



UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO
Escuela de Ingeniería de Bilbao
Estudio de viabilidad de sistema de aprovechamiento eólico urbano

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

GRADO EN INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE SISTEMA DE APROVECHAMIENTO EÓLICO URBANO

Alumno: García García, Sergio

Director: Charray González, Carlos

Curso: 2018/2019

Fecha: Bilbao, 19 de junio de 2019.



UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO
Escuela de Ingeniería de Bilbao
Estudio de viabilidad de sistema de aprovechamiento eólico urbano

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO



ABSTRACT

The main purpose of this final degree project is to analyse the feasibility of an urban wind power system and to evaluate different alternatives of small-wind technology for the generation of electricity in the city, taking into account the current moment of this type of energy and the most recent developments in this field.

On the one hand, this project was born of the desire of a "greener" and more sustainable city of Bilbao, in addition to the attraction of researching an emerging technology like this one. On the other hand, the importance of betting on renewable energies as the unique source of energy in the early future, while the city gains a modern image and a relevant social awareness.

KEYWORDS

Energy, wind, city, feasibility, wind-turbine generator, self-consumption, renewable.

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es estudiar la viabilidad de un sistema de aprovechamiento eólico en la ciudad. Además, evaluar las diferentes tecnologías minieólicas para la generación de energía, teniendo en cuenta el momento actual de este tipo de energía y los desarrollos más recientes en este campo.

Por un lado, este proyecto nació del deseo de una ciudad más "verde" y sostenible, además del interés por la investigación y el conocimiento sobre una tecnología emergente como ésta. Por otro lado, la importancia de apostar por las energías renovables como la única fuente de energía en el futuro, al mismo tiempo que Bilbao adquiere una imagen más vanguardista y una relevante concienciación social.

PALABRAS CLAVE

Energía, viento, ciudad, viabilidad, aerogenerador, autoconsumo, renovable.

LABURPENA

Gradu Amaierako Lan honen helburua hiri batean energia eolikoa aprobetxatzearen bideragarritasuna ikertzea da. Gainera, energia sortzeko hainbat teknologia minieolikoa ebaluatzea helburutzat hartu da, energia mota horren momentua eta eremu horren azken garapenak kontuan hartzen.

Alde batetik, proiektu honek hiri “berdeago” eta iraunkor baten nahiaz sortu zen, sortzen ari den teknologia honen ikerketak eta ezaguerak daukan interesaz beste. Beste aldetik, energia berriztagarriengan etorkizunaren energia iturri bezala apustu egitearen garrantziaz, Bilbo hiriak gizartearen kontzientziario eta sentsibilizazioan irudi modernoago eta garrantzitsuagoa hartzen duen eran.

GILTZA HITZAK

Energia, haizea, hiria, bideragarritasuna, aerosorgailua, autokontsumo, berriztagarri.



ÍNDICE DEL TRABAJO

1. Introducción	1
1.1. Justificación del proyecto	2
1.2. Alcance y objetivos.....	2
2. Estado del arte – Contexto actual	4
2.1. Las energías renovables	4
2.1.1. Energías alternativas o renovables	4
2.1.2. Tipos de energías renovables	4
2.1.3. Las energías alternativas y el desarrollo sostenible	5
2.1.4. Ventajas y desventajas del desarrollo sostenible	6
2.2. La energía eólica y minieólica	7
2.2.1. La energía eólica	7
2.2.2. Ventajas y desventajas de la energía eólica	7
2.2.3. La generación eólica.....	8
2.2.4. La tecnología minieólica.....	9
2.2.5. La generación de energía eólica y minieólica en España en la actualidad .	10
3. Aerogeneradores	12
3.1. Definición y tipos	12
3.2. Propuesta de alternativas	16
3.2.1. Venger Wind Turbine	17
3.2.2. Wind Tree	18
3.2.3. Windspire Wind Turbine.....	20
3.2.4. QR6 Wind Turbine	21
3.2.5. Aerogenerador Aeolos-V.....	22
3.2.6. Aerogenerador Kliux Zebra	23
4. Análisis de las propuestas	25
5. Elección y justificación de la alternativa	28

6. Desarrollo del proyecto	31
6.1. Localización	31
6.2. Caracterización de las condiciones del viento	33
6.3. Cálculo de la energía generada.....	36
7. Estudio de viabilidad	39
7.1. Presupuesto	40
7.2. Planificación del proyecto (Diagrama de Gantt).....	43
7.3. Beneficios.....	44
8. Conclusiones	47
9. Referencias.....	51



ÍNDICE DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Relación existente entre los ámbitos ecológico, social y económico.	5
Ilustración 2. Microturbina fabricada por la empresa española ENEA Renovables.	11
Ilustración 3. Aerogeneradores de eje horizontal.	13
Ilustración 4. Aerogeneradores de eje vertical.	13
Ilustración 5. Diseño de aerogeneradores de eje horizontal de alta y baja potencia. ..	15
Ilustración 6. Diferentes tipos de dispositivos minieólicos de eje vertical.....	15
Ilustración 7. Instalación de turbinas Venger Wind en el tejado de un edificio.....	17
Ilustración 8. Turbina del Wind Tree, denominada Aeroleaf.	18
Ilustración 9. Medidas del Wind Tree.	19
Ilustración 10. Wind Tree en el ámbito urbano.	20
Ilustración 11. Aerogenerador Windspire en el ámbito rural.	20
Ilustración 12. Aerogenerador QR6.....	21
Ilustración 13. Aerogenerador Aeolos, modelo de eje vertical.	22
Ilustración 14. Aerogenerador de Kliux Energies, modelo Zebra.....	24
Ilustración 15. Modelos de Kliux Energies instalados en el ámbito urbano y rural.	24
Ilustración 16. Wind Tree instalado en un entorno urbano.	28
Ilustración 17. Gráfica que relaciona las revoluciones por minuto y la velocidad del viento (velocidad de arranque).....	30
Ilustración 18. Esquema del lugar de emplazamiento de los aerogeneradores.	31
Ilustración 19. Área general de la ciudad donde se instalarán los Wind Tree.	32
Ilustración 20. Localización concreta de la instalación.	32
Ilustración 21. Gráfico que relaciona el valor de la función con el parámetro k.	34
Ilustración 22. Curva de potencia del Aeroleaf que relaciona la potencia (W) con la velocidad del viento (m/s).	37
Ilustración 23. Medida del lugar de la instalación.	39
Ilustración 24. Tarifas de Iberdrola del kWh para una empresa/negocio.	45
Ilustración 25. Relación entre la energía generada por un Wind Tree y la contaminación evitada.	46
Ilustración 26. Recreación de los Wind Tree instalados en lugar de emplazamiento descrito.	47

ÍNDICE DE LAS TABLAS

Tabla 1. Clasificación de aerogeneradores en función de su potencia.....	8
Tabla 2. Principales diferencias de la energía eólica y minieólica.	12
Tabla 3. Clasificación habitual de los aerogeneradores.	13
Tabla 4. Comparativa de aerogeneradores tipo Darrieus y tipo Savonius.....	16
Tabla 5. Alternativas minieólicas a desarrollar en el proyecto.	16
Tabla 6. Potencia instalada y precio de cada propuesta minieólica.....	25
Tabla 7. Matriz donde se evalúan los 5 criterios ponderados.....	26
Tabla 8. Histograma de velocidades para velocidades de 1 a 25 m/s en un año.	35
Tabla 9. Energía generada según la velocidad del viento en un año para un aerogenerador.	38
Tabla 10. Coste CAPEX de un aerogenerador.....	41
Tabla 11. Coste OPEX de un aerogenerador.....	41
Tabla 12. Variación anual del OPEX debido a la inflación.....	42
Tabla 13. Presupuesto de la instalación de los 10 aerogeneradores Wind Tree.	42
Tabla 14. Consumo dividido por meses del Edificio I de la EIB en el curso 17/18.....	49

1. Introducción

Este trabajo tiene por objetivo valorar diferentes alternativas que aprovechen la energía del viento para la generación de energía eléctrica en el ámbito urbano, teniendo en cuenta las tecnologías actuales y los desarrollos más recientes en este campo.

Debido a las obligaciones impuestas por la Unión Europea y demás acuerdos ratificados por los países occidentales, actualmente existe la obligación de seguir avanzando en la búsqueda de nuevas fuentes de energía que cumplan con el binomio “economía – ecología”. En este aspecto, la energía eólica se ha presentado como una buena candidata a incorporarse al mix energético nacional creando una fuerte industria auxiliar en torno a este tipo de energía que ha permitido ampliar los conocimientos en campos de ingeniería estructural y eólica. Bajo esta misma perspectiva, y dando un paso más, aparece la conocida como *energía minieólica*, cuya principal diferencia radica en que su generación y aprovechamiento se dan en menor escala y mayoritariamente en las zonas urbanas.

Esta relativamente reciente alternativa nace del deseo de generar energía en la propia ciudad, y no únicamente en entornos rurales alejados de los núcleos urbanos, y también de incentivar el autoconsumo tanto en hogares como en infraestructuras públicas que puedan ser abordadas con esta tecnología. Es posible aprovechar el viento en las ciudades, y aunque por ahora es una tecnología emergente, se ve necesario instalar más estaciones de medida para conocer mejor el potencial de uso del viento. Por otro lado, es innegable que este sector tiene un gran potencial por explotar. Poco a poco se irá viendo avanzar a esta variante de la energía eólica, hasta que un día se considerará como una alternativa más como lo son actualmente los grandes parques de energía hidráulica o las vastas instalaciones de paneles fotovoltaicos.

Por otro lado, y unido a lo anterior, actualmente se persigue la idea de un desarrollo de la vida humana más sostenible. Las instalaciones de generación minieólica a nivel urbano son una forma de, por un lado, impulsar las energías renovables en la ciudad y, a su vez, de reducir el gasto de energía procedente de la quema de combustibles fósiles; y, por otro lado, de dar una imagen limpia de la ciudad y de generar una concienciación de desarrollo sostenible en las personas.

1.1. Justificación del proyecto

La razón de ser de este trabajo tiene que ver directamente con las materias que trata. Desde un primer momento me ha llamado la atención el mundo de la energía, tanto las renovables como las no renovables, sus diferencias y características, y las múltiples formas que hay para trabajar con la energía, generarla y entenderla como trabajo o como calor. De ahí que me pareciese interesante la eficiencia energética, cómo conseguir que los sistemas en los que vivimos sean eficientes, que no pierdan energía en forma de calor, que no se desaproveche energía en forma de trabajo por un mal diseño del aparato, y de una forma más global, cómo se puede conseguir un entorno en el que nos desarrollemos de un modo más “verde”, más sostenible, principalmente en lo que se refiere a la energía.

Esto ligado a mi interés por la economía, la relación entre coste y beneficio, o el riesgo que supone el implantar una alternativa nueva y su rentabilidad a corto y largo plazo, tienen que ver directamente con este trabajo: cómo de viable es implantar un sistema de aprovechamiento energético a nivel urbano, desde la consideración de propuestas para cumplir el cometido, pasando por un análisis de rentabilidad para cada una, hasta la elección definitiva de la mejor valorada desde un enfoque tanto cuantitativo como cualitativo.

Todo esto engloba este proyecto, son materias que me resultan interesantes, que engloban un poco lo trabajado durante el grado, y al mismo tiempo, son temas de actualidad, lo cual lo hacen aún más atractivo y adecuado para el aprendizaje y su desarrollo.

1.2. Alcance y objetivos

En cuanto al alcance del proyecto, éste abarca el estudio e investigación de un sistema de aprovechamiento minieólico en ciudad, la valoración de alternativas que respondan a esta propuesta en términos de viabilidad financiera, eficiencia energética y posibilidad de emplazamiento, y un posterior análisis y evaluación de la alternativa elegida y las características que le acompañan en un caso real.

Ligados con la justificación del proyecto, los objetivos que se persiguen son los siguientes:

- Conocer e investigar acerca de las posibilidades que ofrece la tecnología minieólica.
- Promover y hacer visible el consumo de energía de fuentes renovables y generar una importante sensibilización a nivel social de este tipo de energía.
- Analizar la repercusión a nivel económico que tiene la implantación de un sistema de generación minieólico.

- Valorar cómo se podría integrar un sistema de aprovechamiento minieólico en la ciudad de Bilbao.
- Impulsar una imagen más “verde” y sostenible de la ciudad y de los edificios y zonas donde se ubique la instalación.

2. Estado del arte – Contexto actual

En primer lugar, se llevará a cabo una exposición sobre lo que suponen las energías renovables y el desarrollo sostenible para contextualizar el trabajo, y como parte del proyecto, se hará mayor hincapié en la energía minieólica.

2.1. Las energías renovables

2.1.1. Energías alternativas o renovables

Una *energía alternativa*, o concretamente una fuente de energía alternativa es aquella que puede suplir a las energías o fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de ser renovada.

Asimismo, se denomina como *energía renovable* a la que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios limpios y naturales.

2.1.2. Tipos de energías renovables

Las fuentes renovables de energía pueden dividirse en dos categorías bien diferenciadas: no contaminantes o limpias, y contaminantes.

Entre las no contaminantes o limpias, se encuentran las siguientes:

- Energía solar (el Sol).
- Energía eólica (el viento).
- Energía hidráulica (los ríos y corrientes de agua dulce).
- Energía mareomotriz (los mares y océanos).
- Energía geotérmica (el calor de la Tierra).
- Energía undimotriz u olamotriz (las olas del mar).
- Energía azul (la llegada de masas de agua dulce a masas de agua salada).

Las contaminantes se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa, y se pueden utilizar directamente como combustible (madera u otra materia vegetal sólida), o bien transformarlos, mediante procesos de fermentación orgánica, reacciones de transesterificación, etc. en combustibles como el bioetanol, el biogás o el biodiesel.

Las energías de fuentes renovables contaminantes presentan, en parte, el mismo problema que la energía producida por combustibles fósiles: en la combustión emiten dióxido de carbono, el cual es un gas de efecto invernadero, y que a menudo son más contaminantes, dado que la combustión no es tan limpia y se emiten hollines

y otras partículas sólidas. Sin embargo, se encuadran dentro de las energías renovables porque mientras que puedan cultivarse los vegetales que las producen, no se agotarán.

2.1.3. Las energías alternativas y el desarrollo sostenible

El debate entre la energía alternativa frente a la convencional no es una mera clasificación de las fuentes de energía, sino que representa un cambio que necesariamente tendrá que producirse durante este siglo. Es interesante destacar que las energías alternativas, a pesar de ser renovables, no son infinitas y como cualquier otro recurso natural, tendrán un límite de explotación.

Por lo tanto, incluso suponiendo que se pueda llevar a cabo la transición a estas nuevas energías continuada y gradualmente, no parece posible mantener el modelo económico actual basado en el crecimiento continuo. Es por ello que surge el concepto del **desarrollo sostenible**.

Este término, formalizado por primera vez en el documento conocido como *Informe Brundtland* (1987), fruto de los trabajos de la Comisión Mundial del Medio Ambiente, creada por la Asamblea de las Naciones Unidas en 1983, habla de “satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las futuras para atender sus propias necesidades.”



Ilustración 1. Relación existente entre los ámbitos ecológico, social y económico.

El ámbito del desarrollo sostenible puede diferenciarse conceptualmente en tres partes: ambiental, económica y social. Se considera el aspecto social por la relación entre el bienestar social con el medio ambiente y el desarrollo económico.

El modelo del desarrollo sostenible de la energía eléctrica contará con las siguientes bases:

- El uso de fuentes de energía renovable, en sustitución de las fuentes fósiles.
- El uso de fuentes limpias, frente a la combustión y la fisión nuclear.
- El fomento del autoconsumo frente a la explotación extensiva, evitando en la medida de lo posible la construcción de grandes infraestructuras de generación y distribución de energía eléctrica.
- La disminución de la demanda energética mediante la mejora del rendimiento de los dispositivos eléctricos, como electrodomésticos o lámparas.
- La reducción o eliminación del consumo energético innecesario. No consiste sólo en consumir de forma más eficiente, sino en consumir menos, es decir, desarrollar una conciencia y cultura del ahorro energético y condena del despilfarro.

2.1.4. Ventajas y desventajas del desarrollo sostenible

A continuación, se enuncian algunas de las ventajas e inconvenientes que presenta el desarrollo sostenible en la generación eléctrica:

- El Sol es una fuente de energía inagotable. Puede abastecer estas fuentes de energía durante los próximos cuatro mil millones de años.
- No se emiten gases de efecto invernadero ni otras emisiones, contrariamente a lo que ocurre con los combustibles, tanto fósiles como renovables.
- Se pueden generar problemas ecológicos particulares y localizados, como, por ejemplo, los aerogeneradores peligrosos para las aves, las centrales hidroeléctricas que alteran el caudal de los ríos, la integración con el paisaje, etcétera.
- Distribución geográfica y naturaleza difusa de las energías renovables. Una instalación fotovoltaica en una vivienda ubicada en la zona nublada de Europa deberá instalar más metros cuadrados de paneles fotovoltaicos que otra en el sur con el mismo consumo eléctrico.
- Irregularidad en la producción de energía eléctrica sostenible. Un consumo continuado en el tiempo exige medios de almacenamiento, como el uso de bombas en sistemas hidráulicos, baterías, futuras pilas de combustible de hidrógeno, etcétera).
- Gestión de las redes eléctricas. Si la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables se generalizase, los sistemas de distribución y transformación deberían ser completamente revisados. Se debería llevar a cabo una gestión "activa" del sistema para garantizar el equilibrio local del sistema.

2.2. La energía eólica y minieólica

2.2.1. La energía eólica

La energía eólica puede ser considerada como un derivado de la energía solar, ya que alrededor del 2% se transforma en eólica. El planeta Tierra está expuesto al calor del Sol, pero no es calentado de manera uniforme debido a su forma esférica.

Esta diferencia térmica produce una transferencia de energía de los puntos más calientes a los más fríos. Dicha transmisión es infinita, y es la razón por la cual se genera el viento, es decir, aire atmosférico en movimiento con masa y con energía cinética.

Una parte de esta energía es la que se transforma, por medio de turbinas de viento, en energía eléctrica. De hecho, actualmente se cuenta con suficiente tecnología madura y en evolución permanente que permite obtener energía eléctrica aprovechando al máximo el viento.

2.2.2. Ventajas y desventajas de la energía eólica

La energía eólica es una energía renovable, no emite gases contaminantes, autóctona, distribuida, gratuita y que ha demostrado su viabilidad técnica y económica. A su vez, compete con otras fuentes de energía, generando electricidad con un bajo impacto medioambiental.

Por otro lado, cabe destacar que se trata de una fuente de energía aleatoria y variable: no todos los lugares son adecuados para una explotación técnica y económicamente viable de la energía eólica.

Además, la potencia generada cae rápidamente cuando la velocidad del viento es menor que los 3 m/s, lo cual exige una correcta estimación del recurso eólico en la zona donde se pretenda instalar una planta de generación eólica.

Su explotación y utilización no implican riesgos ambientales severos como, por ejemplo, el nivel de ruido, el impacto visual, la ocupación del suelo, o el riesgo sobre las aves. De hecho, favorece la reducción de emisiones de CO₂.

El periodo de recuperación energético es breve: en unos pocos meses de explotación se recupera la energía empleada en el transporte, construcción y montaje del parque eólico correspondiente.

A la hora de incorporar la producción eólica a la red de distribución, dada su variabilidad, deben realizarse previsiones de producción a muy corto plazo (entre 24 y 48 horas) para una eficaz y apropiada gestión en la cadena de generación, transporte y distribución de la energía eléctrica.

2.2.3. La generación eólica

Como se ha adelantado, el viento es una masa de aire en movimiento y, como tal, posee energía cinética. Las turbinas eólicas, también denominadas aerogeneradores, permiten emplear dicha energía para producir electricidad al hacer girar el rotor que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica. Al mismo tiempo, empleando un generador eléctrico se consigue transformar esta energía procedente del rotor en electricidad.

La cantidad de energía que puede generar una turbina eólica, además de la propia potencia del aerogenerador, dependerá de las características del viento en el lugar del emplazamiento de la misma, por lo que será necesario conocer el potencial eólico en dicho lugar.

Los aerogeneradores eléctricos se pueden clasificar en función de su potencia, lo que determinará, asimismo, el uso para el que han sido diseñados.

Denominación	Potencia	Utilización
Micro	1 kW <	Embarcaciones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación, etc.
Mini	1 – 10 kW	Granjas, viviendas aisladas (sistemas EO-FV), bombeo, etc.
Baja	10 – 100 kW	Comunidades de vecinos, PYME's (sistemas EO- Diésel), tratamientos de aguas, etc.
Media	100 – 1000 kW	Parques eólicos (en terrenos montañosos o complejos)
Alta	1000 – 10000 kW	Parques eólicos (en terrenos llanos o mar adentro)
Muy alta	> 10000 kW	En fase de investigación y desarrollo, nuevos diseños y materiales

Tabla 1. Clasificación de aerogeneradores en función de su potencia.

Al mismo tiempo, a la hora de hablar de generación de energía a partir del movimiento del viento se deben distinguir, fundamentalmente, dos segmentos de producción.

Por un lado, la generación eólica de gran potencia, conectada a las principales redes de distribución eléctrica, que contribuye de manera creciente a la generación masiva de electricidad mediante la concentración de grandes turbinas en los parques eólicos.

Por otro lado, las instalaciones de tecnología minieólica, con aerogeneradores de media y baja potencia y otras posibilidades que cuentan con menor fama, destinadas tanto para instalaciones aisladas como para la generación distribuida conectada a la red eléctrica.

2.2.4. La tecnología minieólica

Se conoce como energía minieólica a la generación de electricidad a pequeña escala gracias a la energía del viento, y cuenta con las siguientes características propias:

- Generación de energía próxima a los puntos de consumo, reduciendo de tal forma las pérdidas por transporte (generación distribuida).
- Promotora del autoconsumo, presenta una gran versatilidad de aplicaciones y posibilidades de ubicación.
- Suministro de electricidad en lugares aislados y alejados de la red eléctrica, como zonas rurales.
- Posibilidad de integración en sistemas híbridos, principalmente de tecnología fotovoltaica.
- Funcionamiento con vientos moderados, sin requerir complejos estudios de viabilidad.
- Moderados costes de instalación, operación y mantenimiento.
- Reducido impacto ambiental.
- Integración en espacios urbanos y humanizados.

Históricamente, los aerogeneradores de baja potencia se han venido utilizando para el autoconsumo en instalaciones aisladas de la red, habitualmente conectadas a baterías, para el suministro de energía en viviendas o edificaciones alejadas de la red eléctrica, así como para otras instalaciones como, por ejemplo, repetidores de radio o de telefonía móvil.

En este tipo de instalaciones aisladas se pueden distinguir, asimismo, sistemas individuales (de una sola vivienda), de concentración (para toda una localidad aislada) y, por último, sistemas híbridos (eólicos – fotovoltaicos) que mejoran los sistemas aislados y se obtiene una mayor rentabilidad con ellos.

Sin embargo, debido al desarrollo que están experimentando los aerogeneradores de baja potencia en los últimos años, una de las aplicaciones con mayor potencial de crecimiento es la instalación de sistemas minieólicos conectados a la red eléctrica, siguiendo de esta forma estrategias de microgeneración distribuida.

En este caso, su objetivo es reducir la demanda de energía a nivel urbano, principalmente para infraestructuras de carácter público, operando de esta forma como una vía activa de ahorro de energía directamente en el punto de consumo. Si la instalación minieólica produce energía en exceso, se entrega el excedente a la red eléctrica y, si se genera menos de la requerida, se toma de la red.

2.2.5. La generación de energía eólica y minieólica en España en la actualidad

El viento es la fuente de energía renovable que más kWh produce anualmente en España, con 23 GW de potencia eólica instalada que cubre el 18% de la energía consumida en el país. Además, esta tecnología está llamada a liderar, junto con la fotovoltaica, el crecimiento del parque eléctrico nacional en las próximas décadas.

En España existe un importante tejido empresarial consolidado en el sector eólico con gran reconocimiento a nivel internacional, y que da empleo a más de 22.000 personas repartidas entre empresas relacionadas directa o indirectamente con el sector y en 195 centros de fabricación en 16 de las 17 comunidades autónomas. La Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA) está formada por fabricantes, promotores y productores con el fin de mejorar la situación de la minieólica a nivel nacional.

Los productores nacionales del sector, de gran calidad, sirven tanto para la integración en viviendas como para la conexión a la red. No obstante, debido a la falta de regulación específica, la mayoría de instalaciones minieólicas existentes en España son aisladas para el autoconsumo, tanto para viviendas como para sistemas de radio, móvil, vigilancia en carreteras o contraincendios.

A pesar de haber demostrado que ofrece un gran potencial durante la evolución de esta tecnología desde sus inicios, su implantación todavía no es la suficiente y podría ser instalada tanto en el sector primario como en el industrial, el de servicios y el residencial, con los mecanismos adecuados, especialmente los legislativos. Al fin y al cabo, se trata de acercar la generación de energía al punto de consumo, con las numerosas ventajas que esto ofrece al usuario y al colectivo en general.

Actualmente, la tecnología minieólica se encuentra dentro del régimen especial (Real Decreto 661/2007) como la gran eólica. La falta de diferenciación entre ambas perjudica enormemente el desarrollo del sector minieólico.

Para conseguir el despegue definitivo de esta alternativa de generación de energía será necesaria una diferenciación regulatoria clara entre la eólica de gran potencia y la minieólica, un aumento de las facilidades para su tramitación administrativa, y un sistema de primas e incentivos específicos que tenga en cuenta las ventajas de esta tecnología sobre la de gran potencia.

La APPA se ha convertido en la asociación constituida por productores, promotores y fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia en España. Existe una gran variedad de diseños y productos, desde aerogeneradores de hasta 10 kW de eje horizontal, hasta equipos de eje vertical con umbrales de potencia de hasta 100 kW.



Ilustración 2. Microturbina fabricada por la empresa española ENEA Renovables.

La tecnología permite avanzar y las empresas en España están bien posicionadas en el mercado, trabajando en avances y mejoras de cara a una efectiva conexión a la red.

El PER, o Plan de Energías Renovables, 2011-2020 plantea una evolución de la potencia minieólica instalada desde los 5 MW en 2011 hasta 50 MW anuales en 2015 y durante los cinco años posteriores, acumulando cerca de 300 MW en el periodo comprendido entre 2011 y 2020. El aumento progresivo del precio de los combustibles potenciaría su rentabilidad, facilitando su expansión en el mercado nacional, así como el cambio climático y el aumento continuado de la demanda eléctrica.

Existen países que apuesta por la tecnología eólica de baja potencia como China, con 450.000 unidades y 166 MW, o Estados Unidos, con 144.000 unidades y 179 MW de potencia instalados. Otros países como Reino Unido, Canadá, Alemania, Polonia, Japón o España les siguen a cierta distancia, con una potencia de entre 5 y 50 MW y entre 2.000 y 21.000 unidades instaladas. Para 2020, la WWEA (World Wind Energy Association) prevé que se habrá instalado una potencia total de 3.800 MW a nivel mundial, cifra que representa 10 veces la potencia total instalada en 2010.

A nivel político y legal, únicamente 10 de los 40 países donde se encuentran las empresas de tecnología minieólica cuentan con políticas de apoyo a esta nueva forma de generación de energía. Al mismo tiempo, los estadounidenses cuentan con más de 30 tipos de medidas diferentes a favor de las energías renovables, así como planes de ayuda financiera para proyectos de minieólica. Países donde prevalecen las instalaciones aisladas o las microrredes ofrecen un gran potencial de desarrollo, mientras que en países desarrollados su implantación depende del apoyo de la administración central, desde normativas hasta planes de financiación.



3. Aerogeneradores

En este apartado se realizará, por un lado, una definición general de los aerogeneradores y se analizará qué tipos y alternativas diferentes se pueden encontrar en la actualidad. Por otro lado, se presentarán y desarrollarán brevemente las 6 alternativas que se tendrán en cuenta para el posterior análisis ponderado según diversos criterios de interés.

3.1. Definición y tipos

Tanto la energía eólica como la minieólica emplean el mismo tipo de tecnología, ya que ambas se basan en los mismos principios. La diferencia entre ellas radica en lo que respecta al tamaño y potencia de los aerogeneradores.

	Energía minieólica	Energía eólica
Altura de los aerogeneradores	Entre 2 y 20 metros	Hasta 120 metros
Diámetro de las aspas	3 metros	90 metros
Potencia	< 10 kW	Hasta 3 MW
Proximidad al lugar de consumo	Sí	No

Tabla 2. Principales diferencias de la energía eólica y minieólica.

Los aerogeneradores se clasifican mediante diferentes criterios, puesto que no existe una clasificación única. Pueden clasificarse por rango de potencia, tamaño, tecnologías, etc.

Potencia	<ul style="list-style-type: none">- Microturbinas (< 3 kW)- Aerogeneradores pequeños (< 50 kW)- Aerogeneradores grandes (< 850 kW)- Aerogeneradores multimegavatios (de 1 a 3 MW)
Número de palas	<ul style="list-style-type: none">- Monopala- Bipala- Tripala- Multipala

Velocidad del rotor	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad constante - Velocidad variable
Eje de rotación	<ul style="list-style-type: none"> - Aerogenerador de eje horizontal - Aerogenerador de eje vertical

Tabla 3. Clasificación habitual de los aerogeneradores.

Tal y como se indica en la tabla superior, los aerogeneradores se pueden clasificar por su eje. En las siguientes imágenes se muestran diferentes tipos de aerogeneradores según la disposición de su eje de rotación:



Ilustración 3. Aerogeneradores de eje horizontal.



Ilustración 4. Aerogeneradores de eje vertical.

En los aerogeneradores de eje horizontal, el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento, y en los de eje vertical es perpendicular a la superficie del terreno y a la dirección del viento.

Los aerogeneradores de eje vertical presentan ciertas ventajas frente a los aerogeneradores de eje horizontal:

- Su simetría vertical hace que no sean necesarios sistemas de orientación que alineen el eje de la turbina y la dirección del viento.
- El mantenimiento es más sencillo.
- No son necesarios mecanismos de cambio de paso.
- Sus instalaciones son más económicas.
- Producen menos ruido y vibraciones que los aerogeneradores de eje horizontal.

Sin embargo, también presentan algunas desventajas, donde destacan la necesidad de incorporar un motor de arranque, una menor velocidad de giro, y un menor rendimiento que las máquinas de eje horizontal de la misma potencia.

El hecho de que las mejoras tecnológicas se hayan aplicado sobre los aerogeneradores de eje horizontal ha hecho que el desarrollo de los de eje vertical pase a un segundo plano. No obstante, a pequeña escala, los aerogeneradores de eje vertical son competitivos por las ventajas que se han citado anteriormente.

Por otro lado, la instalación de energía minieólica en edificios no requiere apenas de obra. Produce energía a bajas velocidades de viento, soporta velocidades de viento de hasta 200 km/h, puede producir entre un 50 y un 70 por ciento del consumo eléctrico medio de un hogar y los mini aerogeneradores urbanos son cada vez más estéticos para reducir así el impacto visual.

Existe una alternativa para edificios con una gran ocupación en planta, o para una agrupación de edificios: ésta tiene su razón de ser en que todos generan energía para todos. Por ello, algunos edificios pueden no consumir puntualmente y contribuir a la generación eléctrica mientras que otros pueden consumir sin generar. De esta forma se optimiza la producción conjunta.

En este trabajo se estudiarán únicamente aerogeneradores de eje vertical. El motivo principal es su aceptación social: los de eje horizontal son muy similares a los grandes aerogeneradores que se pueden observar en un campo eólico en zonas rurales alejadas de las grandes urbes. Asociar ese mismo concepto en la ciudad tiene un componente de impacto negativo mayor. Por el contrario, los aerogeneradores de eje vertical, al ser menos conocidos y con un diseño más estético y moderno, supondrían un paso adelante en innovación a nivel urbano y su impacto visual sería más reducido.

En las siguientes imágenes se evidencia la similitud previamente descrita de los mini aerogeneradores de eje horizontal con los gigantes generadores eléctricos que se encuentran en los parques eólicos:



Ilustración 5. Diseño de aerogeneradores de eje horizontal de alta y baja potencia.

Por otro lado, encuentro más interesante estudiar los aerogeneradores de eje vertical, no sólo por lo comentado anteriormente, sino porque hay una mayor variedad y porque son soluciones más apropiadas en ciudad, implantadas tanto en suelo urbano como en el tejado de los edificios, y éste es precisamente el objetivo de este trabajo de fin de grado. Las soluciones minieólicas de eje horizontal son más habituales en zonas alejadas de las ciudades como, por ejemplo, naves industriales, plantas de tratamiento de residuos municipales, o superficies de explotación agrícola.

Existen cuatro diseños básicos de aerogeneradores de eje vertical. Sin embargo, los dos primeros son las soluciones más habituales:

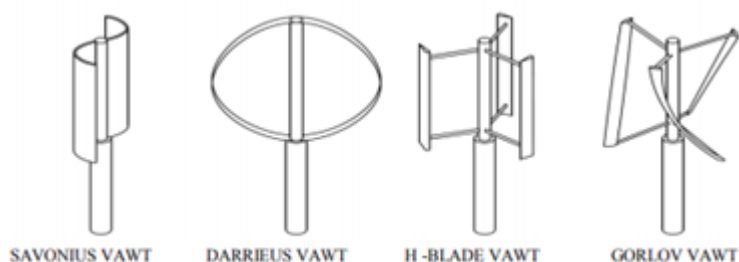


Ilustración 6. Diferentes tipos de dispositivos minieólicos de eje vertical.

En la siguiente tabla se realiza un análisis comparativo de estos dos tipos de aerogeneradores mencionados anteriormente, destacando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

	Eje vertical tipo DARRIEUS	Eje vertical tipo SAVONIUS
Ventajas		<ul style="list-style-type: none"> - Más silencioso - Más robusto
	<ul style="list-style-type: none"> - Menor sensibilidad a la turbulencia que los de eje horizontal - Orientación sencilla - Menos vibraciones 	
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor sensibilidad a la turbulencia que el tipo Savonius 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor coste económico

Tabla 4. Comparativa de aerogeneradores tipo Darrieus y tipo Savonius.

3.2. Propuesta de alternativas

En este trabajo se van a estudiar las siguientes soluciones minieólicas de eje vertical:

	Modelo de aerogenerador	Empresa	País procedente
1	Venger Wind Turbine	Venger Wind	Estados Unidos
2	Wind Tree/Aeroleaf	New World Wind	Francia
3	Windspire Wind Turbine	Windspire Energy	Estados Unidos
4	QR6 Wind Turbine	Quiet Revolution	Reino Unido
5	Aeolos-V 3kW	Aeolos Wind Turbine	Dinamarca
6	Kliux Zebra	Kliux Energies	España

Tabla 5. Alternativas minieólicas a trabajar en el proyecto.

A continuación, se analizará cada una de las propuestas previamente mencionadas:

3.2.1. Venger Wind Turbine



Ilustración 7. Instalación de turbinas Venger Wind en el tejado de un edificio.

Venger Wind es un gran fabricante de aerogeneradores de eje vertical con sede en Nevada (Estados Unidos) que produce soluciones de energía eólica para muchas grandes empresas y otros clientes de todo el mundo. Los aerogeneradores de eje vertical que produce esta compañía se suelen instalar principalmente en los tejados planos de los edificios.

Las turbinas eólicas verticales *Venger Wind* tienen un aspecto muy fino y cuidado. La compañía ha participado en numerosos proyectos, siendo la instalación más grande hasta la fecha la llevada a cabo en el edificio de Investigación Médica en Oklahoma, y que resulta ser el parque eólico de techo más grande de los Estados Unidos con 18 aerogeneradores de eje vertical tipo V2.

Especificaciones técnicas:

- Potencia instalada: 4,5 kW
- Superficie que ocupa: 6,2 m²
- Velocidad de arranque: 1,5 m/s

Características:

- Silencioso y sin vibraciones.
- Fabricado mediante un sólido perfil aerodinámico de aluminio que soporta vientos intensos y fenómenos meteorológicos anormales.
- No es peligroso contra animales voladores como, por ejemplo, pájaros o murciélagos.
- Fácil mantenimiento.
- Protección contra rayos.

3.2.2. Wind Tree

La empresa francesa *New World Wind* se inspira en la naturaleza para inventar soluciones que proporcionen un servicio eléctrico a nivel local sostenible.

Su principal producto, el *Wind Tree*, está compuesto por pequeñas turbinas de eje vertical cuya apariencia es similar a la de las hojas de un árbol. Estas terminaciones verdes se conocen como *Aeroleaf*, otro producto de la compañía.

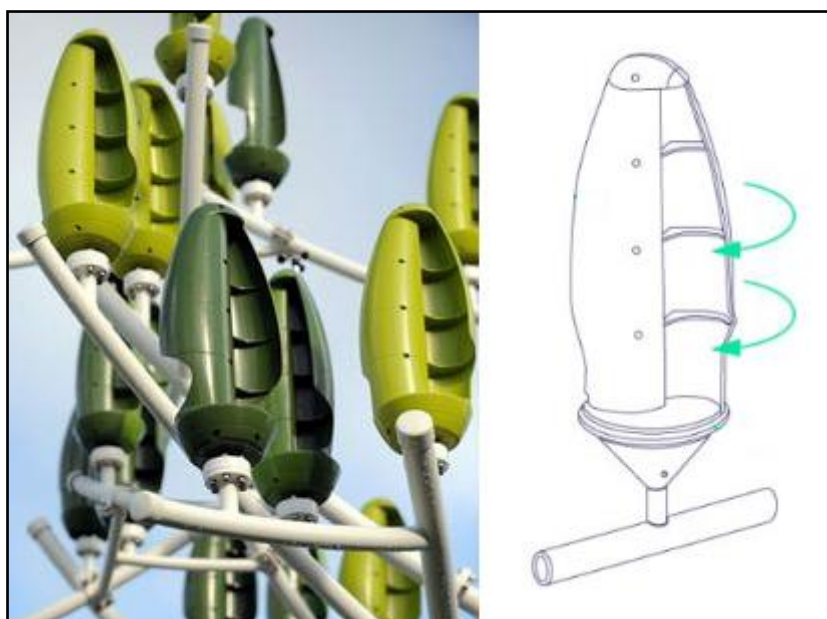


Ilustración 8. Turbina del Wind Tree, denominada Aeroleaf.

Gracias a su bajo umbral de inicio de rotación, menor que 2 m/s, las turbinas del *Wind Tree* comienzan a girar con el menor soplo de aire y producen cerca de 300 días al año (cifra muy elevada en comparación con los 125 días para otros casos). Además, gracias a su gran número de *Aeroleaf* montadas en paralelo, esta solución puede suministrar 5.400 W de potencia nominal.

Especificaciones técnicas:

- Potencia instalada: 5,4 kW.
- Superficie que ocupa: 48 m² cada árbol.
- Velocidad de arranque: menor que 2 m/s.

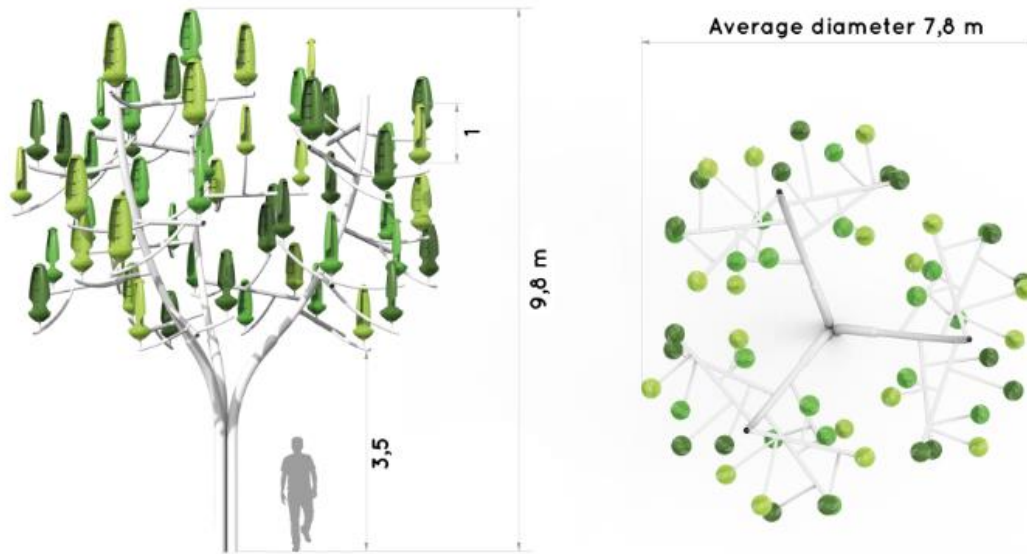


Ilustración 9. Medidas del Wind Tree.

Características:

- Tecnología innovadora para capturar los vientos más pequeños, como los fenómenos turbulentos específicos de los entornos urbanos.
- Diseño atractivo y estilizado para la ciudad como para las zonas de la periferia urbana.
- Un umbral de arranque reducido y una inercia cercana a cero para una producción de 300 días al año aproximadamente.
- Un control electrónico inteligente a bordo en cada lámina de la *Aeroleaf* para extraer en todo momento la energía máxima del viento.
- El *Wind Tree* se puede instalar cerca de cualquier zona urbana. Su instalación no produce pérdidas en la línea eléctrica y no es necesario un permiso de construcción.
- Mantenimiento sencillo.

Por su parte, la turbina *Aeroleaf*, cuenta con las siguientes características:

- Dispositivo de eje vertical que no genera ruido mecánico para una perfecta aceptabilidad.
- Un montaje mecánico y eléctrico de *plug and play* (en español, “conectar y usar”) permite cambiar los *Aeroleaf* de forma segura (baja tensión) y sin detener la producción de energía.
- Cuenta con una mecánica robusta, sin correas ni engranajes, para una mayor durabilidad.



Ilustración 10. Wind Tree en el ámbito urbano.

3.2.3. Windspire Wind Turbine

La empresa *Windspire*, con sede en Wisconsin (Estados Unidos), diseña y fabrica turbinas eólicas de eje vertical de muchos tamaños y formas. Esta compañía se especializa en sistemas de generación limpios e inteligentes, productos de confianza y de máxima eficiencia.



Ilustración 11. Aerogenerador Windspire en el ámbito rural.

Especificaciones técnicas:

- Potencia instalada: 3 kW
- Diámetro del aerogenerador: 1,70 metros
- Superficie que ocupa: 2,5 m²
- Velocidad de arranque: 4,5 m/s

Características:

- Construido en materiales metálicos.
- Aerogeneradores configurables para adaptarse a cualquier condición del viento.
- Cuenta con una garantía de 5 años.
- Diseñado para uso comercial y residencial, proporciona energía eléctrica para tanto para hogares y pequeñas empresas, como para parques y zonas peatonales.

3.2.4. QR6 Wind Turbine



Ilustración 12. Aerogenerador QR6.

Quiet Revolution (QR) es una empresa británica que diseña, desarrolla y comercializa turbinas minieólica de eje vertical. Su principal producto es la turbina minieólica de eje vertical QR6. Este dispositivo fue una innovación entre las turbinas helicoidales tipo VAWT ofreciendo una mayor generación de energía y mayor área de barrido del viento.

Las cuchillas, las láminas, los radios y el tubo de torsión están hechos de materiales compuestos avanzados, donde destaca principalmente la fibra de carbono,

material apropiado de cara a conseguir los mejores valores en peso, rigidez y longevidad. El resto de la estructura está fabricado en acero galvanizado.

Especificaciones técnicas:

- Potencia instalada: 7,5 kW
- Diámetro del aerogenerador: 3,1 metros
- Superficie que ocupa: 8 m²
- Velocidad de arranque: 4,5 m/s

Características:

- Diseño icónico y atractivo.
- Elevado rendimiento aerodinámico.
- El QR6 maximiza su eficiencia ya que puede usar el viento desde todas las direcciones, a diferencia de otros aerogeneradores de eje vertical tradicionales.
- Las cuchillas helicoidales del QR6 ayudan a distribuir las cargas uniformemente, dando como resultado una vibración mínima que hace que sea una gran solución para montajes en el techo de los edificios.
- El diseño aerodinámico de la hoja helicoidal reduce las vibraciones y da como resultado un movimiento suave y silencioso.
- Se requiere una conexión de red trifásica.

3.2.5. Aerogenerador Aeolos-V



Ilustración 13. Aerogenerador Aeolos, modelo de eje vertical.

La empresa *Aeolos Wind Turbine* es una empresa danesa, cuya sede en la actualidad se encuentra en Londres, es un fabricante líder de mini aerogeneradores a nivel internacional. Cuenta con una gran variedad de dispositivos, desde turbina de eje vertical de 300 W hasta grandes aerogeneradores de eje horizontal de más de 100

kW. Los aerogeneradores *Aeolos* funcionan en Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Italia, España, Dinamarca, Alemania, Francia, Países Bajos, Australia, Argentina, Rusia, Brasil, Sudáfrica, Mozambique y entre otros muchos.

Especificaciones técnicas:

- Potencia instalada: 3 kW
- Diámetro del aerogenerador: 3 metros
- Superficie que ocupa: 7,5 m²
- Velocidad de arranque: 1,5 m/s

Características:

- Aerogeneradores de 3 palas de aleación de aluminio.
- Dispositivo inteligente: posibilidad de control monitorizado remoto por medio de conexión WiFi (conexión inalámbrica a Internet).
- Eficiencia de generación superior al 96%.
- Fabricado con componentes de destacadas empresas como ABB, Omron o SFK.
- Cuenta con una garantía estándar de 5 años.
- Destaca por su funcionamiento silencioso y seguro.
- Se requiere una conexión de red trifásica.
- Instalación habitual en edificios pequeños, escuelas, supermercados y áreas urbanas con poco ruido.

3.2.6. Aerogenerador Kliux Zebra

Kliux Energies es una empresa española con sede en Logroño (La Rioja) especializada en soluciones de energía distribuida o energía generada en el lugar de consumo, a medida del cliente y con presencia en el mercado internacional. La empresa cuenta con tecnología y productos de diseño y desarrollo propio y patentado.

Esta empresa fabrica y comercializa únicamente aerogeneradores de eje vertical de 2, 4 y 6 kW, los cuales se pueden integrar en sistemas híbridos con paneles fotovoltaicos y sistemas de acumulación de energía para ofrecer el coste más bajo y de mayor eficiencia energética por kilovatio generado.

Al mismo tiempo, *Kliux Energies* integra y comercializa soluciones de eficiencia energética e iluminación para municipios y complejos residenciales privados.



Ilustración 14. Aerogenerador de Kliux Energies, modelo Zebra.

Especificaciones técnicas:

- Potencia instalada: 1,8 kW
- Diámetro del aerogenerador: 2,4 metros
- Superficie que ocupa: 4,8 m²
- Velocidad de arranque: 3 m/s

Características:

- Integración y diseño adecuados para entornos urbanos y aislados.
- Cuenta con 9 álabes tipo alfa (α) para permitir el máximo aprovechamiento del viento y optimizar el rendimiento aerodinámico del mismo.
- Mantenimiento mínimo.
- Funcionamiento suave y silencioso.
- Respetuoso con la fauna: sin riesgo para las aves.
- Posibilidad de soporte publicitario de gran visibilidad.
- Se fija al suelo mediante una base de hormigón y se pinta con pintura marina anticorrosión especial.



Ilustración 15. Modelos de Kliux Energies instalados en el ámbito urbano y rural.

4. Análisis de las propuestas

En este punto del trabajo se evaluará cada una de las 6 alternativas en una matriz de forma conjunta, analizando los datos de cada una, comparándolos y teniendo en cuenta los puntos que se comentarán a continuación.

En este análisis se dará importancia a los 5 aspectos que, a mi juicio, son los más importantes de cara a aprobar la viabilidad de un sistema de aprovechamiento minieólico en la ciudad teniendo en cuenta los objetivos propuesto al inicio de este trabajo:

- Precio del kW instalado: la relación existente entre el precio unitario y la potencia instalada del aerogenerador, en otras palabras, el coste del kW.
- Estética: la evaluación del diseño del aerogenerador y de su belleza exterior y su adecuación artística en el entorno urbano.
- Impacto social: el nivel de aceptación social y el efecto de sensibilización y promoción que tenga la implantación de un aerogenerador en la ciudad.
- Facilidad de mantenimiento: la sencillez que suponga el mantenimiento y el cuidado del aerogenerador y la posibilidad de generación en caso de avería, así como la probabilidad de fallo de la(s) turbina(s).
- Potencia por unidad: se valorará positivamente una mayor potencia instalada por aerogenerador, en detrimento de los dispositivos que cuenten con una menor potencia por unidad en funcionamiento.

Se puede apreciar que algunos aspectos son completamente objetivos, sin embargo, otros no son medibles y, por lo tanto, se evaluarán de forma subjetiva manteniendo la coherencia con los objetivos del trabajo para justificar la elección definitiva.

A continuación, los datos de precio por aerogenerador y de precio unitario para cada una de las 6 alternativas. La información ha sido obtenida de la página web de cada fabricante.

Producto	Empresa	Potencia instalada (kW)	Precio unitario (€)
Venger Wind Turbine	Venger Wind	4,5	30.000
Wind Tree	New World Wind	5,4	49.500
Windspire Wind Turbine	Windspire Energy	3	34.700
QR6 Wind Turbine	Quiet Revolution	7,5	55.300
Aeolos-V 3kW	Aeolos Wind Turbine	3	7.320
Kliux Zebra	Kliux Energies	1,8	10.500

Tabla 6. Potencia instalada y precio de cada propuesta minieólica.

Para realizar el análisis con mayor precisión, se realizará una matriz ponderada con los 5 aspectos previamente descritos. Cada uno de ellos contará con un peso determinado y justificado, y se evaluarán del 1 al 5, siendo 1 la puntuación más baja, y 5 la más elevada para cada criterio.

Criterios y ponderación	Venger WTG	Wind Tree	Windspire WTG	QR6 WTG	Aeolos-V 3kW	Kliux Zebra
Precio del kW instalado (20%)	3	2	1	2	5	4
Estética (25%)	4	5	2	4	1	3
Impacto social (30%)	3	5	2	3	2	2
Facilidad de mantenimiento (15%)	2	4	4	1	2	2
Potencia por unidad (10%)	3	4	2	5	2	1
Total	3.10	4.15	2.10	2.95	2.35	2.55

*WTG = *Wind Turbine Generator*

Tabla 7. Matriz donde se evalúan los 5 criterios ponderados.

La alternativa que más puntos ha obtenido y, por tanto, la elegida para el estudio de viabilidad, es el *Wind Tree* de la empresa francesa *New World Wind*. Esta propuesta presenta las calificaciones más altas en estética e impacto social. Ambos criterios potencian las virtudes no medibles de este aerogenerador.

Según los objetivos del trabajo, se pretende dar visibilidad a las energías “verdes” y sensibilizar a la sociedad acerca de la importancia de impulsar este tipo de energía. Los resultados reflejan que el *Wind Tree* es la alternativa que mejor va a representar la consecución de este enfoque del proyecto.

Por otro lado, este aerogenerador compuesto por 54 miniturbinas denominadas *Aeroleaf*, cuenta con un precio de 9.166,67 €/kW instalado, uno de los ratios más altos de todos propuestos, como se ve penalizado en la matriz. Además, cuenta con 5,4 kW por unidad, el segundo con más potencia unitaria de las 6 alternativas presentadas en el trabajo.

En cuanto al mantenimiento, el *Wind Tree* tiene dos grandes ventajas en este aspecto. Por un lado, los 54 *Aeroleaf* con los que cuenta el árbol son dispositivos de pequeñas dimensiones (no alcanzan el metro de altura), y por ello, el mantenimiento es sencillo y no exige unas grandes capacidades ni físicas ni tecnológicas. Por otro

lado, el contar con 54 turbinas permite generar energía de forma continuada a pesar de que falle una de ellas. Esto supone una ventaja frente al resto de alternativas, las cuales únicamente cuentan con una turbina de generación, en caso de fallo, ese dispositivo deja de producir energía. En el caso del *Wind Tree*, la generación se reparte en 54 dispositivos de 100 W de potencia y, por tanto, la repercusión de una posible avería es mucho menor.

5. Elección y justificación de la alternativa

Como se ha presentado en el punto anterior, la alternativa minieólica seleccionada es el *Wind Tree*. El objetivo de este apartado del trabajo es justificar la elección de este aerogenerador y aportar más información acerca de propuesta elegida.

Primeramente, se debe hacer referencia a la matriz presentada en el apartado anterior, en la cual se justifican los objetivos del trabajo y se aprecia que valores no medibles, como la aceptación social o la estética, se reparten más de la mitad del peso de la ponderación. Asimismo, las características objetivas cuentan con el 30% de la importancia de la decisión. Los criterios están debidamente justificados y contrastados para el posterior estudio de viabilidad.

Por otro lado, y muy relacionado con la primera justificación, cabe destacar que este trabajo se plantea como un proyecto técnico y también artístico, tratando de buscar beneficios no sólo en términos económicos sino también a nivel social, como se ha comentado previamente. En mi opinión, es muy importante que este tipo de alternativas de generación energética lleguen a las ciudades con el objetivo de que la sociedad pueda verlo como algo más cercano y accesible. Sin dejar de lado el aspecto económico, este estudio pretende impulsar y promover la energía “verde” y dar una imagen más cuidada y vanguardista de la ciudad y de la zona donde se localice la instalación. Desde mi punto de vista, el *Wind Tree* reúne a la perfección estas características y representa con firmeza los objetivos del trabajo. En cierto modo, este estudio de viabilidad tiene más porcentaje de inversión social y concienciación que económica.



Ilustración 16. Wind Tree instalado en un entorno urbano.

Por último, otra razón para optar por el *Wind Tree* es que éste se colocaría a ras de suelo. Esta justificación tiene su base, principalmente, en una mayor generación de energía. Esta idea es susceptible de ser malinterpretada, ya que es cierto que a mayor altura, mayor velocidad de viento. Sin embargo, lo que no se debe pasar por alto es que la estructura y geometría del edificio influye negativamente en el aprovechamiento del viento. El corte del edificio tiende a reducir el potencial eólico, ya que se genera un flujo tan turbulento que los aerogeneradores difícilmente resisten las condiciones de trabajo impuestas.

Además, la instalación de alternativas minieólicas en los tejados de los edificios es aún una práctica poco probada, ya que en esta zona se apuesta fundamentalmente por los paneles fotovoltaicos que sí aprovechan mejor la luz del sol desde esta localización que a ras de suelo. Por otro lado, no se deben olvidar las vibraciones y ruidos que produciría el aerogenerador, que no son despreciables. Estos efectos adversos tendrán una menor repercusión a ras de suelo que en los tejados de los edificios, ya que la calle y los parques son zonas de tránsito y bullicio, mientras que en los hogares se debe respetar más si cabe el silencio y la tranquilidad. Por último, otro inconveniente que tiene la instalación en el tejado de un edificio de cara a este proyecto es su poca visibilidad y, por tanto, el impacto a nivel social sería mucho menor, lo cual no interesa como se ha justificado anteriormente.

Habiendo razonado la elección del *Wind Tree* para este estudio de viabilidad, a continuación, se facilitará más información acerca de esta alternativa y se profundizará en algunos aspectos clave de este dispositivo de la empresa francesa *New World Wind*.

Inspirado en un árbol, el *Wind Tree* es un producto de generación eléctrica complementario formado por pequeñas turbinas de eje vertical llamadas *Aeroleaf*. Este sistema minieólico está diseñado para aprovechar todo tipo de vientos, sin importar si su flujo es laminar o turbulento.

Cada turbina *Aeroleaf* está formada por un generador síncrono con imanes permanentes. Los generadores desarrollados por esta empresa tienen un estator que consta de una bobina de cobre y un rotor constituido por dos placas que soportan los imanes. Simplemente iniciada la rotación de la turbina, sin ayuda de engranajes, los imanes crean un campo magnético, generando tensión y corriente alterna. Para obtener la suma de la generación de todas las *Aeroleaf*, se cambia a corriente continua previamente a la generación en corriente alterna definitiva.

La estructura *Wind Tree* es de acero, tanto el tronco como las ramas, en la que se instalan 54 *Aeroleaf*. Todas las turbinas son independientes entre ellas, lo que facilita tanto la producción como el mantenimiento, ya que cada una se puede

monitorizar sin detener la generación del *Wind Tree*, dado que el montaje eléctrico es en paralelo, y sin riesgo (a baja tensión, 48 voltios).

La altura de cada *Aeroleaf* es de 90 centímetros, mientras que el árbol mide 9,8 metros. El peso total del *Wind Tree*, sin tener en cuenta la base donde se ancla, es de 3.050 kilogramos. Por su parte, la estructura eléctrica está formada por:

- ✓ Una batería, que permite regular temporalmente la producción de electricidad para limitar los picos y únicamente para necesidades a corto plazo. No sirve para almacenamiento.
- ✓ Una fuente de alimentación ininterrumpida (UPS, *Uninterruptible Power Supply*) que permite proporcionar al equipo receptor un voltaje alterno conectado directamente a la red local.
- ✓ Todos los sistemas de seguridad requeridos para la conexión a la red eléctrica: cable de fusibles, interruptores, pararrayos e interruptor de aislamiento.

La aerodinámica del *Aeroleaf* se ha optimizado para las velocidades de viento más bajas. Gracias a este diseño, la velocidad de arranque está por debajo de 2 m/s, este es el valor mínimo de la velocidad del viento a partir de la cual la turbina está en funcionamiento. Por razones de seguridad, el *Aeroleaf* tiene integrado un sistema de freno que se activa cuando la velocidad del viento supera los 18 m/s, lo que corresponde a una velocidad de rotación de 700 rpm. Por lo tanto, la potencia queda limitada a 100 W por turbina como se verá más adelante.

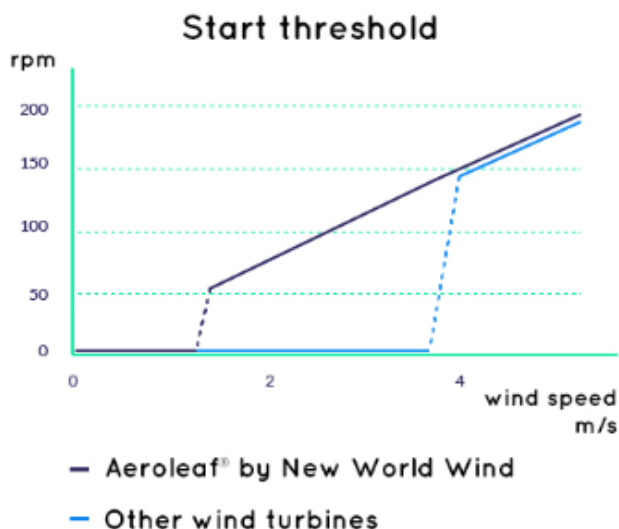


Ilustración 17. Gráfica que relaciona las revoluciones por minuto y la velocidad del viento (velocidad de arranque).

6. Desarrollo del proyecto

6.1. Localización

Primeramente, se ha decidido que la localización de los aerogeneradores sea en la calle Rafael Moreno "Pichichi" de Bilbao. Se ha elegido esta calle por 2 motivos principales. Por un lado, en esta zona y en sus alrededores se encuentra la Escuela de Ingeniería de Bilbao, y este trabajo se va a enfocar no sólo para que la universidad consuma un porcentaje de energía limpia, sino también para dar una imagen "verde", sostenible y vanguardista a la Escuela y a sus alrededores.

Por otro lado, esta zona de la ciudad no se encuentra concurrida entre edificios, lo que dificultaría el aprovechamiento eólico y, además, entre el estadio de fútbol y el edificio II de la EIB se generan unos vientos muy fuertes que se aprovecharían con la instalación de los *Wind Tree*.



Ilustración 18. Esquema del lugar de emplazamiento de los aerogeneradores.

Para continuar con el desarrollo del proyecto es necesario conocer qué velocidades de viento, o una estimación de las mismas, se dan habitualmente en esta zona de Bilbao. Profundizando en este aspecto, existe una herramienta web de la empresa española Enair, compañía especializada en energía eólica y solar, que muestra la velocidad media del viento en cada zona de España. Como bien se aprecia en la siguiente imagen, el lugar donde se implantarán los aerogeneradores se encuentra en la zona de la ciudad que mayor velocidad de viento registra anualmente.



Ilustración 19. Área general de la ciudad donde se instalarán los Wind Tree.

A continuación, se ampliará el mapa para que la estimación de la velocidad del viento se aún más precisa.

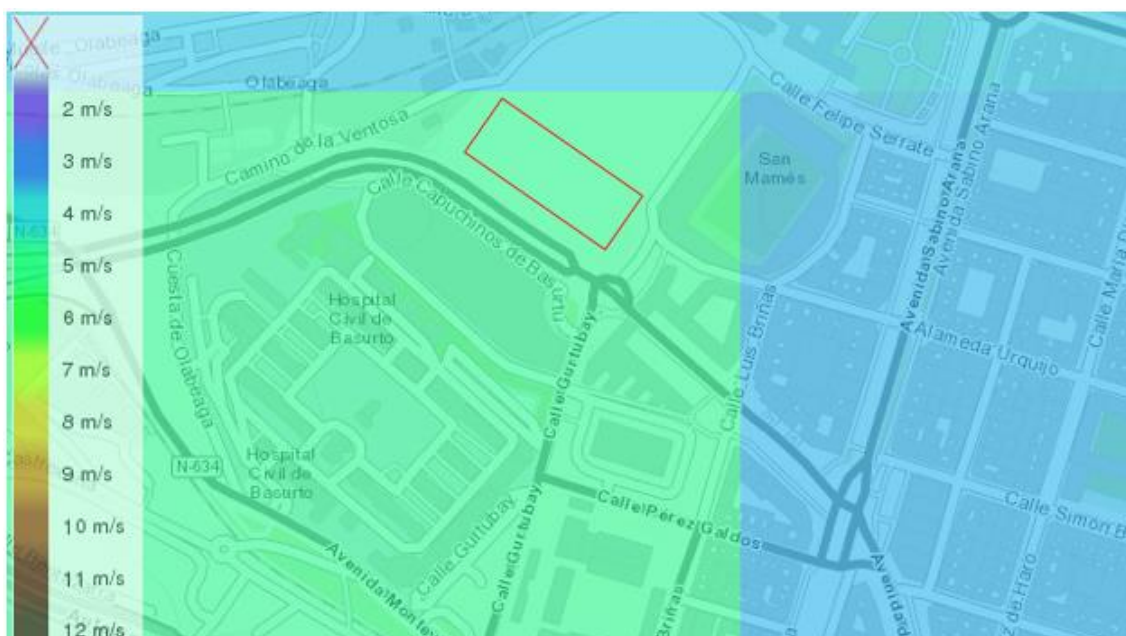


Ilustración 20. Localización concreta de la instalación.

En esta última imagen se aprecia que en la futura localización de los Wind Tree se registra una velocidad media del viento que ronda los 5 y 6 metros por segundo

según la herramienta de libre uso de la empresa Enair. Por ello, para los cálculos que se realizarán a partir de ahora se utilizará un valor de velocidad del viento de **5,5 m/s**.

6.2. Caracterización de las condiciones del viento

Para realizar una buena caracterización del recurso energético es necesaria una importante inversión en prospección eólica en la ubicación seleccionada. Para ello, se parte de la expresión de la ley de distribución de Weibull.

$$p(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Donde:

- **p(v)** Función de densidad de probabilidad de Weibull.
 - **v** Velocidad del viento (m/s).
 - **c** Factor de escala (m/s), que suele ser próximo a la velocidad media.
 - **k** Factor de forma que caracteriza la asimetría de la función probabilidad.
- *Para cálculos de viento terrestre se toma un valor estándar de k = 2.*

Al tratarse de una ley empírica y totalmente aceptada por los expertos, una forma de generar un mapa de viento real es la de dar valores a la variable **v** con una velocidad media de viento aceptable y usual para cualquier instalación minieólica de las que se están comenzando a implantar hoy en día por todo el mundo.

Este valor de velocidad media será de 5,5 m/s a una altura próxima al suelo. Existe una expresión empírica que relaciona la velocidad media del viento con las diferentes alturas de medición. En este caso, como el *Wind Tree* mide cerca de 10 metros, y considerando que sus turbinas se encuentran entre los 4 y 9 metros de altura sobre el nivel del suelo, se despreciará el incremento de velocidad que supone ese pequeño aumento en la altura de medición.

Otros parámetros importantes a definir en la ley de Weibull son **k** y **c**. El primero es un factor de forma de la curva de densidad de probabilidad, y el segundo es el factor de escala, muy próximo en valor a la velocidad media. A continuación, se muestra la relación matemática que existe entre los valores **c** y **v**.

$$\frac{v}{c} = \varphi\left(1 + \frac{1}{k}\right) = \varphi\left(1 + \frac{1}{2}\right) = \varphi(1,5) = 0,886$$

Donde **k** toma un valor de 2, como se ha justificado previamente, **v** es la velocidad media del viento que se estima para esta localización, y donde la función φ tiene esta forma en función del parámetro **k**:

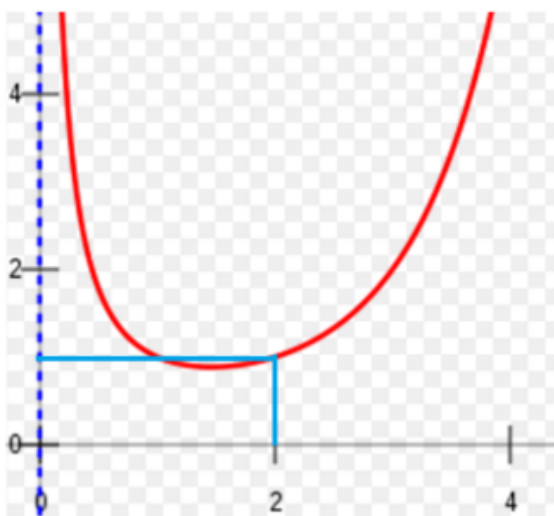
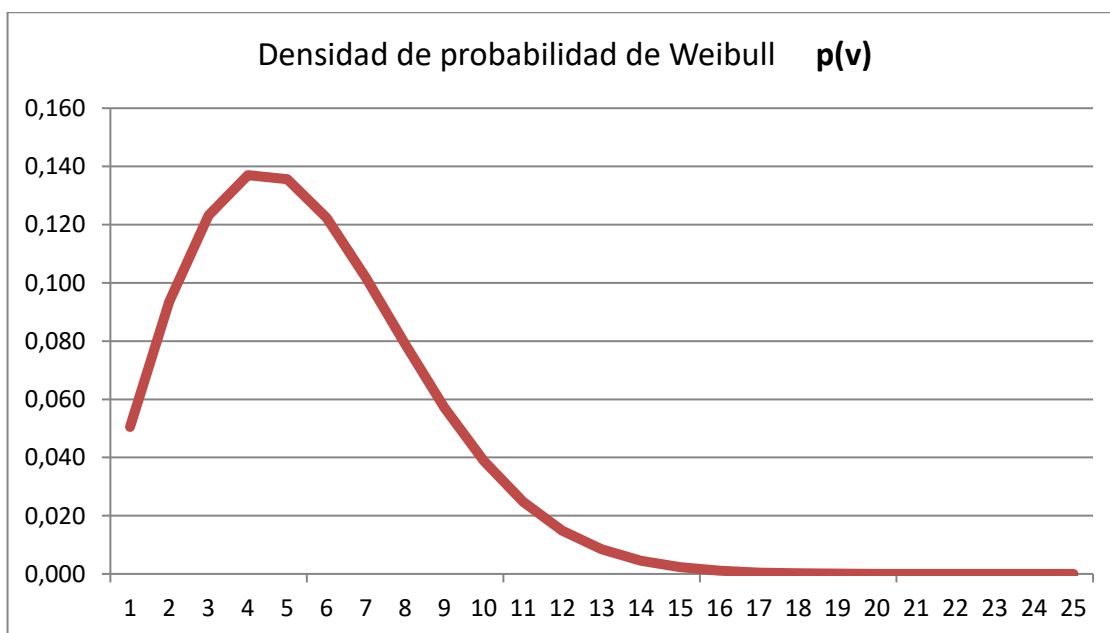


Ilustración 21. Gráfico que relaciona el valor de la función con el parámetro k.

Analizando la gráfica, la función φ es algo inferior a la unidad para un valor de $k = 2$. Operando con estos resultados, se obtiene el valor de c que se empleará como una constante en la función $p(v)$:

$$\frac{v}{c} = 0,886 \rightarrow \frac{5,5}{c} = 0,886 \rightarrow c = 6,21$$

Con estos datos se obtiene la siguiente representación de la función de probabilidad de Weibull.



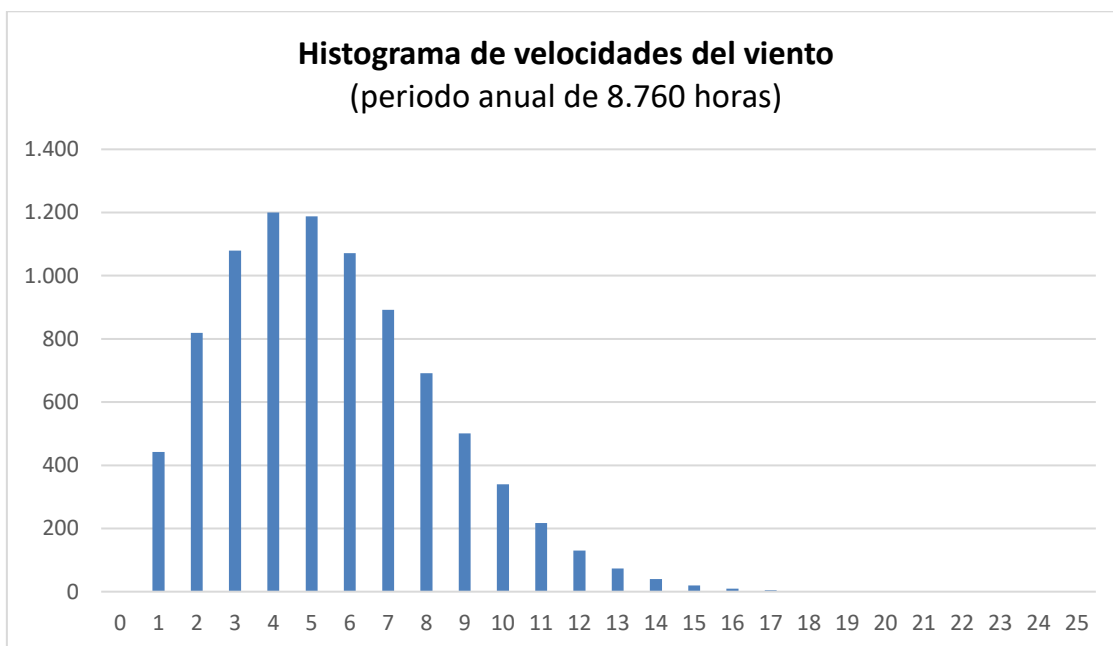
Esta ley empírica permite calcular, del total de las horas de un año natural de 365 días, cuántas tendrán vientos de una determinada velocidad. En otras palabras, qué velocidades del viento son más probables a lo largo de las horas de un año.

De esta forma, teniendo en cuenta las 8.760 horas del año, se multiplicarán por la probabilidad para cada velocidad, según los resultados obtenidos de la función de densidad de Weibull. Se obtendrá el siguiente histograma de velocidades:

Velocidad del viento (m/s)	p(v)	Horas al año (h)
0	0	0
1	0,0505	442,68
2	0,0935	819,10
3	0,1232	1.079,24
4	0,1370	1.200,12
5	0,1356	1.187,90
6	0,1223	1.071,73
7	0,1019	892,54
8	0,0789	691,35
9	0,0571	500,50
10	0,0388	339,77
11	0,0248	216,81
12	0,0149	130,27
13	0,0084	73,80
14	0,0045	39,46
15	0,0023	19,93
16	0,0011	9,52
17	0,00049	4,30
18	0,00021	1,84
19	0,000085	0,74
20	0,000032	0,28
21	0,000012	0,10
22	0,00000404	0,035
23	0,0000013	0,012
24	0,00000041	0,0036
25	0,00000012	0,00104

Tabla 8. Histograma de velocidades para velocidades de 1 a 25 m/s en un año.

Esta batería de datos se puede representar por medio de barras para valores enteros de la velocidad, obteniendo así el siguiente gráfico:



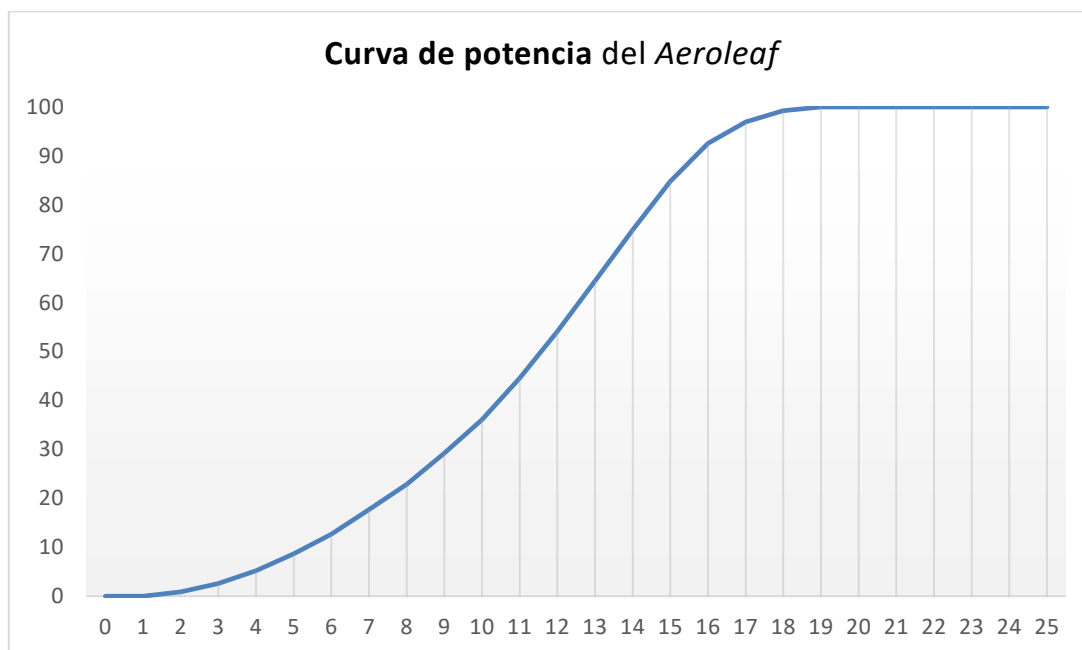
Donde se puede observar, por ejemplo, que habrá cerca de 2.400 horas en todo el año con velocidades comprendidas entre los 4 y los 5 m/s. Por el contrario, tan sólo habrá 8 horas al año con velocidades superiores a los 16 m/s.

Será sencillo, por tanto, calcular la producción energética de un aerogenerador determinado, el *Wind Tree* en este caso, que vendrá caracterizado por una cierta curva de potencia en función de la velocidad del viento.

6.3. Cálculo de la energía generada

Uno de los objetivos principales del proyecto es estudiar la viabilidad económica de la instalación de un sistema de generación minieólico en la ciudad. Las inversiones son elevadas y el consumo de energía limpia debe suponer un ahorro económico en la factura eléctrica, compensando en la medida de lo posible los costes productivos que engloban los de explotación y financiación.

Para cada valor de la velocidad, la generación de energía depende directamente de la relación descrita en la curva de potencia del aerogenerador. Para este estudio, esta curva viene definida para una única turbina en la página web del fabricante francés. Cada *Aeroleaf* cuenta con una potencia de 100 W, como se observa en el gráfico a continuación. Cada *Wind Tree* tiene 54 turbinas, por tanto, su potencia instalada asciende a 5.400 W.



*Ilustración 22. Curva de potencia del *Aeroleaf* que relaciona la potencia (W) con la velocidad del viento (m/s).*

Se han de estudiar detalladamente todos y cada uno de los aspectos técnicos ya que la fiabilidad del sistema total permitirá tener una disponibilidad del campo mayor.

Suponiendo una disponibilidad total, las horas de producción eléctrica vienen marcadas por aquellas en las que los valores de la velocidad del viento sean superiores a 2 m/s, como marca la curva de potencia y la descripción del propio aerogenerador. Es ese rango de valores entre los cuales el *Wind Tree* entra en funcionamiento.

Para realizar el cálculo de la energía producida son necesarios 2 parámetros previamente descritos:

- a) Un histograma de velocidades que caracterizan el viento.
- b) La relación velocidad/potencia del aerogenerador (curva de potencia).

Como se ha definido previamente, las turbinas comenzarán a producir energía a partir de velocidades superiores a 2 m/s. A continuación, se mostrará en una tabla las distintas generaciones eléctricas que se producen para cada rango de velocidades. La producción energética total será la suma de todas las aportaciones parciales, producto de la potencia de la turbina (W) y las horas al año correspondientes a cada velocidad de viento, como se ha justificado mediante la curva de potencia del *Aeroleaf* y el histograma de velocidades para un periodo anual de 8.760 horas.



v (m/s)	Potencia (W)	Horas al año (h)	Generación (kWh)
0	0	0	0
1	0	442,68	0
2	0,9	819,10	39,81
3	2,6	1.079,24	151,53
4	5,23	1.200,12	338,94
5	8,65	1.187,90	554,87
6	12,7	1.071,73	734,98
7	17,7	892,54	853,09
8	22,9	691,35	854,92
9	29,2	500,50	789,18
10	36,09	339,77	662,17
11	44,6	216,81	522,17
12	54,09	130,27	380,51
13	64,4	73,80	256,66
14	74,9	39,46	159,62
15	84,8	19,93	91,28
16	92,6	9,52	47,59
17	96,94	4,30	22,49
18	99,25	1,84	9,84
19	100	0,74	4,01
20	100	0,28	1,54
21	100	0,10	0,56
22	100	0,035	0,19
23	100	0,012	0,062
24	100	0,0036	0,019
25	100	0,00104	0,006

TOTAL 6.476,04

TOTAL (DISPONIBILIDAD 97%) 6.281,76

Tabla 9. Energía generada según la velocidad del viento en un año para un aerogenerador.

Esta es la generación anual de un *Wind Tree* medida en kWh. El valor definitivo es que aparece en negrita, suponiendo una disponibilidad del 97% anual, ya que los aerogeneradores no están todo el tiempo funcionando debido a averías o pausas para mantenimiento. La potencia, en la segunda columna de la tabla, se mide en vatios (W). Sin embargo, ese valor se multiplica por 54, ya que cada *Wind Tree* cuenta con tal número de turbinas. Es por eso que el resultado de generación se mide en kWh.

7. Estudio de viabilidad

El primer paso para realizar el estudio de viabilidad de este proyecto es decidir cuántos aerogeneradores se van a instalar en la calle Rafael Moreno “Pichichi” de Bilbao, el ya comentado lugar de emplazamiento.

Como se aprecia en la siguiente imagen, la calle, que cuenta por un lado con el Edificio II de la EIB y, por el otro, con el nuevo San Mamés, tiene más de 200 metros donde se podrían instalar los *Wind Tree*.

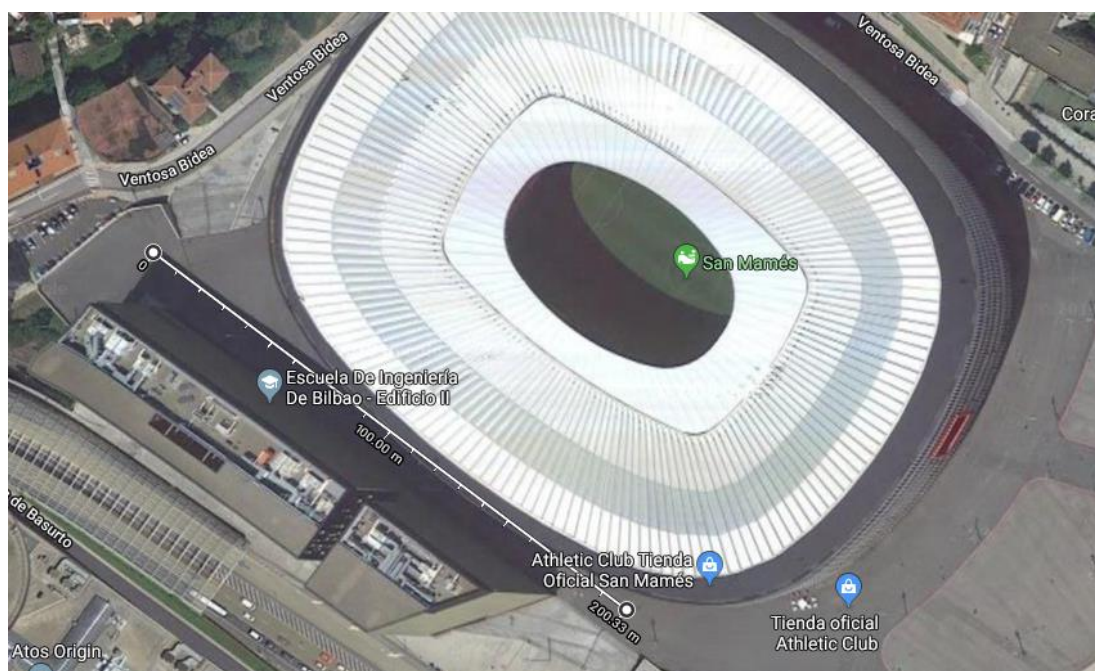


Ilustración 23. Medida del lugar de la instalación.

La justificación del número de *Wind Tree* a instalar viene basada en 2 razones principales. Por un lado, se pretende fomentar el autoconsumo y, por tanto, cuantos más aerogeneradores, más energía limpia podría consumir la universidad, y con ello, más dinero se ahorraría en el gasto eléctrico. Por otro lado, el *Wind Tree* es un dispositivo relativamente grande, y teniendo en cuenta que la calle no es muy amplia, considero que instalar 14 o más aerogeneradores sería sobrecargar demasiado la zona.

Por ello, y teniendo ambas razones en cuenta, pienso que 10 es el número de árboles ideal a instalar. Supone un apoyo energético razonable para la EIB, y visualmente es una solución con éxito puesto que 10 *Wind Tree* en 200 metros entre el primero y el último, implica que entre cada uno de ellos habrá una distancia de 22 metros, una cifra adecuada ya que, de lo contrario, podría tener un impacto visual negativo.

7.1. Presupuesto

Previo a empezar a enumerar los costes, es de vital importancia definir la naturaleza de los mismos en este tipo de proyectos.

Por un lado, está el CAPEX (*Capital Expenditure*). Estos gastos hacen referencia a los costes de capital, donde se engloban todas aquellas partidas en las que se haya invertido en bienes físicos no consumibles. Dentro del CAPEX se contabilizan tanto el coste de la adquisición como los gastos relacionados directamente con la instalación y puesta en marcha (en este caso, de los aerogeneradores) y con la implementación de todo lo necesario para que el bien adquirido funcione de forma correcta y esperada.

Desde un punto de vista fiscal, los gastos considerados como CAPEX no se contabilizan de inmediato como coste, sino que se amortizan a lo largo de varios ejercicios en función de su depreciación. Supone, por tanto, una forma de ajustar mejor o repartir la carga económica de esta compra a medio/largo plazo.

Por otro lado, está el OPEX (*Operating Expenditure*), su contraparte. Se considera un costo permanente para el funcionamiento de un producto, y se traduce como gastos de operación. Este gasto tiene que ver directamente con el servicio de mantenimiento y seguridad del bien adquirido, y suele ser un servicio periódico a fijar con el cliente. Los costes de operación y funcionamiento son, normalmente, menos elevados que los gastos de capital. Sin embargo, la partida del OPEX será constante durante toda la vida útil del producto.

Otra variable muy importante a tener en cuenta de cara al cálculo de los costes es la vida útil del aerogenerador. Para el *Wind Tree* se estimarán 15 años, lo cual es un valor habitual en el mundo de la energía minieólica. Este valor es más reducido que en el caso de los aerogeneradores de gran potencia, puesto que pueden alcanzar hasta 25 años de vida útil.

Como se ha descrito anteriormente, el CAPEX tiene 2 variables a tener en cuenta. Para el caso del *Wind Tree*, se hace referencia al coste del aerogenerador y a la instalación del mismo, que engloba el proceso de instalación, obra civil y transporte de mercancías, la construcción de una infraestructura eléctrica que conecte el sistema de generación a la red, y la gestión del proyecto.

Cabe destacar que no existe una fórmula estándar para el CAPEX, ya que puede variar, por ejemplo, dependiendo de dónde se realice la instalación y la distancia entre la empresa que comercializa el producto y el lugar de emplazamiento del mismo. El CAPEX puede tomar rangos desde 60/40 (60% coste del producto + 40% costes de instalación y derivados) hasta 90/10, en el caso de que la instalación sea sencilla y barata. No será lo mismo la instalación dentro del mismo país a 100 km de distancia, que la misma operación en una región de otro continente. Por tanto,

teniendo en cuenta que la empresa *New World Wind* se sitúa al norte de Francia, se puede estimar que los costes directamente relacionados con la instalación en Bilbao no serán muy elevados.

Ocurre lo mismo con el OPEX, ya que tampoco existe una fórmula para calcular este coste, ni está regulado. Son valores que establece la empresa que vende el producto y generalmente se miden en céntimos/W·año. Las 2 partidas principales de este coste son la de mantenimiento y la del seguro. Por un lado, la partida de mantenimiento, como su propio nombre indica, hace referencia al mantenimiento del aerogenerador con el objetivo de que el producto funcione al máximo rendimiento durante su vida útil y prevenir así posibles errores de funcionamiento, así como el coste de los repuestos que sean necesarios. Por otro lado, la partida de seguros es el contrato por el cual la compañía garantiza la reparación del aerogenerador en caso de que se produzca una avería.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, considero que un reparto del CAPEX de 70/30 es una estimación correcta. Al mismo tiempo, y como se ha presentado en el apartado 3.2, el precio unitario de cada *Wind Tree* es de 49.500 euros. Con estos datos, se llega a la siguiente conclusión.

CAPEX	%	COSTE (€)
WIND TREE	75	49.500,00
INSTALACIÓN	25	16.500,00

TOTAL	66.000,00
--------------	------------------

Tabla 10. Coste CAPEX de un aerogenerador.

Con este reparto del coste de capital de 70/30 se concluye que la instalación y puesta en funcionamiento de un *Wind Tree* cuesta un total de 66.000 euros. Habiendo decidido instalar 10 aerogeneradores, el coste CAPEX total asciende a los **660.000 €**.

Para calcular el OPEX se tomarán como referencia los valores de costes de operación más comunes en proyectos de energía minieólica en la actualidad. Estos son próximos a 2,5 céntimos por W instalado al año por la partida de mantenimiento, y cercanos a 3 - 4 cént/W·año por la del seguro.

OPEX	PRECIO		
	cént / W·año	€ / W·año	€ / kW·año
MANTENIMIENTO	2,5	0,025	25,00
SEGURO	3,5	0,035	35,00
TOTAL	6	0,06	60,00

Tabla 11. Coste OPEX de un aerogenerador.

Habiendo definido los precios del OPEX para este proyecto, se considerará un ratio de 60 € anuales por kW instalado. Teniendo en cuenta que se ha decidido instalar 10 aerogeneradores, la potencia total instalada es de 54 kW, lo que supone un coste OPEX total de 3.240 € el primer año. Suponiendo el año 2020 como el momento en que la instalación comienza a funcionar y, al mismo tiempo, una inflación estándar de +1,5% se puede concluir que el coste OPEX anual variará del siguiente modo durante los 15 años de vida de los aerogeneradores (para la hipótesis de que la inflación considerada es constante para ese periodo de tiempo):

INFLACIÓN CONSTANTE (+1,5%)	
AÑO	OPEX ANUAL (€)
2020	3.240,00
2021	3.288,60
2022	3.337,93
2023	3.388,00
2024	3.438,82
2025	3.490,40
2026	3.542,75
2027	3.595,90
2028	3.649,83
2029	3.704,58
2030	3.760,15
2031	3.816,55
2032	3.873,80
2033	3.931,91
2034	3.990,89
TOTAL	54.050,11

Tabla 12. Variación anual del OPEX debido a la inflación.

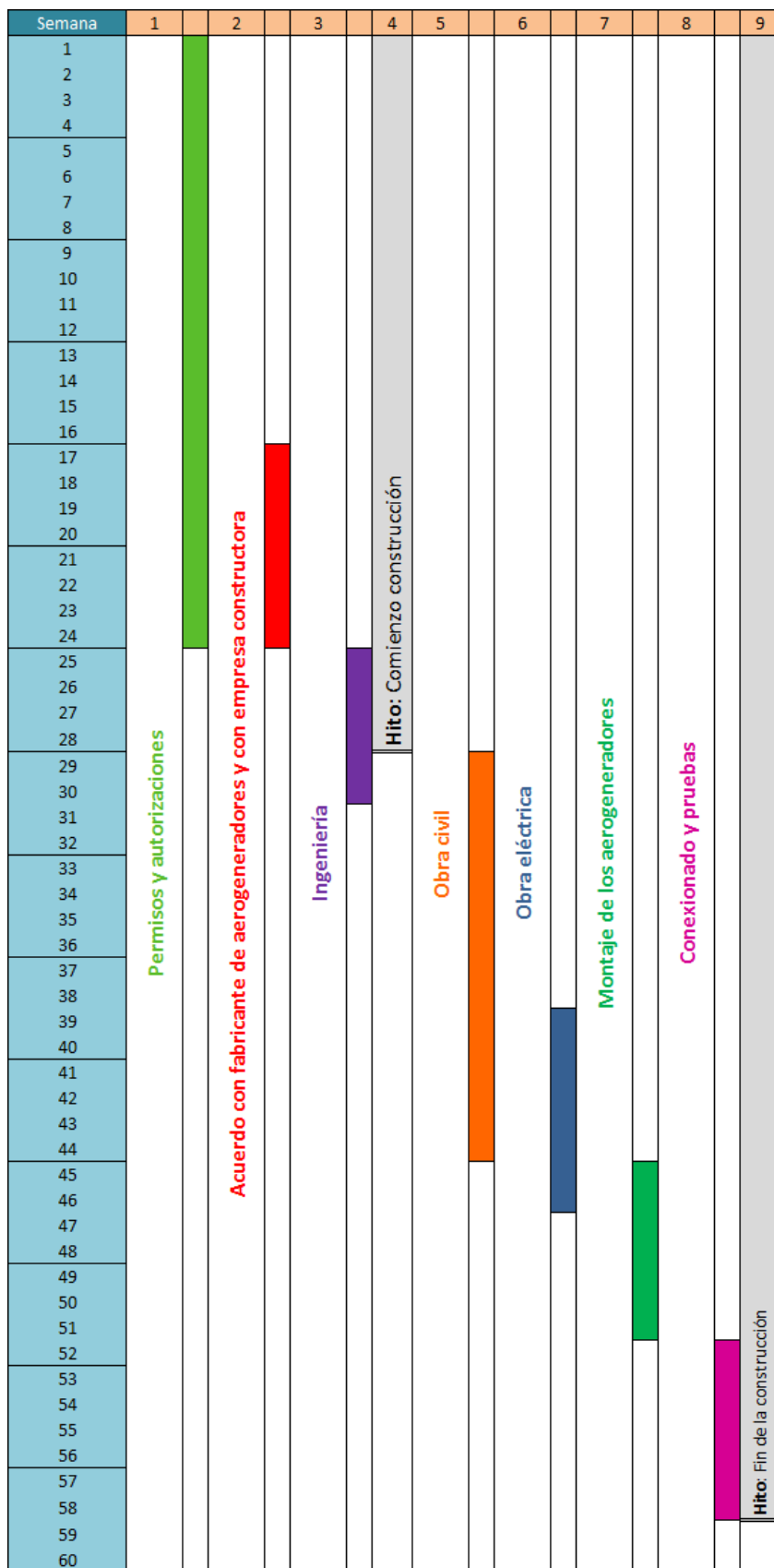
A modo de conclusión, el Coste de Capital (CAPEX) total y el Coste de Operación (OPEX) total alcanzan los siguientes valores:

COSTES TOTALES		€
CAPEX	UNITARIO	66.000,00
	TOTAL (10 UNIDADES)	660.000,00
OPEX	ANUAL	<i>ver Tabla 8</i>
	TOTAL (15 AÑOS)	54.050,11
TOTAL PROYECTO		714.050,00 €

Tabla 13. Presupuesto de la instalación de los 10 aerogeneradores Wind Tree.



7.2. Planificación del proyecto (Diagrama de Gantt)



7.3. Beneficios

El trabajo se divide, como se ha justificado, en 2 objetivos principales. Por un lado, la generación de energía que permita a la EIB consumir energía limpia y, a su vez, abaratar el gasto eléctrico. Por otro lado, tratar de llegar a la sociedad con una iniciativa de energía eólica, apostando por la sostenibilidad en un edificio público como la universidad, y sensibilizando tanto a nivel social como institucional de la importancia de impulsar alternativas energéticas como ésta.

Mientras que el primer objetivo descrito es medible, por desgracia, el segundo es subjetivo y, por tanto, no se puede medir su eficacia cuantitativamente. En el apartado 6.3. del trabajo se ha calculado la energía generada por un *Wind Tree* en un año, concretamente 6.281,76 kWh. Teniendo en cuenta que se instalarán 10 aerogeneradores, el valor de la energía producida aumenta hasta los **62.817,60 kWh** anualmente, estimando una disponibilidad del 97% cada año.

Generalizando estos valores para los 15 años de vida útil de los *Wind Tree*, y estimando unos niveles de viento similares a los previamente descritos en el punto 6.2, se puede afirmar que la generación total para la vida útil de los 10 aerogeneradores es de **942.264 kWh**.

Profundizando más en el aspecto económico, el precio de la energía es el coste que el cliente abona en su factura por el consumo de electricidad. El precio del kWh, que se expresa en €/kWh, es la suma del precio de la energía y del coste de la tarifa de acceso contratada. El precio de esta última está fijado por el Gobierno.

El precio del kWh de España en 2019 depende del mercado en el que el cliente tenga contratado el suministro de luz. Se entiende que la UPV tiene dicho contrato con la empresa energética vasca Iberdrola. Desde el año 2014, el precio del kWh del mercado regulado de electricidad es establecido a través del mercado mayorista. Anteriormente, se realizaba mediante subastas eléctricas. Por su parte, el precio del kWh en el mercado libre es establecido por cada compañía, que adquiere la energía al mismo coste.

En la página web de Iberdrola se pueden encontrar diversas tarifas y alternativas para el contrato de la electricidad. No obstante, un edificio como la EIB se debe clasificar dentro del grupo "*Empresas/Negocios*" ya que su actividad es mucho mayor que la de un hogar. Teniendo esto en cuenta, se tomará el siguiente valor como constante para los 15 años:

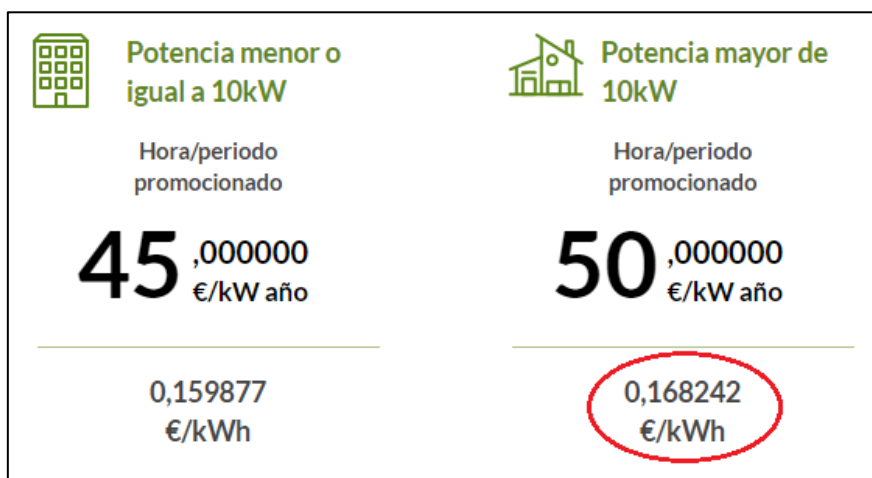


Ilustración 24. Tarifas de Iberdrola del kWh para una empresa/negocio.

Para justificar esta elección se debe tener en cuenta que un edificio de tales características tiene una potencia contratada mayor de 10 kW. Éste es un dato para empresas y negocios, no para el caso de un hogar. La EIB cuenta con 3 edificios de grandes dimensiones que se pueden considerar de tamaño industrial, aunque no se dediquen a tal actividad.

Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, esta instalación minieólica se destinará al autoconsumo. Por lo tanto, la energía generada será la cantidad de energía que la EIB no consumirá de la red eléctrica, ahorrando así una cantidad de dinero significativa y apostando por el consumo de energía limpia.

Para el cálculo se tomará el valor de la *Ilustración 24* como constante para los 15 años de vida de los aerogeneradores. De esta forma, el ahorro económico para este periodo de tiempo será de:

$$942.264 \text{ kWh} \times 0,168242 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = \mathbf{158.528,38 \text{ €}}$$

Otro beneficio directo, en este caso desde la perspectiva medioambiental, sería la reducción de emisiones que supone la instalación de un sistema de aprovechamiento eólico. En este caso, la propia empresa francesa que comercializa el aerogenerador aporta información sobre el tema en su página web donde se puede encontrar la siguiente relación en inglés: “*Producir 2.400 kWh con un Wind Tree supone evitar generar 3,2 toneladas de CO₂.*”

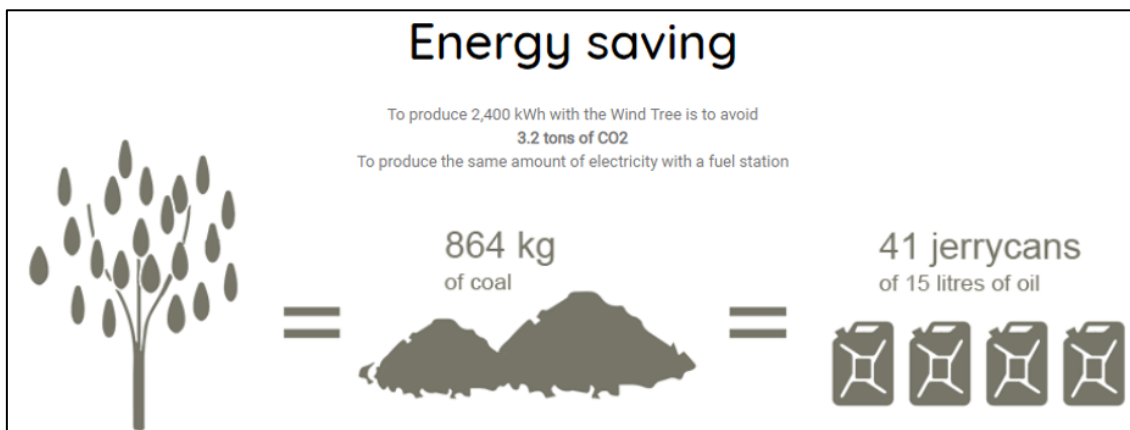


Ilustración 25. Relación entre la energía generada por un Wind Tree y la contaminación evitada.

Manteniendo esta relación como constante para el sistema de aprovechamiento eólico descrito en este trabajo, se puede concluir que se evita producir **1.256,35 toneladas de CO₂**.

$$\begin{aligned} 2.400 \text{ kWh} &\rightarrow 3.200 \text{ kg de CO}_2 \\ 942.264 \text{ kWh} &\rightarrow 1.256.352 \text{ kg de CO}_2 \end{aligned}$$

8. Conclusiones

Para concluir este trabajo se deben mencionar diferentes elementos de gran importancia para tener una idea general de los resultados de una instalación de este estilo en las condiciones descritas.

Para empezar, cabe destacar la inversión que supone este proyecto de energía minieólica. A simple vista se puede apreciar que la inversión es mucho mayor al ahorro económico que supone la generación de energía en 15 años. Hago referencia a los 714.050 € frente a los 158.528 € de beneficios. La inversión es más de 4 veces mayor al dinero ahorrado en el gasto eléctrico, por tanto, una primera conclusión podría ser que el proyecto no es viable desde el punto de vista económico.

No obstante, y como se ha comentado a lo largo del trabajo, a pesar de que el proyecto no genere beneficios económicos durante los 15 años de su vida útil, se debe valorar por su repercusión a nivel social. Se debe enfocar como una inversión en materia de innovación urbanística y de sensibilización social acerca de la importancia de apostar por las energías renovables, además de dotar tanto a la Universidad del País Vasco como institución como al edificio de la EIB y ese entorno de la ciudad de una imagen verde y vanguardista.



Ilustración 26. Recreación de los Wind Tree instalados en lugar de emplazamiento descrito.

Por otro lado, se trabaja la idea de impulsar una tecnología emergente como lo es la minieólica y, al mismo tiempo, un concepto que va a ser clave en la Transición

Energética como es el autoconsumo. Se puede afirmar que este tipo de instalaciones a nivel urbano es aún un embrión en el mundo de la energía. Bien es cierto que cada vez más empresas diversifican su cartera de productos y apuestan por diseñar y fabricar aerogeneradores de baja potencia. Sin embargo, pocas son las iniciativas que se pueden encontrar hoy en día en las ciudades españolas. Bilbao, con la trayectoria moderna que está llevando en los últimos años, y la UPV gozarían de popularidad apostando por un proyecto como éste, además de dar una imagen sostenible y concienciada respecto a la problemática energética actual, como se ha comentado previamente. Respecto a este tema en concreto, cabe señalar que países como Alemania cuentan con muy buenos números en materia de autoconsumo en la ciudad y en ambientes rurales, principalmente mediante tecnología fotovoltaica.

Otra conclusión a destacar sería que el éxito de este proyecto no es medible como si se tratase de alguna variable económica o energética. Por ello, este Trabajo de Fin de Grado es una apuesta con incertidumbre, un riesgo que supone una inversión de este estilo. Sin embargo, no se debe olvidar el gran potencial para proporcionar energía eólica en el punto de uso, dentro de entornos urbanos, es un cambio de paradigma importante, no sólo a nivel energético, respecto de los escenarios de vientos grandes típicos donde los sistemas de megavatios múltiples se ven obligados a instalarse cada vez más lejos de las poblaciones donde más se necesita la energía.

Por otro lado, cabe señalar que este trabajo ha tenido un fin académico en su totalidad, con estimaciones y aproximaciones debidamente justificadas, pero sin tener en cuenta algunos aspectos que serían necesarios en caso de llevar adelante dicho proyecto. Uno de ellos es, por supuesto, la cuestión relacionada con los permisos municipales y urbanísticos. La instalación de 10 aerogeneradores *Wind Tree* en esa calle de Bilbao debe contar con la autorización municipal para poder realizar la obra civil, siempre y cuando esa superficie de terreno cumpla tales características de cara a llevar a cabo el proyecto en esas condiciones. Más allá de viabilidad técnica y económica, para que este tipo de proyectos se materialicen hace falta una receptividad positiva por parte de las administraciones autonómica y nacional, pero, sobre todo, local.

Otro aspecto interesante a tener en cuenta es la generación total de energía obtenida en el apartado 6.3. Relacionando este valor con la realidad del consumo de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, se puede concluir lo siguiente:

	Edificio I (entrada Calle Luis Briñas)		
MESES	DESDE	HASTA	CONSUMO (kWh)
SEPTIEMBRE	1/9/17	30/9/17	61.617
OCTUBRE	1/10/17	31/10/17	75.372
NOVIEMBRE	1/11/17	30/11/17	73.217
DICIEMBRE	1/12/17	31/12/17	69.111

ENERO	1/1/18	31/1/18	70.395
FEBRERO	1/2/18	28/2/18	70.545
MARZO	1/3/18	31/3/18	76.033
ABRIL	1/4/18	30/4/18	68.967
MAYO	1/5/18	1/5/18	78.607
JUNIO	1/6/18	30/6/18	71.018
JULIO	1/7/18	31/7/18	73.493
AGOSTO	1/8/18	31/8/18	44.897

TOTAL	833.272
--------------	----------------

Tabla 14. Consumo dividido por meses del Edificio I de la EIB en el curso 17/18.

El edificio I de la EIB consume una media de 833.272 kWh al año. Considerando que la variación del consumo energético de un año a otro es despreciable, se puede concluir que la instalación cubre un 7,5 % del consumo anual medio del Edificio I.

1 *Wind Tree* → 6.281,76 kWh generados en un año
 10 *Wind Tree* → 62.817,6 kWh generados en un año

$$\frac{62.817,6}{833.272} \times 100 = 7,5 \%$$

Por último, otro aspecto a mencionar es el amplio abanico de opciones de financiación que tienen los proyectos de energías renovables. La administración pública, con el fin de incentivar y facilitar la puesta en marcha de estos proyectos, proporciona subvenciones siempre y cuando se cumplan una serie de requisitos. El EVE (Ente Vasco de la Energía) es el encargado de evaluar y juzgar los proyectos, fase previa a conceder la ayuda financiera. En caso de llevar a la práctica la instalación de estos 10 aerogeneradores, sería interesante profundizar más en esta cuestión, ya que no sólo se podría conseguir ayuda económica y abaratar los costes del proyecto, sino también ayuda en la gestión del mismo y asesoría a nivel administrativo y tecnológico. Profundizando en este tema, el EVE va a gestionar a lo largo de este ejercicio 2019 más de 17 millones de euros en subvenciones, impulsando así cerca de 430 proyectos y 200 nuevas plantas de aprovechamiento de fuentes renovables.

En definitiva, la viabilidad de un proyecto de esta naturaleza, donde se conjugan aspectos tan dispares como tecnologías emergentes, energías renovables, cambio climático, sensibilidad medioambiental, imagen de la ciudad, rentabilidad económica y, mucho más si cabe, en un entorno tecnológico-educativo como el de la

Escuela de Ingeniería de Bilbao, obedece más a razones de índole política que a razones puramente económicas y aun más teniendo en cuenta que estamos viviendo una época donde las noticias sobre el cambio climático y la Transición Energética están todos los días en los periódicos. Debido a esto, parece acertado promover proyectos de este tipo que nos sitúen a la cabeza no sólo en materia tecnológica sino también medioambiental y, por supuesto, de sensibilización social.

9. Referencias

2. Estado del arte – Contexto actual

- <https://twenergy.com/a/la-minieolica-quiere-abrirse-paso-en-el-entorno-urbano-221>
- <https://www.construible.es/2010/05/04/energia-eolica-de-pequena-potencia>
- <http://eoliccat.net/la-minieolica-y-el-autoabastecimiento-energetico-urbano/?lang=es>
- <https://newsroom.ferroviario.com/es/noticias/la-energia-mini-eolica-una-tecnologia-en-pleno-desarrollo-tambien-tendra-presencia-en-genera08/>
- <https://www.certificadosenergeticos.com/paradoja-energia-minieolica>

3. Aerogeneradores

- <http://www.verticalwindturbineinfo.com/vawt-manufacturers/>

4. Análisis de las propuestas

Referencias de las páginas web de las empresas:

- Venger WTG: <http://www.verticalwindturbineinfo.com/vawt-manufacturers/venger-wind-vertical-axis-wind-turbines/>
- New World Wind: <http://newworldwind.com/>
- Aeolos: <https://www.windturbinestar.com/>
- Quiet Revolution: <https://www.quietrevolution.com/>
- Windspire WTG: <https://www.windspireenergy.com/index.html>
http://www.shoproyall.com/Wind-Turbines_c_87.html
- KLiUX Energies: <http://www.kliux.com/productos/aerogenerador-de-eje-vertical/>
<http://www.kliux.com/wp-content/uploads/2011/03/Ficha-tecnica-geo-4k.pdf>

5. Elección de la alternativa

- <https://blog.structuralia.com/como-aprovechar-la-energia-eolica-en-un-edificio-alternativa-fotovoltaica>
- <http://newworldwind.com/wp-content/uploads/2018/01/Data-sheet-WindTree-NWW-ENG.pdf>

6. Desarrollo del proyecto

- Estimación de la velocidad del viento: <https://www.enair.es/es/app/>

7. Estudio de viabilidad

- <https://www.iberdrola.es/negocios/luz/plan-estable>

Relación CAPEX y OPEX:

- <https://www.myabcm.com/es/blog-post/descubra-las-diferencias-entre-capex-y-opex/>
- <http://director-it.com/index.php/es/el-dinero/195-%C2%BFcu%C3%A1-es-la-diferencia-entre-capex-y-opex.html>
- <https://www.energyst.com/es/noticias/capex-frente-a-opex/>

8. Conclusiones

- <https://www.eve.eus/>
- <http://www.euskadi.eus/gobierno-vasco/-/noticia/2019/9-45m-en-ayudas-para-proyectos-de-eficiencia-energetica-e-instalaciones-renovables/>

