



Trabajo completo correspondiente al artículo

EOLIA HIGHWAYS. Producción de electricidad procedente de fuentes de tipo renovable para carga y consumo de vehículos en carretera

Autores: Juan Manuel García Chamizo, Francisco Javier Ferrández Pastor y Sergio Gómez Trillo.

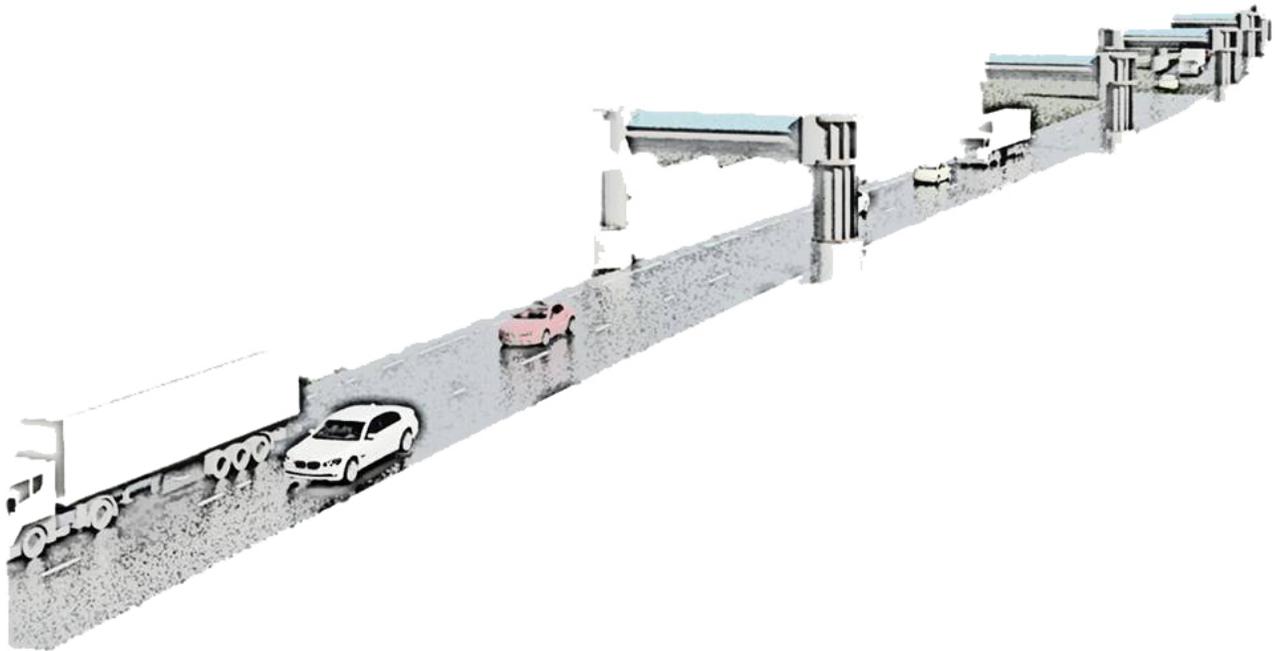
Publicado en el número especial de la revista *Carreteras*:

“Premio Internacional a la Innovación en Carreteras
Juan Antonio Fernández del Campo”. VI Edición 2015-2016

Nº 214, julio – agosto 2017

EOLIA HIGHWAYS

PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD PROCEDENTE
DE FUENTES DE TIPO RENOVABLE PARA CARGA Y
CONSUMO DE VEHÍCULOS EN CARRETERA



ES EL MOMENTO de impulsar una **refundación** de la red de carreteras en aras de adaptarse a los nuevos tiempos de energías limpias y respetuosas con el medio ambiente.

ES EL MOMENTO de crear **valor** a través del fomento de investigaciones destinadas a optimizar el inmenso potencial que atesoran las carreteras.

ES EL MOMENTO de invertir en nuestro **presente y futuro**, proyectando carreteras capaces de producir la **energía** necesaria para el autoabastecimiento propio y de los usuarios.

EOLIA HIGHWAYS.

EOLIA HIGHWAYS es el único sistema capaz de aprovechar la energía solar, eólica y las corrientes generadas por el paso de los vehículos para su transformación en energía disponible para el consumo.

La energía producida por cada **EOLIA HIGHWAYS** es distribuida a un punto de carga de vehículos eléctricos. En un entorno adecuado, **EOLIA HIGHWAYS** es capaz de producir entre 11.5-16.6 kW/día.

La instalación de una cadena de **EOLIA HIGHWAYS** puede llegar a producir 207-299 kW/día/kilómetro.

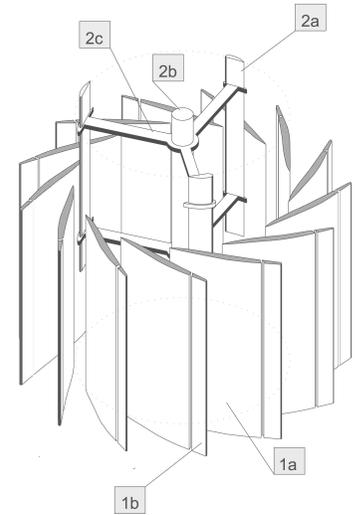
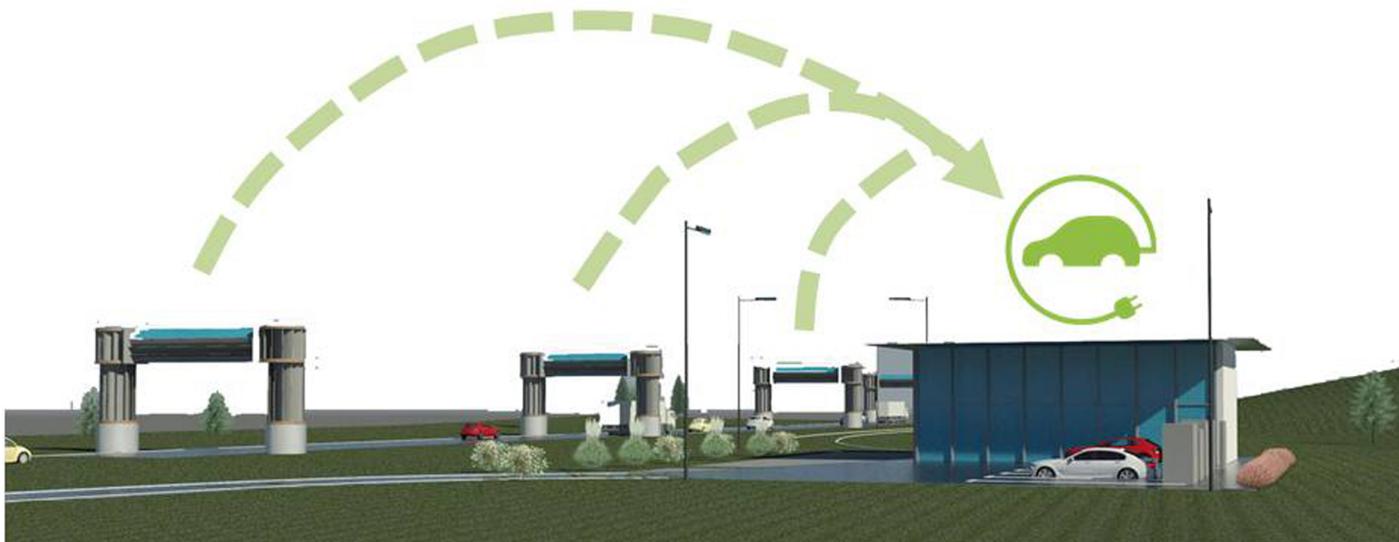


Figure 1: EOLIA, prototipo de concentración para turbina de eje vertical, JMG Chamizo, FJ Ferrández-Pastor y S Gómez Trillo



Índice general

<i>Introducción</i>	9
<i>Objeto de la propuesta</i>	13
<i>Estado del conocimiento</i>	14
<i>Modelado del prototipo</i>	22
<i>Estimación capacidad productiva EOLIA HIGHWAYS</i>	39
<i>Bibliography</i>	46

Índice de figuras

- 1 EOLIA, prototipo de concentración para turbina de eje vertical, JMG Chamizo, FJ Ferrández-Pastor y S Gómez Trillo 4
- 2 Prototipo de concentración para turbina de eje horizontal, R Oman y K Foreman 16
- 3 EOLIA, prototipo de concentración para turbina de eje vertical, JMG Chamizo, FJ Ferrández-Pastor y S Gómez Trillo 17
- 4 Contorno de velocidad de una turbina VAWT giromill, 3 palas rectas verticales 19
- 5 Velocidad y dirección de las corrientes eólicas a 10m durante 3 días, Estación Rabassa, periferia de Alicante 23
- 6 Interfaz de usuario del software PVGIS 24
- 7 Vehículos utilizado en las simulaciones CFD 24
- 8 Toma de datos de la velocidad a causa de las corrientes generadas por el paso de vehículos 29
- 9 Previsiones de tráfico marítimo para 2020 en relación a los puertos del territorio nacional 29
- 10 Sistema central de recuperación de corrientes generadas por el paso de vehículos 32
- 11 Sistema de captación EOLIA 34
- 12 Composición estructural base 36

13	Composición estructural modificada para la inserción de los sistemas de captación lateral	38
14	Arquitectura del prototipo	39
15	Tramo de circulación A-31 entre las localidades de Sax y Villena	40
16	Recurso solar disponible	40
17	Ángulo óptimo de la instalación	40
18	Producción eléctrica mediante captación solar	41
19	Geometría modelada para simulación CFD	41
20	Interfaz de concentración eólica EOLIA	41
21	Curva de potencia para el rotor $\varnothing 1.5\text{m} * 2\text{m}$ de altura	42
22	Formación de vórtices, distancia entre estructuras 30m	43
23	Formación de vórtices, distancia entre estructuras 30m	44

Introducción

LAS REDES VIARIAS han sido fundamentales para el desarrollo y consolidación de las actuales estructuras urbanas y sociales. Tras la irrupción de la Revolución Industrial en las últimas décadas del siglo XVIII, las ciudades crecieron carentes de una ordenación básica y programada. Se caracterizaban por ser espacios donde prevalecía la heterogeneidad de usos, prósperos en actividad y una comunicación particularmente fluida entre individuos ¹. Esta bonanza industrial impulsó el crecimiento demográfico de manera superlativa durante el siglo XIX. El fenómeno tuvo una enorme intensidad en las grandes urbes norteamericanas, originándose de manera espontánea los conocidos como suburbios o *sprawls*.

Este desbordamiento social fue el propulsor de un nuevo modelo urbano disperso y expansivo. Sus fundamentos residían en una descentralización de espacios y planificación funcional del suelo, apoyándose en un complejo entramado de redes de comunicación y servicio. Cada nodo se definía como un espacio monofuncional, de reducida densidad urbana, y donde la actividad mayoritariamente se concentra en una determinada franja horaria. Mientras el modelo compacto basaba su crecimiento tradicionalmente alrededor de las estaciones de ferrocarriles y puertos marítimos, el modelo disperso fomentaba la descentralización de los puntos de actividad industrial y comercial. E Glaeser ² señala como factores de primer orden el uso del vehículo

¹ Salvador Rueda. La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa. *Ciudades para un futuro más sostenible*, pages 69–80, 1997. URL <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a009.html>

² Edward L Glaeser and Matthew E Kahn. The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67(3):404–418, 2010. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094119009001028>

y el auge del transporte de mercancías por carretera para la aceptación y posterior consolidación del modelo a lo largo del siglo XX hasta la actualidad.

En estas últimas décadas se ha vivido una expansión extraordinaria de las redes de comunicación. Sirva de ejemplo el crecimiento de la red viaria estadounidense³, la cual crece a un promedio de 6,500 millas (10.462km) de carreteras públicas desde 1980 hasta la actualidad. La red de carreteras estadounidense supera los 6,5 millones de kilómetros, por delante de China con 4,6 millones.⁴ En su caso, en el periodo 2005-2015 la red ha incrementado su kilometraje un 35%, esperando alcanzar en 2020 los 5,3 millones de kilómetros. En el caso de España, desde 1970 hasta 2014, la red de carreteras del Estado ha aumentado un 19.5%.⁵ Según datos de Eurostat datados a principios de 2015, España es líder en la Unión Europea y tercer país por detrás de China y Estados Unidos en relación a la longitud de la red de autopistas y autovías. La longitud total asciende a 166.284 km, de los cuales 15.048 km corresponden a autopistas y autovías y 1.656 km a carreteras de doble calzada.

Una buena parte de estas nuevas vías provienen de la reconversión de caminos rurales en carreteras con mayor capacidad en aras de adaptarse ante las consecuencias del fenómeno migratorio rural-urbano. En este sentido, la puesta en marcha de proyectos de infraestructuras viales y carreteras según GB i Queralt⁶ precisa de una pormenorizada reflexión en torno a las siguientes interrogantes: ¿Cuánto cuesta? ¿Qué beneficios aportará la nueva infraestructura? ¿Qué podría lograrse con un uso alternativo de los recursos exigidos por el proyecto en consideración? Esta última pregunta está relacionada con el análisis del *coste de oportunidad*, es decir, si el valor de los recursos previstos es utilizado en proyectos alternativos produciría mayores beneficios, o incluso como apunta el autor, considerar la posibilidad de no

³ Los datos han sido consultados en la página web de la Administración Federal de Autopistas, organismo dependiente del Departamento de Transporte de Estados Unidos. <http://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/>

⁴ Los datos han sido consultados en la página web de la Oficina Nacional de Estadística del Gobierno de China. <http://www.stats.gov.cn/english/statisticaldata/AnnualData/>

⁵ Los datos han sido consultados en la página web del Ministerio de Fomento del Gobierno de España http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/CARRETERAS/CATYEVO_RED_CARRETERAS/

⁶ Germá Bel i Queralt. La racionalización de las infraestructuras de transporte en España. *Cuadernos económicos de ICE*, (80):211-228, 2010. URL <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3708336&orden=308960&info=link>

realizar acción alguna.

Resulta manifiesto el enorme impacto que tienen las redes de comunicación sobre la actividad económica, industrial, cultural y social de un determinado territorio. Sin embargo, en la mayoría de casos el retorno de la inversión es complejo. El análisis coste-beneficio ⁷ es una de las herramientas más utilizadas a la hora de evaluar la viabilidad de un proyecto de infraestructuras para el transporte rodado. Según B Santos et al. ⁸, uno de los parámetros tradicionales para tales análisis es el coste unitario del viaje. A priori la reducción del tiempo de viaje implica una disminución de costes para el usuario. Ello desencadena destinar buena parte de las inversiones en aquellos territorios con mayor concentración poblacional, causando desequilibrios latentes entre territorios con una menor población o con mayor disgregación. ⁹

¹⁰.

En los últimos tiempos es común incorporar el estudio de las condiciones de equidad del territorio dado en complemento al análisis anterior. Según T Littman & M Brenman, este documento permite profundizar en una planificación sostenible, a partir de un equilibrio entre objetivos económicos, sociales y medioambientales ¹¹. Esta evaluación se basa en el análisis de parámetros tales como el Coeficiente de Gini y el Índice de Theil o Índice de Atkinson. Tanto el análisis coste-beneficio como los estudios de equidad desestiman la hipótesis de un aprovechamiento complementario de las carreteras, capaces de reportar importantes ingresos a tener en cuenta.

El creciente desarrollo de sistemas de generación basados en fuentes renovables han suscitado un nuevo paradigma relacionado con el diseño de sistemas complejos autosuficientes en términos energéticos. Este paradigma

⁷ Karel Martens. Substance precedes methodology: on cost-benefit analysis and equity. *Transportation*, 38(6):959-974, 2011

⁸ Bruno Santos, António Antunes, and Eric Miller. Integrating equity objectives in a road network design model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2089):35-42, 2008. URL <http://trrjournalonline.trb.org/doi/abs/10.3141/2089-05>

⁹ Diego Puga. European regional policies in light of recent location theories. *Journal of economic geography*, 2(4):373-406, 2002

¹⁰ Héctor S Martínez Sánchez-Mateos and Moshe Givoni. The accessibility impact of a new high-speed rail line in the uk—a preliminary analysis of winners and losers. *Journal of Transport Geography*, 25:105-114, 2012

¹¹ Todd Litman and David Burwell. Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(4): 331-347, 2006

se fundamenta en la capacidad que tienen los **seres autótrofos** para la producción racional de la energía necesaria para su autoabastecimiento.

Pese a los grandes esfuerzos depositados, en la actualidad las carreteras¹² siguen siendo uno de los entornos en los cuales mayor contaminación y emisiones nocivas se producen, tanto a la hora de su ejecución como a lo largo de su vida útil .

¹² Según S Muench, la energía destinada en la construcción de carreteras equivale a la consumida por el tránsito de vehículos en 2 años. El gasto energético proviene principalmente de la producción de materiales, 60-80% del consumo de energía, y 60-90% de las emisiones de CO₂ del total contempladas para la construcción.

Stephen Muench. Roadway construction sustainability impacts: Review of life-cycle assessments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2151):36–45, 2010

El impulso del vehículo eléctrico es una de las alternativas más interesante para su reducción de manera drástica. **Su consolidación pasa por el aprovechamiento de las carreteras para la producción de electricidad destinada al abastecimiento.** La disponibilidad de captación de varios tipos de fuente renovable sumado a la extensa superficie abarcada posiciona a las carreteras como uno de los entornos con mayor potencial en términos de producción energética.

Es el momento de impulsar una metamorfosis en las carreteras.

Objeto de la propuesta

LA SUPERFICIE destinada a las actuales redes de carreteras ofrecen un interesante espacio para el desarrollo de investigaciones multidisciplinares. Una muestra de tal variedad es la lista de los trabajos premiados en las diferentes ediciones del **Concurso Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo**.¹³

El objeto principal del presente proyecto es profundizar en el uso de las carreteras como espacios de producción energética. Para ello, se propone el desarrollo de un único sistema que aglutine tecnologías de producción solar, eólica, y recuperación de las corrientes generadas por el tránsito de los vehículos. La electricidad producida tendrá como destino el abastecimiento de un punto de carga centralizado para vehículos eléctricos.

Los criterios para evaluar la aptitud del sistema resultante son los siguientes: potencial de producción energética, ausencia de comportamientos anómalos derivados de la implantación alrededor de las plataformas de tránsito, y cumplimiento de las especificaciones técnicas recogidas en las normativas vigentes aplicables.

¹³ Para más información, visite el siguiente enlace <http://www.premioinnovacioncarreterasjafc.org/trabajos>

Estado del conocimiento

EL PRESENTE PROYECTO se enmarca en el uso de tecnologías de producción energética para su implantación en las plataformas de tránsito.

Una de las tecnologías en vías de desarrollo es aquella capaz de aprovechar las vibraciones producidas por el paso de los vehículos para la producción de electricidad. Esta tecnología ofrece un interesante potencial según se muestra en el proyecto *Roads as energetic crops, carreteras energéticas mediante captación piezoeléctrica*¹⁴. Los resultados de los ensayos realizados ilustran la productividad de los discos dispuestos bajo la capa de rodadura, capaces de generar $10 \mu W$ de potencia, en total 1 KWh en 3,5 metros longitudinales en carreteras de dos carriles con una elevada densidad de tráfico. Un proyecto análogo es el realizado por M Peigney & D Siegert, en el cual se aprovechan las vibraciones originadas en puentes para su transformación en energía eléctrica¹⁵. Los resultados realizados muestran un potencial de producción de $30 \mu W$ durante picos de tránsito rodado.

Otras vías de investigación profundizan en las sinergias latentes con las conocidas como energías renovables. En uno de estos proyectos se propone la instalación de sistemas solares sobre las plataformas de tránsito¹⁶

¹⁴ Antonio Pérez Lepe, Silvia Hernández Rueda, María Ángeles Izquierdo Rodríguez, José Francisco Fernández Lozano, Alberto Moure Arroyo, María Pilar Ochoa Pérez, and Domingo Urquiza Cuadros. Proyecto rec âÀIroads as energetic cropsâÀI carreteras energéticas mediante captación piezoeléctrica. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, (202):6–14, 2015

¹⁵ Michaël Peigney and Dominique Siegert. Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced bridge vibrations. *Smart Materials and Structures*, 22(9):095019, 2013

¹⁶ B Tansel, P Kumar Varala, and V Londono. Solar energy harvesting at closed landfills: Energy yield and wind loads on solar panels on top and side slopes. *Sustainable Cities and Society*, 8:42–47, 2013

. P Sharma & T Harinarayana ¹⁷ proponen una estructura longitudinal circunscrita a las plataformas de tránsito compuesta por una cubierta habilitada para la disposición de sistemas de captación solar. Según los autores, en la carretera Ahmedabad-Rajkot(India) de 205 km, la totalidad del sistema produciría hasta 163 GWh de generación de energía anual para de una sola capa de paneles solares .

¹⁷ Pragya Sharma and Tirumalachetty Harinarayana. Solar energy generation potential along national highways. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4 (1):1–13, 2013

Otra modalidad de aprovechamiento es la inclusión en la plataforma de tránsito de una capa de rodadura compuesta en su gran mayoría por tejido fotovoltaico. Recientemente se ha impulsado por parte del Ministerio de Transportes del Gobierno de Francia un proyecto para la pavimentación de 1.000km con este tipo de sistemas de captación solar ¹⁸.

¹⁸ Anthony King. Solar roads. *Wiley Online Library*, 2016

En el caso de la energía eólica, no existe una bibliografía de referencia para sistemas de producción basados en este tipo de fuente energética implantados en el entorno de las carreteras. De igual manera ocurre con las investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de las corrientes derivadas del tránsito de los vehículos, reduciéndose el estado del conocimiento a varias invenciones objeto de patente.

Una hipótesis que justifique de cierta manera esta carencia, es la naturaleza de las corrientes eólicas circulantes sobre la superficie terrestre. A poca altura, estas brisas se caracterizan por una reducida velocidad, intermitencia y ausencia de un sentido predominante. Una segunda posibilidad es el impacto, en forma estelas y fenómenos turbulentos nocivos para el ejercicio de la conducción, que pueda tener la instalación de un sistema eólico en las proximidades de una carretera.

La energía eólica posee un enorme potencial en relación a su rentabilidad.

La dependencia cúbica de la velocidad justifica que desde hace más de cuatro décadas se venga investigando diseño de estructuras complementarias incorporadas a la turbina eólica con el propósito de mejorar sus prestaciones a partir del incremento de la velocidad de circulación del viento.

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1)$$

Siendo «P» la potencia eólica disponible, « ρ » densidad del aire, «S» superficie de captación de la turbina y «v» la velocidad de las brisas eólicas.

A finales de los años setenta R Oman y K Foreman presentaron un accesorio incorporado a una turbina de eje horizontal capaz de mejorar su rendimiento potencial ¹⁹ Éste prototipo tiene su origen en los planteamientos iniciales de GM Lilley y WJ Rainbird a mediados de los años cincuenta ²⁰.

La incorporación del sistema de concentración eólica aumenta el rendimiento potencial y el tiempo de funcionamiento en comparación al ejercicio libre de las pequeñas turbinas eólicas. Este resultado amplía el alcance de implantación geográfica de estos sistemas de producción energética.

La eficiencia en la incidencia del flujo eólico en los aerogeneradores de eje horizontal depende fundamentalmente del mecanismo de orientación. Este mecanismo se encarga de orientar la góndola según la dirección eólica, con el propósito de alcanzar una incidencia perpendicular sobre las palas de la turbina. La naturaleza turbulenta e intermitente de las corrientes que predominan sobre la superficie terrestre reduce la eficacia en la consecución de este propósito, a lo que hay que añadir los perjuicios derivados de la

¹⁹ KM Foreman, B Gilbert, and RA Oman. Diffuser augmentation of wind turbines. *Solar Energy*, 20(4):305–311, 1978. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X78901226>

²⁰ GM Lilley and WJ Rainbird. A preliminary report on the design and performance of ducted windmills. 1956. URL <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7971>

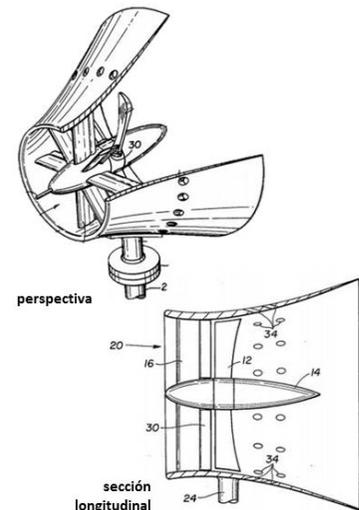


Figure 2: Prototipo de concentración para turbina de eje horizontal, R Oman y K Foreman

sobreactuación que reducen la vida útil del mecanismo.

En el caso de los aerogeneradores de eje vertical la incidencia se produce en planos idénticos al trazado por la rotación, desechando la necesidad de utilizar este tipo de mecanismo. Esta circunstancia conduce a una incidencia eficaz y un mejor par de arranque frente a las velocidades reducidas.

* * *

El prototipo de microgeneración **EOLIA** es uno de los resultados alcanzados en las investigaciones desarrolladas para la elaboración de la tesis doctoral “Aceleración de corrientes eólicas de reducida velocidad para la generación eléctrica doméstica”²¹, redactada por el Dr. S Gómez Trillo y dirigida por el Dr. JM García Chamizo y el Dr. FJ Ferrández Pastor.

EOLIA es el primer sistema de microgeneración híbrido instalable en cualquier volumen arquitectónico. En un único sistema se aprovecha la energía eólica y solar para la generación de electricidad, y además se recoge el agua pluvial para su futura reutilización. **EOLIA** aúna en un único sistema tres tipos de tecnologías capaces de producir energía eléctrica y la reutilización de aguas pluviales para su consumo.

El sistema consta de una estructura de concentración modelada para el aprovechamiento de las brisas circulantes sobre la superficie terrestre. La interfaz concentradora de flujo eólico está configurada para optimizar el aprovechamiento de las corrientes con independencia de su dirección. Se caracteriza por una arquitectura capaz de sectorizar la entrada de viento en diferentes tramos inyectando el flujo eólico estratégicamente. Esta carcasa circunscribe a un aerogenerador de eje vertical tipo giromill de palas rectas

²¹ Sergio Gómez Trillo. Aceleración de corrientes eólicas de reducida velocidad para la generación eléctrica doméstica. 2016

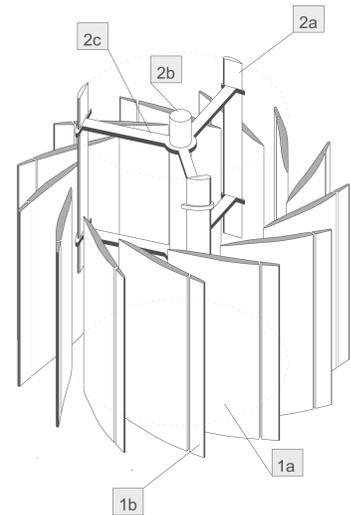


Figure 3: EOLIA, prototipo de concentración para turbina de eje vertical, JMG Chamizo, FJ Ferrández-Pastor y S Gómez Trillo

verticales.

Con la inyección sectorizada conseguimos un efecto muy interesante. El flujo acelerado inyectado promueve la formación de una circulación interior vorticial que incide permanentemente en el rango de sustentación característico del perfil aerodinámico que define la geometría de la pala de rotación. Ello facilita que se alcance un funcionamiento nominal de la turbina con brisas de velocidades reducidas.

Para identificar las regiones estratégicas donde inyectar de manera óptima las brisas aceleradas, hay que tener en cuenta el comportamiento dinámico de los perfiles aerodinámicos. A partir de un ángulo nulo en perfiles simétricos, la fuerza de sustentación generada comienza a incrementarse según lo hace al ángulo de ataque, originándose una estela de limitadas proporciones.

En perfiles asimétricos, el incremento de la fuerza de sustentación se produce a partir de valores ligeramente negativos. Esta tendencia continúa hasta alcanzar un punto máximo en el cual se produce una degradación brusca de la fuerza de sustentación correspondiéndose con el incremento de la fuerza de arrastre. Este punto está relacionado con el desprendimiento de la capa límite generada a lo largo de la superficie del perfil, provocando la formación posterior de vórtices y turbulencias.

El modelado de la arquitectura tiene en cuenta los dos instantes críticos en donde se pueda producir tales fenómenos: el paso a través de la estructura de concentración, y el tramo de inyección hacia las palas de rotación. La arquitectura de la carcasa se ha proyectado con propósito de minimizar la formación de capa límite facilitando el avance del flujo lo más uniforme

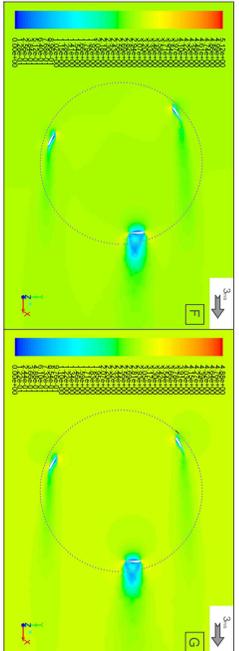
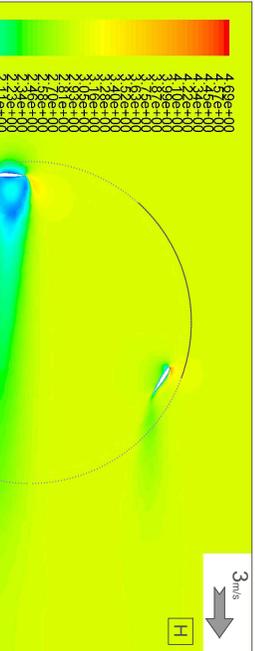
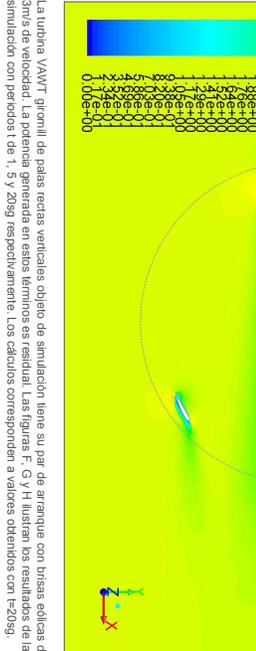
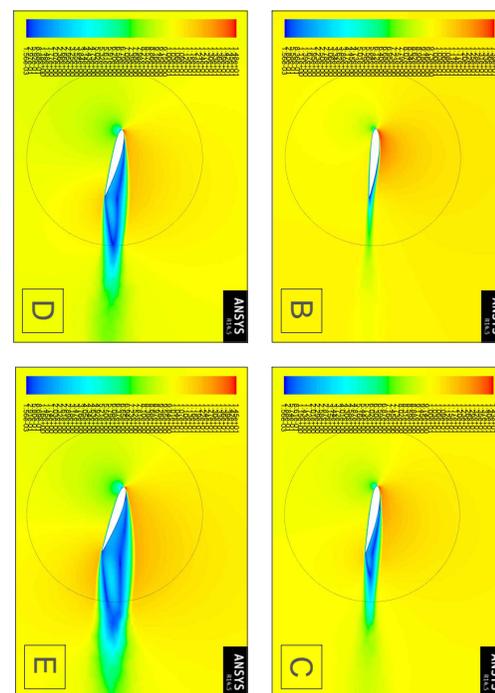
<p>La efectividad del diseño de la interfaz se mide a través de la fuerza generada en la incidencia del flujo eólico sobre la superficie de las palas. Esta fuerza se descompone en sus dos componentes, arrastre y sustentación. Se define la fuerza de arrastre (D) como la ejercida sobre la superficie del cuerpo inmerso en la dirección de la corriente libre. La fuerza de sustentación (L) se define como la ejercida sobre la superficie del cuerpo inmerso en dirección perpendicular a la de la corriente libre.</p> <p>La fuerza de sustentación se incrementa según aumenta el ángulo de ataque. Esta tendencia continúa hasta alcanzar el punto en el cual se produce una brusca degradación correspondiéndose con el incremento de la fuerza de arrastre. Este punto está relacionado con el desprendimiento de la capa límite generada a lo largo de la superficie del perfil. En la figura siguientes se observa el comportamiento de un perfil tipo en distintas posiciones inmerso en una circulación de tipo eólico.</p> <p>En base principalmente a su geometría, cada perfil aerodinámico existe un ángulo característico en el cual se produce el desprendimiento de la capa límite, y comienza el desarrollo de vórtices, incrementándose la frecuencia según aumenta dicho ángulo. Generalmente este ángulo se encuentra en una horquilla entre 10-15°.</p>															
<p>De este comportamiento se deduce la existencia de un reducido rango, en el cual la incidencia del flujo eólico resulta efectiva en base a la fuerza de sustentación resultante generada. En consecuencia, la efectividad de la interfaz vendrá dada por su capacidad para aprovechar este comportamiento.</p>															
<p>El desprendimiento de la capa límite en el perfil NACA 2412 Y $Re = 100.000$ se produce alrededor de los $12,1^\circ$.</p> <p>Las figuras A, B, C, D Y E ilustran la incidencia de la corriente eólica en un perfil aerodinámico en un ángulo de ataque de $0, 4,5, 9, 13,5$ Y 18° respectivamente.</p>															
	<p>La turbina VAWT giramill de palas rectas verticales objeto de simulación tiene su par de arranque con brisas eólicas de 3m/s de velocidad. La potencia generada en estos términos es residual. Las figuras F, G, Y H ilustran los resultados de la simulación con períodos de $1, 1,5$ Y 20seg respectivamente. Los cálculos corresponden a valores obtenidos con $\tau=20\text{seg}$.</p> <p>time = 20,010040, Ux, omega = -0,148647, fuerza = -11,540766</p> <p>Momentos - Moment Axis (0 0 1)</p> <table border="1"> <tr> <td>Zone</td> <td>Pressure</td> <td>Viscosus</td> <td>Total</td> </tr> <tr> <td>Turbina</td> <td>-0,0071161484</td> <td>-0,00093126651</td> <td>4,00386474149</td> </tr> </table> <p> $P_{\text{turbina}} = 1/2 \rho A v^3 = 1/2 \cdot 1,224 \cdot 3,53^3 \cdot \pi = 68,32 \text{ W}$ $P_{\text{viscosas}} = Ux \cdot \text{omega}^2 \cdot u = 0,01 \text{ W}$ $P_{\text{residual}} = (P_{\text{turbina}} - P_{\text{viscosas}}) \cdot 100 = 0,01\%$ </p> <table border="1"> <tr> <td>Título del plano</td> <td>eólica</td> </tr> <tr> <td>Título de la simulación</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Título de la simulación</td> <td>SO1</td> </tr> </table> <p>autor: García Chamizco, J.M. / Ferrández Pastor, Francisco J. / G. Trillo, Sergio</p>	Zone	Pressure	Viscosus	Total	Turbina	-0,0071161484	-0,00093126651	4,00386474149	Título del plano	eólica	Título de la simulación	-	Título de la simulación	SO1
Zone	Pressure	Viscosus	Total												
Turbina	-0,0071161484	-0,00093126651	4,00386474149												
Título del plano	eólica														
Título de la simulación	-														
Título de la simulación	SO1														

Figure 4: Contorno de velocidad de una turbina VAWT giromill, 3 palas rectas verticales

posible hacia el sistema mecánico. Ello se resuelve mediante el cálculo²² del espesor de desplazamiento (2) δ^{**} derivado de la ecuación diferencial de Falkner-Skan (3).

²² El espesor de desplazamiento se define como la hipotética distancia que habría que desplazar la pared sólida hacia el interior de la capa límite para eliminar la capa turbulenta generada.

$$\delta^{**} = x \sqrt{\frac{2-\alpha}{Re_x}} \lim_{\eta \rightarrow \infty} [\eta - f(\eta)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial^3 f}{\partial \eta^3} + f \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} + \alpha \left(1 - \frac{\partial f}{\partial \eta}\right)^2 = 0 \quad (3)$$

siendo las condiciones límites,

$$f(0) = f'(0) = 0, f'(\infty) = 1 \quad (4)$$

En síntesis, el uso de la interfaz deriva en un aumento de la potencia eléctrica generada al incrementarse la velocidad de incidencia del viento en la turbina. La estructura de la interfaz de acelerador es tal que los sistemas de energía solar pueden ser colocados en su cubierta obteniendo de esta manera un sistema híbrido capaz de generar una gran parte de la electricidad requerida por un volumen arquitectónico.

* * *

El prototipo **EOLIA** es el resultado de la aplicación de la metodología de cálculo elaborada para este tipo de estructuras de concentración incorporadas sobre todo tipo de aerogeneradores de eje vertical. Una de las ventajas de esta metodologías es la posibilidad de extrapolar este tecnología con el propósito de su implantación en numerosas estructuras cotidianas, con independencia del ámbito urbano.

En este sentido, las **carreteras** ofrecen numerosas posibilidades gracias a su trazado mayoritario en espacios abiertos y adaptados a la morfología terrestre. Ello facilita la óptima captación de la radiación solar y las brisas presentes, sin que existan prácticamente obstáculos que puedan tener repercusión negativa. Por otro lado, la adaptabilidad al terreno posibilita detectar patrones de circulación y aceleraciones locales en tramos acotados. Ello facilita que se puedan aprovechar fenómenos tales como la inversión térmica, la captación de corrientes catabáticas, anabáticas, o superficies conocidas por una elevada variación en la presión atmosférica.

A ello se suma la generación de corrientes turbulentas gracias al tránsito continuado de vehículos. La penetración de los vehículos a través de las masas de aire provoca el movimiento turbulento de las mismas, originándose estelas y corrientes laterales de interesante potencial. Este conjunto de motivaciones son suficientes para impulsar el diseño y desarrollo de **EOLIA HIGHWAYS**.

Modelado del prototipo

Objetivos y metodología

PARTIENDO DEL OBJETO DE LA PROPUESTA se extraen tres objetivos fundamentales para el desarrollo de **EOLIA HIGHWAYS**. Estos hitos son de gran utilidad a la hora de redactar una hipótesis inicial del modelo a resolver.

El **primer objetivo** es la integración en un único sistema de tecnologías capaces de rentabilizar la energía solar, eólica y las corrientes generadas por el paso de los vehículos para su transformación en energía disponible para el consumo. El **segundo objetivo** es el diseño de un modelo que cumpla con las especificaciones técnicas descritas en las normativas viales vigentes. El **tercer objetivo** está relacionado con la ausencia de efectos perjudiciales para el ejercicio de la conducción achacables a la implantación del sistema.

Para su resolución se propone utilizar la metodología *top-down* a partir de la aportación de requerimientos que profundicen en la solución de los objetivos impuestos. Hay que tener en cuenta que todo requerimiento es clasificable en función de su intensidad de alcance, es decir, la cantidad de

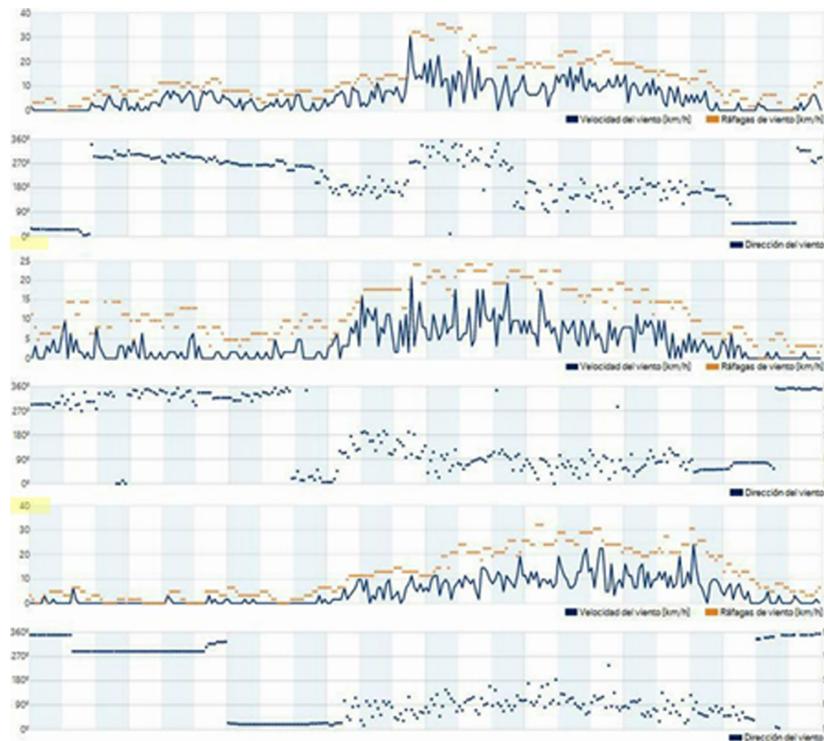
elementos del problema que se vean afectados. El propósito es elaborar un árbol de resolución desglosado en diferentes niveles en función a la intensidad de alcance, profundizando hasta alcanzar soluciones conocidas en cada una de las ramificaciones.

Evaluación del recurso energético

Energía eólica y solar

Las brisas eólicas circulantes sobre la superficie terrestre a una altura no superior a 10m es un recurso energético con escasa investigación. Como se comentaba anteriormente, uno de los posibles motivos es la baja energía de este recurso, intermitencia y ausencia de dirección predominante, lo cual dificulta su posterior explotación comercial. ²³

23



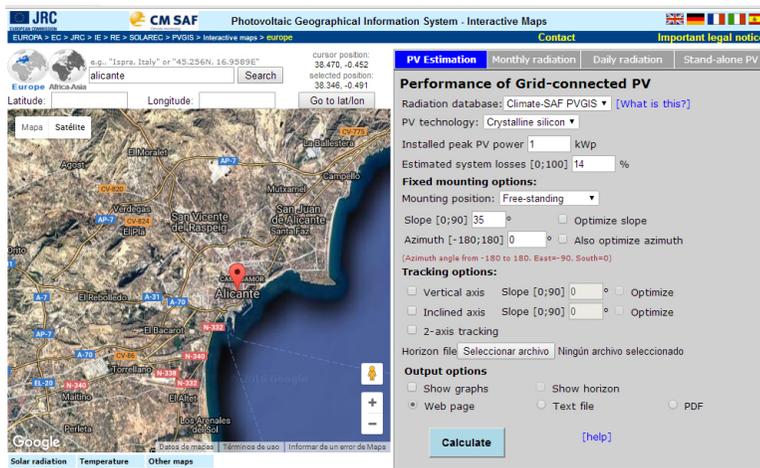
A modo ilustrativo se adjunta los datos tomados de velocidad y dirección de las corrientes eólicas a 10m durante 3 días seguidos elegidos al azar, en la estación de Rabassa (Alicante). Los perfiles muestran la naturaleza turbulenta de las brisas circulantes a tales cotas en territorios sin una morfología singular. La ausencia de dirección predominante es manifiesta, el rango direccional en el primer día supera los 270, mientras en los dos días siguientes el rango se sitúa alrededor de 180. La circulación es casi continuada a excepción de las horas nocturnas, con velocidades promedios alrededor de los 10-20km/h.

Figure 5: Velocidad y dirección de las corrientes eólicas a 10m durante 3 días, Estación Rabassa, periferia de Alicante

Son numerosos los espacios abiertos donde la presencia de las brisas es predominante con independencia de su velocidad o sentido de circulación. La tecnología desarrollada para **EOLIA** multiplica los territorios donde se puede impulsar su instalación, al tener un funcionamiento con brisas prácticamente residuales del orden de 1-1.5m/s.

Por otro lado, el conocimiento amplio de la posición del Sol²⁴ a lo largo del tiempo así como la radiación que llega a la Tierra, permite calcular con precisión la producción de energía a través de su captación.

²⁴ PVGIS es una herramienta interactiva y de gran utilidad que proporciona datos relativos a la captación solar en un territorio dado, permitiendo realizar una estimación de la producción energética en función del sistema de captación seleccionado. [://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php)



Corrientes producidas por el tránsito de vehículos

El tránsito de los vehículos origina corrientes posteriores en formas de estelas y turbulencias a causa de la penetración a través de las masas de aire. Esta acción consume tanto aceleraciones significativas tanto lateral como verticalmente. Para analizar estos fenómenos se han realizado simulaciones con diferentes configuraciones en función al número, distancia y tipología de vehículos presentes.

Las simulaciones se han realizado mediante ANSYS, un software de

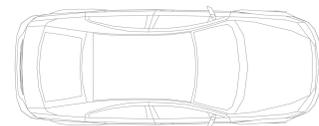
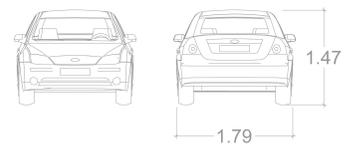
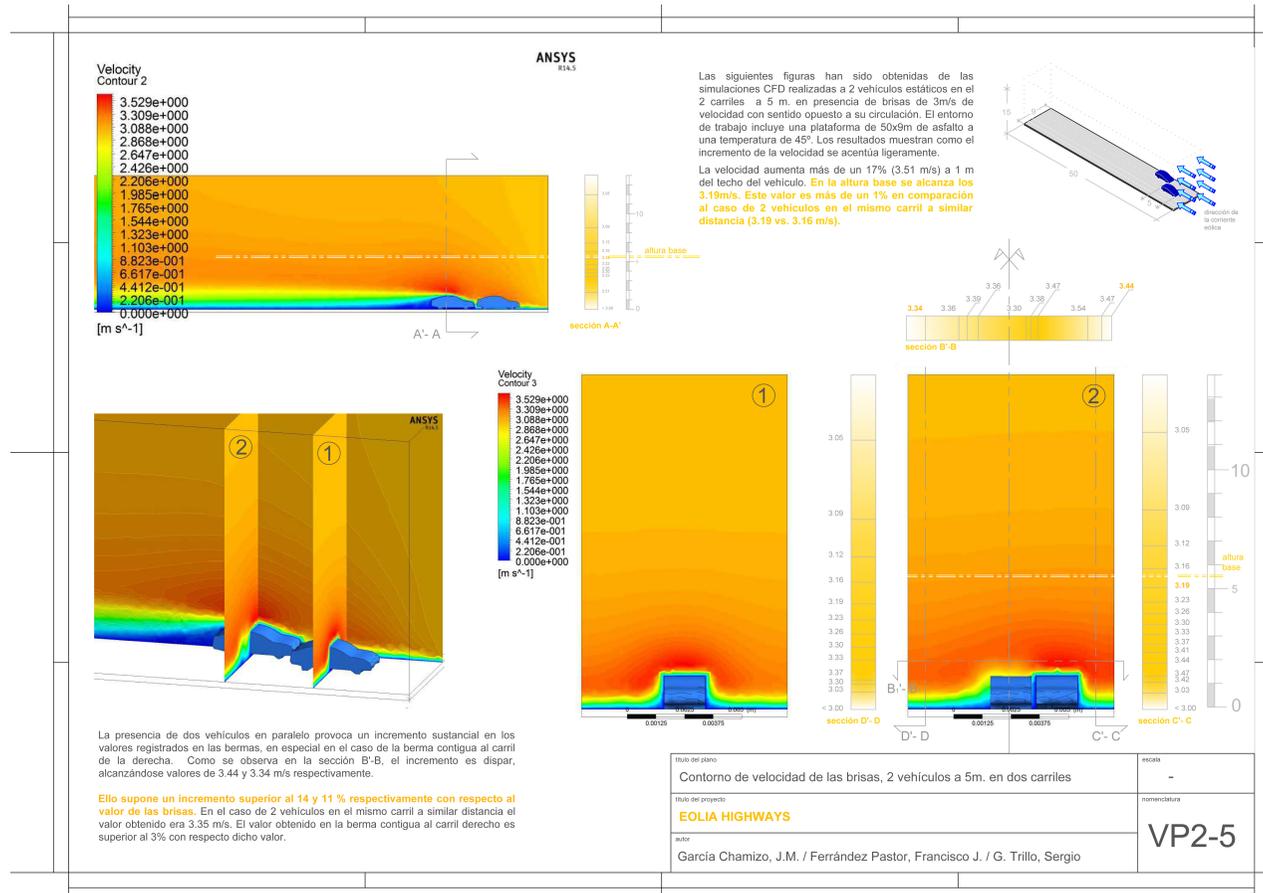
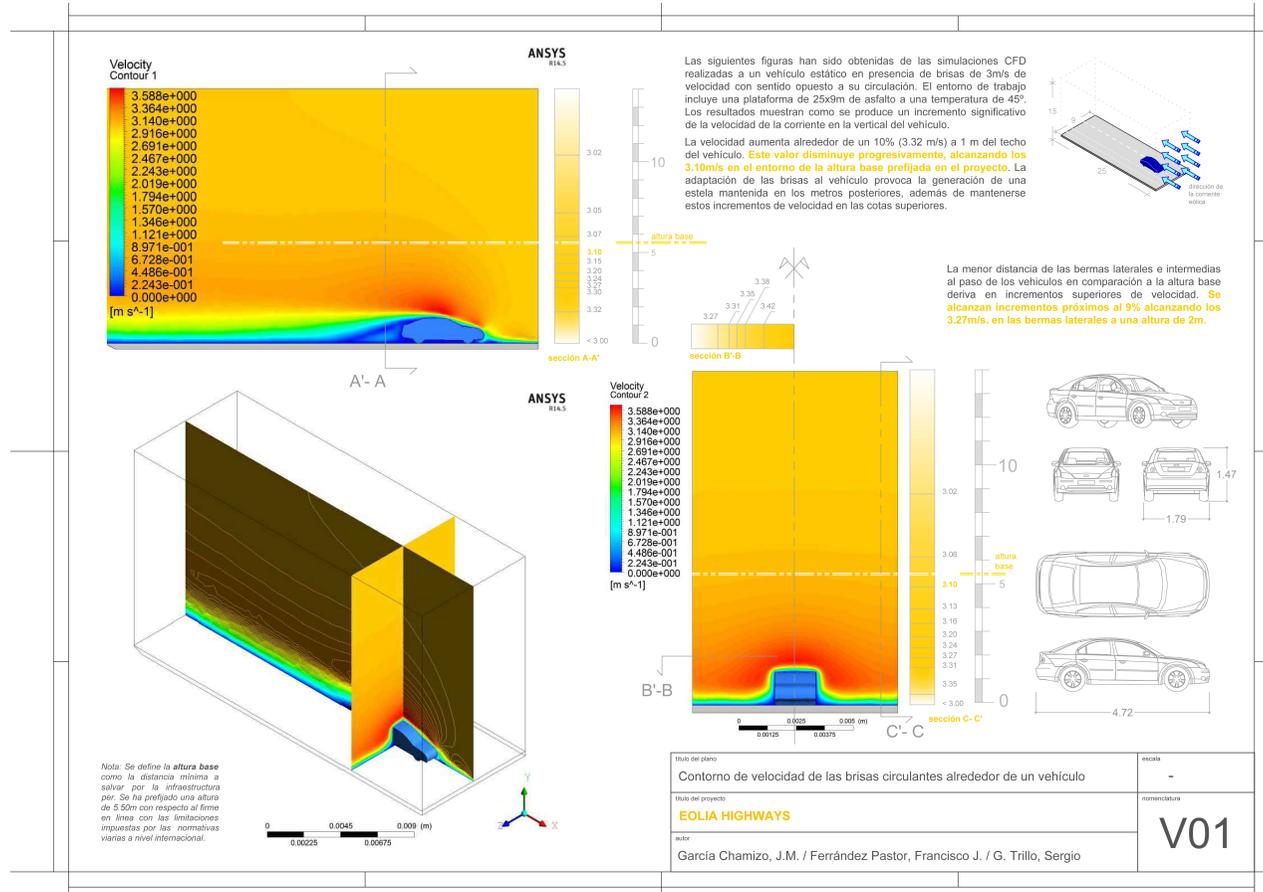
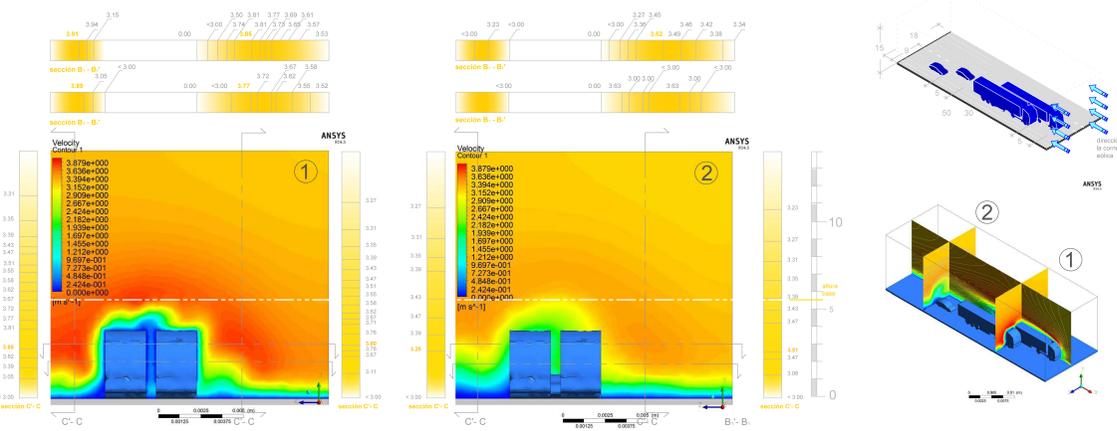


Figure 7: Vehículos utilizado en las simulaciones CFD

dinámica de fluidos computacional(CFD). El propósito ha sido modelar un entorno a modo de túnel del viento, con una entrada de aire inyectada a un elemento estático, en este caso un número determinado de vehículos. Los modelos se han sometido a corrientes de 3m/s con una turbulencia del 25%, la duración de cada simulación ha sido de $t=10\text{sg}$, se ha definido como hipótesis de partida una temperatura de asfalto de 45°C , y utilizado el modelo de viscosidad *Transition SST*. Uno de los objetivos fundamentales era identificar aquellas regiones en las cuales se producían aceleraciones significativas. Los resultados más significativos se sintetizan a continuación:

- La penetración de vehículos o camiones provoca la aparición posterior de una estela turbulenta y con velocidades residual. En todas las simulaciones realizadas, la longitud de la estela superaba los límites longitudinales del entorno de simulación (25m para el caso del vehículo en solitario).
- La adaptación de las brisas a la arquitectura de los vehículos provoca significativas aceleraciones laterales. A 2m del límite del carril derecho, el valor de la velocidad aumenta entre un 9-13% en comparación al valor inicial de las corrientes. Esta horquilla abarca las configuraciones de vehículo y 2 vehículos en un mismo carril a una distancia entre 5-25m.
- En el caso de vehículos en paralelo la aceleración lateral se incrementa levemente hasta alcanzar el 15% .
- La adaptación de las brisas a la arquitectura de los vehículos también provoca el incremento de la velocidad sobre el vehículo. Tomando como referencia la altura base de proyecto, 5.5m con respecto al firme, el valor de la velocidad aumenta entre un 3-9% en comparación al valor inicial de las corrientes. Esta horquilla abarca las configuraciones de vehículo, 2 vehículos en un mismo carril y vehículos en paralela a una distancia entre 0-20m.

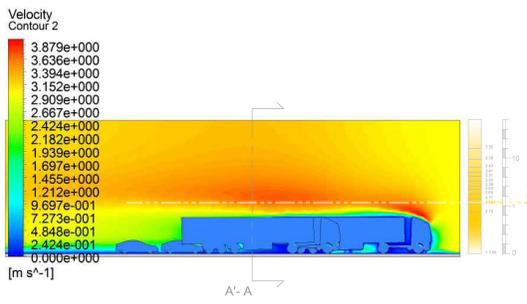




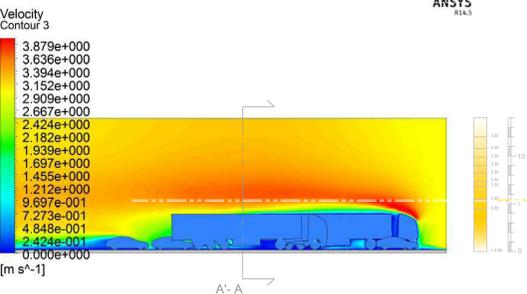
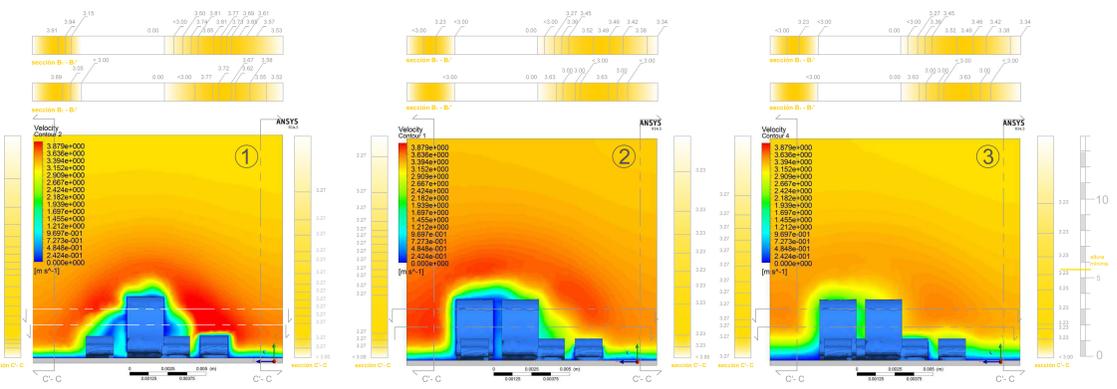
Las siguientes figuras han sido obtenidas de las simulaciones CFD realizadas a dos camiones y vehículos en paralelo a una distancia de 5m, en presencia de brisas de 3m/s de velocidad con sentido opuesto a su circulación. El entorno de trabajo incluye una plataforma de 50x18m de asfalto a una temperatura de 45°.

En estas imágenes se pueden ver comportamientos significativos. En la altura base, la velocidad alcanza 3.65 m/s, un 22% superior al valor de la brisa eólica. En las bermas laterales se alcanza una velocidad de 3.80-3.90 m/s a una altura de 3m sobre el firme. Este valor corresponde con una sección perpendicular al paso de los camiones. Esta puntualización es necesaria, ya que la velocidad es sensiblemente inferior si observamos la sección 2 situada una vez han pasado los dos camiones (3.50 y 3.25 m/s).

Este comportamiento nos permite atisbar que entre 2 y 3 metros en las bermas laterales se puede obtener un aprovechamiento óptimo sin que las estelas generadas tengan una influencia importante. En segundo lugar, el aprovechamiento de estas corrientes en la altura base se multiplica con viales donde el paso de camiones sea predominante.



Titulo del plano	sección
Contorno de velocidad de las brisas, 2 camiones y vehículos en paralelo, 5m	-
Titulo del proyecto	nomenclatura
EOLIA HIGHWAYS	CV05-2
Autor	
García Chamizo, J.M. / Ferrández Pastor, Francisco J. / G. Trillo, Sergio	



Titulo del plano	sección
Contorno de velocidad, tráfico medio en cuatro carriles	-
Titulo del proyecto	nomenclatura
EOLIA HIGHWAYS	CV-M
Autor	
García Chamizo, J.M. / Ferrández Pastor, Francisco J. / G. Trillo, Sergio	

- El paso de camiones provoca un incremento cualitativo en relación a los anteriores valores. A 2m del límite del carril derecho, el valor de la velocidad se incrementa entre un 30-40%. Esta horquilla abarca las configuraciones de camión y vehículo en un mismo carril a una distancia entre 5-25m, y 2 camiones en paralelo.
- La menor distancia entre camión y altura base provoca importantes aumentos en el caso de sobre el vehículo, superiores en todo caso al 22% en comparación al valor inicial de las brisas.
- Se han detectado dos comportamientos diferenciales en relación a dicha adaptación de las brisas. El primero tiene relación con la altura en las aceleraciones laterales, mientras el segundo se refiere a la retroalimentación de las corrientes producidas entre distintos vehículos. La altura mínima para la óptima captación de las aceleraciones laterales se sitúa a partir 0.5-0.8m en los casos de las distintas configuraciones de vehículos. En el caso de camiones y vehículos en paralelo, esta altura mínima se sitúa alrededor de los 2m.
- En el caso de simulaciones con más de dos vehículos, y en especial con la presencia de camiones, la adaptación que se produce en el segundo caso es retroalimentada por las aceleraciones que se han originado en el vehículo inicial. Este efecto se puede ver con nitidez en el plano CV-M, donde se observa que las velocidades son mayores, identificadas en rojo en la escala cromática, y existe una mayor área en valores máximos en comparación tanto al primer plano como en el caso del segundo.

Las mediciones a pie de campo confirmaron la importancia de la retroalimentación, en particular con el paso de camiones. En la figura 8 se recogen varios intervalos en donde se produce el paso continuado de dos o tres camiones.

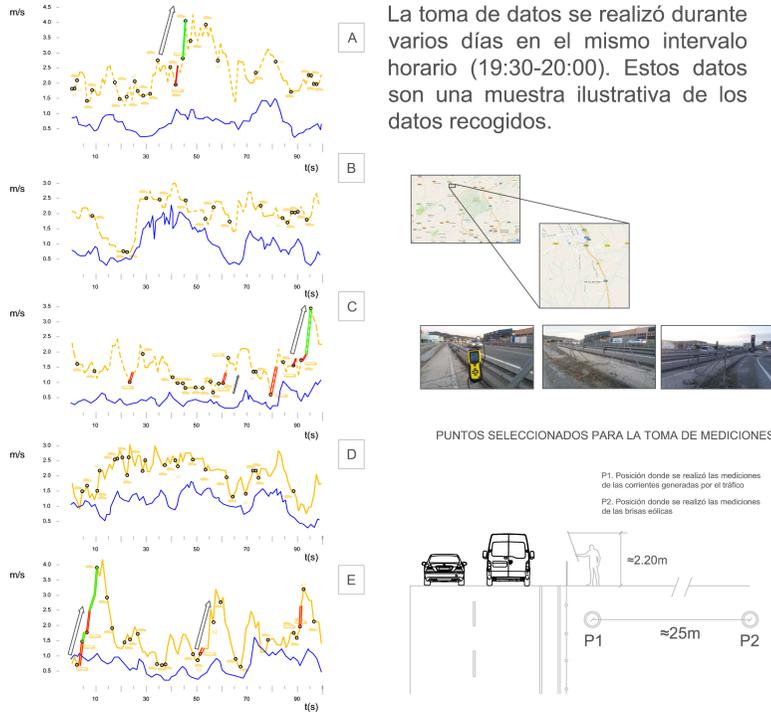


Figure 8: Toma de datos de la velocidad a causa de las corrientes generadas por el paso de vehículos

En conclusión, las carreteras con un tránsito elevado de camiones son especialmente indicadas para la estructura a modelar. En este sentido textcolorangelas carreteras nacionales que se han convertido en la segunda alternativa frente a determinados tramos de autopistas de peaje. Es el caso por ejemplo de la N-VI, conocida como «carretera de A Coruña», en su tramo entre la periferia de Madrid y Adanero. Es un tramo de 72 km de paso continuado de camiones en ambos sentidos, y además en una zona con morfología singularmente agreste.

Otras carreteras propicias para la instalación de **EOLIA HIGHWAYS** son aquellas que comunican puntos de actividad comercial relevante. **Son especialmente interesante aquellas que sirvan de conexión con puertos con una importante actividad en tráfico de mercancías, y sus ramificaciones con ciudades de gran tamaño.** Ello asegura un tránsito continuado de camiones además de un elevado tráfico de vehículos ²⁵.

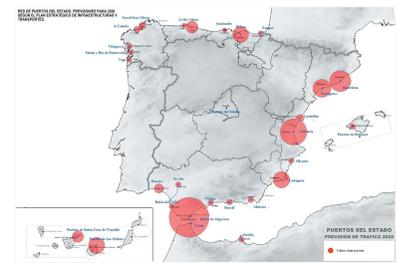


Figure 9: Previsiones de tráfico marítimo para 2020 en relación a los puertos del territorio nacional

²⁵ Los puertos de Barcelona, Valencia, Bilbao, Alicante, Vigo A Coruña, Cádiz o Algeciras son los más importantes de España en tráfico de mercancías. Por lo tanto, son especialmente idóneas aquellas carreteras nacionales y autovías que sirven de conexión con Madrid y las capitales de provincia aledañas.

Diseño de **EOLIA HIGHWAYS**

A la hora de analizar distintos modelos se detectaron dos posibles configuraciones que, *a priori*, satisfacen los objetivos impuestos.²⁶ La presente propuesta comprende una estructura porticada dispuesta transversalmente sobre la plataforma de tránsito. Este tipo de estructura es comúnmente utilizada para la sujeción de paneles informativos, en particular paneles luminosos informativos. Ello permite tener un conocimiento extenso sobre las diferentes configuraciones, perfiles y secciones utilizadas, comportamiento ante las cargas a soportar, etc.

²⁶ La segunda propuesta está siendo objeto de desarrollo en la actualidad

Una de las problemáticas fundamentales a resolver es su propia configuración geométrica, en el objeto de impedir una posible interferencia en el rendimiento de los sistemas de producción energética.

Un segundo reto ha sido la optimización del espacio productivo. En este sentido, ha sido especialmente interesante el juego compositivo entre las distintas arquitecturas de cada uno de los sistemas de producción en aras de maximizar la potencia a generar.

Arquitectura del modelo

EOLIA HIGHWAYS es un sistema de producción de electricidad compuesto por un sistema central para la recuperación de las corrientes generadas de tráfico, dos sistemas EOLIA de captación y transformación eólica dispuesto en los extremos del travesaño y distintas superficies habilitadas para la implantación de sistemas de captación solar. A ello hay que sumar una

variante de diseño, incluyendo dos sistemas EOLIA insertados en cada uno de los pilares.

Sistema de recuperación energética

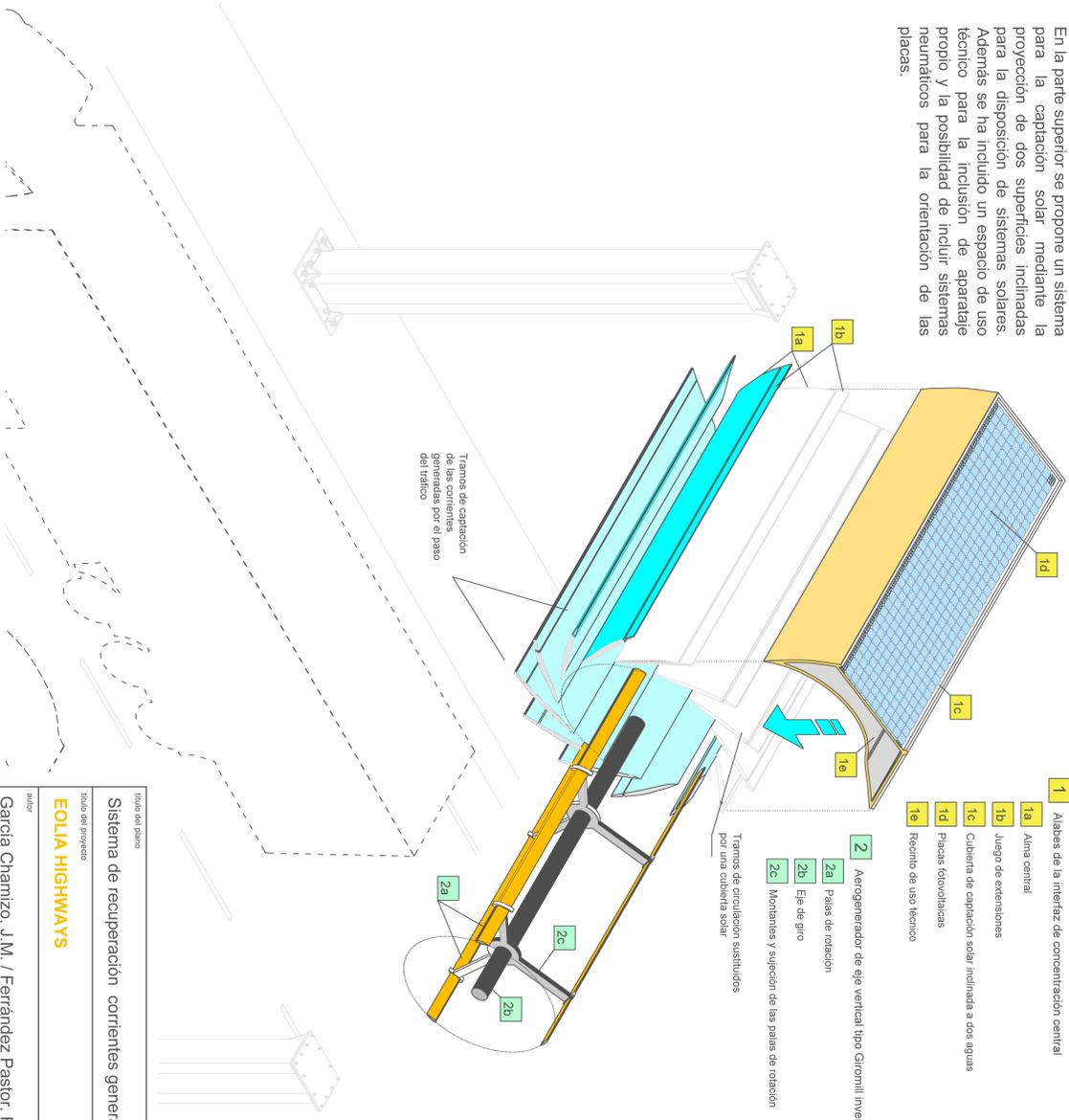
Este sistema es el encargado de la captación de las corrientes generadas a causa del tránsito de vehículos para su posterior transformación eléctrica. El conjunto comprende gran parte de la sección horizontal de la estructura porticada, abarcando la práctica totalidad de los carriles de circulación.

El sistema se compone de un aerogenerador vertical invertido tipo Giromill de tres palas de rotación y una estructura de concentración eólica. Se ha seleccionado este modelo de rotor en base a su elevado rendimiento con independencia del sentido de circulación eólica y mayor torque en comparación a otros modelos similares. En cuanto a la configuración tripala, la elección se realiza en línea con los resultados alcanzados por S Castelli ²⁷, en los cuales se justifica un mejor rendimiento en comparación a otro tipo de configuraciones.

²⁷ Marco Raciti Castelli, Stefano De Betta, and Ernesto Benini. Effect of blade number on a straight-bladed vertical-axis darreius wind turbine. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61:305–3011, 2012

Para el modelado de esta estructura se ha tenido en cuenta la turbulencia manifiesta de las corrientes generadas. Estas condiciones se asemejan en gran medida a la naturaleza de las brisas eólicas circulantes sobre la superficie terrestre.

En la parte superior se propone un sistema para la captación solar mediante la proyección de dos superficies inclinadas para la disposición de sistemas solares. Además se ha incluido un espacio de uso técnico para la inclusión de aparataje propio y la posibilidad de incluir sistemas neumáticos para la orientación de las placas.



El sistema **EOLIA HIGHWAYS** es el primer sistema de microgeneración capaz de aprovechar tres tipos de fuentes de energía en un solo sistema para la producción de electricidad.

Una de las principales aportaciones es la recuperación de parte de la energía consumida por el tráfico. Las corrientes generadas por el paso de los vehículos son captadas por el sistema **EOLIA HIGHWAYS** para su aprovechamiento como fuerza motriz.

El sistema aglutina varias tecnologías destinadas a optimizar la transformación energética de las corrientes generadas por el tráfico, las brisas sólidas circulares sobre la superficie terrestre y la energía solar.

La **parte central** comprende una interfaz de captación y concentración de las corrientes generadas del tráfico. En su interior se incluye un aerogenerador de eje vertical invertido. La incorporación de la interfaz concentradora facilita la captación de las corrientes generadas por el paso del tráfico. Su arquitectura provoca la concentración de las mismas, incrementando progresivamente su velocidad hasta producirse su inyección al interior. Esta inyección se realiza aprovechando el rango de trabajo del perfil en el cual se produce una mayor sustentación (véase plano S1).

La arquitectura de la carcasa se basa en tres aspectos diferenciales: el primero, alcanzar un incremento significativo de la velocidad en relación al valor de las brisas superficiales a través de tramos convergentes. En segundo lugar, minimizar la capa límite generada en las distintas superficies consiguiendo un flujo lo más uniforme posible. Y en tercer lugar, maximizar la fuerza generada en la incidencia, a través de un una inyección estratégica en relación al adecuado trabajo del perfil aerodinámico.

Título del plano		escala
Sistema de recuperación corrientes generadas por el tráfico		-
Título del proyecto		numeración
EOLIA HIGHWAYS		E02
autor		
García Chamizo, J.M. / Ferrández Pastor, Francisco J. / G. Trillo, Sergio		

Figure 10: Sistema central de recuperación de corrientes generadas por el paso de vehículos

Sistemas de captación EOLIA

Los sistemas de captación eólica se componen de un aerogenerador de eje vertical tipo Giromill de palas verticales, una interfaz de concentración eólica, disco inferior y superior, y distintos accesorios para el correcto funcionamiento del conjunto.

El rotor mantiene características análogas al descrito para el sistema central con la excepción en este caso de conservar su posición vertical. La interfaz se compone de 10 álabes que forman otros tantos tramos de circulación de recorrido convergente. Su modelado se ha realizado siguiendo las pautas desarrollados para el caso de EOLIA, con la particularidad de la inserción de la pieza «Y» en el caso de los sistemas dispuestos en el lateral del travesaño. Su función estructural es servir de unión entre sistema central y lateral, impulsando la canalización de las corrientes en uno u otro sistema de producción teniendo en cuenta la adaptación de las mismas a la estructura. Su modelado minimiza el desarrollo de capa límite y efectos turbulentos asociados.²⁸ En su superficie se han incluido unas pequeñas hendiduras para impulsar la canalización en este caso al sistema central.

Sistemas de captación solar

Una de las problemáticas a resolver era la escasa aportación de los tramos superiores del sistema de recuperación energética central. Los tramos inferiores se encargan de manera íntegra de la captación y concentración de las corrientes generadas por el tráfico.

²⁸ Es objeto de futuras investigaciones la inclusión de texturas rugosas con pequeños salientes, con el propósito de retrasar el desarrollo de la capa límite. Esta solución tiene su origen en las propiedades de la piel del tiburón para reducir los comportamientos turbulentos asociados a la inmersión de un cuerpo sólido en un fluido

Brian Dean and Bharat Bhushan. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929):4775–4806, 2010

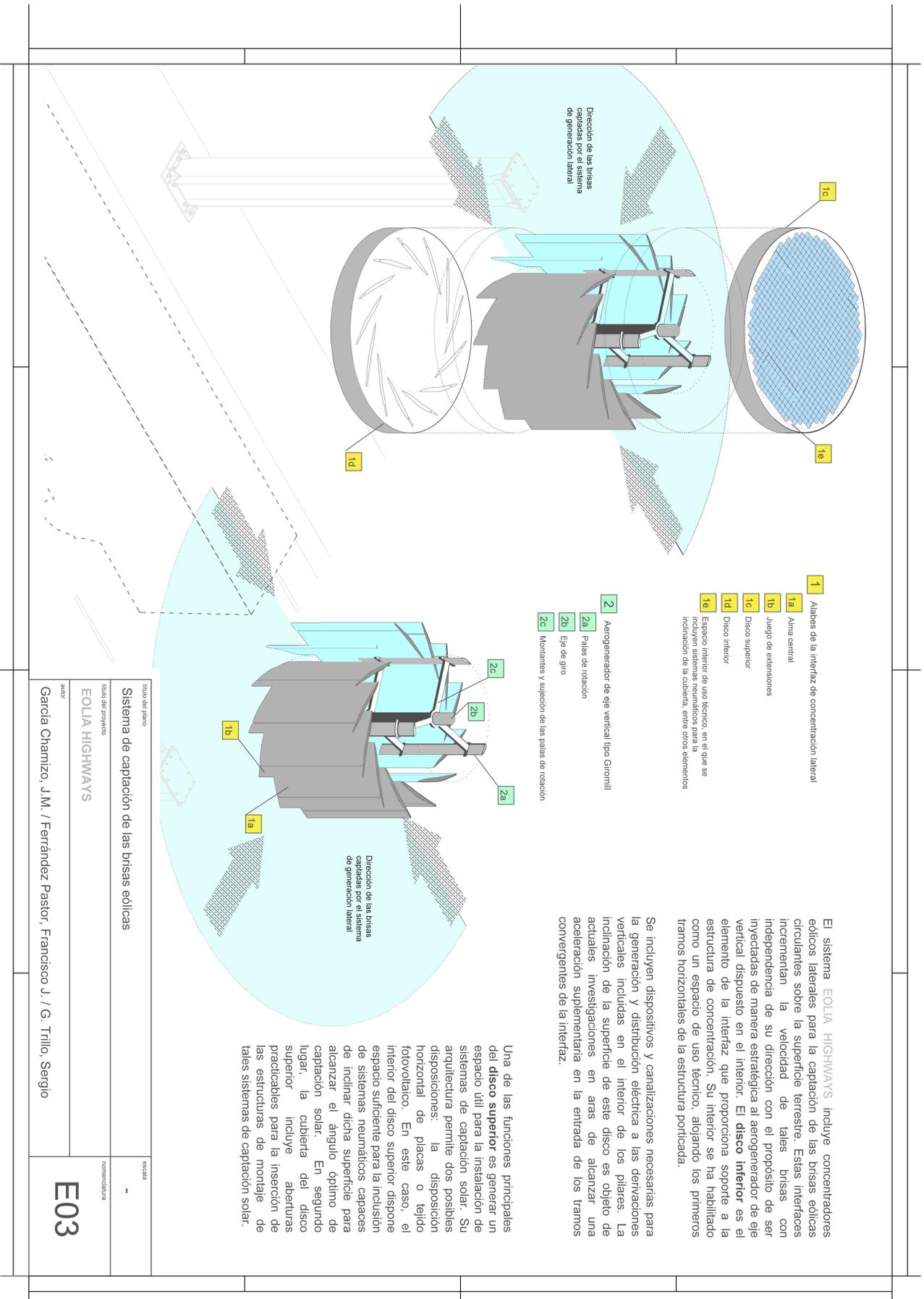


Figure 11: Sistema de captación EOLIA

Título del plano		escala
Sistema de captación de las brisas eólicas		-
Título del proyecto		numeración
EOLIA HIGHWAYS		E03
autor		
García Chamizo, J.M. / Ferrández Pastor, Francisco J. / G. Trillo, Sergio		

Para optimizar dicho espacio se propuso el diseño de una cubierta solar a dos aguas permitiendo así la creación de dos grandes superficies para la producción energética a partir de la radiación solar. A ello se suma un espacio de uso técnico para la disposición de equipamientos de transformación eléctrica, y la posibilidad de incluir sistemas neumáticos para el posicionamiento de los sistemas en un ángulo óptimo para la captación solar. Esta configuración también se traslada a la cubierta de los discos superiores de los sistemas laterales de captación eólica.

Los sistemas de captación eólica situados en los extremos del travesaño incorporan un disco superior apto para la instalación de sistemas solares. De igual manera, su arquitectura permite dos posibles configuraciones: la horizontal de placas o tejido fotovoltaico. En este caso, el interior del disco superior dispone de espacio suficiente para la inclusión de sistemas neumáticos capaces de inclinar dicha superficie en aras de alcanzar el ángulo óptimo de captación. En segundo lugar, la cubierta también incluye aberturas practicables para la inserción de las estructuras de montaje de placas fotovoltaicas o similar.

Estructura porticada

La sustentación del conjunto se realiza a través de una estructura porticada compuesta por dos pilares y una viga horizontal de tramo quebrado embebida a través de los diferentes sistemas de producción energética.

El reto era conseguir un elemento estructural que no entorpeciera o tuviera influencia directa sobre el comportamiento de tales sistemas. Para ello se ha adoptado un diseño quebrado simétrico, con un primer tramo

horizontal incluido en el disco inferior. Este tramo sirve de espina central para la conformación de una plataforma de sustentación del primer sistema de captación eólica. El segundo tramo es un tramo vertical insertado en la pieza «Y», el cual igualmente sirve para la disposición de una estructura auxiliar en la cual se ancle la interfaz del sistema de recuperación de energía.

El tercer tramo se compone de un travesaño horizontal que sirve de eje de giro para el rotor incluido en el susodicho sistema central. El modelado de este elemento se ha realizado siguiendo las prescripciones de la Instrucción de Acero Estructural (EAE) en lo relativo a estados límites de servicio. La flecha máxima estimada para el conjunto de cargas previstas es menor a $L/1000$, en línea con lo exigido por la normativa.

Sistemas de captación EOLIA insertado en los pilares

A una altura de 2m, se insertan nuevos sistemas de captación con el propósito de aprovechar las importantes aceleraciones laterales. Como pasa con el sistema central, el eje de rotación se convierte en un elemento estructural, esta vez sometido principalmente a esfuerzos de compresión.

Este posicionamiento responde por un lado a optimizar la captación acelerada de flujo eólico, y por otro, a aislar los posibles efectos derivados de barreras de protección, arbustos, etc. En ningún caso la arquitectura de estos elementos invadirá el volumen proyectado del arcén. El espacio inferior originado es aprovechado para la colocación de equipamiento técnico y control eléctrico. Para ello se incluye una carcasa de protección de similar diámetro al sistema superior, consiguiendo una estética sólida y atractiva como se muestra en las imágenes iniciales.

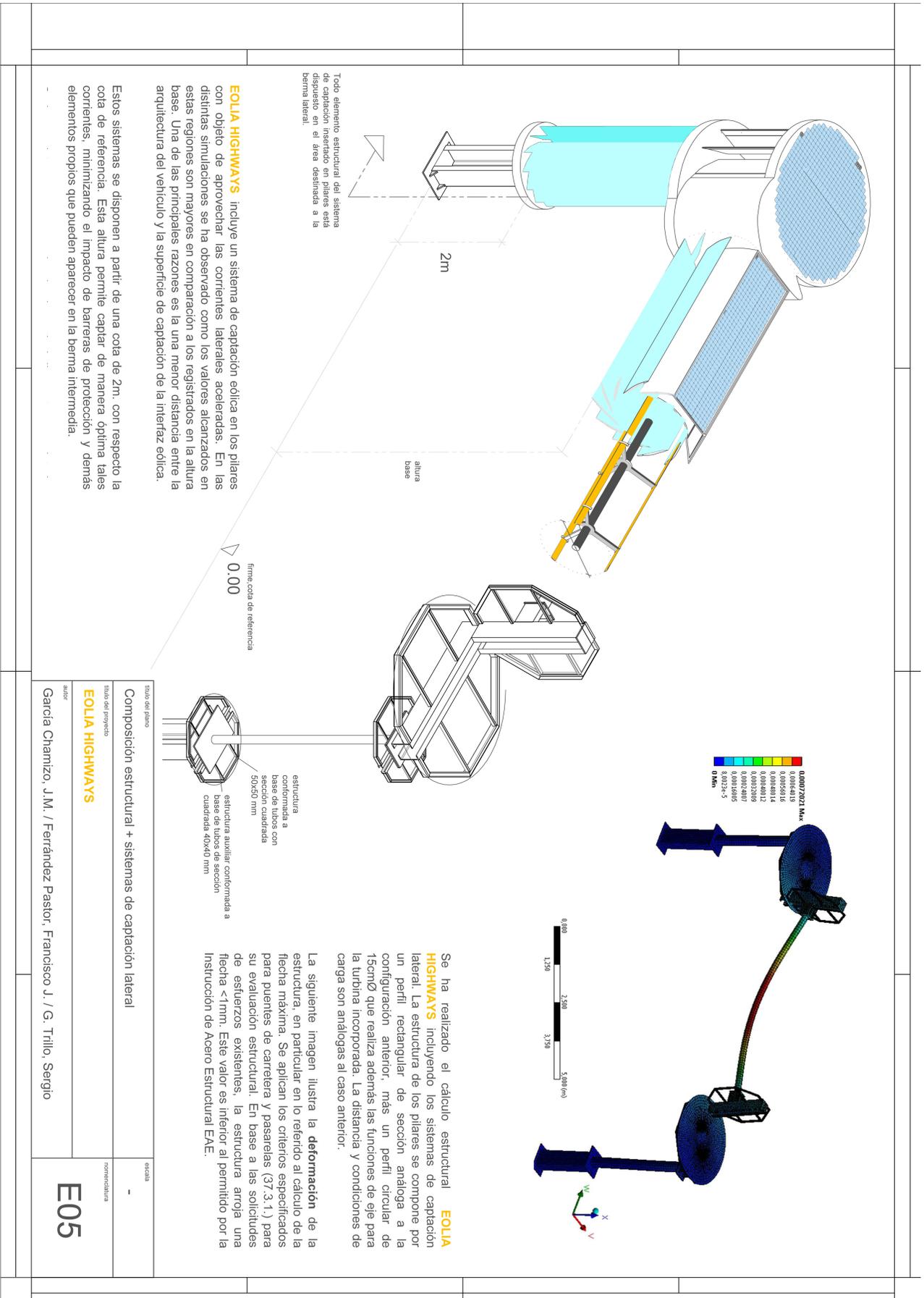


Figure 13: Composición estructural modificada para la inserción de los sistemas de captación lateral

Estimación capacidad productiva **EOLIA HIGHWAYS**

Hipótesis de partida

PARA EVALUAR la capacidad productiva de **EOLIA HIGHWAYS** se propone la estimación de potencia en base a las siguientes hipótesis de partida:

- Configuración: La plataforma de tránsito tiene de ancho 10.5m, desglosados en dos carriles de circulación de 3.5m, arcén exterior de 2.5m e interior de 1m. La bermas tienen un ancho de 1.5m.

Las dimensiones de **EOLIA HIGHWAYS** para su instalación en este caso práctico son las siguientes:

- (a) Sistema de recuperación central: El \varnothing del conjunto es de 2.55m, incluyendo un juego de tres rotores de eje vertical invertido de 1.5m \varnothing y longitud unitaria de 1.75m.
- (b) Sistemas EOLIA laterales: El \varnothing del conjunto es de 2.55m, incluyendo un rotor de eje vertical de 1.5m \varnothing y 2m de altura.
- (c) Sistemas EOLIA embebidos en los pilares: El \varnothing del conjunto es de 1.5m, incluyendo un rotor de eje vertical de 1m \varnothing y 2.5m de altura.

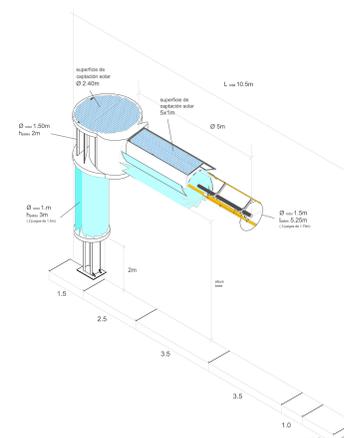


Figure 14: Arquitectura del prototipo

(d) Superficie de captación solar central: Sus dimensiones son 5x1m, en total $10m^2$.

(e) Superficie de captación solar lateral: el \emptyset disponible es de $2.4m\emptyset$, lo que supone $4.5m^2$, en total $9 m^2$.

- Entorno de implantación: La instalación se produce en una autovía de dos carriles de circulación para cada sentido. Se propone el uso de un tramo de la A-31 entre las localidades alicantinas de Sax y Villena.
- Recurso solar: Se adjuntan los datos relativos al recurso solar disponible en función al ángulo de captación, y la curva de óptima inclinación del sistema de captación.



Figure 15: Tramo de circulación A-31 entre las localidades de Sax y Villena

Estimación de la potencia eléctrica a generar

Producción fotovoltaica

Se propone la instalación de dos placas fotovoltaicas en cada uno de los discos superiores laterales. Sus dimensiones son 157.4x80.2 cm con una potencia nominal de 180W. En el caso de las dos superficies centrales se ha optado por 5 placas fotovoltaicas de 88.0x99.2 con una potencia nominal de 100W. El uso de los sistemas neumáticas insertados en los discos superiores y el espacio de uso técnico central permite conseguir la inclinación necesaria para una óptima captación.

La figura 18 ilustra la estimación de potencia mensual en relación a los datos de radiación solar.

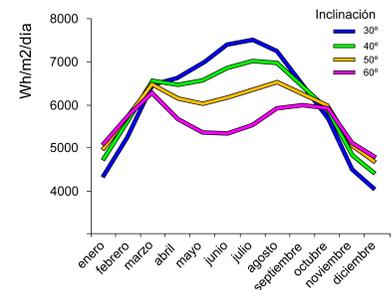


Figure 16: Recurso solar disponible

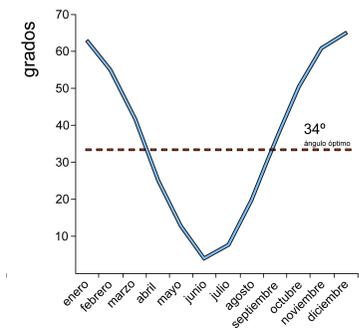


Figure 17: Ángulo óptimo de la instalación

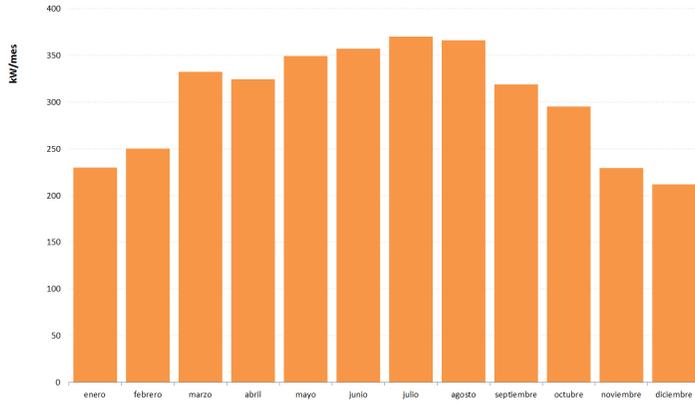


Figure 18: Producción eléctrica mediante captación solar

Producción eólica

El prototipo **EOLIA** es capaz de alcanzar un funcionamiento nominal a partir de brisas con velocidades continuadas de 4-4.5m/s, muy por debajo de los 11 m/s que necesita una turbina estándar. Además se alcanzaba un incremento sustancial del par de arranque, reduciéndose en un 62% el tiempo necesario



Los resultados obtenidos en simulación CFD fueron validados recientemente a través de ensayos realizados en laboratorio a un prototipo de 60 cm

Figure 19: Geometría modelada para simulación CFD

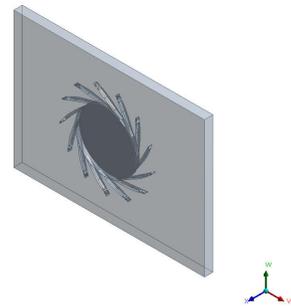


Figure 20: Interfaz de concentración eólica EOLIA

Ø y 16 cm de altura, incorporado sobre una turbina de tres palas de rotación y 40 cm Ø. El propósito de las mediciones es fundamentalmente contrastar la aceleración que se produce en los tramos de circulación situados frente a la fuente eólica. Los resultados obtenidos muestran una estrecha correlación entre los datos obtenidos en las mediciones y las simulaciones realizadas, justificando la viabilidad del diseño de la estructura de concentración eólica para turbinas de eje vertical.²⁹

La semejanza en las dimensiones de los rotores posibilita simplificar los cálculos tomando la misma curva de potencia para todos los casos. La seleccionada es la curva de potencia para el rotor con 1.5mØ y 2m de altura. La potencia máxima en funcionamiento nominal es de 0.7kW.

Tomando como referencia la muestra de mediciones adjuntada anteriormente, en las cuales la velocidad promedio de las brisas registradas en el punto P1 oscilan entre 1.65-1.96 m/s. Con esta horquilla la producción de electricidad oscilaría entre 0.075-0.1kW³⁰ A falta de datos actualizados, la intensidad media de vehículos en 2011 en las proximidades de este tramo oscilaba entre 22.000-26.000 vehículos al día, produciéndose picos de hasta 37.000 vehículos en la época estival. Estamos hablando en el peor de los casos de 15.5 vehículos cada 1 minuto, y teniendo en cuenta que aproximadamente el 33% son camiones. En consecuencia, es aceptable plantear una hipótesis de 8 horas con valores dentro de la anterior horquilla.

Con estos datos la horquilla de producción diaria se situaría 0.6-0.7kW/día, es decir, 18-21kW/mes. Teniendo en cuenta que **EOLIA HIGHWAYS** incorpora 7 turbinas, la producción de electricidad gracias al recurso eólico y las corrientes generadas por el tráfico ascendería a un promedio de 126-147kW/mes. En conclusión, la estimación de electricidad gracias al

²⁹ El desarrollo y resultados de estos ensayos están pendientes de publicación en revista especializada.

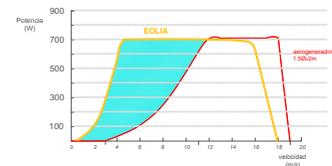


Figure 21: Curva de potencia para el rotor Ø1.5m * 2m de altura

³⁰ véase: http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/3978AC24-7F6F-42C9-88A4-AB0DDA77BD8A/111923/1_Perestacionesmes11.pdf

aprovechamiento de la energía solar, eólica y corrientes generadas por el paso de vehículos por **EOLIA HIGHWAYS** se sitúa entre 350-500kW/mes.

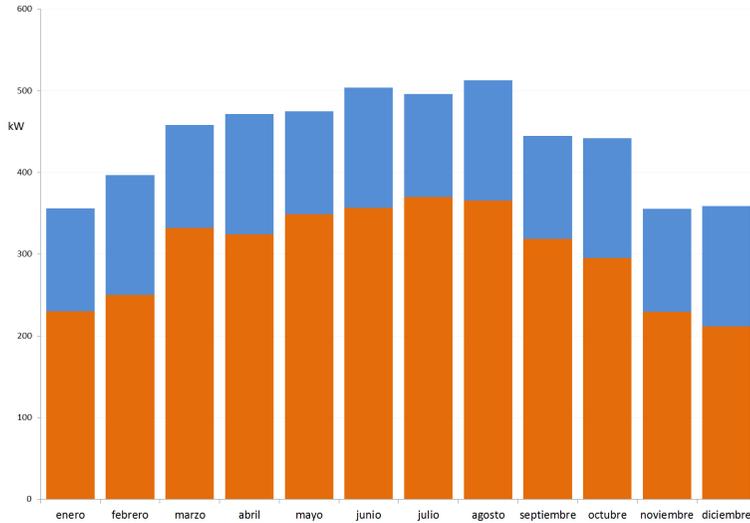


Figure 22: Formación de vórtices, distancia entre estructuras 30m

Distancia mínima de instalación

Para precisar la distancia mínima entre estructuras se han realizado diferentes simulaciones con objeto de determinar la influencia de las estelas y efectos turbulentos generados por la adaptación de las brisas. Se ha procedido a seleccionar una estructura (E1) como referencia fija, mientras se proyectaba una segunda estructura (E2) a sucesivas distancias. Las simulaciones se han realizado durante un intervalo $t=90\text{sg.}$, con velocidades eólicas de 10m/s, siendo los demás parámetros análogos a los anteriores casos. Los resultados muestran el desarrollo de una formación de vórtices *Von Kàrmàn* en las primeras distancias. Según se aumenta la distancia esta formación pierde relevancia.

A partir de 50m. el efecto turbulento de los vórtices es residual y su

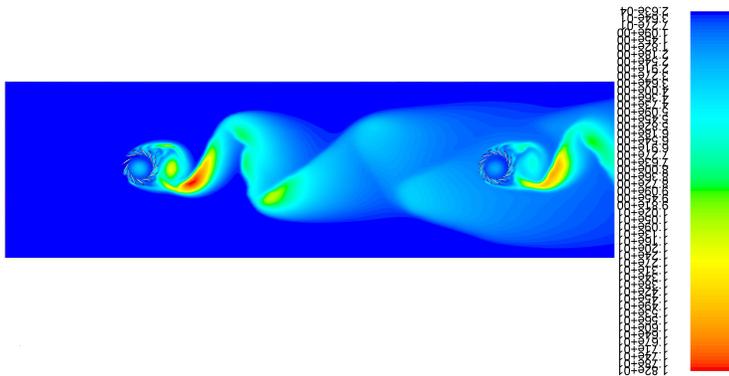


Figure 23: Formación de vórtices, distancia entre estructuras 30m

influencia en la velocidad de entrada es prácticamente nula. Además, hay que tener en cuenta que la adaptación inicial a la estructura E1 origina una zona de remanso justo en la entrada de los tramos de inyección. Esta zona de remanso está cuantificada en una disminución de la velocidad entre un 8-24% en función del tramo seleccionado. Por lo tanto, la distancia mínima óptima entre dos estructuras **EOLIA HIGHWAYS** se sitúa alrededor de los 50m.

En conclusión, en un entorno adecuado **EOLIA HIGHWAYS** es capaz de producir entre 11.5-16.6 kW/día. En un kilómetro se pueden llegar a instalar alrededor de 18 estructuras. La producción de electricidad alcanzaría 207-299 kW/día/kilómetro.

El equipo director del proyecto en colaboración con la **Universidad de Alicante** ha iniciado el procedimiento de patente nacional tanto para **EOLIA** como para **EOLIA HIGHWAYS**.

En el caso de **EOLIA HIGHWAYS**, el objetivo más inmediato es la búsqueda de financiación para la construcción de un prototipo a escala real, con el propósito de validar los resultados alcanzados en simulación.



Justificante de presentación electrónica de solicitud de patente

Este documento es un justificante de que se ha recibido una solicitud española de patente por vía electrónica, utilizando la conexión segura de la O.E.P.M. Asimismo, se le ha asignado de forma automática un número de solicitud y una fecha de recepción, conforme al artículo 14.3 del Reglamento para la ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes. La fecha de presentación de la solicitud de acuerdo con el art. 22 de la Ley de Patentes, le será comunicada posteriormente.

Número de solicitud:	P201630128	
Fecha de recepción:	04 febrero 2016, 13:35 (CET)	
Oficina receptora:	OEPM Madrid	
Su referencia:	PT 2016/0001	
Solicitante:	Universitat d'Alicant / Universidad de Alicante	
Número de solicitantes:	1	
País:	ES	
Título:	INTERFAZ CONCENTRADORA DE FLUJO EÓLICO, MÉTODO DE CÁLCULO DE INTERFAZ CONCENTRADORA DE FLUJO EÓLICO, ALABE DE INTERFAZ Y SISTEMA DE MICROGENERACIÓN PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD DE USO DOMÉSTICO	
Documentos enviados:	Descripción.pdf (23 p.) Reivindicaciones.pdf (7 p.) Resumen.pdf (1 p.) Dibujos.pdf (6 p.) OLF-ARCHIVE.zip	package-data.xml es-request.xml application-body.xml es-fee-sheet.xml feesheet.pdf request.pdf
Enviados por:	CN-ENTIDAD ABRIL ABOGADOS SL - CIF B62976309 - NOMBRE TEMÑO CENCEROS IGNACIO - NIF 093313915.OU-703015345.OU-FNMT Clase 2.CA-O-FNMT-C-ES	
Fecha y hora de recepción:	04 febrero 2016, 13:35 (CET)	
Codificación del envío:	22:AF:18:E8:81:2E:C5:A6:71:E0:40:95:AB:FA:19:35:8C:26:01:1A	



Justificante de presentación electrónica de solicitud de patente

Este documento es un justificante de que se ha recibido una solicitud española de patente por vía electrónica, utilizando la conexión segura de la O.E.P.M. Asimismo, se le ha asignado de forma automática un número de solicitud y una fecha de recepción, conforme al artículo 14.3 del Reglamento para la ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes. La fecha de presentación de la solicitud de acuerdo con el art. 22 de la Ley de Patentes, le será comunicada posteriormente.

Número de solicitud:	S201631228	
Fecha de recepción:	20 septiembre 2016, 16:34 (CEST)	
Oficina receptora:	OEPM Madrid	
Su referencia:	PT 2016/0018	
Solicitante:	Universitat d'Alicant / Universidad de Alicante	
Número de solicitantes:	1	
País:	ES	
Título:	SISTEMA DE MICROGENERACIÓN PARA APROVECHAMIENTO DE CORRIENTES RESIDUALES GENERADAS POR TRÁFICO RODADO EN UN VIAL	
Documentos enviados:	Descripción.pdf (12 p.) Reivindicaciones.pdf (3 p.) Dibujos.pdf (6 p.) Resumen.pdf (1 p.) OLF-ARCHIVE.zip	package-data.xml es-request.xml application-body.xml es-fee-sheet.xml feesheet.pdf request.pdf
Enviados por:	CN-ES-O-ABRIL ABOGADOS S.L.P.2.6.4.97+OC0F0641644669320423882393736833333.CN=093313 915 IGNACIO TEMÑO [R 863276309].[OU=TEMÑO].[CN=Ignacio Temño].[OU=Temño].[OU=093313915].[description=Reg.20066 Hoja 281779 /fome=16641 /foto:71 /fecha:171122008 /inscripción:4	
Fecha y hora de recepción:	20 septiembre 2016, 16:34 (CEST)	
Codificación del envío:	60:11:71:63:9F:84:28:C3:A7:B6:3D:5C:44:FA:CC:09:14:41:4C:6D	

Bibliography

Marco Raciti Castelli, Stefano De Betta, and Ernesto Benini. Effect of blade number on a straight-bladed vertical-axis darreius wind turbine. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61:305–3011, 2012.

Brian Dean and Bharat Bhushan. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929): 4775–4806, 2010.

KM Foreman, B Gilbert, and RA Oman. Diffuser augmentation of wind turbines. *Solar Energy*, 20(4):305–311, 1978. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X78901226>.

Edward L Glaeser and Matthew E Kahn. The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67(3):404–418, 2010. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094119009001028>.

Sergio Gómez Trillo. Aceleración de corrientes eólicas de reducida velocidad para la generación eléctrica doméstica. 2016.

Germá Bel i Queralt. La racionalización de las infraestructuras de transporte en España. *Cuadernos económicos de ICE*, (80):211–228, 2010. URL <https://www.ice.es/revistas/revista-ice>.

[//dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3708336&orden=308960&info=link](http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3708336&orden=308960&info=link).

Anthony King. Solar roads. *Wiley Online Library*, 2016.

Antonio Pérez Lepe, Silvia Hernández Rueda, María Ángeles Izquierdo Rodríguez, José Francisco Fernández Lozano, Alberto Moure Arroyo, María Pilar Ochoa Pérez, and Domingo Urquiza Cuadros. Proyecto rec “roads as energetic crops” carreteras energéticas mediante captación piezoeléctrica. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, (202):6–14, 2015.

GM Lilley and WJ Rainbird. A preliminary report on the design and performance of ducted windmills. 1956. URL <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7971>.

Todd Litman and David Burwell. Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(4):331–347, 2006.

Karel Martens. Substance precedes methodology: on cost–benefit analysis and equity. *Transportation*, 38(6):959–974, 2011.

Stephen Muench. Roadway construction sustainability impacts: Review of life-cycle assessments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2151):36–45, 2010.

Michaël Peigney and Dominique Siegert. Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced bridge vibrations. *Smart Materials and Structures*, 22(9):095019, 2013.

Diego Puga. European regional policies in light of recent location theories. *Journal of economic geography*, 2(4):373–406, 2002.

Salvador Rueda. La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa. *Ciudades para un futuro más sostenible*, pages 69–80, 1997. URL <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a009.html>.

Héctor S Martínez Sánchez-Mateos and Moshe Givoni. The accessibility impact of a new high-speed rail line in the uk—a preliminary analysis of winners and losers. *Journal of Transport Geography*, 25:105–114, 2012.

Bruno Santos, António Antunes, and Eric Miller. Integrating equity objectives in a road network design model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2089):35–42, 2008. URL <http://trrjournalonline.trb.org/doi/abs/10.3141/2089-05>.

Pragya Sharma and Tirumalachetty Harinarayana. Solar energy generation potential along national highways. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1):1–13, 2013.

B Tansel, P Kumar Varala, and V Londono. Solar energy harvesting at closed landfills: Energy yield and wind loads on solar panels on top and side slopes. *Sustainable Cities and Society*, 8:42–47, 2013.