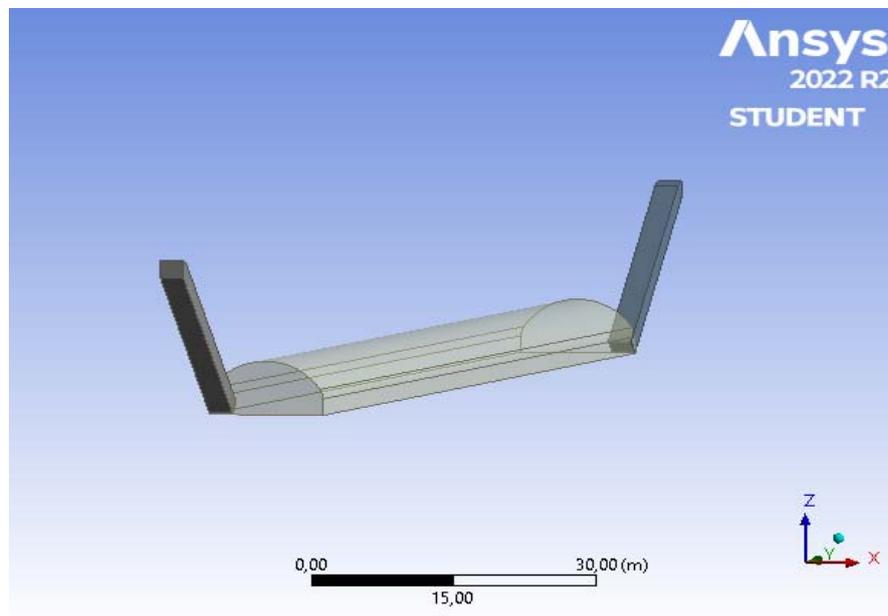


Ilustración 39. Geometría estación de metro

Fuente: Elaboración propia

Para las dimensiones del tren circulante, desde Metro Madrid se informó de que los principales trenes metropolitanos que circulan son el C7000, C8000 y C9000 (detalles y dimensiones en los Anexos 3, 4 y 5). El más moderno y en de uso más común es el C7000 por lo que es el elegido para el modelo.



Ilustración 40. Modelo tren C7000
Fuente: Metro Madrid

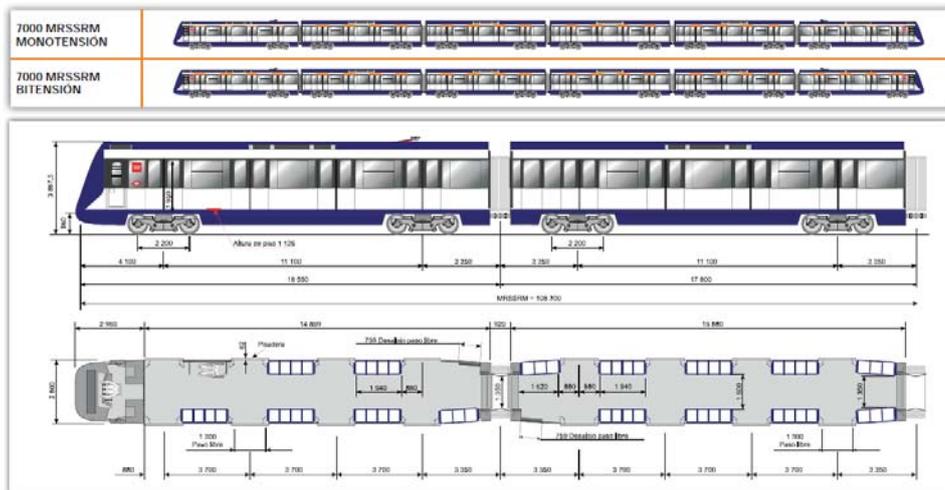


Ilustración 41. Dimensiones del modelo tren C7000
Fuente: Metro Madrid

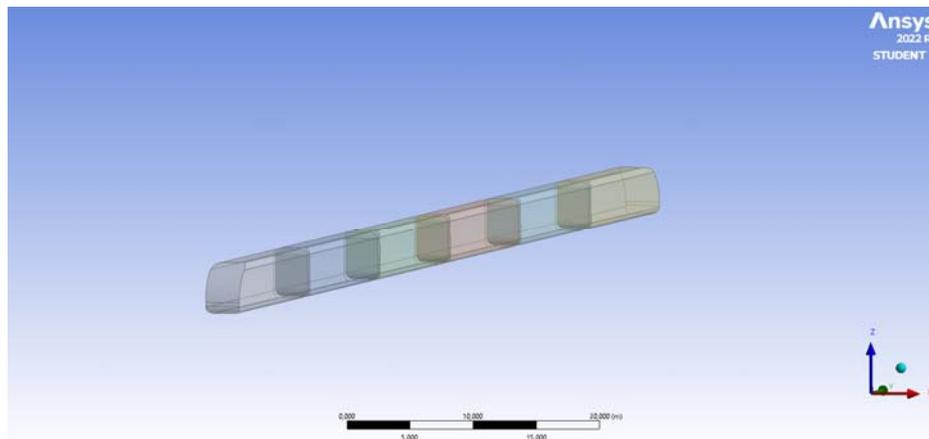


Ilustración 42. Geometría tren metro
Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la geometría de todos los elementos que componen el modelo, se realiza un mallado lo más preciso posible dentro de las limitaciones del software y el grado de precisión buscado, en este caso, elementos de entre 0,6 y 0,8 m con un aumento de los volúmenes de 1.15.

El fluido simulado es aire con propiedades estándar, las condiciones de contorno modeladas son de dos tipos: las entradas a la estación y las bocas de los túneles son abiertas y el diseño de los túneles y la estación que delimitan el contorno de las mismas, tienen características de pared continua.

Los valores iniciales tomados, al ser un problema no estacionario, se inicializan como valores nulos de presión y velocidad. El perfil de velocidad que sigue el modelo es el de una velocidad constante de 15 m/s excepto el momento de entrada y salida de la segunda estación una deceleración por frenado y una aceleración por arranque de $0,2 \text{ m/s}^2$, unos 8 segundos en el modelo.

Otros de los parámetros en los que se base el modelo son:

Parámetros	Valor
Velocidad de circulación	15 m/s
Distancia entre las estaciones	500 m
Longitud de las estaciones	115 m

Tabla 1. Parámetros modelización

Fuente: Elaboración Propia

El recorrido modelizado ha sido que el tren sale de la estación inicial, hace una parada en la segunda estación y sigue su trayecto. Como se puede apreciar en la imagen, el tren se encuentra situado en la estación.

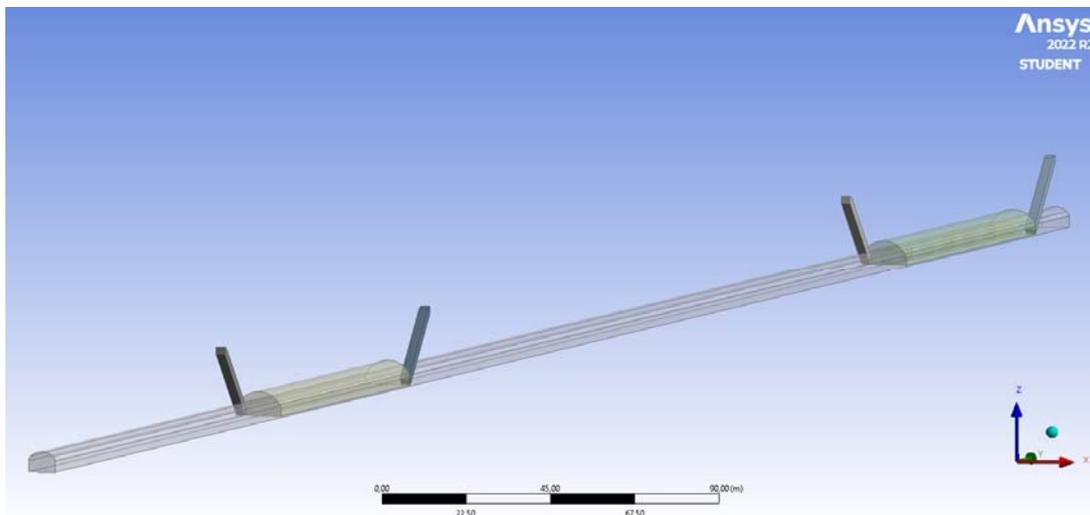


Ilustración 43. Geometría modelo

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que, en lugar del punto inicial de la estación de salida, se ha tomado en su lugar su punto homólogo de la estación de llegada, esto es debido a la limitación del modelo: en el primer caso, el tren sale a 15 m/s directamente lo que provoca una situación irreal ya que no recoge los tiempos de frenado y parada del tren en la primera estación. El segundo punto, sin embargo, si los contempla por lo que se ha optado por su utilización. Los puntos escogidos para el estudio del flujo de aire se agrupan de la siguiente manera:

Grupo	Ubicación	ID
Estaciones	Entrada a la estación de llegada	P0
	Punto medio de la estación de llegada	P1
	Salida de la estación de llegada	P2
Paredes del túnel	50 metros delante de la estación de llegada	P3
	Punto medio del túnel	P4
	50 metros antes de la estación de llegada	P5
Mediana del túnel	50 metros delante de la estación de llegada	P6
	Punto medio del túnel	P7
	50 metros antes de la estación de llegada	P8
Railes del túnel	50 metros delante de la estación de llegada	P9
	Punto medio del túnel	P10
	50 metros antes de la estación de llegada	P11

Tabla 2. Ubicación puntos de estudio

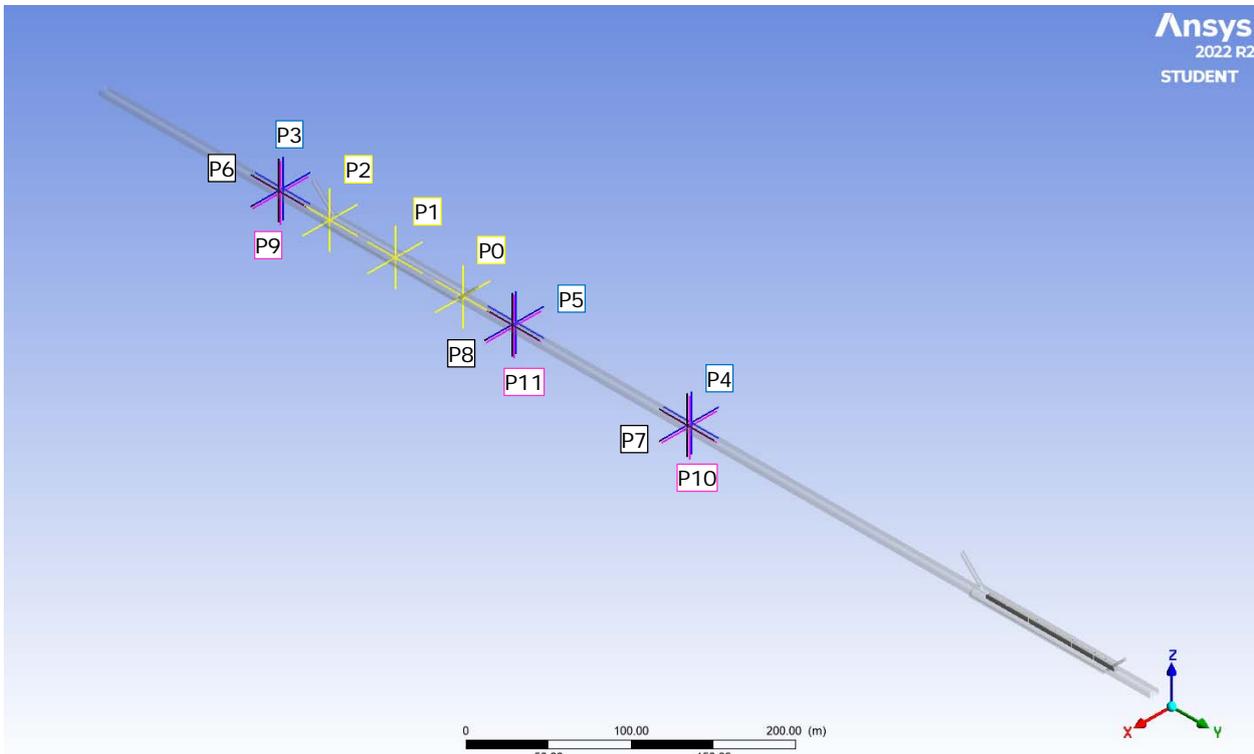


Ilustración 44. Ubicación puntos de estudio.
Fuente: Elaboración Propia

5.4 Resultados obtenidos

Para poder evaluar los resultados obtenidos, se presentan diferentes gráficos explicativos con los puntos que se describen en el apartado anterior con el código de colores mostrado en la Tabla 2y en la Ilustración 44.

5.4.1 Gráficos de velocidad

En primer lugar, se estudian los puntos correspondientes a los movimientos generados en la estación de llegada:



Ilustración 45. Gráfico 1 - Velocidades en la estación
Fuente: Elaboración propia

Los puntos máximos se alcanzan en torno a los 6 m/s correspondiendo estos momentos a la entrada y salida del tren en la estación. Los picos tan bruscos que se forman a la entrada y salida del túnel en la estación corresponden a los momentos en los que se produce un cambio de sección, siendo el cambio del P0 mucho más brusco al ser reducida la misma y el P2 más suave al ser aumentada. También se puede observar que en el punto medio de la estación (P1), se vuelve prácticamente a la situación en calma (0 m/s) cuando el tren permanece parado.

Se procede a analizar las variaciones en las paredes del túnel:

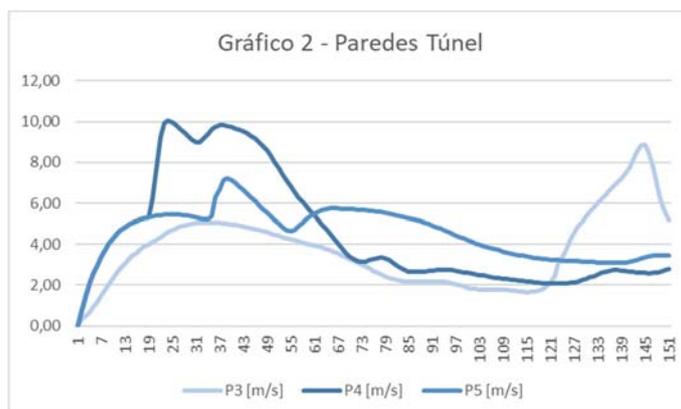


Ilustración 46. Gráfico 2 – Velocidades en paredes
Fuente: Elaboración propia

Los puntos máximos se alcanzan en el punto medio del túnel cuando este va circulando a su máxima velocidad llegando hasta 10 m/s. En las zonas de deceleración (P5) y aceleración (P3) alcanza hasta 9 m/s dependiendo en el punto donde se encuentre. Como se puede apreciar, la velocidad en el punto medio del túnel se mantiene durante un tiempo bastante prolongado en comparación con las otras situaciones.

Las variaciones que se producen en las medianas del túnel son las siguientes:

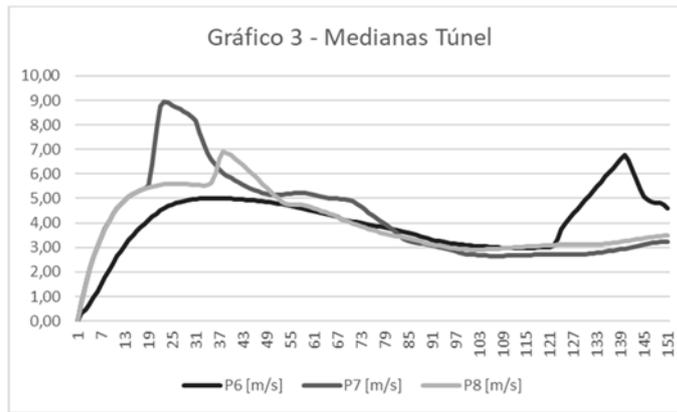


Ilustración 47. Gráfico 3 – Velocidades en mediana
Fuente: Elaboración propia

Muy similar a la comparativa anterior, con la apreciación de que, en las zonas de la mediana, el máximo que alcanza es menor (9 m/s) y que la velocidad en este caso, no es tan mantenida en el tiempo, de hecho, se disipa con mayor velocidad en todos los casos.

Las variaciones que se producen en la zona de los raíles del túnel tienen la siguiente forma:

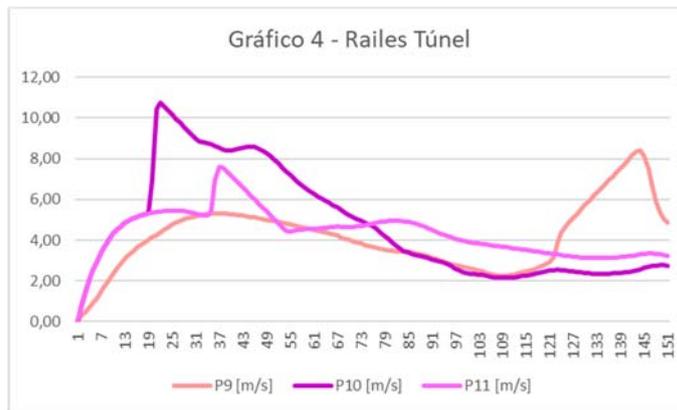


Ilustración 48. Gráfico 4 - Velocidades en zona de raíles.
Fuente: Elaboración propia

En la línea de los gráficos anteriores, se aprecia que el punto medio del túnel vuelve a ser la zona donde se alcanza el máximo, llegando a 11 m/s y en este caso también se mantiene la velocidad durante un periodo prolongado disminuyendo progresivamente.

Una vez hecha la comparativa de los puntos de estudio según las distintas zonas del túnel, vamos a proceder a comparar los puntos de cada zona del túnel en las tres situaciones que se han propuesto: la pared, la mediana y los raíles del túnel, para poder cerciorar cual sería la mejor zona de instalación de los aerogeneradores, una vez que se conoce el potencial real de los puntos singulares.

Se comienza con los puntos correspondientes a la salida de la estación:

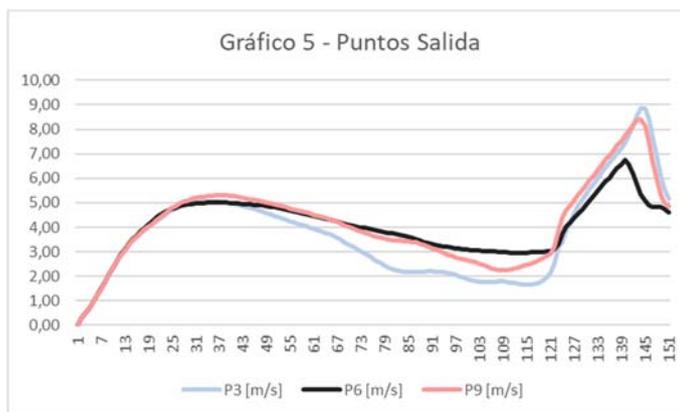


Ilustración 49. Gráfico 5 - Velocidades en punto de salida.
Fuente: Elaboración propia

Puede verse de manera clara, que el máximo se establece en la pared del túnel alcanzando los 9 m/s seguido de valores muy similares en los raíles. En los tres supuestos se aprecia que debido a la aceleración de la salida del túnel el pico de velocidad y sostenimiento del mismo es más breve que en otros supuestos ya que baja rápidamente a los 5 m/s.

Seguidamente se comparan los puntos correspondientes al punto medio del túnel:

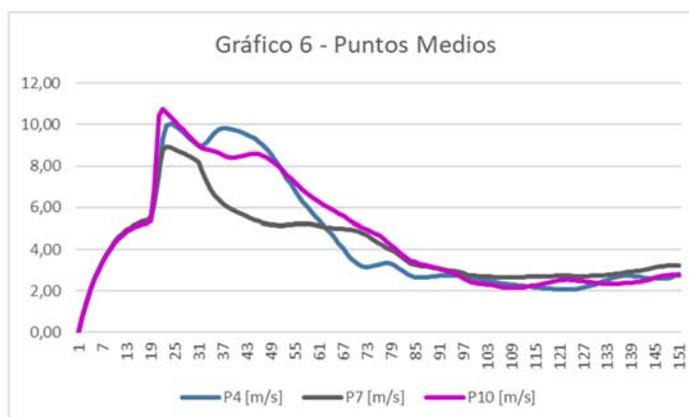


Ilustración 50. Gráfico 6 - Velocidades en puntos medios.
Fuente: Elaboración propia

El máximo en este caso se da en la zona de los raíles (11 m/s), si bien, la zona de la pared del túnel tiene un desarrollo bastante similar, vemos que el mantenimiento de la velocidad con el paso del tiempo tiene valores mayores en el primer caso. En los 3 casos, el descenso es muy paulatino lo que da la posibilidad de mantener la velocidad en el tiempo.

Para finalizar, se comparan los puntos correspondientes al punto de llegada a la estación:

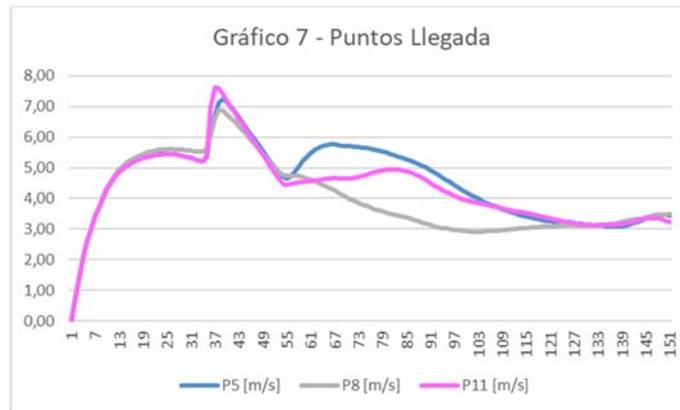


Ilustración 51. Gráfico 7 - Velocidades en puntos de llegada.
Fuente: Elaboración propia

Este caso puede ser el más igualado en todos los casos estudiados, el máximo se obtiene en la zona de los raíles (7,5 m/s), sin embargo, se aprecia que el valor en la zona de la pared se mantiene mejor en el tiempo dando valores más altos. Este pico con la bajada de velocidad tan acusada es el homólogo del caso de los puntos de salida, el fenómeno de parada del tren hace que se produzcan los cambios tan bruscos.

5.4.2 Conclusiones

Una vez se tienen sobre la mesa las hipótesis anteriores y el estudio de los puntos más singulares del modelo, se puede concluir que los máximos se alcanzan en el punto medio del túnel, es decir, cuando el tren ha alcanzado su velocidad máxima y circula por una sección transversal constante. La zona donde ocurre, es la zona media del túnel, lo suficientemente alejada de la entrada y la salida como para no ser afectada por el cambio de sección y una vez se produzca el arranque completo y no se inicie la maniobra de frenado.

También se observa que las zonas del recorrido donde más afecta el paso del tren, son las paredes del túnel y la zona de los raíles, como se ha visto en el punto anterior, los valores obtenidos son muy similares y en según qué situación los resultados se confunden entre ellos. En la zona de la mediana se pierde demasiado potencial del viento debido a la apertura de la sección que no ocurre en los otros supuestos.

Como conclusión se puede decir, que la instalación de los aerogeneradores debería darse en las paredes del túnel o en los raíles del tren, una vez se alcance la velocidad de circulación del recorrido, disponiendo de un potencial de velocidad de viento máximo de unos 10-11 m/s y que se mantiene en el tiempo hasta que el tren entra en la estación disminuyendo paulatinamente su velocidad.

6 ESTUDIO DE AEROGENERADORES

6.1 Estado del arte

La instalación de aerogeneradores en zonas de tránsito para la producción de energía limpia, si bien es un tema estudiado, no es un tema muy implantado en la actualidad. Los estudios son muy variados y en todos casos, bastante prometedores ya que contemplan la instalación de aerogeneradores en distintos ámbitos y lugares como pueden ser las carreteras y autopistas, los túneles de metro o incluso en las azoteas de los edificios para autoconsumo. A continuación, se procede a citar de manera resumida, algunos de los estudios más relevantes para el presente trabajo en este campo de manera cronológica.

En un artículo (Sandru, 2010) de 2010 se encuentra la propuesta de un grupo de diseñadores coreanos, Ryu Chan Hyeon, Sinhyung Cho and Hong Sun Hye que plantean un prototipo de turbinas de eje vertical en paralelo en las paredes de los túneles de metro para el autoabastecimiento de la estación e inmediaciones y la generación de electricidad para iluminar el propio pasaje.

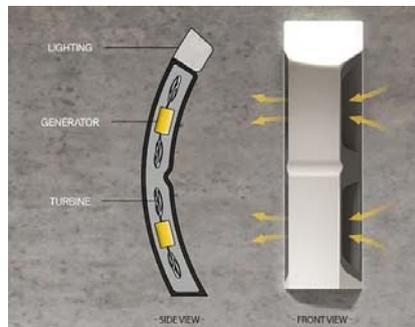


Ilustración 52. Prototipo turbinas de eje vertical en paredes de metro
Fuente: (Sandru, 2010)

En 2013 en la Universidad de Florida se redactó un proyecto denominado *Highway Wind Turbines* (Champagnie, Geatjens, & Simonis, 2013) que contempla la instalación de turbinas de eje vertical en los márgenes de las autopistas para aprovechar el aire que desplazan los vehículos con su paso. Se concluye con que una turbina única no presenta ningún beneficio, sin embargo, un grupo de aerogeneradores bien coordinados y colocados estratégicamente, pueden generar energía que abastezca una pequeña población cercana.

Encontramos que en un artículo (Chen, 2014) de 2013 en Los Ángeles, se creó un prototipo al que se llamó MACE (registrado por MACE Energy Inc.) que consistía en una serie de turbinas de eje horizontal instaladas entre la estación de North Hollywood y la de Universal City durante los meses de agosto a septiembre. El proyecto MACE obtuvo unos resultados muy satisfactorios concluyendo que tenía un potencial de generación de unos 77 KWh/día que se traducían en un gran ahorro energético y una reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera.



Ilustración 53. Prototipo proyecto MACE
Fuente: (Chen, 2014)

En la Universidad de Jaén en 2014 (Ingenieros.es, 2014) un grupo de investigación de Mecánica de Fluidos (TEP-235), comenzó la realización de un proyecto llamado *Estudio del aprovechamiento eólico de las corrientes de aire generadas en túneles y otras infraestructuras de transporte* con el catedrático Carlos Martínez Bazán a la cabeza, en el que se estudia el aprovechamiento eólico de los túneles de carretera. Los trabajos del grupo se centran en los datos proporcionados por el centro COEX de La Herradura siendo la investigación de los túneles carreteros pertenecientes a dicho sector.

En la conferencia ICESA de 2015 con la ponencia *Generating and saving energy by installing wind turbines along de railway tracks* (Kumar, Karandikar, & Chavan, 2015) se expone que las poblaciones más aisladas de la India por donde exista la circulación de trenes (muy extendidos en este país), resultaría interesante la instalación de turbinas de eje vertical en las vías de los mismos, para abastecer luces LED de bajo consumo de una población pequeña cercana a las vías.

En 2015 se encuentra uno de los highlights más importantes en este ámbito. Es una de las ponencias del *I Congreso Internacional de Madrid Subterra. Sobre el aprovechamiento energético del subsuelo* (Madrid Subterra, 2016). La propuesta vino de la mano de Francisco Martínez Bugarín fundador de la empresa Tunnel Energy, consistente en la instalación de pequeños aerogeneradores en los raíles del metro de Madrid para el aprovechamiento de la energía limpia del subsuelo urbano. La empresa recibió el premio del Concurso de Ideas de la edición del congreso, lo cual tendió un puente de colaboración entre dicha compañía y Metro Madrid para crear y probar los prototipos de las turbinas que se quieren instalar. Martínez Bugarín afirmaba que con una instalación de 100.000 generadores en la línea 10 de metro entre Alonso Martínez y Gregorio Marañón, con solamente la generación energética de las horas punta se podrían llegar a generar unos 250 KW/día. Se ha intentado comprobar si a fecha actual de 2022, el proyecto seguía en desarrollo o en proceso de implantación, todos los datos apuntan a que esta empresa cesó su actividad sin llegar a un resultado final que se implantase. No obstante, los cálculos que realizaron son realmente prometedores y podrían sentar las bases de nuevos prototipos e investigaciones en el sector.

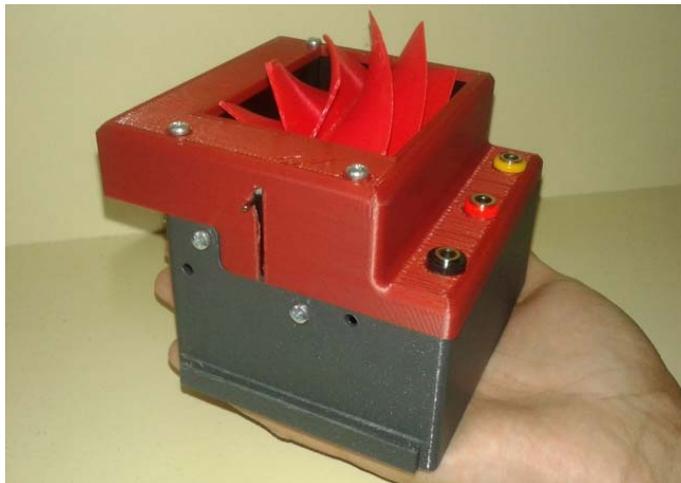


Ilustración 54. Prototipo Turbinas Tunnel Energy
Fuente: (Madrid Subterra, 2016)

En la conferencia PCIM de 2018 en la ponencia *Wind turbine for underground subway stations* (Galai Dol, Cardassi, & de Bernardinis, 2018) presentan una modelización con Matlab Simulink de un conjunto de turbinas que pudieran instalarse en los túneles de metro para aprovechar la capacidad de producción de aire del efecto pistón. Los resultados son de lo más alentadores, concluyendo con que no solo recupera la energía necesaria para el autoabastecimiento si no que genera un pequeño beneficio (1,6 KWh/día) que plantea la instalación de un acumulador.

A partir de ese mismo año, se empieza a ver que hay empresas con aerogeneradores reales. La empresa turca DeveciTech (Devecitech, 2022) saca su modelo llamado Enlil, pensado para su instalación en medianas de autovía y carretera. Dicha turbina es de tipo modular lo que permite un montaje y desmontaje muy rápido, aprovecha los vientos del paso de los vehículos, los vientos naturales y en su parte superior tiene una pequeña placa fotovoltaica que propone un extra. Si bien los resultados públicos no se han encontrado, los creadores de la turbina tras implementarla en distintas zonas de ciudades de Turquía concluyen que es una tecnología limpia muy beneficiosa.



Ilustración 55. Turbina Enlil DeveciTech
Fuente: <https://devecitech.com/>

Para finalizar y a modo curiosidad, esta tecnología da lugar a la sostenibilidad, pero no está reñida con el diseño. El diseñador estadounidense Joe Ducet (Kardoudi, 2021) propone un prototipo de pared de aerogeneradores pensado especialmente para zonas donde no puede ponerse un aerogenerador al uso, las ideas de aplicación son muy amplias pudiendo instalarse en medianas de carreteras, paredes o fachadas de edificios. Está compuesta de hileras de generadores con movimiento independiente lo cual le da una gran durabilidad y eficiencia.



Ilustración 56. Prototipo pared eólica
Fuente: (Kardoudi, 2021)

6.2 Elección del tipo de Aerogenerador

En base a los datos anteriores, sabiendo el potencial del que se dispone con el paso de un convoy en un túnel de metro, se procede a estudiar cómo aprovechar dicho potencial de la manera más eficiente y económica posible, así como las limitaciones que podemos encontrar a la hora de su implantación.

Antes de comenzar, debemos elegir el tipo de aerogenerador, que por sus características se adapte más a la solución buscada. Por su morfología distinguimos dos, los de eje horizontal y los de eje vertical.

6.2.1 Turbinas de eje horizontal

Las turbinas de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) son las que poseen un eje de rotación paralelo al suelo. Son la tipología más extendida y utilizada, se conocen coloquialmente como “molinillos” ya que recuerdan a los antiguos molinos de viento que se utilizaban para moler grano.



Ilustración 57. Aerogeneradores de eje horizontal

Fuente: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>

La gran envergadura de esta solución acarrea a su vez pros y contras para su elección. Las ventajas que encontramos son:

- ✔ Un solo aerogenerador posee una capacidad de generación de energía muy elevada ocupando una zona de terreno muy pequeña.
- ✔ Suelen instalarse en llanuras muy amplias y preferiblemente alejadas de los núcleos de población, por lo que la afección a los ciudadanos es mínima.

Los contras que encontramos son:

- ✘ Al contar con grandes dimensiones provocan un gran impacto visual y que a pesar de parecer que ocupan poco terreno, se debe contar con la gran cimentación que han de tener por la esbeltez de su diseño y que las aspas de los distintos aerogeneradores tengan una separación mínima para evitar su colisión.
- ✘ Al estar situados en zonas despobladas, afectan a la vida de la avifauna existente y el costo de transporte de la energía generada, en algunos casos, llega a ser muy elevado.
- ✘ Gran dependencia de las condiciones atmosféricas que se presenten en el día, un viento de poca velocidad no accionará el mecanismo y un viento de gran envergadura puede dañarlo.

Esta tipología de aerogenerador, no es recomendable para el objeto de este estudio, el principal hándicap que se encuentra para su elección es su gran tamaño y la necesidad de una zona de estación muy amplia ya que en un túnel de metro no se dispone de ninguna de estas posibilidades.

6.2.2 Turbinas de eje vertical

Las turbinas de eje vertical o VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) son las que poseen un eje de rotación perpendicular al suelo. Son una tipología menos extendida que en el caso anterior, pero que en los últimos tiempos cobra fuerza debido a su versatilidad.



Ilustración 58. Aerogeneradores de eje vertical.

Fuente: <https://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com/>

Este tipo de aerogenerador, tiene una serie de pros y contras que procedemos a analizar. Las ventajas que encontramos son:

- ✔ Debido a la disminución de superficie necesaria para su instalación pueden estar más cerca unos de otros e instalarse cercanos al suelo por lo que la cimentación se reduce considerablemente.
- ✔ Tienen un tamaño menor, por lo que tienen menor impacto visual y generan menos ruido pudiendo estar más cerca de los núcleos urbanos reduciendo así el coste de transporte de la generación de energía.
- ✔ Las palas que lo forman son omnidireccionales y no necesitan estar orientadas en ningún sentido específico por lo que son los indicados para zonas donde se encuentra un flujo de aire forzado sin estar sujeto a las condiciones atmosféricas.
- ✔ Especialmente recomendados por su fácil instalación y menor tamaño para instalaciones pequeñas. Este hecho lleva asociado un ahorro económico considerable que los hace muy atractivos para el uso doméstico y el autoconsumo.

Los contras que encontramos en cambio son:

- ✘ Son menos eficientes, al ser más reducidos y poder situarse cercanos al suelo, no pueden soportar grandes corrientes de aire y, por tanto, no poseen una capacidad de generación de electricidad tan elevada como el otro caso.
- ✘ El gasto de instalación es menor pero el mantenimiento asociado es mayor ya que al contar con elementos mucho más pequeños también suelen ser menos estables.

Finalmente consideramos que, aunque este tipo de aerogenerador tiene desventajas, son muchas más las ventajas que ofrece que se adaptan a las características de nuestra propuesta por lo que se ha decidido elegir aerogeneradores de eje vertical para el estudio económico.

Cabe destacar que, si bien es un tipo de turbina que existe y encontramos en el mercado, posee una serie de limitaciones ya que los modelos y prototipos son estándar, por lo que el estudio presente se verá limitado por las soluciones comerciales disponibles y la madurez tecnológica de este tipo de aerogenerador.

6.3 Propuestas técnicas

Partiendo de la elección anterior, las turbinas de eje vertical, se ha realizado un estudio del mercado actual y las posibilidades que ofrece. Para su elección se han tenido en cuenta las restricciones de la zona de trabajo:

- El espacio: En la zona de la pared, contando que la anchura entre la pared del túnel y la zona de circulación del tren es de 60 cm y altura máxima es de 3 m y en la zona de los raíles es de 80 cm de altura.
- Velocidad del viento: oscila entre 0-11 m/s a una velocidad media de circulación del tren de 15 m/s.

Los aerogeneradores propuestos se engloban dentro de los que comercialmente se catalogan como de energía minieólica o domésticos y de autoconsumo ya que son de los pocos del mercado que cuentan con unas dimensiones suficientemente reducidas. Se ha intentado en la medida de lo posible buscar diseños de producción nacional o con distribuidores con base en España ya que esto abarataría los costes de transporte, mantenimiento e instalación de los mismos.

Antes de comenzar con las propuestas, cabe destacar que no se ha encontrado ningún aerogenerador comercial que pudiera instalarse en la zona de los raíles del tren. La propuesta de la empresa Tunel Energy y su prototipo, si bien es una patente que existe y que por la información de la que disponemos, sigue en desarrollo, no se ha encontrado nada similar que pudiera utilizarse para la estimación económica de viabilidad. Debido a esto, el estudio se centrará únicamente en propuestas que puedan instalarse en las paredes del túnel.

6.3.1 Aerogenerador 0,60 City de WindSide

La empresa WindSide (WindSide, 2022) tiene su base en Finlandia, es una compañía especializada en la manufactura de turbinas de eje vertical con una forma helicoidal característica de la marca. Posee una muestra de aerogeneradores que si bien no es muy extensa es muy variada y, por lo tanto, bastante competitiva.

La turbina seleccionada de su catálogo es la 0,60 City por sus dimensiones y su capacidad de generación de energía. Los otros modelos contaban con una velocidad óptima de rotación muy superior a la buscada. No obstante, este modelo, tiene una velocidad de rotación para la potencia nominal de 20 m/s que es muy interesante pero no se adecua por completo a las necesidades del tramo estudiado y siendo muy escasa la información al respecto.

Se intentó mantener contacto con la empresa en cuestión para optar a más información para el estudio de viabilidad y no se obtuvo respuesta.



Ilustración 59. Aerogenerador 0,60 City WS
Fuente: <https://windside.com/products/ws-060/>

6.3.2 Aerogenerador ST-3500 de SmartTwister

La empresa SmartTwister (SmartTwister, 2022) es una empresa española con base en España, que suministra aerogeneradores de pequeñas dimensiones para el autoconsumo no solo domestico si no también de empresas y polígonos empresariales. Su filosofía es la de universalizar la energía y dar acceso a ella de la manera más limpia y eficiente.

La turbina seleccionada de su catálogo es la ST-3500 por sus dimensiones y su capacidad de generación de energía. Los otros modelos contaban con velocidades optimas de rotación menores, por lo que la energía generada era menor. Este modelo arranca con un viento de 1 m/s y alcanza su potencia nominal de 3500W a los 9,30 m/s (soportando hasta los 78 m/s). Tiene una potencia máxima de 3745W lo que la hace muy deseable para las condiciones estudiadas y es escalable y repetible a tramos más largos con velocidades mayores.

La curva de potencia de este aerogenerador es la siguiente:

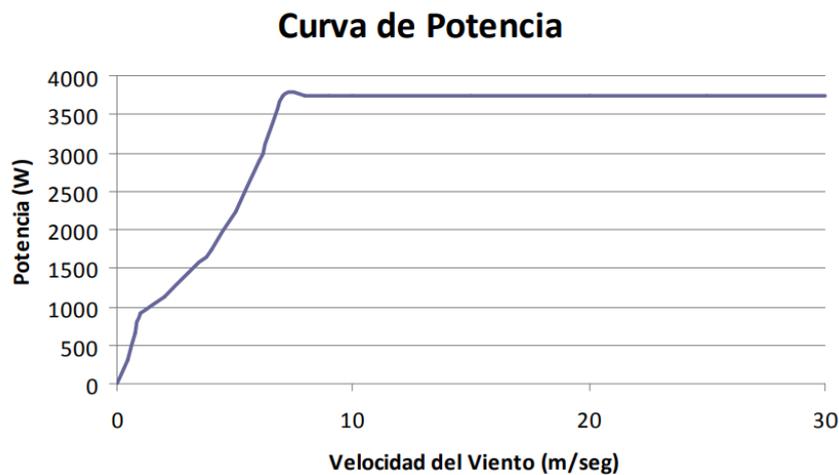


Ilustración 60. Curva de potencia de ST-3500

Fuente: <https://www.smarttwister.org/index.php/es/aerogeneradores/aerogenerador-st-3500>

Tras ponernos en contacto con la empresa para obtener más información sobre este modelo, no se ha recibido ninguna respuesta. Este aerogenerador, si bien resulta muy interesante para las características de este tramo, posee unos valores un tanto limitados en lo que se refiere a la escalabilidad de la solución. En tramos con mayores velocidades su utilización no sería todo lo eficiente que corresponde a la inversión que se plantea.



Ilustración 61. Aerogenerador ST-3500 de SmartTwister

Fuente: <https://www.smarttwister.org/index.php/es/aerogeneradores/aerogenerador-st-3500>

6.3.3 Aerogenerador Atlas X de TESUP

La empresa TESUP (TESUP, 2022) es una empresa internacional con filiales en diferentes puntos del mundo, una de ellas en España. Se presentan como los mayores fabricantes mundiales de turbinas eólicas domésticas y paneles solares flexibles. Presentan un producto muy probado y de muy buenas valoraciones y ofrecen un servicio de instalación y montaje propio.

La turbina seleccionada de su catálogo es la ATLAS X por sus dimensiones y su capacidad de generación de energía. Este modelo arranca con un viento de 3 m/s, no obstante, una vez que empieza a girar puede mantenerse con vientos de solamente 2 m/s. Alcanza su potencia nominal de 4000 W a partir de los 13 m/s (soportando hasta los 50 m/s). Tiene una potencia máxima de 5000 W gracias a sus baterías.



Ilustración 62. Aerogenerador ATLASX de TESUP

Fuente: <https://www.tesup.es/showroom/>

Este aerogenerador, es el que más se adecua a las necesidades que se buscaban, tiene una gran potencia en comparación con otros aerogeneradores, sus dimensiones son adecuadas para el hueco del que se dispone y es perfectamente escalable y repetible a tramos más largos con velocidades mayores sin necesidad de cambiar de modelo. La ventaja de que cuente con gran cantidad de aspas es que en caso de que alguna falle o se rompa, el aerogenerador continúa su funcionamiento con las aspas restantes. El kit de venta del aerogenerador, inversor y controlador de carga posee un precio muy competitivo en el mercado.

El transporte es relativamente rápido gracias a las filiales que tiene la empresa repartidas por la península y no requiere de transporte especial gracias a sus dimensiones reducidas. El montaje tiene unos tiempos de aproximadamente 2 horas por aerogenerador realizados por un electricista cualificado, la sencillez de su montaje hace que el mantenimiento pueda hacerse por empresas externas y pueda ser más rápido y económico. La empresa TESUP, ofrece la posibilidad de comprar las aspas y el generador de manera separada lo que hace que el mantenimiento de estos elementos sea mucho más eficiente que otras opciones ya que no hay que sustituir el aerogenerador completo. También posee un catálogo de controladores de carga e inversores de venta separada en el caso de que sea necesaria su reposición.

La curva de potencia de este aerogenerador es la siguiente:

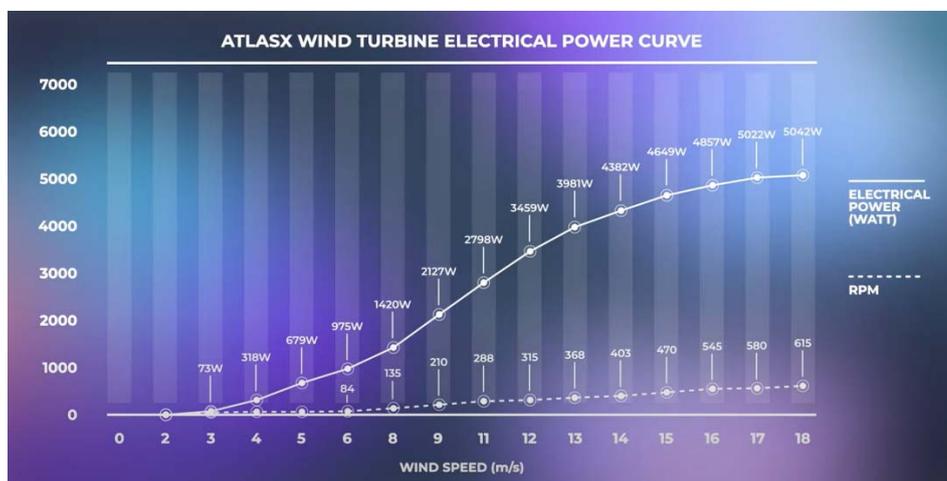


Ilustración 63. Curva de potencia de ATLASX

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=Osy8be2ofHo>

En función de todas las ventajas que ofrece el aerogenerador ATLASX, se ha elegido este modelo para el estudio.

6.4 Estudio de viabilidad y valoración económica

Para dimensionar el conjunto de aerogeneradores que serían necesarios se vuelve al ejemplo de la modelización del apartado anterior. Se recuerda a grandes rasgos que el tramo modelizado es el correspondiente a la línea de Metro Madrid entre las estaciones de Alonso Martínez y Tribunal con una longitud entre túneles de unos 500 m a 15 m/s.

Para conocer el consumo energético para abastecer una estación o una línea de metro, se preguntó a Metro Madrid cual era el consumo medio de las estaciones, la respuesta obtenida fue que esta información no se desglosa por estación si no por línea y que se factura el total del sistema metropolitano por lo que solo disponían del consumo anual total en KWh de la línea 10, siendo este:

Año	Consumo (KWh/año)
2021	9.935.410
2020	10.332.388
2019	10.307.729

Tabla 3. Consumo anual línea 10 Metro Madrid
Fuente: (Metro Madrid, 2022)

Con la finalidad de poder trabajar con números y dimensiones asequibles para el cálculo, hacemos una serie de suposiciones. Se hace la media de consumo de los últimos 3 años y obtiene el valor del consumo por día y por estación (la línea 10 tiene 31 estaciones que pueden verse en la Ilustración 36):

Consumo medio L10 (KWh/año)	Consumo medio L10 (KWh/día)	Consumo medio por estación (KWh/día)
10.191.842	27.923	900,74

Tabla 4. Estimación del consumo diario de las estaciones L10
Fuente: Elaboración propia

Para conocer la capacidad producción de los aerogeneradores, en primer lugar, se debe calcular la frecuencia de paso de los trenes y el tiempo que cada aerogenerador podrá estar girando y su velocidad. Para el cálculo de la frecuencia de paso de los trenes se ha utilizado la siguiente tabla:

Periodo / Period	6:05 - 7:00	7:00 - 7:30	7:30 - 9:30	9:30 - 11:00	11:00 - 14:00	14:00 - 16:00	16:00 - 18:00	18:00 - 20:00	20:00 - 22:00	22:00 - 23:00	23:00 - 0:00	0:00 - 2:00
Lunes a Jueves (minutos) Monday to Thursday (minutes)	4 - 9	2 ½ - 4 ½	2 ½ - 4	4 - 7	4 ½ - 7	4 - 5 ½	3 ½ - 6	5 - 6 ½	7 ½*	15 *		
Viernes (minutos) Fridays (minutes)	4 - 9	2 ½ - 4 ½	2 ½ - 4	3 ½ - 7	4 ½ - 7	2 ½ - 5	4 - 5 ½	5 - 6 ½	7 ½*	15 *		
Sábados (minutos) Saturdays (minutes)	7 - 9			7 - 8				5 ½ - 7 ½	6 ½ - 7 ½	7 ½*	15 *	
Domingos y festivos (minutos) Sundays & public holidays (minutes)	7 - 9			7 - 8				5 ½ - 8	7 ½*	15 *		

Tabla 5. Frecuencia de paso de los trenes de la línea 10
Fuente: (Metro Madrid, 2022)

Basándose en esta tabla, con el valor medio de la frecuencia, se obtiene el número de trenes que circulan por sentido, divididos por tramos horarios:

Horario	Nº trenes: L-J	Nº trenes: V	Nº trenes: S	Nº trenes: D-F
06:05 - 07:00	8	8	7	7
07:00 - 07:30	9	9	4	4
07:30 - 09:30	37	37	16	16
09:30 - 11:00	16	17	12	12

Horario	Nº trenes: L-J	Nº trenes: V	Nº trenes: S	Nº trenes: D-F
11:00 - 14:00	31	31	24	24
14:00 - 16:00	25	32	16	16
16:00 - 18:00	25	25	16	16
18:00 - 20:00	25	25	18	18
20:00 - 22:00	21	21	18	18
22:00 - 23:00	16	16	9	16
23:00 - 00:00	16	16	16	16
00:00 - 02:00	16	16	16	32
TOTAL	246	254	172	194

Tabla 6. Trenes que circulan por sentido y por tramos horarios

Fuente: Elaboración propia

El tiempo que el aerogenerador puede estar girando y la velocidad del aire a la que gira, se extrae de la modelización del apartado anterior, pero cambiando algunos parámetros ya que la modelización no tiene en cuenta el tiempo de arranque del tren. Por tanto, teniendo en cuenta que el trayecto entre estaciones es de 500 m y que el tren se encuentra en mitad del andén (los andenes son de 115 m por lo que sería 57,5 m a la salida y el mismo valor a la llegada) contamos con un trayecto completo de 615 m. Para estar del lado de la seguridad, suponemos que los 100 primeros y los 100 últimos metros del túnel son de aceleración y frenado y por tanto en estos puntos no alcanza su velocidad máxima, lográndolo así en los 300 metros centrales, que son los que se plantean para la instalación. Teniendo todo en cuenta, el trayecto entre estaciones dura unos 60 s en los que se tienen estas velocidades:

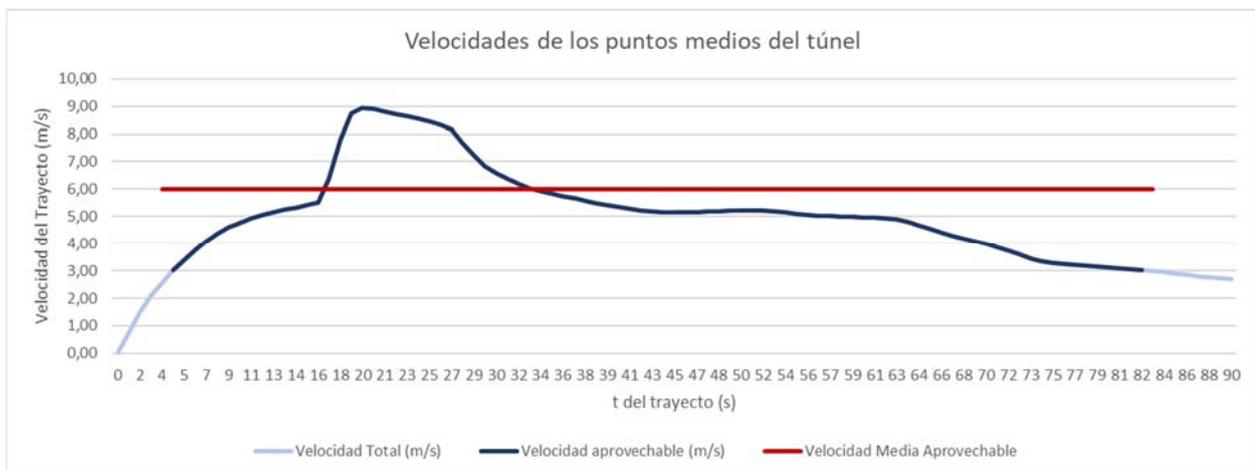


Ilustración 64. Velocidad de los puntos medios del túnel

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia, el tiempo que tarda en bajar a velocidades menores a 3 m/s son unos 20 s más, teniendo un tiempo total de giro de los aerogeneradores de 80 s a una media aprovechable de velocidad de 6 m/s. Según la curva de potencia de la Ilustración 63, a 6 m/s la generación de energía es de 0,98 KWh por generador.

Para la estimación se ha tomado la media de circulación de los trenes de una semana al uso (sin festivos), que asciende a 229 trenes al día, esta cantidad por los trayectos de 80 s que se mencionan en el apartado anterior, se obtienen unas 5,1 horas de giro por aerogenerador.

Con una media de energía de 0,98KWh a 5,1 horas de giro, se obtienen **4,97 KWh/día** de producción por cada aerogenerador.

Volviendo a los datos de la Tabla 4, el consumo diario de una estación de la línea 10 es de 900 KW/día por lo que para cubrir este trayecto harían falta **182 aerogeneradores ATLASX** instalados en los 300 m donde la velocidad es máxima.

Puesto que no se han encontrado documentos propios de la norma de seguridad de Metro Madrid, se va a extrapolar la normativa ferroviaria de ADIF, concretamente la NAV 7-0-1.0 de Seguridad y Salud en el trabajo para Trabajos Ferroviarios más Frecuentes (Normativa ADIF, 2000) para ver el personal necesario para la instalación de los aerogeneradores. Esta norma mantiene que, en el caso de trabajos durante la circulación, será necesaria la presencia de un piloto de vía, no obstante, se va a proponer que las actuaciones de instalación sean realizadas en horario nocturno cuando no existe circulación de los trenes ni usuarios del Metro por lo que únicamente se contará con la presencia de un Recurso Preventivo que compruebe el normal desarrollo de las obras.

En los datos de la ficha técnica de la turbina se menciona que se tarda en instalar cada aerogenerador una media de 2 horas de trabajo, puesto que se va a proponer que la instalación de estos aerogeneradores se lleve a cabo en las horas donde no exista circulación, con una cuadrilla de trabajadores (trabajando por parejas) se tardaría unos 4 meses. A esta duración se ha de añadir el tiempo necesario para la realización de los anclajes a la pared de los aerogeneradores, así como la instalación del nuevo cableado y el sistema de monitorización y control de la energía por lo que se estima que el tiempo total de instalación ascienda a 6 meses.

Se procede a estimar la aportación económica total que es necesaria para comenzar el proyecto. En primer lugar, se calcula la inversión inicial, para lo que tendremos en cuenta una estimación de la obra civil y de la instalación completa para lo cual se destinarán una serie de partidas alzadas.

Inversión Inicial			
Materiales			
Elemento	Medición (ud)	Precio (€)	Importe (€)
Aerogeneradores	182	1.570	285.740
Controlador de carga	91	150	13.650
Inversor de corriente	19	940	17.860
<i>Total presupuesto parcial Materiales</i>			317.250
Obra civil			
Elemento	Medición (ud)	Precio (€)	Importe (€)
Construcción de anclajes	182	250	45.500
<i>Total presupuesto parcial Obra Civil</i>			45.500
Instalación			
Elemento	Medición (ud)	Precio (€)	Importe (€)
Material fungible	P.A.	3.000	3.000
Instalación de cableado	P.A.	10.000	10.000
Sistema de monitorización	1	20.000	20.000
<i>Total presupuesto parcial Instalación</i>			33.000
Inversión inicial total			395.750

Tabla 7. Inversión inicial aerogeneradores
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se realiza una estimación de los gastos iniciales asociados de los 6 meses, los recursos humanos se dividen en medios propios (m.p.) y en subcontratación (s). El responsable del proyecto (Project Manager) será de una plantilla propia de la empresa que realice la implementación del proyecto, así como el responsable de prevención (cuya presencia no tiene por qué ser continua). Por otro lado, el personal de instalación de los aerogeneradores será subcontratado debido a que es un trabajo muy especializado que debe ser llevado a cabo por personal técnico con experiencia en energías renovables y electricidad, se realizará con una cuadrilla que trabajará en parejas.

Gastos Iniciales			
Infraestructura			
Elemento	Medición (mes)	Precio (€)	Importe (€)
Alquiler almacén	6	1.000	6.000
<i>Total presupuesto parcial Infraestructura</i>			<i>317.250</i>
Logística			
Elemento	Medición (mes)	Precio (€)	Importe (€)
Transporte (2 vehículos)	2*6=12	500	6.000
<i>Total presupuesto parcial Logística</i>			<i>6.000</i>
Recursos Humanos (m. p.)			
Elemento	Medición (mes)	Precio (€)	Importe (€)
Project Manager	6	3.000	18.000
Responsable Prevención	6	1.600	9.600
<i>Total presupuesto parcial RRHH (m.p.)</i>			<i>27.600</i>
Recursos Humanos (s)			
Elemento	Medición (mes)	Precio (€)	Importe (€)
Personal técnico (4p)	4*6=24	1.800	43.200
<i>Total presupuesto parcial RRHH (s)</i>			<i>43.200</i>
Gastos iniciales totales			82.800

Tabla 8. Gastos Iniciales de instalación

Fuente: Elaboración propia

Por tanto, si se tiene en cuenta un 15% de costes indirectos, la aportación económica inicial necesaria para llevar a cabo el proyecto asciende a:

Aportación económica inicial	
Inversión inicial	395.750
Gastos iniciales	82.800
Costes indirectos	71.782,50
Total	550.332,50

Tabla 9. Aportación económica inicial

Fuente: Elaboración propia

Para comprobar la rentabilidad del proyecto, se calcula a un horizonte de 25 años tras su instalación. La producción de energía de un año con 182 aerogeneradores ascenderá a 330.165,15 KWh/año lo que con un precio de 0,2 €/KWh, produce un ahorro de 66.033 €/año.

Producción mensual y anual de 182 aerogeneradores		
Mes	KWh/mes	€
Enero	28.041,42	5.608,28
Febrero	25.327,74	5.065,55
Marzo	28.041,42	5.608,28
Abril	27.136,86	5.427,37
Mayo	28.041,42	5.608,28
Junio	27.136,86	5.427,37
Julio	28.041,42	5.608,28
Agosto	28.041,42	5.608,28
Septiembre	27.136,86	5.427,37
Octubre	28.041,42	5.608,28
Noviembre	27.136,86	5.427,37
Diciembre	28.041,42	5.608,28
Total 1º año	330.165,15 KWh/año	66.033,03 €/año

Tabla 10. Producción y ahorro de 1 año con aerogeneradores
Fuente: Elaboración Propia

Con la variación actual del precio de la energía, es muy complicado hacer una estimación a largo plazo, por lo que se ha tomado una situación desfavorable en la que el precio de la energía sigue aumentando a un ritmo lento pero constante en el que sube 1 punto cada 15 años (de 0,2 €/KWh a 0,3 €/KWh en 15 años y de 0,4 €/KWh a 0,4 €/KWh en 30 años).

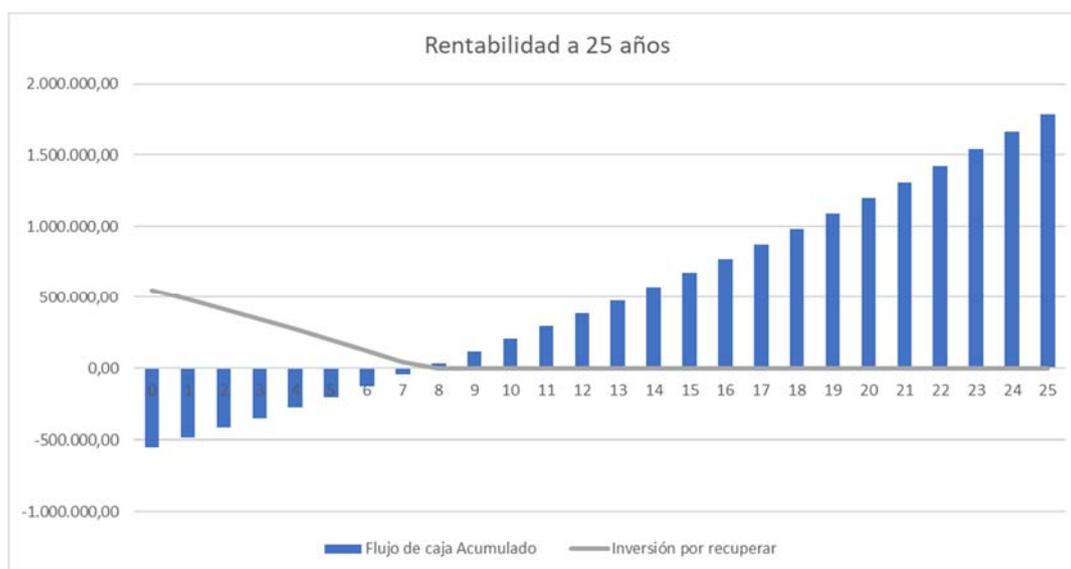


Ilustración 65. Rentabilidad a 25 años
Fuente: Elaboración propia

El año de la instalación es el que se ha denominado como año 0 en el cual no se cuenta con producción de los aerogeneradores hasta estar finalizada la instalación completa de los mismos. En el primer año, ya se cuenta con una producción completa de los mismos, en este periodo debido a su reciente instalación, no se prevé gasto por mantenimiento. A partir del segundo se destina una partida alzada para su mantenimiento la cual asciende a unos 1.000 € que corresponde a la subcontratación del trabajo de revisión de personal técnico durante un par de semanas, durante el horario nocturno. La rentabilidad exigida del proyecto se ha fijado en un 2,5%.

Teniendo en cuenta estos datos y los flujos de caja de los 25 primeros años, el payback de la instalación de los aerogeneradores se daría a los 8 años del inicio de su producción. El VAN del proyecto, empieza a ser positivo a partir del año 9. El TIR empieza a ser positivo (1%) a partir del año 15, superando la rentabilidad exigida con un 3% al año siguiente y llegando a un 12% a los 25 años.

Para mayor comprensión de la evolución económica, se adjunta en el Anexo 6 un documento de la evolución de la rentabilidad detallada en los primeros 25 años.

Como se puede apreciar, es una inversión económica muy potente para el autoconsumo, pero el ahorro energético y económico que produce a largo plazo es muy prometedor. Una vez se realiza la instalación completa de los aerogeneradores en las paredes del túnel, la producción que genera es total y no depende de ningún fenómeno meteorológico por lo cual, está prácticamente asegurada. Se contará con semanas de mayor producción debido a la mayor frecuencia de los trenes y las baterías y el sistema de conservación de energía jugará un papel importante en los casos de avería de trenes o en días que la frecuencia sea más baja de lo habitual. Con todo esto, se considera que la inversión se rentabiliza en un medio plazo asumible y que la independencia que genera del sistema eléctrico aprovechando energía existente y en pro de la energía renovable hacen que resulte una opción viable.

7 CONCLUSIONES

Tras el estudio pormenorizado de todos los puntos anteriores se ha producido un aprendizaje intensivo acerca de las energías renovables (en especial de la eólica y la minieólica) y se han podido obtener una serie de conclusiones.

Si se habla del tema de la implantación de las energías renovables en Europa y España (Introducción y antecedentes), se puede apreciar que en los últimos años, el avance del paso del uso de combustibles fósiles a energías renovables lleva un camino muy prometedor. Los objetivos de Europa marcan el rumbo de los países miembros lo cual anima y obliga a partes iguales a realizar la transición hacia la sostenibilidad. Lo que quizá llama la atención sobre este tema, es la cantidad de energía limpia generada en España en contraposición a la consumida. Este es un gran exportador de energías renovables (en especial eólica y fotovoltaica) pero esta energía debería empezar a utilizarse de mayor manera en territorio nacional para alcanzar la sostenibilidad que tanto se busca.

Como se ha podido apreciar en la evolución estudiada de la energía eólica (Energía Eólica), el avance en las últimas décadas de la energía a gran escala terrestre y marina ha sido muy significativo, con modelos cada vez más eficientes y depurados y perfeccionando tanto su instalación como su mantenimiento. No obstante, la energía minieólica aún no ha llegado a su mayor eficiencia aún. Los modelos más eficientes de la energía minieólica son los que podríamos denominar, aerogeneradores a escala de la energía eólica al uso, los aerogeneradores con turbinas de eje horizontal similares a los de la tecnología onshore y offshore de los parques eólicos son los que producen mejores rendimientos y prestaciones. Los modelos de autoconsumo con turbinas de eje vertical, producen una energía aceptable pero lejana a homólogas de eje horizontal. Se encuentra que, en este sentido, las turbinas de eje vertical aun necesitan madurar la tecnología para mejorar las prestaciones que ofrecen.

Para la modelización (Modelización del Flujo de Aire) del túnel se ha realizado un estudio exhaustivo de la literatura existente del efecto pistón y sus aplicaciones. Este efecto tiene una capacidad generadora muy importante que en la actualidad no se está aprovechando debidamente para producir energía, pero sin embargo si se plantea para el sistema propio de ventilación de los túneles de metro. Este uso resulta indirectamente una mejora sobre el consumo energético ya que al no ser necesario alimentar externamente los sistemas de ventilación, calefacción y refrigeración, se produce un ahorro en la energía eléctrica utilizada por estación, que al final repercute en un ahorro económico. El proceso de modelización ha resultado muy útil para conocer mejor el funcionamiento de la energía del efecto dentro de los túneles y estaciones. Se decidió por modelizar un tramo de 500 m en una zona céntrica (entre Alonso Martínez y Tribunal) ya que resulta un modelo escalable para cualquier otra estación, es decir: para tramos con mayor longitud y donde la circulación sea a mayor velocidad, se pueden obtener resultados tan prometedores e incluso mejores como los calculados.

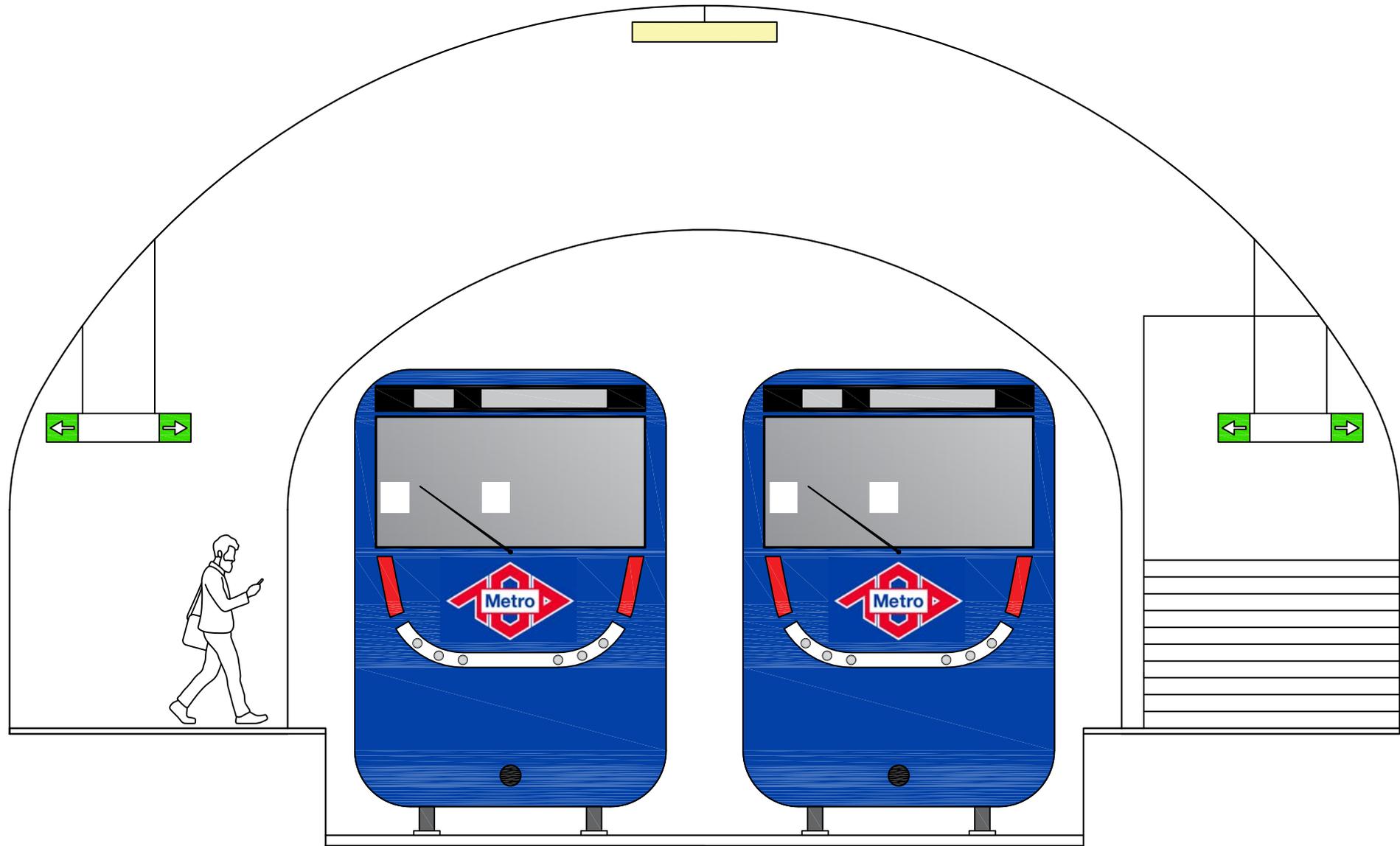
El estudio de los mejores sitios para la instalación de los aerogeneradores y su potencial, produce un empate técnico entre las paredes de los túneles (del lado de circulación) y en la zona bajo el tren (traviesas entre railes) que ha sido solucionado abruptamente por la madurez de la tecnología actual (Estudio de Aerogeneradores) ya que como se ha visto, no se encuentran aerogeneradores en el mercado de unas dimensiones tan reducidas sin tener que recurrir a las patentes en curso. Una de las mejores opciones que se han encontrado era la propuesta de Tunnel Energy, pero como se ha visto en el punto correspondiente, es un modelo que no se llegó a desarrollar del todo y, por lo tanto, no se comercializó. No obstante, los miniaerogeneradores que propone esta empresa, poseen una capacidad de producción un poco limitada a nuestro entender en comparación con los finalmente elegidos en el presente proyecto. Por lo que dijo el fundador de la empresa, el tramo entre Alonso Martínez y Gregorio Marañón (tramo de unos 1.100 m), precisaba de 100.000 aerogeneradores para

autoabastecerse. Este número tan elevado solo puede ser económicamente viable si los aerogeneradores poseen un precio muy competitivo y su mantenimiento es muy reducido a la par que producen grandes resultados de generación energética.

Tras un estudio de mercado a fondo para poder elegir las mejores opciones, el parámetro más restrictivo encontrado ha sido el del tamaño del aerogenerador, los aerogeneradores de la energía minieólica con mejores prestaciones tienen unas dimensiones y diámetros muy elevados que hacen que para el presente trabajo se contase con modelos limitados. Por todo lo mencionado en puntos anteriores, se vuelve a destacar que la tecnología de la minieólica debe seguir mejorando tanto en capacidad de producción de potencia como en variedad de productos en el mercado.

Con el modelo de aerogenerador elegido se han conseguido unos resultados bastante óptimos tanto en inversión como en capacidad de generación y recuperación de la inversión. Una vez demostrada la viabilidad de la idea, se pueden plantear diferentes supuestos como el de eficiencia energética, es decir, que la mitad de la generación de energía fuera de fuentes renovables, lo que haría que la inversión fuera de la mitad. Otro supuesto podría ser la instalación del doble de aerogeneradores para la producción energética y su venta posterior del excedente, sin embargo, en un tanteo previo, se ha visto que, al aumentar el gasto inicial de instalación, la recuperación de la inversión es mucho más lenta y no produce unos beneficios lo suficientemente significativos como para que merezca la pena doblar la inversión inicial.

Como conclusión se puede resumir que la implantación de los aerogeneradores para el autoabastecimiento de los túneles de metro es viable ya que produciría un ahorro energético muy significativo y beneficioso para el medio ambiente. Este trabajo abre la puerta a la posibilidad de diferentes variaciones como la implantación de aerogeneradores en túneles de carretera o de trenes de alta velocidad ya que el potencial del efecto pistón es muy elevado. No obstante, se recomendaría que, en el caso de implantar aerogeneradores en los túneles de metro para el autoabastecimiento, los modelos utilizados fueran modelos propios, es decir, diseñados y fabricados especialmente para las condiciones concretas que son dichos túneles, por lo que se recomendaría invertir en el desarrollo y diseño de la mejora de los aerogeneradores de energía minieólica.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
 MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
 TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR: MARÍA ELENA PÉREZ MACÍAS
 TUTOR: JUAN MANUEL GONZÁLEZ RAMÍREZ

TÍTULO TFM:

ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL DESARROLLO DE
 SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE
 TURBINAS CON FLUJO DE AIRE FORZADO

ESCALA:

1/50

FIRMA:

PLANO:

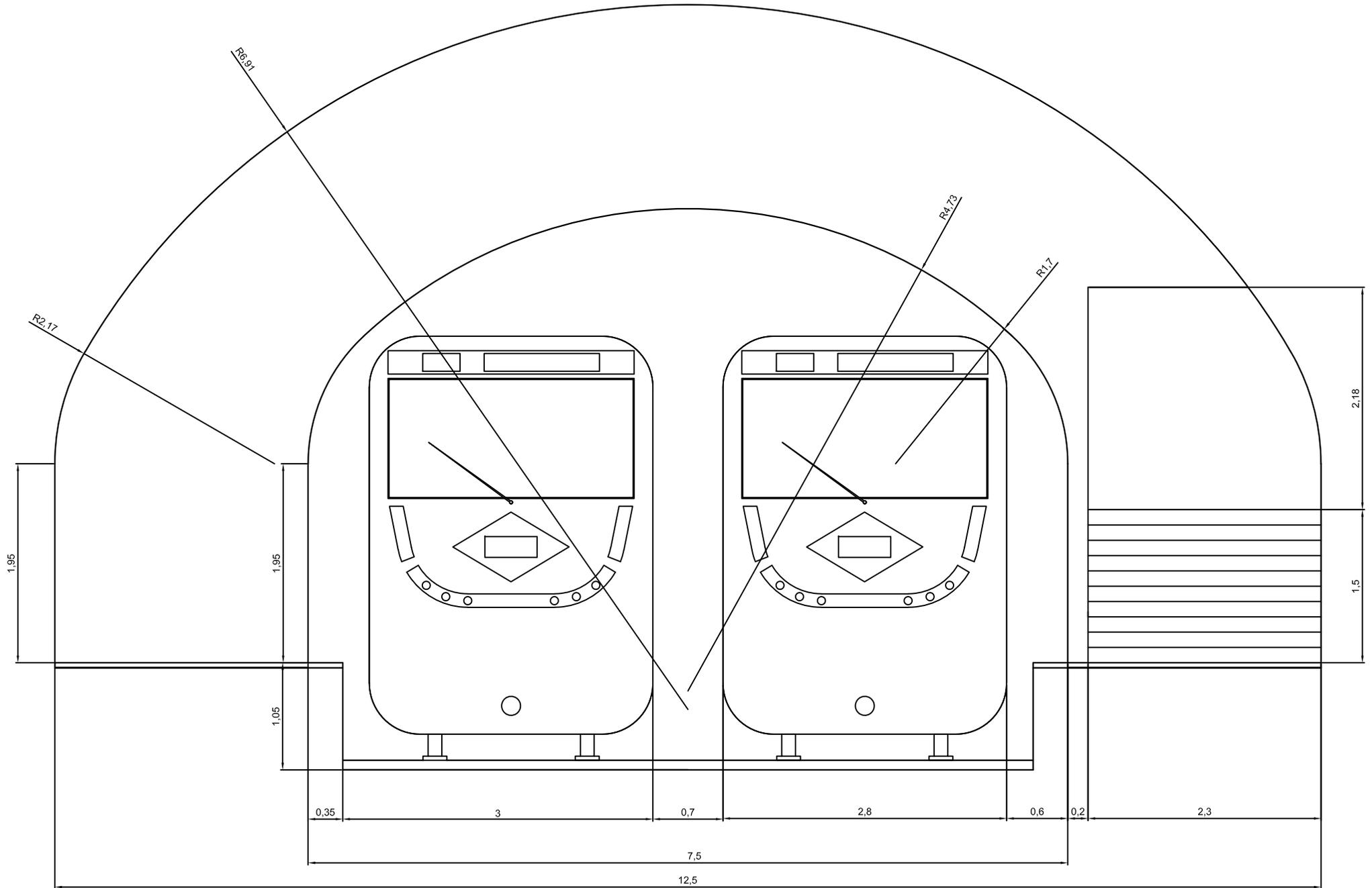
Croquis de la sección tipo
 de la estación

Nº PLANO:

1

HOJA

1/5



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
 MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
 TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR: MARÍA ELENA PÉREZ MACÍAS
 TUTOR: JUAN MANUEL GONZÁLEZ RAMÍREZ

TÍTULO TFM:
 ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL DESARROLLO DE
 SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE
 TURBINAS CON FLUJO DE AIRE FORZADO

ESCALA:
 1/50
 FIRMA:

PLANO:
 Secciones tipo
 túnel y estación

Nº PLANO:
 2
 HOJA
 1/5

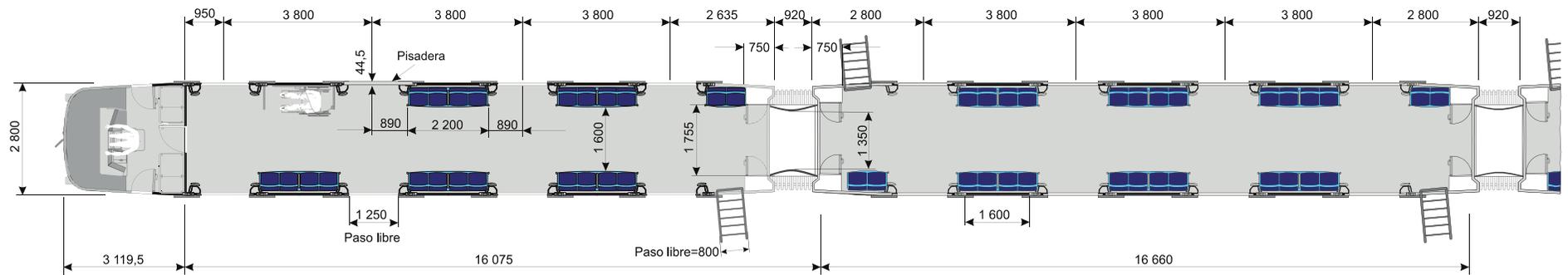
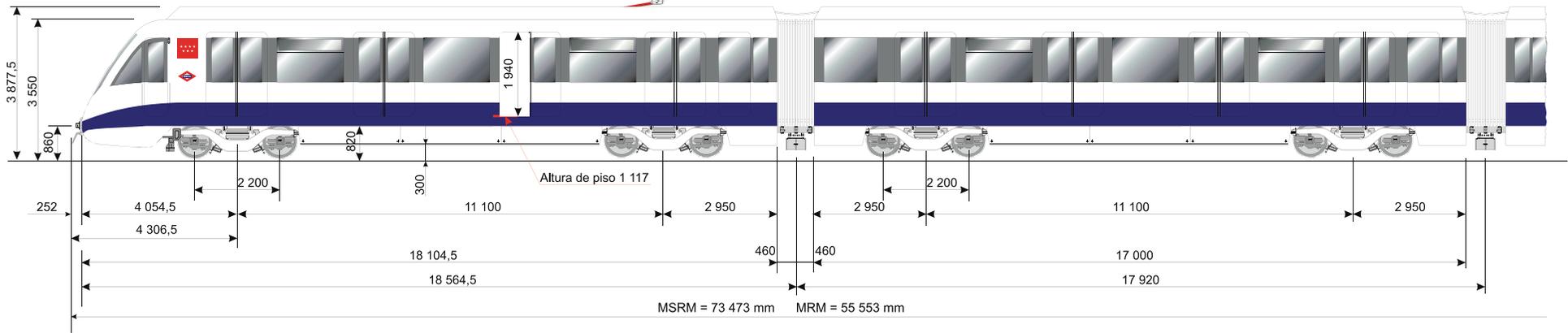
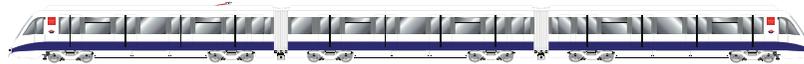
8000 1ª SERIE MSRM
MONOTENSIÓN



8000 1ª SERIE MRM
MONOTENSIÓN



8000 1ª SERIE MRM
BITENSIÓN



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
 MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
 TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR: MARÍA ELENA PÉREZ MACÍAS
 TUTOR: JUAN MANUEL GONZÁLEZ RAMÍREZ

TÍTULO TFM:
 ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL DESARROLLO DE
 SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE
 TURBINAS CON FLUJO DE AIRE FORZADO

ESCALA:
 v.e.
 FIRMA:

PLANO:
 Dimensiones tren
 modelo C8000

Nº PLANO:
 4
 HOJA
 1/5

9000 MRSSRM
MONOTENSIÓN



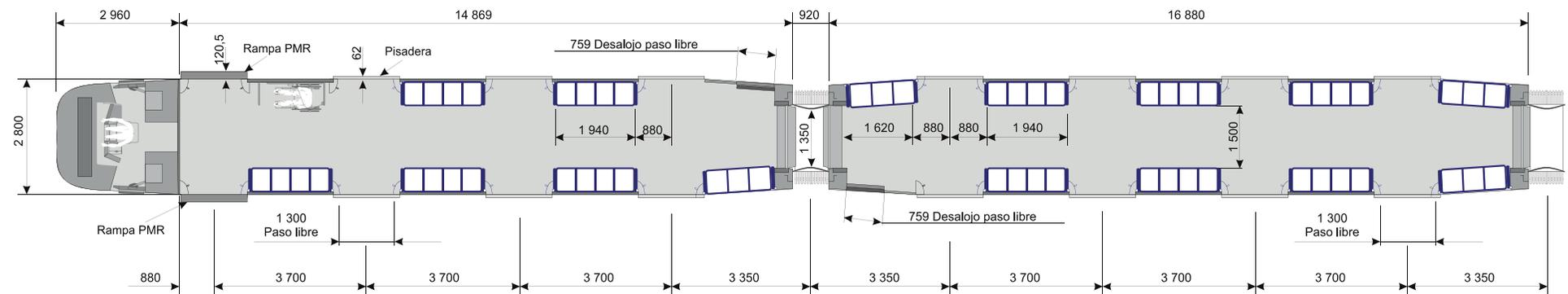
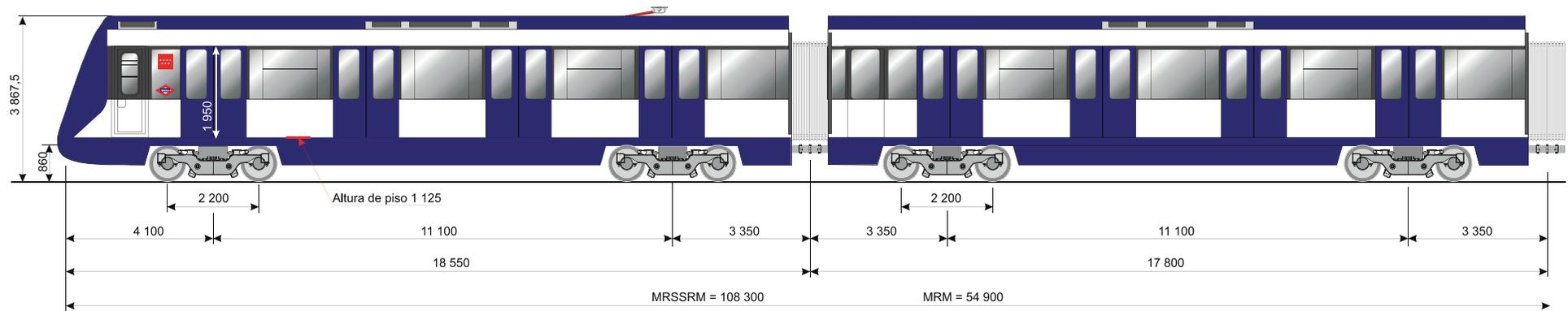
9000 MRSSRM
BITENSIÓN



9000 MRM-CBTC
MONOTENSIÓN



9000 MRM-DO
MONOTENSIÓN



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR: MARÍA ELENA PÉREZ MACÍAS
TUTOR: JUAN MANUEL GONZÁLEZ RAMÍREZ

TÍTULO TFM:
ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL DESARROLLO DE
SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE
TURBINAS CON FLUJO DE AIRE FORZADO

ESCALA:
v.e.
FIRMA:

PLANO:
Dimensiones tren
modelo C9000

Nº PLANO:
5
HOJA
1/5

CÁLCULOS DE RENTABILIDAD DEL PROYECTO

Inversión inicial			
MATERIALES	Med (ud)	Precio (€)	Importe (€)
Aerogeneradores	182	1.570	285.740
Controlador de carga	91	150	13.650
Inversor de corriente	19	940	17.860
Total presupuesto parcial Materiales			317.250
OBRA CIVIL	Med (ud)	Precio (€)	Importe (€)
Construcción de anclajes	182	250	45.500
Total presupuesto parcial Obra Civil			45.500
INSTALACIÓN	Med (ud)	Precio (€)	Importe (€)
Material fungible	P.A.	3.000	3.000
Instalación de cableado	P.A.	10.000	10.000
Sistema de monitorización	1	20.000	20.000
Total presupuesto parcial Instalación			33.000
Inversión inicial			395.750,00

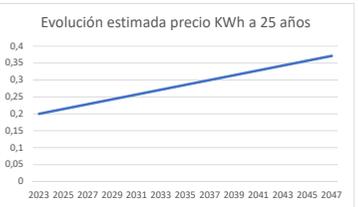
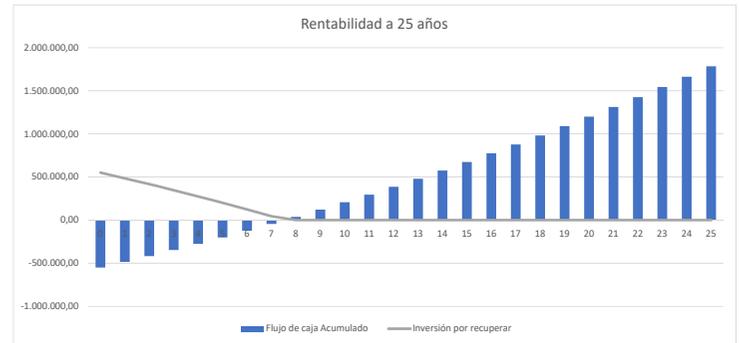
Gastos iniciales				
INFRAESTRUCTURA	Almacén (alquiler)	6,00	1.000,00	6.000,00
Total presupuesto parcial Infraestructura			6.000,00	
LOGISTICA	Transporte (2 vehiculos)	12,00	500,00	6.000,00
Total presupuesto parcial logística			6.000,00	
RECURSOS HUMANOS (MEDIOS PROPIOS)	Project Manager	6,00	3.000,00	18.000,00
Responsable Prevención	6,00	1.600,00	9.600,00	
Total presupuesto parcial RRHH (M.P.)			27.600,00	
RECURSOS HUMANOS (SUBCONTRATACIÓN)	Personal técnico exp. renovables	24,00	1.800,00	43.200,00
Total presupuesto parcial RRHH (S)			43.200,00	
Gastos iniciales			82.800,00	

Aportación económica inicial	
Inversión inicial	395.750,00
Gastos iniciales	82.800,00
Costes indirectos (15%)	71.782,50
Total 550.332,50	

Producción aerogenerador mensual	KWh	€
Enero	28.041,42	5.608,28
Febrero	25.327,74	5.065,55
Marzo	28.041,42	5.608,28
Abril	27.136,86	5.427,37
Mayo	28.041,42	5.608,28
Junio	27.136,86	5.427,37
Julio	28.041,42	5.608,28
Agosto	28.041,42	5.608,28
Septiembre	27.136,86	5.427,37
Octubre	28.041,42	5.608,28
Noviembre	27.136,86	5.427,37
Diciembre	28.041,42	5.608,28
Total 1 año	330.165,15	66.033,03

Media mensual
27.513,76

r
2,5%



Rentabilidad a 25 años

Años	KW anual	Ahorro aerogeneradores	Instalación y mantenimiento	Flujo de caja	Flujo de caja Acumulado	Payback		VAN		TIR
						Inversión recuperada	Inversión por recuperar	Factor descuento	Valor actual	
0	-	0	550.332,50	-550.332,50	-550.332,50	550.332,50	1,00	-550.332,50		
1	330.165,15	66.033,03	0	66.033,03	-484.299,47	66.033,03	0,98	64.422,47	-474.058,57	-
2	330.165,15	68.391,35	1.000,00	67.391,35	-416.908,12	133.424,38	0,95	64.144,06	-411.479,00	-
3	330.165,15	70.749,68	1.000,00	69.749,68	-347.158,44	203.174,06	0,93	64.769,51	-348.289,23	-
4	330.165,15	73.108,00	1.000,00	72.108,00	-275.050,44	275.050,44	0,91	65.326,29	-284.556,27	-
5	330.165,15	75.466,32	1.000,00	74.466,32	-200.584,12	349.748,38	0,88	65.817,38	-220.344,20	-
6	330.165,15	77.824,64	1.000,00	76.824,64	-123.759,48	426.573,02	0,86	66.245,65	-155.714,30	-
7	330.165,15	80.182,97	1.000,00	79.182,97	-44.576,52	505.755,98	0,84	66.613,88	-90.725,15	-
8	330.165,15	82.541,29	1.000,00	81.541,29	36.964,77	587.297,27	0,82	66.924,73	-25.432,73	-
9	330.165,15	84.899,61	1.000,00	83.899,61	120.864,38	671.196,88	0,80	67.180,80	40.109,51	-
10	330.165,15	87.257,93	1.000,00	86.257,93	207.122,31	757.454,81	0,78	67.384,56	105.850,55	-
11	330.165,15	89.616,26	1.000,00	88.616,26	295.738,57	846.071,07	0,76	67.538,42	171.741,69	-
12	330.165,15	91.974,58	1.000,00	90.974,58	386.713,15	937.045,65	0,74	67.644,68	237.736,50	-
13	330.165,15	94.332,90	1.000,00	93.332,90	480.046,05	1.030.378,55	0,73	67.705,59	303.790,73	-
14	330.165,15	96.691,22	1.000,00	95.691,22	575.737,27	1.126.069,77	0,71	67.723,28	369.862,22	-
15	330.165,15	99.049,55	1.000,00	98.049,55	673.786,81	1.224.119,31	0,69	67.699,83	435.910,84	1%
16	330.165,15	101.407,87	1.000,00	100.407,87	774.194,68	1.324.527,18	0,67	67.637,24	501.898,39	3%
17	330.165,15	103.766,19	1.000,00	102.766,19	876.960,87	1.427.293,37	0,66	67.537,43	567.788,57	5%
18	330.165,15	106.124,51	1.000,00	105.124,51	982.085,38	1.532.417,88	0,64	67.402,25	633.546,87	7%
19	330.165,15	108.482,84	1.000,00	107.482,84	1.089.568,22	1.639.900,72	0,63	67.233,49	699.140,52	8%
20	330.165,15	110.841,16	1.000,00	109.841,16	1.199.409,38	1.749.741,88	0,61	67.032,87	764.538,44	9%
21	330.165,15	113.199,48	1.000,00	112.199,48	1.311.608,86	1.861.941,36	0,60	66.802,03	829.711,15	10%
22	330.165,15	115.557,80	1.000,00	114.557,80	1.426.166,66	1.976.499,16	0,58	66.542,58	894.630,74	10%
23	330.165,15	117.916,13	1.000,00	116.916,13	1.543.082,78	2.093.415,28	0,57	66.256,05	959.270,79	11%
24	330.165,15	120.274,45	1.000,00	119.274,45	1.662.357,23	2.212.689,73	0,55	65.943,90	1.023.606,30	11%
25	330.165,15	122.632,77	1.000,00	121.632,77	1.783.990,00	2.334.322,50	0,54	65.607,57	1.087.613,69	12%

evolucion precio KW	
2023	0,2
2024	0,207142857
2025	0,214285714
2026	0,221428571
2027	0,228571429
2028	0,235714286
2029	0,242857143
2030	0,25
2031	0,257142857
2032	0,264285714
2033	0,271428571
2034	0,278571429
2035	0,285714286
2036	0,292857143
2037	0,3
2038	0,307142857
2039	0,314285714
2040	0,321428571
2041	0,328571429
2042	0,335714286
2043	0,342857143
2044	0,35
2045	0,357142857
2046	0,364285714
2047	0,371428571

REFERENCIAS

- Champagnie, B., Geatjens, A., & Simonis, A. (12 de Abril de 2013). Highway Wind Turbines. *A.B.S. Thesis*. Florida International University.
- Chen, A. (31 de Marzo de 2014). Metro explores new green energy options: placing a wind turbine in a subway tunnel. *The Source. Metro*, págs. <https://thesource.metro.net/2014/03/31/metro-explores-new-green-energy/>.
- Chi-Ji, L., Yew Khoy, C., & Chia-Wei, L. (2008). A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system. *Applied Thermal Engineering* 28, 372–379.
- Comisión Europea. (2022). *Comisión Europea (C.E.)*. Obtenido de <https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/>
- Cross, D., Hughes, B., Ingham, D., & Ma, L. (2017). Enhancing the piston effect in underground railway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 61, 71-81.
- Devecitech. (2022). *Devecitech*. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://devecitech.com/>
- EIA. (2022). *International Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iea.org/>
- Energía MITERD. (2022). *Portal de enería del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de <https://energia.gob.es/>
- Galai Dol, L., Cardassi, J., & de Bernardinis, A. (2018). Wind turbine for underground subway stations. *PCIM Europe Conference Proceedings 225809*, (págs. 1273–1278).
- Iberdrola. (2022). *Iberdrola. Sostenibilidad*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>
- Ingenieros.es. (10 de Marzo de 2014). Estudian el aprovechamiento eólico de túneles de carretera. *Ingenieros.es*, págs. <https://www.ingenieros.es/noticias/ver/estudian-el-aprovechamiento-eolico-de-tuneles-de-carretera/4420>.
- IRENA. (2022). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de <https://irena.org/>
- Jialu, J., Huixingi, L., Xinyi, L., & Luoxin, F. (2022). A review of piston effect and energy saving of subway environmental control system. *E3S Web of Conferences* 356, 02028. EDP Sciences.
- Kardoudi, O. (21 de Octubre de 2021). La turbina eólica de pared. El nuevo invento para no tener que pagar a las eléctricas. *El confidencial*, págs. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-10-20/molino-viento-casas-autopistas-fuentes-energia_3309214/.
- Kim, J., & Kim, K. (2007). Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway. *Tunnelling and Underground Space Technology* 22, 166-172.
- Kumar, A., Karandikar, P., & Chavan, D. (2015). Generating and saving energy by installing wind turbines along the railway tracks. *ICESA 2015*, (págs. 25-27).
- Libro de la Energía 2019. (2022). *Libro de la Energía 2019. MITERD*. Madrid: Solana e hijos, A.G., S.A.U.
- López González, M., Galdo Vega, M., Fernandez Oro, J., & Blanco Marigorta, E. (2014). Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology* 40, 22-37.
- Madrid Subterra. (29 de Marzo de 2016). Un proyecto premiado por Madrid Subterra colabora con Metro de Madrid. *Madrid Subterra*, págs. <https://www.madridsubterra.es/un-proyecto-premiado-por-madrid-subterra-colabora-con-metro-de-madrid/>.

- Metro Madrid. (2022). *Portal de Transparencia de Metro Madrid*. Obtenido de <https://www.metromadrid.es/es/agenda-y-transparencia>
- MIBGAS. (2022). *Mercado Ibérico del Gas*. Obtenido de <https://www.mibgas.es/es>
- MITECO. (2022). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/>
- Neoenergía. (2022). *Neoenergía. Historia de la energía eólica*. Obtenido de <https://www.neoenergia.com/es-es/sala-de-comunicacion/noticias/PublishingImages/Historia-de-la-energia-eolica.pdf>
- Normativa ADIF. (2000). *Descargas de la Norma Técnica de ADIF*. Obtenido de <http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf>
- Normativa MITERD. (2022). *Portal de energía del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Normativa*. Obtenido de <https://energia.gob.es/renovables/Paginas/normativa.aspx>
- OMIE. (2022). *Operador del Mercado Ibérico de Energía*. Obtenido de <https://www.omie.es/es>
- Pang, S., Fan, L., Liu, J., Xie, J., Sun, Y., Cui, N., . . . Zheng, B. (s.f.). A Review of the Piston Effect in Subway Stations. *Advances in Mechanical Engineering* 5, 950205–.
- REE. (2022). *Informes del Sistema de Red Eléctrica*. Obtenido de <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico>
- Repsol. (2022). *Repsol. Apartado de Energías Renovables*. Obtenido de <https://www.repsol.com/es/conocenos/que-hacemos/desarrollo-energias-renovables/energia-eolica/>
- Sandru, M. (6 de Septiembre de 2010). Wind Tunnel Concept Converts Wind Energy Generated by Subway Trains into Electricity. *The Green Optimistic*, págs. <https://www.greenoptimistic.com/wind-tunnel-concept-20100906/>.
- SmartTwister. (Noviembre de 2022). Obtenido de <https://www.smarttwister.org/>
- TESUP. (Noviembre de 2022). Obtenido de <https://www.tesup.es/>
- Wanfu, L., Peng, L., Wuqin, Q., Shichang, L., & Haihao, C. (2019). Study on Airflow Characteristics of Train Induced by Piston Effect in Subway Tunnel. *Conference Series: Earth and Environmental Science* 237 032120. IOP Publishing Ltd.
- WindSide. (Noviembre de 2022). Obtenido de <https://windside.com/>
- Yañez Coto, D. (2015). Análisis del Efecto Pistón en la ventilación de túneles ferroviarios. *TFM*. Departamento de Ingeniería. Universidad de Oviedo.

