

Trabajo premiado

Quinta Edición

2013 • 2014



premio internacional

A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS

JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO



PROYECTO “ROADS AS ENERGETIC CROPS”

CARRETERAS ENERGÉTICAS MEDIANTE CAPTACIÓN PIEZOELÉCTRICA

Autor y Jefe de proyecto:
Antonio Pérez Lepe

Co-autores:

Silvia Hernández Rueda

María Ángeles Izquierdo Rodríguez

José Francisco Fernández Lozano

María Pilar Ochoa Pérez

Alberto Moure Arroyo

Domingo Urquiza Cuadros

Presidente



D. JOSÉ LUIS ELVIRA MUÑOZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director Técnico de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.
Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid.
Encomienda de la Orden del Mérito Civil y de la de Isabel La Católica. Medalla al Mérito Profesional del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Medalla de Oro de la Carretera.

Vocales (relacionados alfabéticamente)



D. ÓSCAR DE BUEN RICHKARDAY

Ingeniero Civil y Maestro en Ciencias.
Presidente de la Asociación Mundial de la Carretera (AIPCR).
Académico de Número de la Academia Mexicana de la Ingeniería.
Medalla al Mérito Internacional de la Asociación Española de la Carretera.



D. CÉSAR CAÑEDO-ARGÜELLES TORREJÓN

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Presidente de InseRail.
Medalla de Honor y Medalla al Mérito Profesional del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Medalla de Honor con Mención de la Asociación Española de la Carretera.



D. HERNÁN OTONIEL FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ

Ingeniero Civil, Especialista en Vías Terrestres y Maestro de Ingeniería.
Magíster en Dirección Universitaria.
ExRector y Profesor Emérito de la Universidad del Cauca.
Profesor Honorario de la Universidad de Arkansas.
Consultor de organismos internacionales en países latinoamericanos.



D. JOSÉ MANUEL LOUREDA MANTIÑÁN

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Vicepresidente del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Consejero de Sacyr Vallehermoso y Repsol.
Medalla de Honor del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Medalla de Honor con Mención de la Asociación Española de la Carretera.



D. JOSÉ MARÍA MORERA BOSCH

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Vicepresidente de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC).
Medalla al Mérito Profesional del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Medalla de Honor con Mención de la Asociación Española de la Carretera.



D. FÉLIX EDMUNDO PÉREZ JIMÉNEZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Catedrático de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña).
Medalla de Honor con Mención de la Asociación Española de la Carretera.
I Premio Internacional a la Innovación en Carreteras “Juan Antonio Fernández del Campo”.

Secretario



D. JACOBO DÍAZ PINEDA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Secretario de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC).
Director de la Asociación Española de la Carretera (AEC).
Presidente de la Federación Europea de Carreteras (ERF).
Presidente del Instituto Vial Ibero-Americano (IVIA).

Comisión de Valoración

D. VÍCTOR SÁNCHEZ BLANCO (Coordinador)

Banco Caminos.

D. PEDRO BERRUEZO MARTÍNEZ-ILLESCAS

Subdirector General de Construcción de la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Transportes e Infraestructuras de la Comunidad de Madrid.

D^a ELENA DE LA PEÑA GONZÁLEZ

Subdirectora General Técnica de la Asociación Española de la Carretera.

D. FRANCISCO JOSÉ LUCAS OCHOA

Jefe de Asistencia Técnica y Desarrollo de REPSOL.

D. VICENTE PÉREZ MENA

Director Técnico de CEPESA-PROAS.

D. MIGUEL SEISDEDOS PORTA

Director Técnico de IRIDIUM, Concesiones de Infraestructuras, S.A.

D. IÑAKI ZABALA ZUAZO

Director del Área Norte de IECA.

D^a MARTA RODRIGO PÉREZ (Secretaria)

Fundación de la Asociación Española de la Carretera.

Fallo del Jurado de la V Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo”, adoptado en reunión celebrada en Madrid, el día 9 de octubre de 2014

El jueves, 9 de octubre de 2014, se reúnen en Madrid los miembros del Jurado de la “V Edición del Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo”, actuando como Presidente D. José Luis Elvira Muñoz, y como Secretario D. Jacobo Díaz Pineda.

(...)

Tras una intensa deliberación y por acuerdo unánime del Jurado, cuyos miembros emiten su dictamen personalmente, se acuerda otorgar el galardón como mejor trabajo de innovación en carreteras presentado a la “V Edición del Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo” al original que lleva por título **Proyecto “Roads as Energetic Crops”: Carreteras energéticas mediante captación piezoeléctrica**, del que son autores **D. Antonio Pérez Lepe, D. José Francisco Fernández Lozano, D^a Silvia Hernández Rueda, D^a M^a Ángeles Izquierdo Rodríguez, D. Alberto Moure Arroyo, D^a M^a Pilar Ochoa Pérez y D. Domingo Urquiza.**

Asimismo, el Jurado acuerda reconocer con un Accésit el trabajo titulado **Análisis espacial de la accidentalidad vial en área urbana. Caso de Bogotá D.C. Patrones de evaluación con SIG**, y del que es autora **D^a Flor Ángela Cerquera Escobar.**

HOY INVENTAMOS NOSOTROS



Juan Fco. Lazcano Acedo

Presidente de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC) y del Comité de Gestión del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo"

Hace poco más de un siglo, comenzaba uno de los intercambios dialécticos más populares de nuestra historia reciente, protagonizado por dos intelectuales españoles de primer orden, Miguel de Unamuno y José Ortega y Gasset. Corría el año 1906 y el veterano escritor vasco andaba enredado en un enconado debate con un joven José Ortega y Gasset, recién Doctorado en Filosofía por la Universidad de Madrid.

La correspondencia y los artículos de prensa iban y venían entre aquellas dos mentes privilegiadas que analizaban el papel de una España marcada por el Desastre del 98 en los inicios del recién estrenado siglo XX, cuyas vibrantes transformaciones comenzaban a atisbarse ya como realidades imparables que, más temprano que tarde, dejarían amortizados planteamientos inamovibles hasta la fecha.

La corriente europeísta y cosmopolita de aquellos primeros compases del siglo pasado ejercía una gran atracción en pensadores como el joven Ortega y Gasset, pero no tanto en figuras consolidadas, como era el caso de Miguel de Unamuno. El debate estaba servido y la sentencia lapidaria no tardó en llegar.

En una carta de Unamuno a Ortega, firmada en 1906, aquél deja clara su posición al respecto: "Yo me voy sintiendo profundamente antieuropeo. ¿Que ellos inventan cosas? Invéntenlas". Poco después, en julio del mismo año, Unamuno

publica un artículo donde reincide en la misma idea: "Inventen, pues, ellos y nosotros nos aprovecharemos de sus invenciones. Pues confío y espero en que estarás convencido, como yo lo estoy, de que la luz eléctrica alumbrará aquí tan bien como allí donde se inventó".

La polémica se mantuvo viva durante varios años y acabó cincelando en el mármol de nuestra memoria colectiva el que, quizás, es uno de los epitafios que más nos persigue como nación: "Que inventen ellos".

Me he permitido este pequeño viaje en el tiempo para remarcar la evidencia del carácter cíclico de las transformaciones de toda índole (políticas, sociales, culturales, científicas, económicas...). Y porque todo se repite, porque nada nuevo hay bajo el sol, hoy no podemos caer en el fatalismo decimonónico que nos sugiere el "Que inventen ellos", por más que la España actual atraviese, como antaño, grandes dificultades.

Me enorgullece comprobar que esta forma de ver el mundo no ha arraigado en un sector como el nuestro, siempre dispuesto a fortalecer la musculatura económica y social, insuflando vigor para seguir afrontando los retos de nuestro tiempo, sean cuales fueren su naturaleza y dificultad. No es casual que las empresas españolas del ámbito viario sean profusamente requeridas en todo el mundo cuando el reto no es otro que poner en pie las infraestructuras más audaces.

Por ello, es una enorme satisfacción comprobar que la ingeniería de carreteras en lengua española habla alto y claro en la escena internacional, lo que puede apreciarse también en los países latinoamericanos.

Así, desde 2005, el "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*" de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC) constituye la reivindicación de esta realidad. Y además de poner en valor la investigación viaria en lengua española alrededor del mundo, este Premio es también el reconocimiento y homenaje a una figura que nunca se abandonó al fatalismo. "Inasequible al desaliento" es la expresión que mejor define a quien da nombre a este galardón, el Doctor Ingeniero Juan Antonio Fernández del Campo y Cuevas, de cuya desaparición se han cumplido, en abril de 2014, diez años.

La investigación ganadora de la presente Edición del Premio, la quinta, lleva por título *Roads as Energetic Crops: Carreteras Energéticas mediante Captación Piezoeléctrica*, y se reproduce íntegramente en estas páginas.

Desarrollada por un equipo de técnicos de diversos organismos públicos y privados especializados en la faceta más sostenible de las carreteras, se trata de un estudio que analiza la capacidad de aquéllas como infraestructuras activas capaces de generar energía de forma eficiente y contribuir a un tráfico respetuoso con el entorno.

El equipo ganador está formado por Antonio Pérez Lepe, Doctor en Ingeniería Química del Centro Tecnológico de Repsol; José Francisco Fernández Lozano, Doctor en Ciencias Físicas del Instituto de Cerámica del Vidrio; Silvia Hernández Rueda, Doctora en Ingeniería de Materiales del Centro Tecnológico de Repsol; M^a Ángeles Izquierdo Rodríguez, Ingeniero Químico de la Universidad de Huelva; Alberto Moure Arroyo, Doctor en Ciencias Físicas del Instituto de Cerámica y Vidrio; M^a Pilar Ochoa Pérez, Profesora del Departamento de Física

Aplicada a las Tecnologías de la Información de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid; y Domingo Urquiza, Ingeniero Electricista y Máster en Ingeniería Eléctrica del Centro de Ensayos, Innovación y Servicios (CEIS).

Desde aquí les transmito a todos ellos mi más sincera enhorabuena por el gran trabajo que han presentado a concurso y que, finalmente, se ha alzado con el Premio.

Además, el Jurado de la V Edición del certamen ha concedido un Accésit al trabajo que lleva por título *Análisis Espacial de la Accidentalidad Vial en Área Urbana. Caso de Bogotá D.C. Patrones de evaluación con SIG*, desarrollado por Flor Ángela Cerquera Escobar, docente de Ingeniería de Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), a quien también traslado mis felicitaciones.

Presidido por un gran colega y amigo, José Luis Elvira Muñoz, Director Técnico de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, el Jurado de esta convocatoria ha tenido que sortear importantes dificultades asociadas a la alta calidad y nivel de los originales que han concursado. Pero, sin duda, haciendo gala de una loable ecuanimidad y gracias a los vastos conocimientos de todos sus integrantes, bajo la batuta de José Luis Elvira, he de afirmar que el Jurado ha realizado una magnífica labor, que no puedo por menos que poner de manifiesto y agradecer en nombre del Patronato de la FAEC.

Es la primera vez que rubrico las páginas introductorias de la edición del trabajo ganador del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio

Fernández del Campo", en mi recién estrenado cargo de Presidente de la FAEC, por lo que no puedo por menos que recordar el magnífico trabajo realizado por mi antecesor, Miguel M^a Muñoz Medina, en todas las ediciones del certamen que se han celebrado hasta la fecha. Para mí es un honor -y una enorme responsabilidad- continuar su labor.

Tampoco puedo finalizar estas líneas sin dejar constancia, asimismo, de mi gratitud y reconocimiento a todas las empresas e instituciones que patrocinan y apoyan esta iniciativa: Banco Caminos, CEPSA-Proas y Repsol, la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Transportes e Infraestructuras de la Comunidad de Madrid, la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (Oficemen) y Dragados, Acciona Infraestructuras, Eiffage Infraestructuras, Euroconsult, FCC Construcción, Ferrovial Agromán, Grupo Isolux Corsán, OHL y Sacyr.

Y, por supuesto, gracias también a todos los profesionales que han presentado sus trabajos a esta quinta convocatoria de nuestro Premio. Su valía es tal que es mi obligación animarles a que prosigan su labor científica, con optimismo y convencimiento.

Sigan siendo todos ustedes protagonistas y partícipes del cambio y la revolución en las carreteras del mundo. Puede que ellos inventen y lo hagan realmente bien, pero no es menos cierto que nosotros también los hacemos y, además, con magníficos resultados. Ustedes y su trabajo son la prueba.

En Madrid, a 27 de noviembre de 2014

CUANDO LOS SUEÑOS SE CUMPLEN



José Luis Elvira Muñoz
*Presidente del Jurado de la
V Edición del "Premio
Internacional a la
Innovación en Carreteras
Juan Antonio Fernández
del Campo"*

La V Edición del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*" es una excelente ocasión para repasar los diez años que han transcurrido desde que un grupo de instituciones españolas del ámbito viario pusiera en marcha el certamen bienal que honra la memoria de quien fuera ilustre profesor, reconocido Ingeniero internacional y Presidente de la Asociación Española de la Carretera.

Resulta un motivo de enorme satisfacción comprobar que el "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*" ha conseguido, en una década, convertirse en referencia imprescindible para equipos de investigación de administraciones, universidades, organizaciones y empresas pioneras en el estudio del fenómeno viario dentro del ámbito ibero-latinoamericano.

En estas cinco convocatorias, los trabajos de investigación presentados superan el centenar, liderados por 200 técnicos procedentes de más de una decena de países de todo el mundo. Un acervo científico que constituye una excelente panorámica de la investigación viaria en lengua castellana en las dos primeras décadas del Siglo XXI.

Desde la pavimentación y las innovaciones en cuanto a materiales de construcción, pasando por los más evolucionados sistemas de gestión del tráfico rodado, para llegar a las últimas tecnologías aplicadas en el campo del transporte y el equipamiento viario, sin olvidar los desarrollos y aplicaciones orientados a mejorar la seguridad vial y la comodidad de los desplazamientos, y tampoco aquéllos que se proponen integrar armónicamente la carretera en el espacio que atraviesan ... Todos ellos han sido temas de estudio abordados por quienes, un día, decidieron presentar sus trabajos y todo el esfuerzo tras de ellos al Premio *Juan Antonio Fernández del Campo*, convencidos de que conseguir este reconocimiento representaría un importante espaldarazo a su labor.

Cifras y esperanzas que han logrado afianzar y legitimar la gran apuesta de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera y cuantas entidades y personas colaboran en su materialización, por unas carreteras con vocación protagonista y adaptadas a las necesidades del nuevo milenio.

La V Edición del certamen ha reunido investigaciones suscritas por un total de 54 autores procedentes de 27 organismos públicos y privados. Cabe destacar de estos originales, con carácter general, su notable sentido práctico sin renunciar a un gran nivel técnico y científico y a un marcado carácter innovador.

Proyecto Roads as Energetic Crops: Carreteras Energéticas mediante Captación Piezoeléctrica es el título del estudio que se ha alzado con el galardón. Su tesis principal pasa por cambiar y extender el enfoque de infraestructura viaria

hacia el concepto de infraestructura activa e inteligente, con capacidad para aprovechar y canalizar la energía que produce el tráfico rodado.

Se enmarca en una corriente investigadora que apuesta por la captación de la energía residual presente en las carreteras. Así, como si de un campo de cultivo se tratase, la infraestructura se equipa con receptores y captadores de bajo voltaje, desde los cuales se va recolectando energía que de otro modo se perdería. Un planteamiento en el que las vías de circulación dejan de ser un mero instrumento que soporta el tráfico rodado para convertirse, además, en fuente para la generación de energía eléctrica.

Un proyecto que ha sido desarrollado por un equipo de técnicos de diversos organismos públicos y privados, todos ellos especializados en la faceta más sostenible de las carreteras.

A ellos se suma la autora del estudio que lleva por título *Análisis Espacial de la Accidentalidad Vial en Área Urbana. Caso de Bogotá D.C. Patrones de Evaluación con SIG*, y que el Jurado ha premiado con un Accésit.

En este original estudio se exponen los patrones de la siniestralidad viaria en la capital colombiana y se plantean metodologías para analizar y entender mejor el comportamiento del tráfico en la ciudad. La metodología propuesta constata que la inseguridad vial tiene un marcado componente territorial y temporal, íntimamente relacionado con los rasgos físicos y socioeconómicos

de los espacios estudiados. Por todo ello, el trabajo será de gran ayuda a la hora de tomar decisiones y establecer actuaciones preventivas.

Sin duda, estamos ante dos magníficos proyectos que, junto al resto de los que han participado en el concurso, han puesto las cosas muy difíciles a todos y cada uno de los miembros del Jurado. Un Jurado que he tenido el honor, un año más, de presidir, integrado por un exquisito grupo de expertos con quienes he compartido momentos memorables.

A todos ellos, deseo agradecer *ex profeso* el encomiable trabajo realizado, tanto por la excelencia de sus valoraciones y enjuiciamientos, como por el magnífico ambiente que ha rodeado nuestros debates y deliberaciones. A Óscar de Buen Richkarday, César Cañedo-Argüelles Torrejón, Hernán Otoniel Fernández Ordóñez, José Manuel Loureda Mantiñán, José María Morera Bosch, Félix Edmundo Pérez Jiménez y Jacobo Díaz Pineda (Secretario), mi gratitud.

Mis palabras de agradecimiento se hacen extensivas también a los integrantes de la Comisión de Valoración, sin cuya colaboración y apoyo la labor del Jurado resultaría, si cabe, mucho más ardua y compleja. Han participado en este grupo de trabajo Víctor Sánchez Blanco (Coordinador), Pedro Berruezo Martínez-Illescas, Elena de la Peña González, Francisco José Lucas Ochoa, Vicente Pérez Mena, Miguel Seisdedos Porta, Iñaki Zabala Zuazo y Marta Rodrigo Pérez (Secretaria).

Ha sido un privilegio compartir con todos ellos el proceso de selección de esta V Edición del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*". Tanto como haber podido conocer, de primera mano, el esfuerzo investigador de cuantos han optado al certamen, que pone de manifiesto, por un lado, el extraordinario nivel de la tecnología viaria innovadora y, por otro, la altura que el Premio ha alcanzado en sus diez años de andadura, ocupando los primeros puestos del prestigio internacional en este campo.

Hace diez años comenzamos a soñar y ahora vemos cómo los sueños se han instalado en nuestro presente, haciéndose realidad.

Muchas felicidades a los galardonados y muchas gracias a todos los demás por su significativa participación en este certamen.

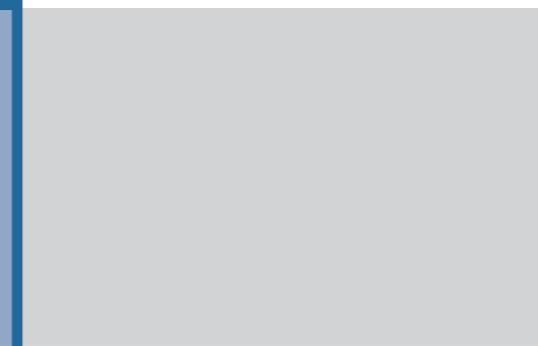
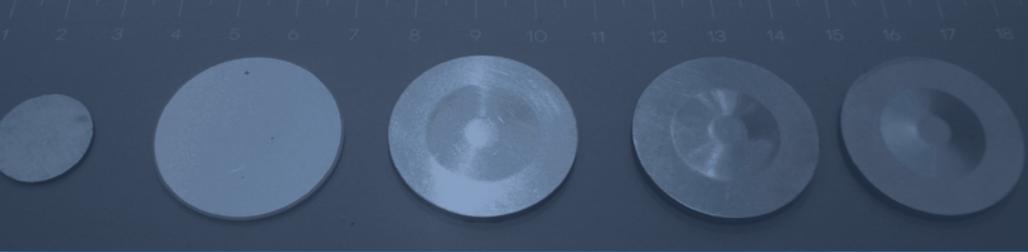
En Madrid, a 27 de noviembre de 2014

PROYECTO “ROADS AS ENERGETIC CROPS”

CARRETERAS ENERGÉTICAS MEDIANTE CAPTACIÓN PIEZOELÉCTRICA

Autor y Jefe de proyecto: Antonio Pérez Lepe

Co-autores: Silvia Hernández Rueda
María Ángeles Izquierdo Rodríguez
José Francisco Fernández Lozano
María Pilar Ochoa Pérez
Alberto Moure Arroyo
Domingo Urquiza Cuadros



AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer la valiosa aportación y pasión mostradas en proyecto REC, por parte de: María José Huertas, Francisco José Barceló, Emilio Moreno, Coordinación de Asfaltos del Centro de Tecnología Repsol, Francisco José Rodríguez Calo, Jesús García San Luis, Eduardo Romero, Álvaro Reguera y Óscar Prieto (en Repsol); Borja Ribera, Julio Viñas y Ana Manzanares (en Ceis); José de Frutos, Francisco Javier Jiménez y Manuel Vázquez (en UPM); Alessandro Comai (en Miniera SL); Teodosio del Caño, Daniel Valencia y Leonardo Casado (en Onyx Solar); Álvaro García, Frank Clemens y Manfred Partl (en EMPA - Suiza); Sybrand van der Zwaag (en Universidad de Delft - Holanda), Linbing Wang (Universidad de Virginia - EEUU).

Índice de contenidos

1	Resumen ejecutivo y objetivo del proyecto	21
2	Antecedentes y selección de alternativas	23
	2.1.- Energía solar	23
	2.2.- Recarga <i>wireless</i> de baterías	23
	2.3.- Energía mecánica por vibración: piezoeléctricos	24
	2.4.- Selección de alternativas a desarrollar	25
3	La carretera del futuro: una visión	27
4	Piezolectricidad para captación de energía	29
5	Etapas de prototipado	32
	5.1.- Mejora de los címbalos para obtención de discos con acoplamiento integrado que maximicen la energía en las condiciones del proyecto	34
	5.1.1.- Fabricación del címbalo metálico	35
	5.1.2.- Preparación de la superficie de pegado	35
	5.1.3.- Pegado del címbalo al disco piezoeléctrico	35
	5.1.4.- Optimización de címbalos para extracción de energía eléctrica	36
	5.1.5.- Medida de Resonancia Piezoeléctrica	43
	5.1.6.- Medida del voltaje asociado a la respuesta piezoeléctrica por deformación	44
	5.1.7.- Medida de la potencia bajo distintas resistencias de carga eléctrica	45
	5.2.- Modificación del equipo para ensayo de pista de laboratorio	46

5.3.- Diseño de asfalto para embeber los discos y conducir la energía fuera del asfalto	48
5.3.1.- <i>Diseño de host layer</i>	48
5.3.2.- <i>Diseño de composites bituminosos con conductividad eléctrica mejorada</i>	49
5.3.3.- <i>Diseño de capas de rodadura</i>	51
5.4.- Caracterización de la señal eléctrica generada en condiciones de rodada	53
5.5.- Selección de circuito eléctrico capaz de transformar la señal pulsante en corriente continua	54
5.6.- Sistema de adquisición y tratamiento de señal	56
5.7.- Verificación en prototipo de factores en tráfico real (<i>velocidad de vehículos, diferente peso de ejes</i>)	57
6 Estimaciones de energía generada	59
7 Discusión de resultados	62
8 Conclusiones	65

1. Resumen ejecutivo y objetivo del proyecto

Una carretera es una vía de dominio y uso generalmente público, proyectada y construida fundamentalmente para la circulación de vehículos. Las carreteras convencionales se centran en dar soporte a los vehículos, atendiendo únicamente (salvo casos excepcionales) a las necesidades mecánicas necesarias para cumplir esta función, y además a la seguridad y el confort, dos de los factores más valorados por los usuarios finales de la carretera. Existen en la actualidad proyectos y tendencias tecnológicas innovadoras que tratan de dotar a las carreteras con nuevas propiedades y características, más allá de su uso tradicional como soporte del tráfico rodado. Ejemplo de ello lo constituyen las numerosas funcionalidades de que se están dotando las capas de rodadura de las carreteras: eliminación de gases nocivos, disminución de ruido, drenabilidad del agua, menor consumo de combustible, mayor durabilidad, color, etc. Pero, **¿Se puede obtener energía de la carretera?**

Éste es el **objetivo** del presente proyecto, el cual intenta cambiar y extender el concepto de infraestructura de transporte hacia el concepto de infraestructura activa e inteligente. Para ello se han evaluado todas las opciones de captura de energía, aprovechando todos los factores y posibilidades energéticas que posee la infraestructura, además de los usos potenciales de dicha energía.

Así, en el caso del asfalto, en la carretera nos encontramos con una estructura multicapa, con una superficie oscura expuesta al sol, con un movimiento continuo de vehículos transmitiendo presión y energía cinética, con unas presiones que bajan hasta el terreno a través de sus capas semi-rígidas, con una fricción importante entre el neumático y la superficie, y con una red física interconectada de muchos kilómetros cuadrados.

Cuando un vehículo pasa por encima de una carretera, se genera una pérdida de energía por parte del vehículo (unos 400-500 kilovatios por kilómetro), que de ser recuperada equivaldría al consumo medio de entre 600 y 800 hogares o sería suficiente para alimentar 9 vehículos eléctricos pequeños. Al igual que este tipo de energía mecánica, también es aprovechable la energía cinética de los vehículos, el rozamiento, la acumulación de calor, etc. Muchos son los esfuerzos tecnológicos por parte del sector automovilístico para capturar parte de esta energía por el propio vehículo, pero pocos o ninguno han invertido esfuerzo innovador en la infraestructura.

De este modo, mediante la incorporación de nuevas tecnologías en la construcción de cualquier tipo de vía de forma que se pudiera recuperar y

canalizar la energía "perdida" por los vehículos, las carreteras cumplirían con los principios de un desarrollo energético sostenible. Este hecho cambiaría por completo el concepto de construcción de carretera. Las vías de circulación dejarían de ser únicamente un instrumento que soporta el tráfico de vehículos, para alcanzar la función adicional de convertirse en un elemento generador de energía eléctrica.

El **proyecto REC** se enmarca, por tanto, dentro de la disciplina de captación de energía residual, o **Energy Harvesting**. Como si de un campo de cultivo se tratara, la carretera se sembrará de receptores y captadores de energía de bajo voltaje, desde los cuales se irá recolectando energía, que de otro modo se perdería, para alimentar diferentes dispositivos.

Posibles Fuentes aprovechables de energía

- Energía Solar Térmica
- Energía Solar Fotovoltaica
- Energía Mecánica: fricción superficial
- Energía mecánica: vibración aprovechada desde el vehículo
- *Energía mecánica: vibración aprovechada sobre la carretera*
- Energía mecánica cinética: elementos circundantes a la carretera o en el propio vehículo

- Energía Electromagnética por Inducción: alimentación de baterías de coche eléctrico en movimiento
- Energía Termoeléctrica por gradientes de temperatura

Posibles Usos de la energía recuperada

Independientemente del proceso captador de energía, ésta puede ser empleada para diversos usos, entre los que se contemplan los siguientes, en función de la cantidad y lo más fundamental como se verá a lo largo del trabajo, la calidad de esa energía:

- Alumbrado, señalización y elementos circundantes a la carretera.
- Alimentación de coche eléctrico (durante su movimiento o acumulando en puntos de recarga).
- Transporte de energía hasta acumuladores.
- Elementos circundantes en zonas urbanas: Ascensores, escaleras mecánicas, etc.
- Alimentación de dispositivos sensores embebidos y autónomos: daños del material, radares, densidad del tráfico, localizaciones GPS, TICs, smart-grids...
- Traslación de tecnologías a transporte terrestre por raíles: tren, metro, tranvía, etc.
- Desplazamientos de personas o vehículos ligeros en recintos cerrados,...

2. Antecedentes y selección de alternativas

El estudio de estado actual de la técnica e inteligencia competitiva fue llevado a cabo conjuntamente con la empresa Miniera SL, (www.miniera.es). Se presentan algunos casos de estudio en referencia a la captación de energía en la carretera, a nivel mundial.

2.1. Energía solar

- En Holanda, la empresa Ooms Avenhorn Holding BV (ahora Ooms Civiell) y en España, dentro del proyecto cenit Fénix, proponen recuperar la energía del sol para calentar un fluido calor-transportador bajo la superficie de la carretera (<http://www.proyctofenix.es/clients/ShowSection.aspx?Original=428007>). En el primero de los casos se trata de tubos flexibles enterrados (con la consiguiente pérdida de estructura) y en el segundo, más innovador, se trata de generar una mezcla muy abierta y con cierta pendiente por la que circula el fluido que se calienta con la temperatura que adquiere la mezcla. La misma empresa holandesa apuesta por materiales termoeléctricos bajo la carretera para aprovechar la alta temperatura y cambios de temperatura.
- En EEUU la tendencia de los últimos años es la recuperación de energía solar a partir de fotovoltaica (www.solarroadways.com). Sin embargo, está

basada en la construcción de paneles de soporte hechos de plástico y vidrio reforzado, con la consiguiente pérdida de funcionalidad de la carretera (grip, soporte, drenabilidad,...). No deja de ser un proyecto de paneles transitables, como el proyecto puesto en marcha en Holanda para los carriles bici.

2.2. Recarga wireless de baterías

En Corea, Alemania y EEUU, se está desarrollando la tecnología de vehículo eléctrico de recarga online por inducción (OEV). Se introducen conductores eléctricos en la carretera, de manera que se genera un campo electromagnético capaz de recargar por inducción (y en movimiento) la batería de los vehículos. Entre estas propuestas:

- OLEV-KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)-Ms. Se-Hyung Eum (Líder del proyecto), han desarrollado un sistema de recarga *in-motion* desde cables enterrados en la carretera, vía wireless. La tecnología aún exige que la distancia entre la base del vehículo y la carretera sea de apenas varios centímetros.
- *Plugless Power* (Evatran) ha desarrollado sistemas portátiles para recarga wireless en

asociación con Nissan (Leaf) y Chevrolet (Chevy Volt).

- MIT y Stanford (EEUU). Transferencia *wireless* de energía en presencia de placas metálicas (Xiaofang Yu, Shanhui Fan (Stanford)). A partir de un trabajo desarrollado en MIT (WiTricity / Mitsubishi-Marín Soljačić), la Universidad de Stanford ha optimizado la transferencia energética: una serie de arrollamientos están enterrados en la carretera y conectados a corriente eléctrica. Los arrollamientos receptores van bajo el vehículo y permiten la carga a lo largo del desplazamiento del vehículo. Se ha avanzado mucho en este campo minimizando las pérdidas de transferencia mediante el uso de arrollamientos ultra-finos, frecuencias altas y mejoras electrónicas.

2.3. Energía mecánica por vibración: piezoeléctricos

Una definición clásica de piezoelectricidad (electricidad a partir de presión) es la generación de polarización eléctrica de un material como respuesta a una tensión mecánica. Cuando el material es sometido a una tensión mecánica aparece un momento dipolar dentro del material (sin que exista ningún campo eléctrico externo que lo induzca), que da lugar a la aparición de un campo eléctrico en el interior del mismo. Algunas de las alternativas más innovadoras son las siguientes:

- En Londres se está desarrollando un proyecto piloto que trata de obtener electricidad de las bandas sonoras que suele haber en cualquier carretera, acoplando a las mismas unos mecanismos que transforman la energía mecánica en electricidad.
- En el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) se está trabajando en la misma aproximación pero de forma opuesta, es decir, se está investigando en cómo incluir mecanismos piezoeléctricos en la suspensión de los vehículos de forma que puedan absorber y generar electricidad con los baches. Los estudios se centran en el propio bache, en cómo sacar partido de las bandas sonoras (o badenes limitadores de la velocidad) atrapando la energía cinética de los coches que pasan por encima. Esa electricidad podría utilizarse por el propio vehículo.
- En Israel, se está desarrollando un método de producción de electricidad a partir de piezoeléctricos, colocados en cofres metálicos de gran tamaño bajo la capa de rodadura, que aprovechan la vibración que produce sobre la carretera el paso de los vehículos. Es una tecnología denominada IPEG™ (Innowattech. Prof. Haim Abramovich). Sin embargo, el gran tamaño de estos bloques vuelve a romper la funcionalidad de la carretera.

- En Tokio, la empresa Soundpower está llevando a cabo una serie de experimentos en los que tratan de aprovechar las vibraciones producidas por vehículos y viandantes en un puente. La energía de las vibraciones que provoca el paso de coches es almacenada durante el día y se emplea para iluminar artificialmente el puente cada noche.
- En Holanda, el proyecto “Vibrations, fizzling source of energy” también ha propuesto (investigación preliminar) recoger la energía producida por el paso de vehículos a través de materiales piezoeléctricos. Universidad de Twente.
- El consorcio estratégico SmartPie, en Holanda, ha desarrollado un material composite termoplástico para fabricación de neumáticos, con captación de energía para el vehículo a través de piezoeléctricos. Su investigación es aún preliminar de cara a la aplicación final, pero los resultados son prometedores.

2.4. Selección de alternativas a desarrollar

Empleando criterios que apunten hacia alternativas capaces de generar un vector de cambio e innovación en el sector de la carretera se pre-seleccionaron tres fuentes de energía: energía solar (térmica o

fotovoltaica), energía mecánica por vibración y energía electromagnética.

- La energía solar térmica ha sido tratada desde varios ámbitos y proyectos. Ejemplo de ello es el proyecto Fénix, donde en su línea de pavimentos sostenibles se trató de capturar energía a partir de un fluido calo-portador que fluía bajo la superficie de rodadura. Por lo tanto, se descartó este caso.
- La energía electromagnética se consigue a partir del campo eléctrico en movimiento que se genera cuando un arrollamiento metálico es enterrado bajo la rodadura y otro arrollamiento es situado en la parte baja del vehículo eléctrico. La tecnología a desarrollar compete por tanto al área electromagnética, en la medida en que aún es necesario mejorar la transferencia eléctrica y aumentar la distancia entre la carretera y la batería, que a día de hoy debe limitarse a varios centímetros. Por lo tanto, tampoco resulta de nuestro interés esta alternativa.
- Las dos alternativas a desarrollar son por tanto, la **captación de energía fotovoltaica** en la carretera y la **captación de energía vibracional** sobre la carretera.

El presente equipo de trabajo, consciente de la multitud de alternativas para ambas fuentes de energía seleccionadas, decide trabajar y desarrollar tecnolo-

gías que partan de la carretera y cuide la “no ruptura” o pérdida de *performance* que reside en la infraestructura. Por tanto, en un primer barrido se eliminan a este respecto el desarrollo de tecnologías de captación por piezoeléctricos en badenes o resaltos, paneles fotovoltaicos en las inmediaciones de la carretera o en túneles *ex profeso*, sustitución de asfalto u hormigón por paneles de vidrio reforzado o de plástico, zonas de frenada con dispositivos piezoeléctricos, neumáticos con captación piezoeléctrica, etc. No por ello se desdeña la actividad inventiva de estas innovaciones, sino por el hecho de que se pretende dar un paso en la concepción de la propia carretera como elemento activo en la comunicación de personas y bienes.

Con el fin de integrar el efecto fotovoltaico en la carretera, el sistema que se diseñe debe cumplir, por tanto, una serie de requisitos iniciales que nos impone la carretera (y no al contrario, donde por ejemplo en el caso de solarroadways, es la tecnología energética la que hace perjudicar la infraestructura por el hecho de acumular energía), y que hacen realmente difícil esta alternativa:

- crear una capa foto-activa continua protegida del tráfico rodado,
- ser resistente a las compresiones del tráfico,
- emplear transporte lumínico por técnicas de confinamiento óptico,

- ser implementable junto con las técnicas de construcción de carreteras actuales o visualizables,
- con materiales y técnicas de coste no muy elevado si están sometidas a un daño por la acción del tráfico.

Tras una evaluación exhaustiva de ambas alternativas finales, y en el ejercicio de estar equilibrados entre invención y realidad, se decide acometer un único reto, objeto de la presente convocatoria a concurso:

Captar energía mecánica vibracional mediante la incorporación de transductores piezoeléctricos bajo la rodadura de la carretera.

3. La carretera del futuro: una visión

Según un documento publicado recientemente, la visión de FEHRL, Forum of European National Highway Research Laboratories <http://www.foreveropen-road.eu/>, e integrando también la visión del proyecto REC, las carreteras del futuro tenderán a ser cada vez más:

- adaptables a las necesidades futuras. Muy probablemente estarán formadas por módulos pre-fabricados, de fácil puesta en servicio y retirada (no tienen por qué ser de asfalto),
- dotadas de automatización y sensorización bajo la capa de rodadura, con transmisión de señales para detectar defectos en la calzada, distancia entre vehículos, peso de vehículos, densidad de tráfico, conexión con teléfonos y señal GPS,...

- con capacidades de recuperación energética, y de alimentar energéticamente a vehículos,
- muy resistentes y duraderas, con escaso mantenimiento, autorreparables,
- con multifuncionalidad superficial: descontaminantes, autolimpiables, rugosidad (grip) adaptable, calentamiento o micro-encapsulado para evitar nieve,...

Por tanto, el planteamiento del proyecto está alineado con un avance paralelo en las tecnologías constructivas de las carreteras y en sus materiales, a la vez que en los campos energéticos (piezoeléctricos, fotovoltaica, baterías,...). Limitaciones actuales, por ejemplo para implantar una tecnología fotovoltaica con los materiales y métodos constructivos

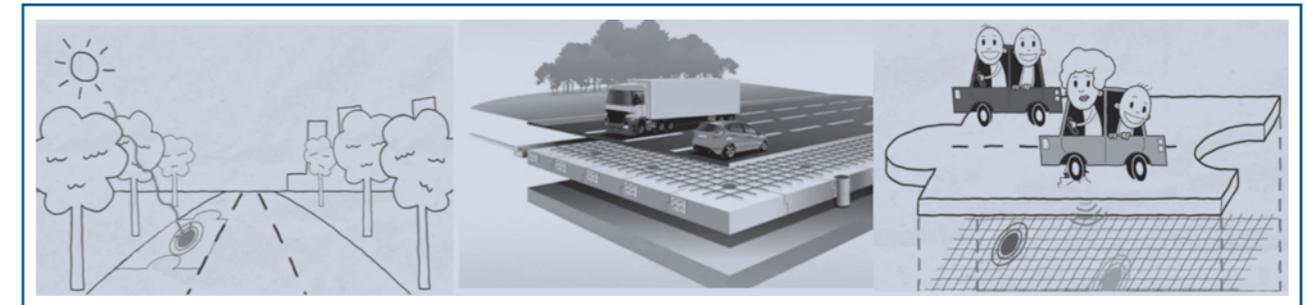


Figura 1.- Visión de FEHRL de las carreteras del futuro.

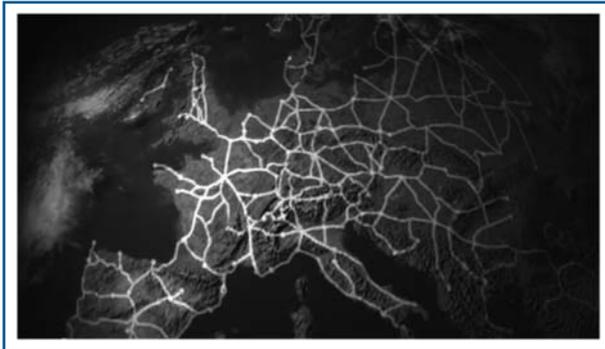


Figura 2.- *Interconexión de red terrestre mediante carreteras principales en Europa.*

actuales, se verán superadas por un cambio en la propia construcción de la carretera, por ejemplo mediante módulos independientes de rodadura.

La red interconectada existente mediante la unión de carreteras, calzadas y calles, invita a un aprovechamiento integral de la red de carreteras, permitiendo mejorar el desplazamiento, el acceso a los servicios y la conexión de las personas, así como optimizar recursos energéticos en desplazamiento y en construcción-mantenimiento de las infraestructuras.

4. Piezoelectricidad para captación de energía

Todo vehículo transitando sobre carreteras y firmes semi-rígidos genera deformaciones instantáneas en el pavimento que actúan de forma negativa en la durabilidad del mismo. En situaciones de tráfico lento, sobre todo en entornos urbanos, la vibración continuada que ejerce el vehículo sobre la carretera supone una cantidad de energía no aprovechada. Si la energía producida por esas deformaciones y vibraciones se pudiese recuperar, contribuiría en gran medida a la conservación de las carreteras, y aún más importante, se podría generar energía eléctrica aprovechando dichas deformaciones que harían de las carreteras infraestructuras no sólo de transporte sino de obtención de energía.

Cuando un vehículo pasa por encima de una carretera, la carretera se deforma verticalmente debido al peso del vehículo. Se genera así una pérdida de energía por parte del vehículo. Una manera de recuperar esta energía sería empleando algún tipo de material que recogiera la energía transmitida por parte del vehículo al firme. Este tipo de material existe y se denomina material piezoeléctrico.

Una definición clásica de piezoelectricidad (término griego para electricidad a partir de presión) es la generación de polarización eléctrica de un material como respuesta a una tensión mecánica. Cuando

el material es sometido a una tensión mecánica aparece una diferencia proporcional de potencial eléctrico entre dos caras del material, produciendo una variación del momento dipolar dentro del material (sin que exista ningún campo eléctrico externo que lo induzca), que da lugar a la aparición de un campo eléctrico en el interior del mismo. Este fenómeno se conoce como efecto directo o efecto generador y se aplica fundamentalmente en la fabricación de sensores, así como en captación energética, en un estado aún incipiente. El efecto inverso es ampliamente utilizado en actuadores piezoeléctricos para dispositivos electrónicos.

La recuperación de energía vibracional por parte de elementos piezoeléctricos incorporados en el asfalto de vías urbanas, estructuras viarias y carreteras puede suponer un hito en el desarrollo de nuevas infraestructuras de transporte y gestión de la movilidad. Las limitaciones que poseen los materiales cerámicos piezoeléctricos están relacionadas con: su baja estabilidad mecánica al ser sometidos a tensiones mecánicas; la eficiencia por altas pérdidas dieléctricas y procesos de despolarización; la mejor respuesta se produce en su modo fundamental de resonancia; y la última pero no menos importante, se trata de compuesto con un contenido mayoritario en plomo, >65% en peso. Sin embargo, los

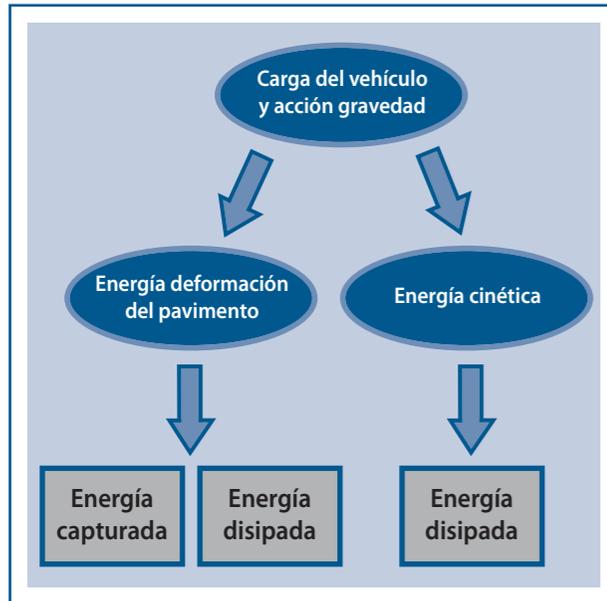


Figura 3.- *Disipación de energía potencial desde el vehículo.*

materiales cerámicos presentan enormes ventajas como son: su producción a bajo coste en diferentes formas; su facilidad de ajuste de las propiedades mediante modificaciones composicionales; y su integración en estructuras compuestas. El proyecto REC aborda el desarrollo de materiales piezoeléctricos encapsulados en estructuras compuestas que permitan soslayar las limitaciones existentes y su validación como elementos para el aprovechamiento de la energía vibracional.

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que no poseen centro de simetría. El efecto de una compresión o de un cizallamiento consiste en disociar los centros de gravedad de las cargas positivas y de las cargas negativas, apareciendo entonces dipolos elementales en la masa y, por influencia, cargas de signo opuesto en las superficies enfrentadas.

Los materiales piezoeléctricos y su tecnología se conocen desde hace tiempo (fueron descubiertos por los hermanos Curie en 1880) y se han utilizado en diferentes aplicaciones (sensores, sistemas micro-electro-mecánicos MEMS, microscopios electrónicos, ensayos no destructivos de materiales, ecografías, lectores CD, tinta electrónica, ...). Otros ejemplos más recientes son:

- El Instituto Georgia Tech ha logrado crear un generador de electricidad basado en nanohilos que transforma vibraciones sonoras en electricidad. Estos nanohilos, de media micra de longitud, están formados por un material piezoeléctrico, óxido de cinc, que produce cargas eléctricas al someterlo a un esfuerzo mecánico y viceversa. Una posible utilidad de estos materiales es su colocación en nuestros zapatos, de modo que al caminar se podría generar suficiente corriente como para alimentar los típicos dispositivos portátiles.

- Otro ejemplo de materiales piezoeléctricos en la vida diaria es el desarrollado por científicos de la Universidad de Texas, que permitirá hablar con teléfonos móviles sin depender de una batería, gracias a las vibraciones de la propia voz, que generan electricidad al percutir sobre un sistema piezoeléctrico.
- La empresa SAP ha desarrollado un generador piezoeléctrico empleado en el fondo de los pozos petrolíferos que transforma la vibración del trépano en energía eléctrica. El elemento

piezoeléctrico es una batería de anillos cerámicos de titanato y circonato de plomo. Las vibraciones producidas por el trépano sobre las cerámicas generan una energía que alimenta de corriente a tres sistemas: los sensores que miden la composición química y física de las rocas e indican del hallazgo de agua, gas o petróleo, un ordenador para el procesado de datos y el control subterráneo del trépano y los equipos de comunicación con la superficie. (Referencia Proyecto Caleidoscopio-Repsol).

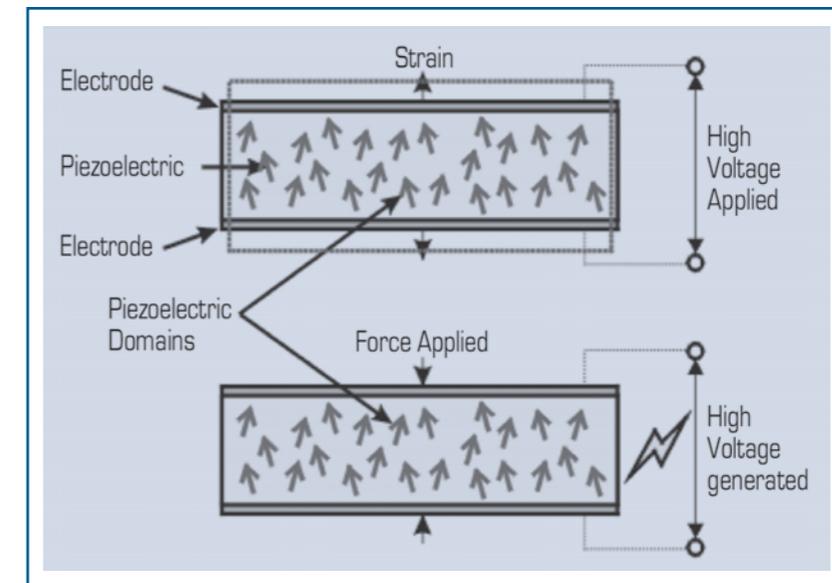


Figura 4.- *Efecto piezoeléctrico directo (presión genera electricidad) e inverso (electricidad genera desplazamiento).*

5. Etapa de prototipado

Una vez realizados los cálculos para la validación teórica de la captación energética, se procede a la construcción de un prototipo para la validación técnica.

- 1) El prototipo será realizado mediante la modificación de **ensayo de pista**¹ de equipo laboratorio, actualmente presente y propiedad de Repsol.
- 2) Dicho equipo una vez modificado deberá demostrar la captación de energía a partir del concepto de **discos piezoeléctricos insertados**² en probetas de material asfáltico.
- 3) Así mismo, deberá permitir una observación y caracterización de la señal eléctrica que proviene de la energía generada.

- 4) Y deberá mostrar un contador de energía como registro cuantificable de energía recuperada y almacenable.

La mejor respuesta piezoeléctrica se produce en el modo fundamental de resonancia del piezoeléctrico, sin embargo a la frecuencia de impacto de los vehículos nos situamos muy por debajo de esta frecuencia óptima, en una zona con alta impedancia. De acuerdo con un diseño publicado por el Instituto de Cerámica y Vidrio (CSIC) la disposición en discos embebidos puede ser la solución más prometedora para casos de embebido total en una matriz. Por tanto, se opta por incluir en el prototipo estructuras con piezo-cerámicas compuestas con **acoplamiento mecánico integrado**, para el ajuste de las propiedades requeridas en el

contexto de las carreteras: recuperación de energía en un amplio espectro de frecuencias, mejora de la solicitud mecánica, reducción de las pérdidas dieléctricas, estabilidad en condiciones de uso e instalación. Existen diferentes métodos para maximizar la conversión de energía mecánica en eléctrica en una cerámica. Los llamados acoplamientos mecánicos son sistemas que hacen transmitir la presión ejercida sobre ellos de forma generalmente direccionada hasta la cerámica. En el proyecto se han puesto en juego acoplamientos mecánicos llamados integrados, llamados así porque constituyen una misma pieza junto con la cerámica. Se trata de címbalos o platillos de metal que pegados en ambas caras de un disco cerámico hacen re-direccionar la fuerza, incluso la difusa, en la dirección de expansión radial del disco, maximizando la eficiencia de la conversión.

De acuerdo con los valores aportados por la bibliografía y los valores encontrados en laboratorio por CSIC, se partió de unos valores de recuperación de energía por unidad de volumen de unos 60 KW/m³, valores que se redujeron a un objetivo de 30-45 KW/m³ teniendo en cuenta que las condiciones de obtención obligaban a embeber y por tanto restringir el movimiento de desplazamiento del disco. Sin embargo, según avanzaba la construcción del prototipo, se entendió que estos valores de potencia en vacío, no eran los indicados para valorar el impacto energético del proyecto. La potencia en vacío se

refiere en este caso a la cuantificación de energía obtenida en laboratorio mediante un sistema de transductores piezoeléctricos (*shaker*) que golpean con una frecuencia oscilatoria dada el material piezoeléctrico. La diferencia de potencial se transforma en valores de potencia, sin conectar una carga capacitiva (capaz de almacenar). Por lo tanto, el criterio impuesto inicialmente, a tenor de la bibliografía técnica, se cambia hacia valores de energía "usable", en lugar de valores de voltaje.

Líneas de trabajo hasta consecución del prototipo

- 5.1. Mejora de los címbalos para obtención de discos con acoplamiento integrado que maximicen la energía en las condiciones del proyecto.
- 5.2. Modificación del equipo para ensayo de pista de laboratorio.
- 5.3. Diseño de asfalto para embeber los discos y conducir la energía fuera del asfalto.
- 5.4. Caracterización de la señal eléctrica generada en condiciones de rodada.
- 5.5. Selección de circuito eléctrico capaz de transformar la señal pulsante en corriente continua.
- 5.6. Sistema de adquisición y tratamiento de señal
- 5.7. Verificación en prototipo de factores en tráfico real (velocidad de vehículos, diferente peso de ejes).

¹ *El ensayo de pista "Wheel-track" es el típicamente empleado para caracterizar la profundidad de huella provocada por una rueda de peso equivalente a un vehículo a su paso en vaivén sobre una probeta asfáltica. La velocidad, sin embargo, no puede simularse en este prototipo, siendo un parámetro a tener en cuenta a la hora de evaluar la entrega de energía del material piezoeléctrico. Es por ello que se ha simulado en otro prototipo, Patente ES2364063B2, y que se describe posteriormente.*

² *En la propuesta de proyecto se fijó como prioritario situar bajo la rodadura un transductor piezoeléctrico tal que no dañara la propia infraestructura. Así se valoraron 2 alternativas para dichos transductores: discos y fibras piezoeléctricas. De estas dos se conoce que la de discos es la que maximiza la conversión de presión a energía, ya que presenta un mayor volumen localizado bajo el impacto de un vehículo. Es por ello, que se decide seleccionar esta vía como clave decisiva para el prototipado.*

5.1. Mejora de los címbalos para obtención de discos con acoplamiento integrado que maximicen la energía en las condiciones del proyecto

El grupo del Instituto de Cerámica y Vidrio de CSIC, así como el grupo en la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIT), son los encargados de seleccionar y diseñar los sistemas de címbalos acoplados que maximicen la energía y resistan las condiciones mecánicas del proceso de asfaltado.

El material piezoeléctrico seleccionado para el prototipo es un disco cerámico comercial (de circonato-titanato de plomo (PZT)), proporcionado por Noliac (Dinamarca), de referencia comercial NCE51. Este tipo de materiales piezoeléctricos se caracterizan por presentar un efecto actuador adecuado en condiciones de baja presión y cuando la frecuencia de trabajo se encuentra fuera de su frecuencia de resonancia. En estos casos, se requieren altos valores de factores de acoplamiento, específicamente en la dirección perpendicular al esfuerzo, 1-3.

La temperatura de Curie, definida como la temperatura a la cual el material piezoeléctrico pierde sus propiedades piezoeléctricas, fue un factor importante a tener en cuenta en la elección del material piezoeléctrico empleado, dado que la temperatura de procesamiento de las mezclas bituminosas en las que

debía ser integrado el sistema es superior a 150° C habitualmente. Para la cerámica PZT seleccionada la temperatura de Curie se sitúa entorno a los 340° C garantizando su adecuado comportamiento a las temperaturas de trabajo en carretera.

El proceso de fabricación del acoplamiento integrado tipo címbalo (Figura 5), consistió en adherir mediante un adhesivo epoxídico una o dos chapas metálicas a ambos lados del disco piezoeléctrico previamente fabricadas mediante troquelado. Como chapas se usaron chapas metálicas de latón y acero, con distintos espesores: 0.25, 0.30 y 0.40 mm

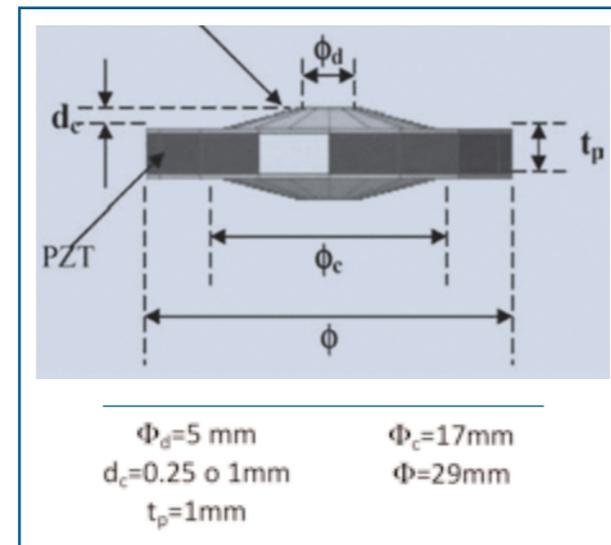


Figura 5.- Esquema y dimensiones de los címbalos preparados.

en el caso de los címbalos fabricados con latón y 0.25 en aquellos fabricados con acero. En todos los casos, las chapas metálicas preparadas tenían 29 mm de diámetro.

Las etapas del proceso de fabricación son las siguientes:

5.1.1. Fabricación del címbalo metálico.

En primer lugar se realiza el corte de tiras de 4mm de ancho de chapa metálica mediante un troquel con una parte interior hueca de 29 mm de diámetro. Para ello, ésta se golpea con un émbolo del mismo diámetro obteniendo una pieza metálica circular.

La forma cóncava del címbalo se obtiene por un proceso posterior de prensado uniaxial con otro troquel que deforma las cápsulas para obtener una corona circular exterior plana, con dos alturas nominales: 0.25 o 1 mm. La presión aplicada fue de 15 o 30 MPa para las chapas de latón. La máxima presión aplicada para el acero (30 MPa) sólo consigue deformar la chapa hasta una altura de la corona de 0.8 mm para el molde de 1 mm y 0.20 mm para el molde de 0.25 mm. Para fabricar chapas de acero con una altura intermedia (0.65 mm) se aplicó una presión de 4 MPa durante 5 s. Esta serie de címbalos se denotó como SP1-13. En algunos casos, la presión se aplicó tres veces consecutivas durante 1 minuto rotando la muestra 120° entre cada prensada. En otros se aplicó 2 presiones consecutivas girando

la muestra 90°, también durante 1 minuto. No se observaron diferencias entre las chapas obtenidas por las dos maneras. Se ha determinado el segundo método como el procedimiento a seguir en las sucesivas fabricaciones.

5.1.2. Preparación de la superficie de pegado.

A continuación se realiza un desbastado suave tanto de la zona de unión de las cápsulas metálicas como del disco cerámico, con cuidado en este caso de no dañar el electrodo que cubre la superficie del piezoeléctrico. El objetivo es mejorar la rugosidad en la zona de unión para mejorar la adhesión. En el lijado se usó en primer lugar una lija de SiC de granulometría 400 y el acabado se llevó a cabo con una superficie menos abrasiva (con una goma). Durante el proceso se deben evitar deformaciones o alabeos que luego dificulten el pegado del címbalo.

El siguiente paso consistió en la limpieza de las superficies de las chapas metálicas y de los electrodos de los piezoeléctricos con alcohol y acetona, por ese orden, aplicados con bastoncillos de algodón.

5.1.3. Pegado del címbalo al disco piezoeléctrico.

El címbalo se ensambla con el piezoeléctrico tras la limpieza. Para ello se usó en todos los casos una resina epoxi EPO-TEK® 353ND-T, de dos componentes.

Para aplicar el pegamento epoxi sobre la superficie de la chapa metálica se utilizó un dispensador

automático I&J Fisnar Inc., modelo JBE1113. El dispensador permite cambiar la presión de salida del adhesivo y el tiempo de aplicación. Combinando ambas, se establecieron las condiciones óptimas de aplicación del adhesivo, en condiciones reproducibles. Todo este proceso se produce a temperatura ambiente. En este paso se debe asegurar que tanto las superficies de la chapa y la cerámica piezoeléctrica como el dispensador no tengan restos de acetona proveniente de la etapa de limpieza, ya que disuelve parte del epoxi y dificulta la adhesión.

Una vez aplicado el pegamento, las chapas pegadas a las cerámicas piezoeléctricas se introdujeron en un troquel con un orificio central de 29 o 30 mm de diámetro (para cada tamaño de cerámica) cuya función es servir de guía evitando la pérdida de alineación entre los componentes. Para mantener el contacto durante el proceso de secado del epoxi, se colocó un peso de 4.66 Kg (0.7 MPa) sobre el bloque. Todo el sistema se introdujo en una estufa y se calentó a 80° C durante 1 hora, para asegurar el curado del epoxi.

Los címbalos fabricados se han referenciado como asimétricos (un solo címbalo en una de las caras del disco piezoeléctrico) y simétricos (un címbalo en cada cara del disco piezoeléctrico). La Tabla 1 muestra un resumen de los piezoeléctricos fabricados y sus principales características.

5.1.4. Optimización de címbalos para extracción de energía eléctrica.

El diseño de los címbalos se realizó en base al análisis de la respuesta estructural del sistema címbalo-disco piezoeléctrico mediante aproximación mediante elementos finitos. En esta etapa del proyecto nos hemos centrado en la selección de la herramienta de trabajo, es decir, en la elección del programa de elementos finitos que vamos a utilizar. Los programas de AEF (análisis por elementos finitos o FEA por sus siglas en inglés: Finite Element Analysis), permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que sean susceptibles de ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales. En Ingeniería, la mayoría de los procesos actuales están definidos de dicha forma, por lo que dichos programas nos permitirán obtener productos de calidad superior a un menor coste, o para mejorar procesos existentes, o para estudiar el fallo de un componente estructural o un equipo. Debido a esto, utilizar un programa de AEF en este proyecto puede ayudar a reducir el tiempo total de desarrollo de un producto, reduciendo el número de ciclos prototipo-pruebas-ensayos- evaluación.

¿Qué es el Método de los Elementos Finitos? El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de

Tabla 1.- Resumen de címbalos de distintos diámetros y chapas metálicas.

Serie Címbalo	Chapa	Presión Conformado (MPa)	Espesor Chapa (mm)	Diámetro piezoeléctrico (mm)	Altura Címbalo (mm)	Total piezoeléctricos	Simétrico
Serie 1-6	Latón	15	0.3	29	1	6	Sí
B 1-5	Latón	15	0.3	29	0.25	5	Sí
BF 1-9	Latón	15	0.25	29	0.25	9	Sí
AA 0-5	Latón	15	0.3	29	1	6	No
AB 1-8	Latón	15	0.3	29	0.25	8	No
S 1-19	Acero	30	0.25	29	0.8	19	Sí
SB 1-4	Acero	30	0.25	29	0.20	4	Sí
AAS 1-3	Acero	30	0.25	29	0.8	3	No
SABA 1-3	Acero	30	0.25	29	0.20	3	No
SP 1-13	Acero	4	0.25	29	0.65	13	Sí
L 1-11	Latón	30	0.4	30	1	11	Sí
L0330 1-31	Latón	30	0.3	30	1	31	Sí
LB330 1-4	Latón	30	0.3	30	0.25	4	Sí
A30 1-3	Acero	30	0.25	30	1	3	Sí

subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos

considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla». Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina preproceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.

Hay generalmente dos tipos de análisis que son usados en la industria: modelos en 2D y en 3D. Mientras los modelos en 2D conservan la simplicidad y permiten que el análisis se realice en un ordenador normal, tiende a dar resultados menos precisos. El modelado en 3D, sin embargo, produce resultados más precisos mientras sacrifica la habilidad para funcionar de manera efectiva en cualquier ordenador, menos en los más rápidos. Con cada uno de estos esquemas modelados, el programador puede insertar numerosos algoritmos o funciones que pueden hacer al sistema comportarse de manera lineal o no lineal. Los sistemas lineales son menos complejos y normalmente no tienen en cuenta deformaciones plásticas. Los sistemas no lineales toman en cuenta las deformaciones plásticas, y algunos incluso son capaces de testear el material hasta la fractura.

¿Cómo trabaja el Método de los Elementos Finitos? El MEF usa un complejo sistema de puntos llamados nodos que hacen una red llamada malla. Esta malla, está programada para contener el material y las propiedades de la estructura que definen cómo ésta reaccionará ante ciertas condiciones de carga. A los nodos se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de estrés anticipado en un área. Las regiones que recibirán gran cantidad de estrés tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Los puntos de interés consisten en: puntos de fractura previa-

mente testeados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevado estrés. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos. Se puede decir que existen tres fases a la hora de realizar un análisis por elementos finitos, que serían:

1. Pre-procesamiento: El primer paso en FEA, pre-procesamiento, es construir un modelo de elementos finitos de la estructura a ser analizada. En muchos paquetes de FEA se requiere de la entrada de una descripción topológica de las características geométricas de la estructura. Ésta puede ser 1D, 2D, o 3D. El objetivo principal del modelo es replicar de manera realista los parámetros importantes y características del modelo real. La manera más sencilla para conseguir similaridad en el análisis es utilizar planos pre-existentes, modelos CAD. Una vez que se ha creado la geometría, se utiliza un procedimiento para definir y dividir el modelo en "pequeños" elementos. En general, un modelo de elementos finitos está definido por una malla, la cual está conformada por elementos y nodos. Los nodos representan puntos en los cuales se calcula el desplazamiento (análisis estructural). Los paquetes de FEA enumeran los nodos como una herramienta de identificación. Los elementos están

determinados por conjuntos de nodos, y definen propiedades localizadas de masa y rigidez. Los elementos también están definidos por la numeración de la malla, la cual permite hacer referencia a la correspondiente deformación o esfuerzo (en análisis estructural) para una localización específica.

2. Análisis (cómputo de la solución): En la siguiente etapa, en el proceso de análisis de elementos finitos se lleva a cabo una serie de procesos computacionales que involucran fuerzas aplicadas, y las propiedades de los elementos de donde producir un modelo de solución. Tal análisis estructural permite la determinación de efectos como lo son las deformaciones, estiramiento o estrés que son causados por fuerzas estructurales aplicadas como lo son la fuerza, la presión y la gravedad.
3. Post-procesamiento (visualización): Estos resultados entonces pueden ser estudiados utilizando herramientas visuales dentro del ambiente de FEA para ver y para identificar completamente las implicaciones del análisis. Herramientas numéricas y gráficas permiten la localización precisa de información como esfuerzos y deformaciones a ser identificadas.

Selección del programa a utilizar en este proyecto. En la actualidad existen numerosos programas de análisis por elementos finitos, tales como:

ABAQUS, ANSYS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, STRUDL, CAEPIPE, etc. Tanto ANSYS (más conocido) como COSMOS o ABAQUS son de programas de "Uso General". El concepto de "Uso General" quiere decir que, en primer lugar, el programa incluye muchas capacidades generales, tales como funciones de preprocesador (para generar un modelo), soluciones, postprocesador, gráficos, modelado paramétrico y utilidades para que el programa sea fácil de usar. En resumen, no se trata de un programa especializado para resolver problemas, sino que nos permitirá satisfacer muchas necesidades complejas de diseño y análisis. Se ha seleccionado el software comercial ANSYS debido a la gran variedad de tipos de análisis que permite realizar sin necesidad de cambiar de plataformas. ANSYS, Inc. desarrolla y comercializa a nivel mundial el software de simulación en ingeniería más usado por diseñadores e ingenieros a través de un amplio espectro de industrias. Los diferentes tipos de análisis que pueden realizarse con este software son:

- Análisis estructural, consistente en modelos lineales y no lineales. Los modelos lineales usan parámetros simples y asumen que el material no se deforma plásticamente. Los modelos no lineales consisten en deformar el material más allá de su límite elástico. En esta situación la tensión que experimentará el material varía con la cantidad de deformación.

- Análisis vibracional, empleado para analizar el comportamiento del material ante vibraciones aleatorias, choques e impactos. Cada uno de estos supuestos puede afectar a la frecuencia propia del sistema causando fenómenos de resonancia y consecuentemente el fallo.
- Análisis de fatiga, que ayuda a los diseñadores a predecir la vida útil del material o de la estructura, mostrando el efecto de los ciclos de carga sobre la muestra. Este análisis puede señalar las áreas donde es más probable que se produzca la propagación de la grieta. El fallo por fatiga puede también indicar la tolerancia al fallo del material.
- Análisis de transferencia de calor, ya sea por conductividad o por dinámicas térmicas de flujo del material o la estructura.
- Análisis de campos acoplados: termo-estructurales, termo-eléctricos, piezoeléctricos o acústicos, que permiten al usuario obtener un mayor conocimiento de cómo sus modelos reaccionan ante este tipo de cargas combinadas.

ANSYS tiene una estructura modular, lo que permite instalar únicamente las aplicaciones necesarias para la solución de un problema específico. A medida que el usuario avanza en la solución, este puede necesitar análisis más complejos. Los distintos módulos de ANSYS permiten solucionar los problemas

por partes. Esto implica que una vez seleccionado el programa que se va a emplear como herramienta, hay que seleccionar de que módulos de los cuales comprar la licencia. El precio de la licencia es diferente en función de las capacidades que se necesiten. Las dos licencias (conjunto de módulos) que a priori cumplen las necesidades del proyecto (se necesita poder realizar estudios de campos acoplados, concretamente piezoeléctricos) son ANSYS Multiphysics y ANSYS Mechanical. ANSYS Multiphysics engloba el análisis del comportamiento de un elemento sometido a múltiples fenómenos físicos. Incluye capacidades de análisis de estructuras, análisis térmico, comportamiento de fluidos y electromagnetismo a alta y baja frecuencia. ANSYS Mechanical permite el análisis de estructuras bajo cargas lineales, no lineales y dinámicas. Incluye una amplia gama del estudio del comportamientos de los elementos, también incorpora varios modelos de materiales, así como formulas precargadas para la resolución de un gran número de problemas de ingeniería.

Simulaciones preliminares de címbalos. A la hora de evaluar cuáles van a ser nuestras necesidades a la hora de realizar las mejoras en el diseño de los címbalos se ha comenzado con unas simulaciones preliminares. Para estas primeras simulaciones se ha comenzado con un modelo lineal que no tiene en cuenta el posible comportamiento viscoelástico del adhesivo. Tampoco se ha tenido en cuenta las

posibles inestabilidades geométricas (abolladura del címbalo).

Las estructuras axisimétricas sometidas a cargas axisimétricas, pueden ser analizadas en un modelo bidimensional. Existen varios elementos en ANSYS capaces de modelar problemas axisimétricos, es decir, problemas que posean simetría respecto a un eje. Los modelos axisimétricos se realizan en un plano, de forma que el eje Y sea el eje de simetría del objeto considerado.

En ingeniería estructural se emplea el concepto de tensión de Von Mises en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles. La tensión de Von Mises es un escalar proporcional a la energía de deformación

elástica de distorsión que puede expresarse en función de las componentes del tensor tensión, en particular admite una expresión particularmente simple en función de las tensiones principales, por lo que la tensión de Von Mises puede calcularse a partir de la expresión de la energía de deformación distorsiva. Las unidades de las tensiones son Pa. Los puntos con valores más altos de tensión de Von Mises muestran zonas en las que será más probable el fallo del dispositivo, al haber una mayor acumulación de tensiones.

Durante el análisis el grupo de trabajo de UPM identificó las variables que podrían trabajarse desde el punto de vista de simulación y que hacen referencia a la no linealidad del sistema integrado disco-címbalo-asfalto-vehículo.

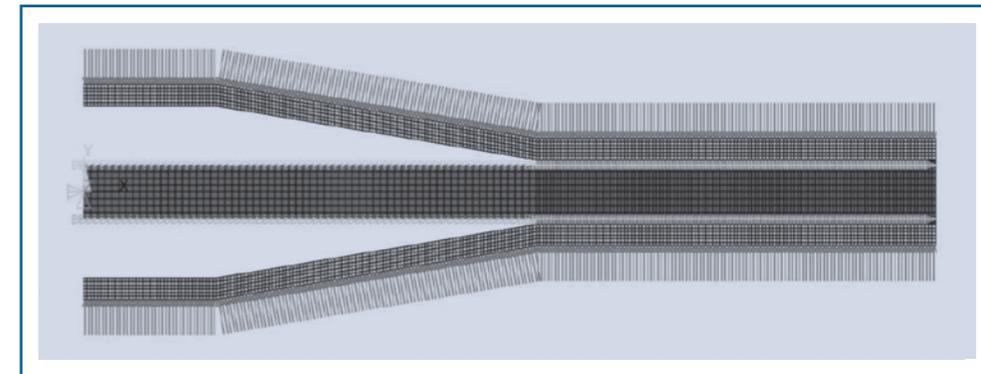


Figura 6.- Visualización de címbalo con Modelo FEA cargado con 0,5 MPa.

Podemos encontrarnos con fuentes de no linealidad debidas a:

- Viscosidad del adhesivo: La mayoría de los análisis por métodos de elementos finitos que se realizan se basan en la solución de problemas donde existe una relación lineal entre la fuerza y la deformación (Ley de Hooke). Sin embargo no todos los modelos cumplen con esta condición, estos modelos son conocidos como no lineales. A diferencia de lo que ocurre en los metales, que requieren relativamente pocas propiedades para caracterizar su comportamiento, el tratamiento del adhesivo puede ser más complejo, debido a que nos encontramos ante un tipo de problema no lineal del material.
- Posible pandeo de la chapa de acero o inestabilidad geométrica. El pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal de compresión. Se traduce en la aparición de una flexión adicional en la estructura cuando se halla sometido a la acción de esfuerzos axiales de cierta importancia. Es necesario realizar un estudio de nuestra estructura para descartarlo en el rango de tensiones en que nos movemos o para estudiar el fenómeno si ocurre ya que repercutirá en su vida útil.

- Estudio dinámico: La carga aplicada es de carácter dinámico y transitorio, por lo que no tiene que ser necesariamente periódica. Esto hace necesario realizar estudio de fenómenos dinámicos con el fin de descartarlos, si son despreciables, o ser tenidos en cuenta en caso contrario.
- La onda de presión que se genera no llega a todos los címbalos a la vez. Esto hace necesario diseñar con cuidado como conectar los diferentes címbalos entre sí para evitar pérdidas. Esto es debido a que los címbalos, cuando no están actuando como actuadores se convierten en sensores, y la energía que se ha obtenido a partir de los címbalos activos puede estar invirtiéndose en deformar los címbalos inactivos.
- Simulación de circuitos: Es un fenómeno acoplado, el hecho de estar obteniendo energía eléctrica del címbalo modifica su respuesta elástica (el efecto es como si estuviera amortiguado adicionalmente) con lo que a su vez se modifica su respuesta eléctrica. Se pueden usar circuitos eléctricos en el propio ANSYS para estudiar este efecto y ver cómo afecta al rendimiento. El objetivo es producir el máximo de energía eléctrica para una señal de fuerza $P(t)$ dada en el intervalo de tiempo considerado. Se debe cerrar el circuito y la energía produ-

cida será la integral de $V(t) \cdot I(t)$ en el intervalo. La impedancia óptima para obtener el máximo de energía dependerá de las características del dispositivo piezoeléctrico. La optimización del circuito de conversión de energía y el piezoeléctrico se debe calcular en conjunto al ser problemas acoplados.

Con el fin de determinar las características de los diferentes címbalos fabricados, se llevó a cabo una primera caracterización en el Instituto de Cerámica y Vidrio, anterior a la realizada en Repsol en el equipo de pista.

La caracterización consistió en: estudio de las resonancias piezoeléctricas, medida del voltaje asociado a la respuesta piezoeléctrica por deformación y por último, medida de la potencia bajo distintas resistencias de carga eléctrica.

5.1.5. Medida de Resonancia Piezoeléctrica.

Al someter cualquier cerámica polarizada a un campo eléctrico alterno, ésta vibra mecánicamente, alcanzando a determinadas frecuencias su amplitud máxima de oscilación (frecuencia de resonancia). Las frecuencias a las que se obtienen los máximos de impedancia dependen de las propiedades piezoeléctricas, elásticas y dieléctricas del material. A partir del estudio de las resonancias mecánicas se pueden conocer diferentes características de un

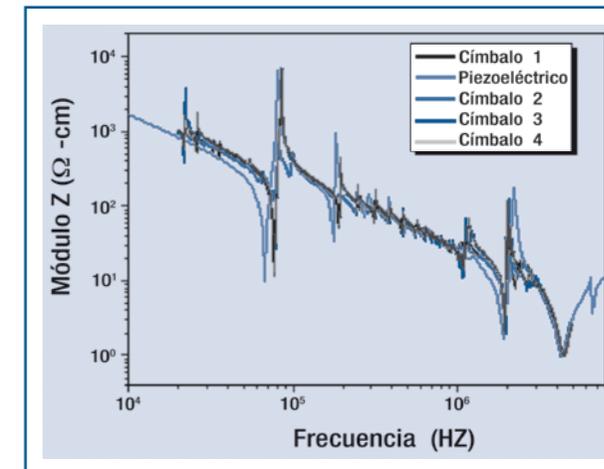


Figura 7.- Curvas de resonancia címbalos de latón de la serie 1-6.

vibrador piezoeléctrico. Esta medida fue usada para comprobar si el címbalo sigue comportándose como un piezoeléctrico, la calidad del pegado, etc. Se llevó a cabo con un analizador de impedancias Agilent/HP 4194A, con medidas realizadas principalmente en el rango de frecuencias entre 20 KHz y 5 MHz. Resultados representativos de esta medida se muestran en la 7, para címbalos de latón de la serie 1-6 (ver Tabla 1).

Se muestran también las resonancias de las cerámicas piezoeléctricas sin chapa a modo de comparación. Alrededor de 80 KHz aparece la frecuencia de vibración fundamental del modo radial (excitación en perpendicular a las caras electrodadas y

vibración en el diámetro). La frecuencia aparece desplazada para los címbalos, lo que es un efecto de las chapas sobre la cerámica piezoeléctrica. Otros efectos apreciables son la aparición a frecuencias menores (rango 20-30 KHz) de resonancias del címbalo que no se observan en la cerámica piezoeléctrica sin chapas. Las resonancias del címbalo 2 son muy diferentes y con amplitudes mucho menores que el resto. Esto es debido a una menor actividad piezoeléctrica del címbalo, debido probablemente a una peor calidad del pegado. En algunos casos como el mostrado, esta técnica ha sido usada como una rápida manera de descartar címbalos defectuosos.

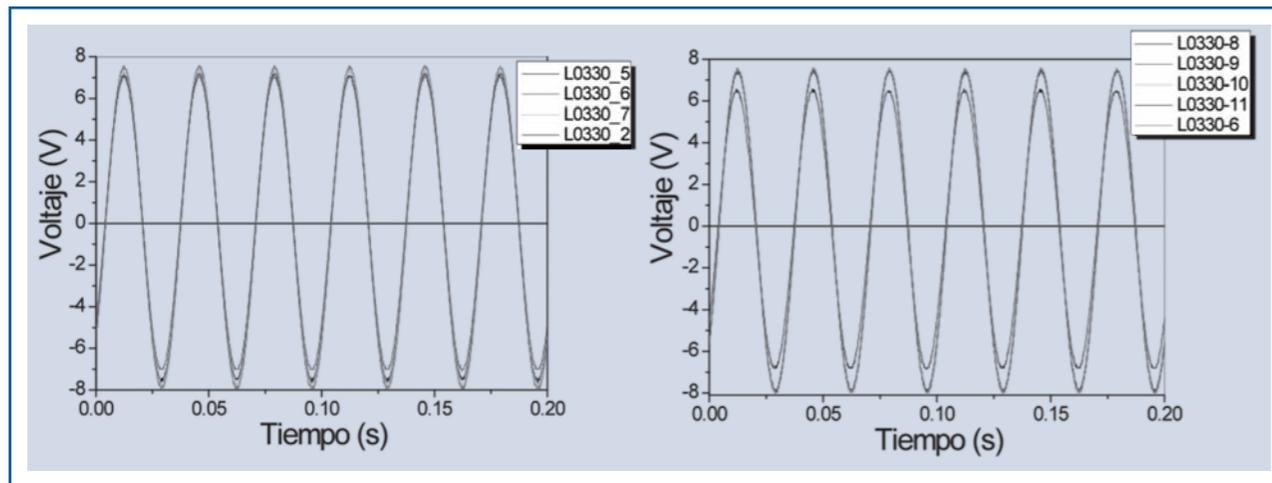


Figura 8.- Voltajes generados por distintos címbalos de la serie L0330 excitados mecánicamente a 30Hz.

5.1.6. Medida del voltaje asociado a la respuesta piezoeléctrica por deformación.

La segunda caracterización llevada a cabo es la medida en un osciloscopio de la señal sinusoidal a distintas frecuencias generada por el címbalo excitado mecánicamente por el vibrador acústico. Para el montaje experimental, el vibrador se coloca boca abajo sobre el címbalo. La señal que se recoge es aquella que da mayor voltaje pico-pico a la máxima amplitud de oscilación dada por el vibrador sin que se distorsione por rebotes, o por efecto del anclaje del movimiento oscilatorio del címbalo. Señales características recogidas por el osciloscopio con este montaje se muestran en la 8.

5.1.7. Medida de la potencia bajo distintas resistencias de carga eléctrica.

La potencia disipada por el címbalo en una resistencia es función del voltaje generado y de la propia resistencia. La 9 muestra una curva representativa de esta dependencia para varios címbalos de la serie 1-6.

Para calcular la curva, se excita mecánicamente con el vibrador acústico el címbalo a la frecuencia seleccionada. El voltaje desarrollado por el címbalo

se descarga en una resistencia variable en serie con el címbalo y se mide en un multímetro Agilent/HP 34401A (función V_{ac} , que mide el V_{rms} de la señal). La potencia se calcula como $P_{max} = V_{ac}^2 / R$.

Todas las curvas presentan similares comportamientos. La potencia aumenta en función de la resistencia externa hasta un máximo, a partir del cual disminuye. A partir de estas medidas se han caracterizado las propiedades eléctricas de los diferentes címbalos, mostrados en la Tabla 2. Son el voltaje medido en una

Tabla 2.- Caracterización de címbalos de distintos diámetros y metales a 30 Hz.

Piezoeléctricos	V (1 M Ω) (V)	P _{Max} (mW/cm ²)	R _{max} (K Ω)
Serie 1-6	4.8	$3.9 \cdot 10^{-3}$	500
B 1-5	8.5	$1.0 \cdot 10^{-2}$	500
BF 1-9	11.7	$2.4 \cdot 10^{-2}$	500
AA 0-5	2.5	$1.8 \cdot 10^{-3}$	500
AB 1-8	4.2	$3.4 \cdot 10^{-3}$	500
S 1-19	4.6	$3.8 \cdot 10^{-3}$	500
SB 1-4	3.0	$1.6 \cdot 10^{-3}$	500
AAS 1-3	3.0	$1.7 \cdot 10^{-3}$	500
SABA 1-3	4.3	$3.2 \cdot 10^{-3}$	500
SP 1-13	5.6	$5.5 \cdot 10^{-3}$	500
L 1-11	3.8	$2.5 \cdot 10^{-3}$	500
L0330 1-31	4.2	$3.0 \cdot 10^{-3}$	500
LB330 1-4	5.7	$5.4 \cdot 10^{-3}$	500
A30 1-3	4.7	$3.7 \cdot 10^{-3}$	500

resistencia de carga de 1 M Ω , la potencia disipada en el máximo de la curva de la Figura 9, y la resistencia a la que se produce ese máximo.

El propósito de esta caracterización es hacer una primera evaluación de los címbalos piezoeléctricos. Las frecuencias de medida (30 Hz) se alejan ligeramente de las observadas en el banco de pruebas de Repsol (2 Hz), pero sirven para hacer una primera comparativa entre címbalos. La fuerza ejercida por el vibrador acústico también parece menor que la aplicada en Repsol. Por ello, algunos de los címbalos piezoeléctricos que pudieron ser medidos en el ICV se rompieron en condiciones más exigentes.

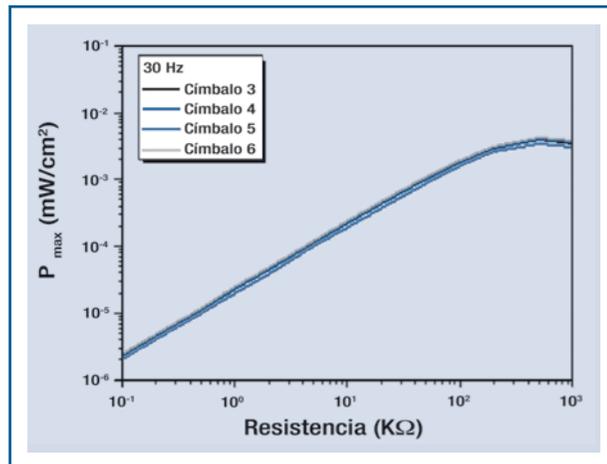


Figura 9.- Potencia disipada en función de la resistencia de carga a 30 Hz para címbalos de la serie 1-6.

Esto hizo que se tomaran medidas correctoras para una mejor fabricación de címbalos (como el uso de latón como metal para las chapas, pequeños cambios en la fase de preparación de superficies y en el secado tras la limpieza con acetona, etc.).

En los resultados mostrados en la Tabla 2 se observa que los mejores valores de potencia se dieron para los címbalos de latón de la serie BF, con chapa de 0.25 mm de espesor. Sin embargo, esta chapa es muy fina, y tras las pruebas el címbalo terminó deformado. El resto de los címbalos de latón dan potencias del orden de $10^{-3} mW/cm^2$.

Finalmente, y aunque el diseño se ha ido modificando durante la etapa de prototipado, se concluye en un diseño de discos de 29mm de diámetro, 1mm de espesor y un címbalo de chapa de latón de 0.3 mm de espesor y 1mm de altura (d_c) (Figura 10).

5.2. Modificación del equipo para ensayo de pista de laboratorio

Tomando el equipo *Wheel-Track test*, que consiste en una rueda con peso equivalente a vehículo apoyada en un banco con movimiento de vaivén donde se soporta la probeta asfáltica, se ha cableado hacia afuera de la cámara climática hasta un osciloscopio, en primera instancia. Una vez se inicia el ensayo, la rueda pasa rodando encima de la probeta

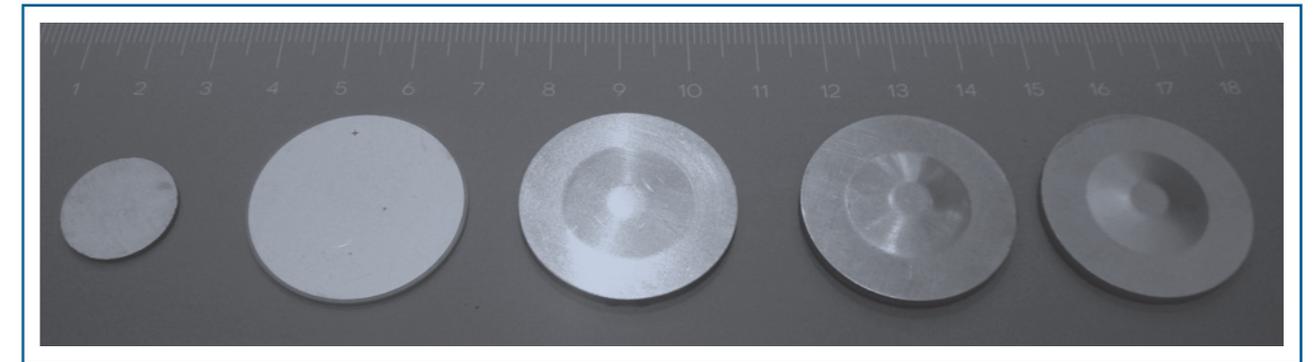


Figura10.- Vista de los diferentes discos y címbalos ensayados en el prototipo *Wheel Track*.

y se puede registrar el pulso eléctrico generado por el piezoeléctrico enterrado bajo la superficie de la probeta. En una segunda fase, se ha sustituido el osciloscopio por una tarjeta de adquisición de datos y un circuito eléctrico, con una presentación en PC de la energía acumulada con el paso continuo de rueda. La rueda de ensayo es metálica y con banda de rodadura de goma maciza de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor. La frecuencia de la rodadura es de 42 pasadas por minuto, con un recorrido de 23 cm por sentido. La presión de contacto de la rueda es de 0,9 Mpa.

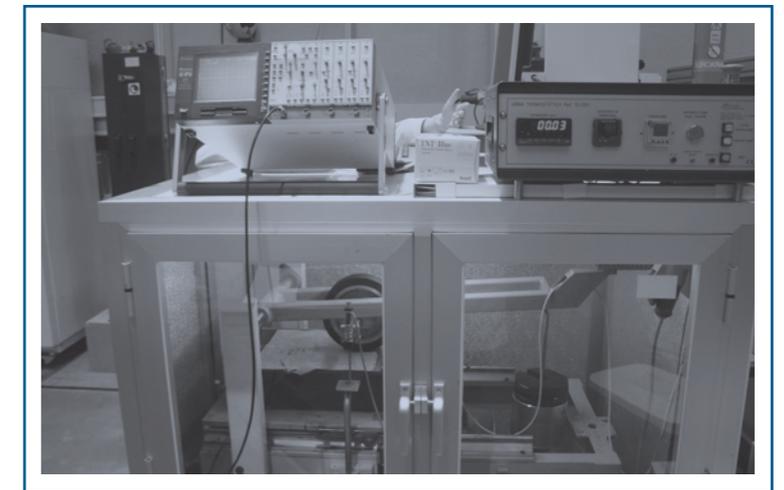


Figura11.- Vista de la modificación del equipo de ensayo de pista (*Wheel-Track*) en laboratorio del Centro de Tecnología Repsol.

5.3. Diseño de asfalto para embeber los discos y conducir la energía fuera del asfalto

Se arrancaron tres líneas a este respecto:

- 5.3.1. Diseñar un mástico bituminoso (*host layer*) que contuviera el disco piezoeléctrico en su interior
- 5.3.2. Diseñar composites bituminosos con conductividad eléctrica mejorada, capaces de conducir la electricidad generada en los discos.
- 5.3.3. Diseñar las capas que se situarían bajo la rueda y la capa de rodadura sobre la capa *host*.

5.3.1. Diseño de *host layer*.

La integración de los piezoeléctricos en el asfalto se ha realizado mediante un *host layer* consistente en un mástico bituminoso compuesto por betún 70/100 y distintos porcentajes de filler silíceo.

Las primeras láminas se realizaron embebiendo los piezoeléctricos en betún y amasando todo el conjunto (12). Posteriormente el procedimiento consistió en el amasado de la lámina sin piezoeléctricos, colocándose los piezoeléctricos en agujeros realizados una vez enfriado el mástico. Los piezoeléctricos se conectaron a través de cinta adhesiva

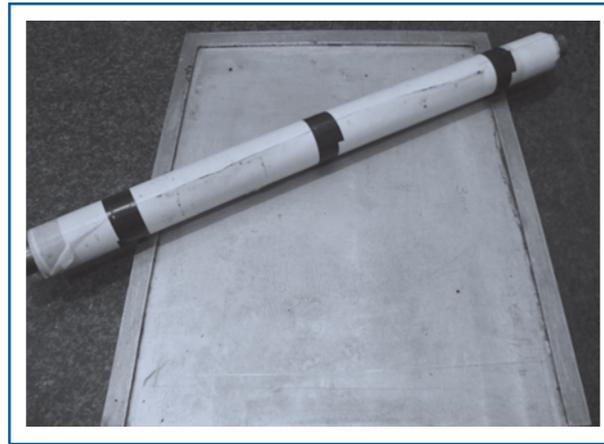


Figura 12.- Placa y rodillo utilizados para la fabricación de las láminas.

de cobre con el osciloscopio para las medidas de voltaje (13).

Se han estudiado diferentes efectos a la hora de la realización de la lámina:

- % Filler añadido: 5%, 10%, 15%.
- Diámetro del piezoeléctrico: 12.7 y 30 mm.
- Elemento conductor: malla metálica y cinta adhesiva de cobre.
- Disposición de piezoeléctricos: un piezoeléctrico centrado, 3 piezoeléctricos apilados centrados, 3 piezoeléctricos apilados y un piezoeléctrico en la misma banda.

- Composición de la matriz: betún 70/100, betún 35/50, betún modificado y mezcla betún con arena caliza 0/2.

Tras probar varias configuraciones con la que se obtienen mejores resultados es con aquella donde se colocan tres piezoeléctricos con címbalo en sentido perpendicular al movimiento de la rueda (14). El porcentaje de filler no llega a ser determinante, obteniendo resultados similares con porcentajes de filler del 5 al 15%. Tampoco llega a ser determinante el tipo de betún utilizado.

5.3.2. Diseño de composites bituminosos con conductividad eléctrica mejorada.

Dentro de esta línea se ha probado con diversos materiales conductores con el objetivo de ver su comportamiento a la hora de mezclarlos con betún.

- Nanofibra de carbono (GANFs): las nanofibras de carbono utilizadas han sido suministradas por Grupo Antolín, y se trata de nanofibras con excelente relación de aspecto y una alta estructura grafitica (grado de grafitación sobre el 70%). Se caracterizan por sus excelentes propiedades mecánicas y de transporte (Tabla 3). Debido a su pequeño diámetro y a su alta relación de aspecto, GANFs son capaces de hacer una red conductora muy efectiva en polímero y otras matrices con un contenido de carga muy bajo.



Figura 13.- Lámina de betún con piezoeléctricos embebidos.

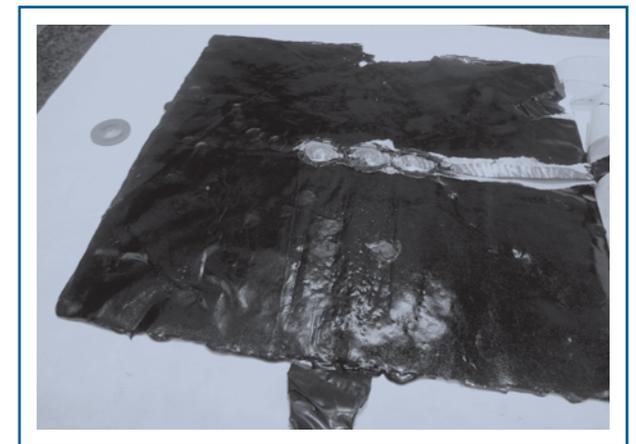


Figura 14.- Lámina de betún con tres piezoeléctricos en sentido perpendicular al movimiento de la rueda.

Tabla 3.- *Propiedades de las nanofibras de carbono del Grupo Antolín.*

DIÁMETRO DE FIBRA (TEM)	nm	20 -80	20-80
LONGITUD DE FIBRA (SEM)	µm	>30	>30
DENSIDAD VOLUMÉTRICA	g/cc	>1,97	»2.1
DENSIDAD APARENTE	g/cc	0.060	0.085
ENERGÍA SUPERFICIAL	mJ/m ²	≈100	-
ÁREA SUPERFICIE ESPECÍFICA BET (N2)	m ² /g	150-200	105-115
GRADO DE GRAFITACIÓN	%	≈70	≈100
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	Ohm·m	1·10 ⁻³	1 10 ⁻⁴
CONTENIDO DE PARTÍCULAS METÁLICAS	%	6-8	0.1-0.2

Se realizan probetas con árido silíceo de tamaño máximo 8 mm y 15% de betún sobre árido. Se utilizan distintos porcentajes de nanofibra de carbono, comprendidos entre 0,25% y 2% en peso sobre la cantidad de árido.

- Escorias de acero:

Se realizan probetas con árido silíceo de tamaño máximo 8 mm y 15% de betún sobre árido. Se utilizan distintos porcentajes de escorias de acero, comprendidos entre 0,25% y 2% en peso sobre la cantidad de árido.

- Polvo de carbonilo de hierro SQ:

Fue suministrado por BASF, quien inventó este producto en 1925. Se trata de un hierro de alta pureza (97.5% para grado S y 99,5% para grado R), preparado por descomposición química del pentacarbonilo de hierro purificado. Tiene la apariencia de polvo gris y está compuesto de micropartículas esféricas. Muchas de las impurezas son carbono, oxígeno y nitrógeno.

Se realizan probetas con árido silíceo de tamaño máximo 8 mm y 15% de betún sobre árido. Se

utilizan distintos porcentajes de nanofibra de carbono, comprendidos entre 0,25% y 3% en peso sobre la cantidad de árido.

- Polvo de óxido de hierro pigmento:

Se ha constatado que las mezclas de betún con pigmento rojo de óxido de hierro constituyen un material asfáltico dieléctrico. No se consiguen másticos conductores, sin embargo, con este pigmento se llega a obtener materiales dieléctricos (ya no aislantes), que pudieran encontrar aplicación en otro tipo de situaciones, por ejemplo en proporcionar una capa superficial de pavimento que permita la descarga de energía estática a tierra, con aplicación en centros industriales, por ejemplo.

5.3.3. *Diseño de capas de rodadura.*

Para el prototipo se han desarrollado diferentes capas con el objetivo de simular una capa inferior y una capa de rodadura superior, en medio de las cuales irá colocada la lámina bituminosa con los piezoeléctricos embebidos. Se han estudiado diferentes formulaciones y diferentes espesores de capa.

Para el caso de la capa inferior o base del prototipo la mezcla utilizada ha sido una AC16 con árido silíceo y calizo y betún 35/50 (Tabla 4). El espesor seleccionado ha sido 4 cm (16).

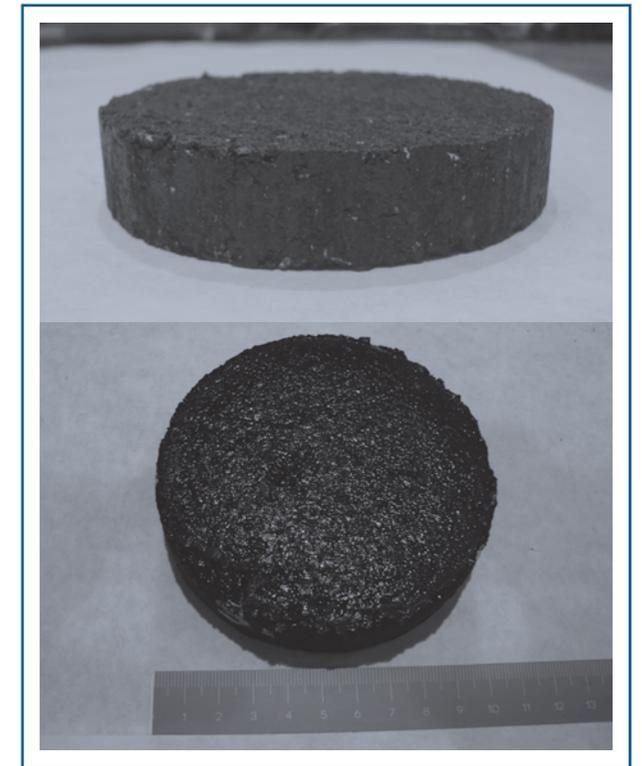


Figura15.- *Probetas realizadas con composites conductores.*

Para el caso de la capa de rodadura superior se han utilizado diferentes formulaciones teniendo en común todas ellas un espesor de 2 cm. Las características de cada una son:

- Capa cerrada con betún 35/50, arena caliza y sílicea (Tabla 5).

- Capa cerrada con betún 70/100, arena caliza y sílicea (Tabla 5).
- Capa abierta con betún 35/50, arena caliza y sílicea (Tabla 6).

El mejor comportamiento lo ofrecen las capas cerradas ya que la capa abierta está limitada en cuanto al tamaño del árido. Se ha elegido un espesor de capa de 2 cm para que el piezoeléctrico viera reflejada la máxima presión posible, ya que la capa de rodadura puede amortiguar el efecto producido por el paso de la rueda (17).

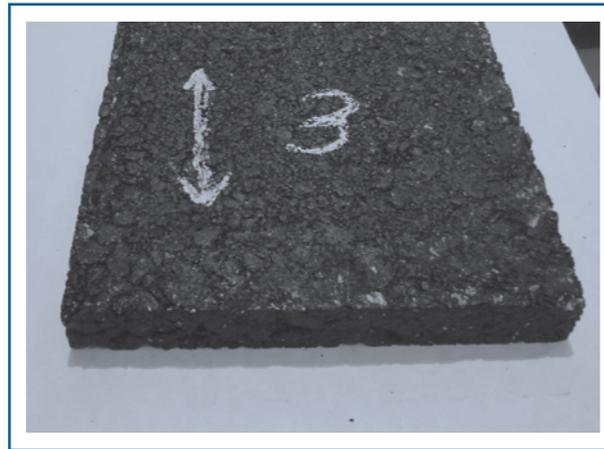


Figura 16.- Capa de rodadura inferior.

Tabla 6.- Formulación utilizada para la preparación de las probetas de rodadura superior abierta.

	Porcentajes			
	12/20	6/12	0/6 Sílice	0/6 Caliza
22,4-16	0,0			
11,2-8	0,0	5,0		
8-4		0,0	36,5	36,5
4-2			1,0	1,0
2-0,5			4,0	4,0
0,5-0,063			3,3	3,3
Filler			2,8	2,8
	0,0	5,0	47,5	47,5

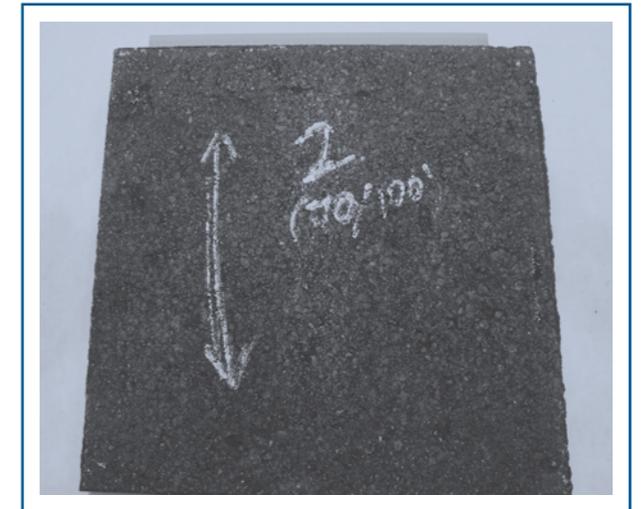


Figura 17.- Capa de rodadura superior cerrada.

Tabla 4.- Formulación utilizada para la preparación de las probetas de rodadura inferior.

	Porcentajes			
	12/20	6/12	0/6 Sílice	0/6 Caliza
22,4-16	5,0			
16-8	10,0	23,0		
8-4		11,0	4,0	2,00
4-2			7,0	8,0
2-0,5			6,0	8,0
0,5-0,063			6,0	4,0
Filler			3,0	3,0
	15,0	34,0	26,0	25,0

Tabla 5.- Formulación utilizada para la preparación de las probetas de rodadura superior cerrada.

	Porcentajes			
	12/20	6/12	0/6 Sílice	0/6 Caliza
22,4-16	0,0			
16-8	0,0	0,0		
8-4		0,0	10,0	10,0
4-2			11,3	11,3
2-0,5			15,8	15,8
0,5-0,063			9,3	9,3
Filler			3,8	3,8
	0,0	0,0	50,0	50,0

5.4. Caracterización de la señal eléctrica generada en condiciones de rodada

En primera instancia, las cintas de cobre adheridas a los discos fueron conectadas a un osciloscopio, detectando los pulsos eléctricos generados a cada paso de rueda (18).

Estos valores de diferencia de potencial pico-pico son equivalentes a los valores de voltaje observables cuando los discos son excitados en un shaker, sin carga (es decir en vacío). Por ello, es necesario recurrir a un circuito rectificador y de adecuación de señal en una etapa siguiente. En este punto se suelen cometer los errores más abundantes en el

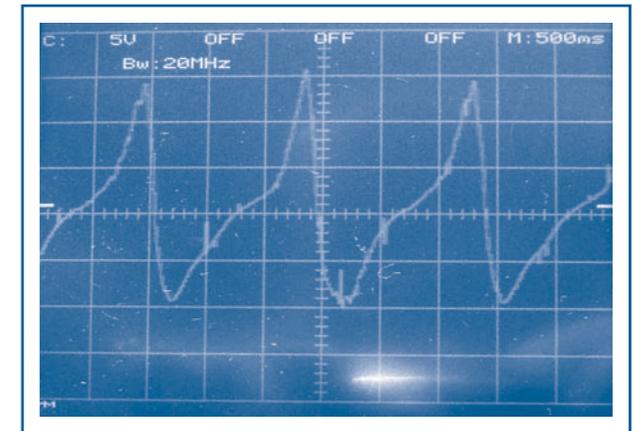


Figura 18.- Pulsos registrados en osciloscopio a cada paso de rueda en prototipo Wheel Track.

campo de la captura de energía residual, pensando que realmente este pico es el voltaje que se conseguirá finalmente, sin embargo, una conclusión del presente proyecto es que tanto hay que trabajar el diseño de los transductores, como el diseño de la integración se los mismos en la carretera, como el circuito eléctrico que transformará la señal en energía "usable".

5.5. Selección de circuito eléctrico capaz de transformar la señal pulsante en corriente continua

Con el objetivo de seleccionar qué componentes deben estar presentes en la adecuación de señal pulsante, se construyó un prototipo preliminar, denominado *Rodante*, mediante el cual se podían obtener señales pulsantes similares a las obtenidas en el prototipo *Wheel Track* (Figura 19). Este prototipo previo permite cuantificar y evaluar las distintas variables eléctricas y mecánicas de los distintos tipos y arreglos de piezoeléctricos objetos de estudio. El estudio del comportamiento en este banco de ensayos permitió avanzar en paralelo mientras se eliminaban en el *Wheel Track* las incertidumbres asociadas a las condiciones de las probetas de asfalto. La estación de trabajo permite además aplicar cargas mecánicas a distintas velocidades (entre 50 y 300 mm/s) con el objetivo de simular el paso de una rueda sobre el piezoeléctrico. El sistema permite

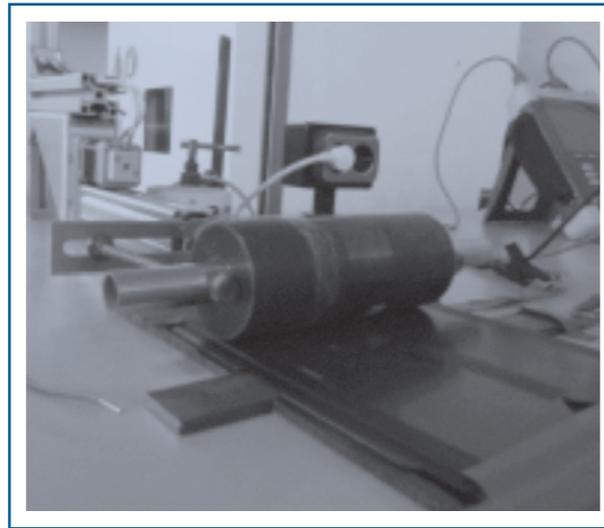


Figura 19.- Prototipo rodante (CEIS) para selección de circuito eléctrico.

además probar distintas configuraciones o arreglos de piezoeléctricos para varios discos.

Con el objetivo de identificar los parámetros óptimos del circuito, se diseñó un modelo matemático que incluye la simulación de:

- Fuerza aplicada
- Piezoeléctrico
- Circuito de rectificación
- Pinzas de medida

El modelo tiene una primera etapa que simula la forma de onda del voltaje del piezoeléctrico al some-

terse a la presión de la pasada de una rueda. La impedancia interna del piezoeléctrico se simula con una rama serie compuesta por una resistencia y un condensador.

La etapa posterior a la obtención de energía pulsante consta de un circuito rectificador de onda completa con condensador de filtro a la entrada y un condensador de almacenamiento de energía a la salida. El circuito seleccionado conlleva por

tanto las etapas de filtrado, de rectificación de señal mediante un puente de diodos, y de estabilización. Dicho circuito necesita un potencial mínimo para funcionar y entregar señal, estimado en 2,5 V de señal mínima. Además, se ha de medir la energía en condiciones de carga resistiva, es decir no en vacío (figura 20). La figura 20 es una infografía clave en el proyecto, y que podría ser extrapolable a muchos proyectos de captura de energía.

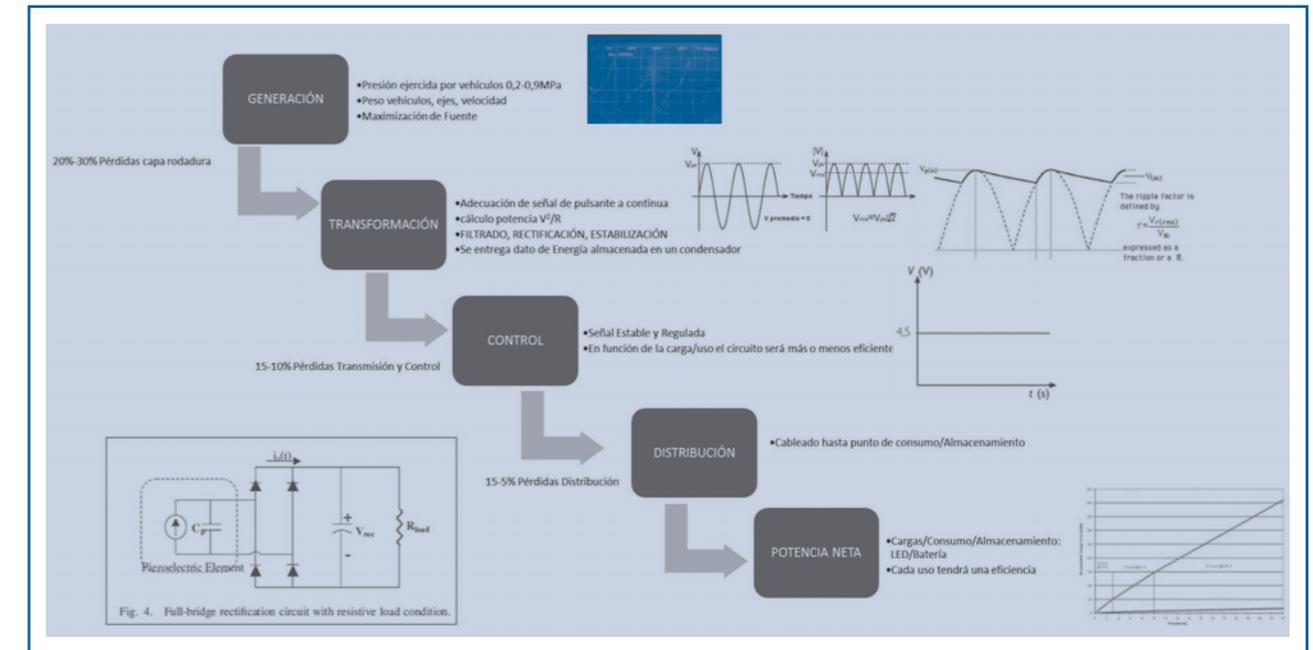


Figura 20.- Etapas tradicionales de acondicionamiento y control de señal eléctrica pulsante hasta carga de energía.

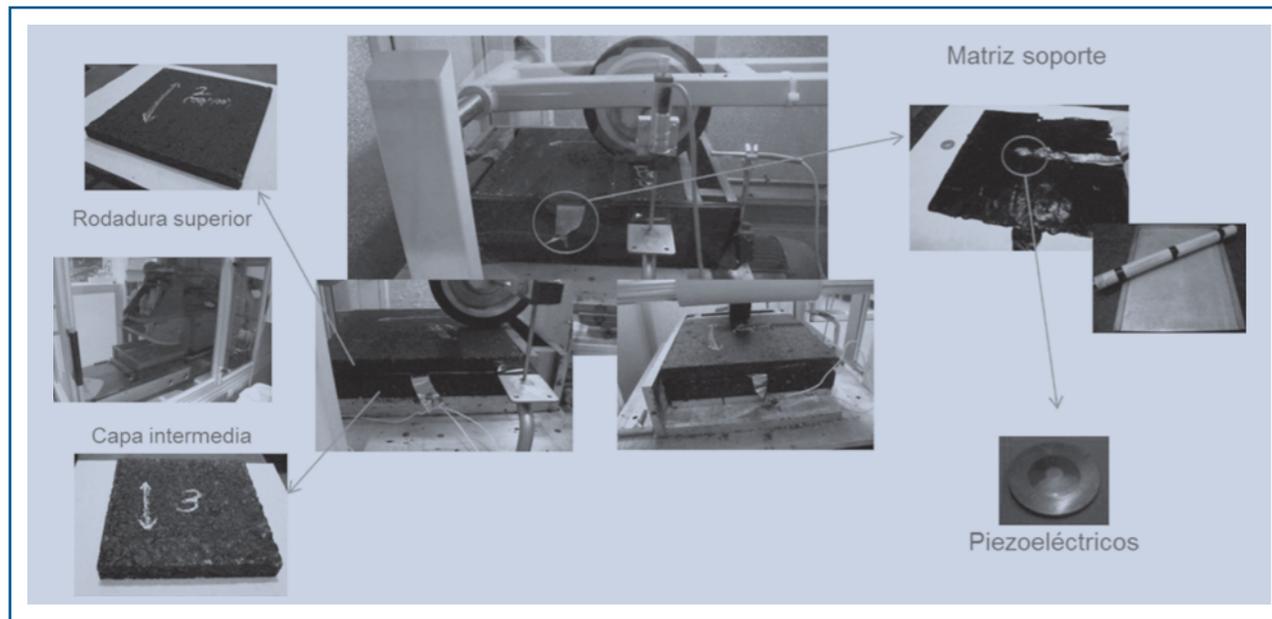


Figura 21.- *Visión completa del prototipo Wheel Track.*

5.6. Sistema de adquisición y tratamiento de señal

El sistema de medida y adquisición de datos se ha diseñado para la caracterización de las variables eléctricas generadas por piezoeléctricos embebidos en probetas de asfalto. El sistema además permite mostrar y cuantificar la energía acumulada durante la operación del banco de ensayo (Figura 22).

La interfaz gráfica permite cuantificar las variables eléctricas tanto en la fase de diseño de probetas

como durante las fases de evaluación de producto a largo plazo. Además, la versatilidad de su entorno gráfico permite acompañar a los desarrollos y/o cambios requeridos por el usuario (Figura 23).

El sistema es exportable a un sistema portátil y autónomo, facilitando su incorporación a medidas en carretera y/o durante largos periodos de prueba.

Por tanto, ahora sí es válido calcular los parámetros de potencia, intensidad de corriente y energía generada a cada paso de rueda, y por tanto alimentar las

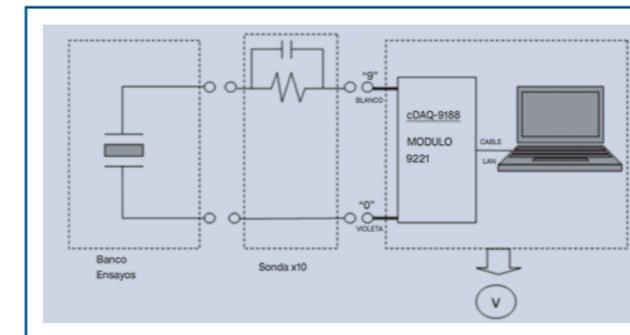


Figura 22.- *Esquema de adquisición de señal en prototipo Wheel Track.*

estimaciones en condiciones de contorno reales, según las siguientes ecuaciones basadas en voltaje rms (valor cuadrático medio de una corriente variable):

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 \cdot dt}$$

Intensidad:
$$I_{Rms} (\mu A) = \frac{V_{Rms} (V)}{R_{carga} (M\Omega)}$$

Potencia:
$$P(\mu W) = \frac{V_{Rms}^2 (V)}{R_{carga} (M\Omega)}$$

Energía:
$$E(\mu J) = P(\mu W) \cdot t_{ventana} (S)$$

Así, en el prototipo Wheel Track se pueden obtener del orden de **30-50 voltios** de señal rms en vacío, equivalentes a unos **4 voltios** en condiciones de carga, equivalentes a su vez a **16 μW** de potencia.

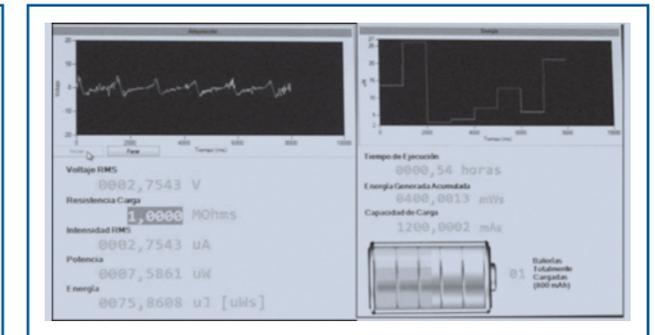


Figura 23.- *Pantallas del software de recogida de datos.*

5.7. Verificación en prototipo de factores en tráfico real (velocidad de vehículos, diferente peso de ejes)

Con el objetivo de conocer la influencia de la velocidad del vehículo en el período del pulso eléctrico, así como la influencia de un diferente peso en los ejes delantero y trasero, se utilizó otro banco de pruebas diseñado para caracterizar materiales y dispositivos en aplicaciones de tráfico vial. Este banco de pruebas es propiedad de la UPM³ (ubicado y desarrollado en la ETSIST – CAMPUS SUR - UPM) y es capaz de reproducir los efectos buscados (Figura 24).

³ Patente ES2364063B2 Universidad Politécnica de Madrid. Inventores: Dr. De Frutos Vaquerizo, José. Dr. Jiménez Martínez, Francisco Javier. Prof. Vázquez Rodríguez, Manuel.



Figura 24.- Prototipo de Anillo para verificar la influencia de la velocidad sobre la respuesta del piezoeléctrico.

Este banco de pruebas es usado, entre otras, en aplicaciones viales de detección de velocidad y conteo de vehículos mediante cables y espiras piezoeléctricas. En sus diferentes configuraciones, el banco de ensayos es capaz de barrer un rango de velocidad entre los 14 y los 170 km/h, lo que cubre sobradamente las condiciones de tráfico real. Tanto el control del variador de velocidad del motor trifásico que realiza el accionamiento del banco, como la recogida de resultados de medida en las pruebas de excitación y de fatiga de los compuestos piezoeléctricos, se realiza de forma automatizada mediante código informático. El peso que soporta cada eje del banco es configurable.

Las conclusiones de las distintas pruebas son:

- Con el aumento de velocidad los pulsos se estrechan en período y aumenta la potencia (área de pico).
- A partir de aprox. 30 Km/h esta tendencia se mantiene pero se reduce considerablemente en intensidad.
- A estas velocidades, 2 pulsos entran en 1 segundo de período (importante para el control de señal).
- Cuando el eje delantero tiene 75% del peso, el pulso primero es superior al segundo en proporción.
- Cuando el eje trasero tiene el 75% del peso, el pulso trasero es superior aunque algo menos que proporcional (efecto pre-tensado). En cualquier caso es muy leve y hemos comprobado que la carga no afectaría a las estimaciones ni al comportamiento del piezoeléctrico.

Se concluyen por tanto las pruebas en los tres prototipos, y se pasa a evaluar los parámetros y valores de energía acumulada conseguidos, para poner en escena la aplicación más conveniente.

6. Estimaciones de energía generada

El valor conseguido en prototipo CTR es de $16 \mu\text{W}$ para cada paso de rueda (vehículo pesado: 0,9 MPa). A partir de aquí, se ha definido un vehículo promedio (85% de vehículo ligero con 0,2 MPa y 15% de vehículo pesado), para el cual se conseguirían, por proporcionalidad de pesos, unos $5,3 \mu\text{W}$. Este valor de potencia es estable y para una carga capacitiva de 1 MOhm. Para un vehículo promedio con 2,15 ejes y una frecuencia de vehículos de 1000 vehículos/hora (valor obtenido en numerosos tramos de M-30 (caso tipo de carretera periurbana de gran capacidad)), se puede obtener sobre un solo disco, una energía de 1,5 mWh. El hecho de ser capaces de conseguir valores de microwatios por cada impacto supone un hito en el proyecto y la resolución de una barrera técnica: conseguir excitar el piezoeléctrico en condiciones de restricción de movimiento (embebido en asfalto).

El acercamiento técnico para visualizar la distribución espacial en la carretera, teniendo en cuenta factores constructivos y de mantenimiento de la infraestructura, conducen a la situación de lámina intercapa bajo rodadura (25). Para facilitar la visualización de las estimaciones se han definido dos unidades de medida:

Stack: corresponde a una tableta de dimensiones 20cmx10cmx2cm realizada en lámina asfáltica y

capaz de albergar 360 discos piezoeléctricos. De forma preliminar, 1 Stack es capaz de generar en estas condiciones unos 4 Wh.

rec: a diferencia de la unidad espacial anterior, se define 1 rec como la disposición de discos en stacks, extendidos bajo las zonas de rodadura probable del vehículo, capaz de generar 1 KWh.

Se ha ampliado la zona de rodadura probable a 32 cm para cada rueda de vehículo ligero. También se ha tenido en cuenta que la carga difusa también es capaz de generar energía en discos adyacentes a la vertical bajo rueda. Se han admitido pérdidas en la transformación y distribución de la señal eléctrica (no contempladas en prototipo) de un 15%, en cada caso. Con todo, se obtiene que 1 REC debe contener 289 Stacks, que situados en ambas rodaduras de un mismo vehículo, equivaldría espacialmente a unos 12 metros por carril.

Para calcular el coste de la instalación de los piezoeléctricos, se han tenido en cuenta el coste de los discos, el ensamblado con címbalos, la integración en lámina asfáltica, la instalación eléctrica (sin baterías) y el mantenimiento eventual de la infraestructura. Se ha lanzado los cálculos para 20 años, teniendo en cuenta que entre 5 y 6 años se suelen

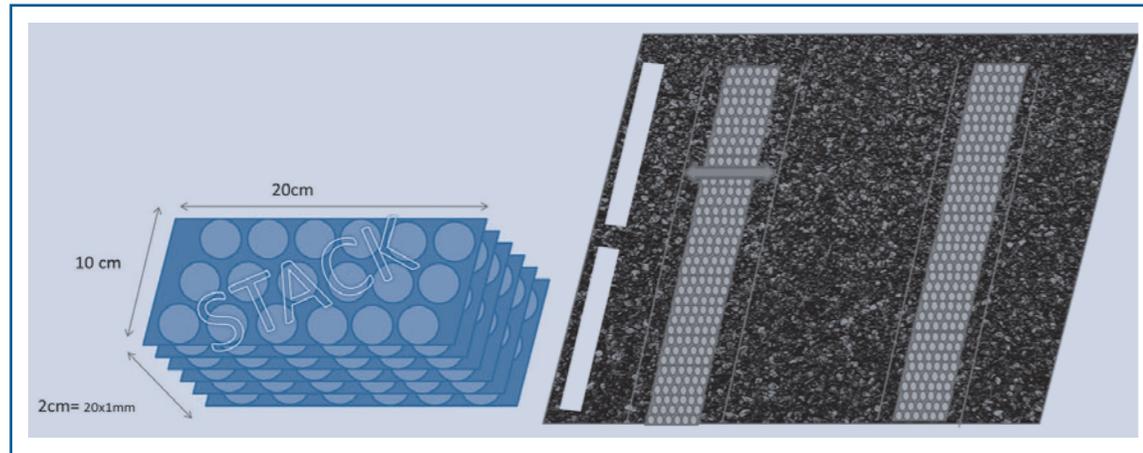


Figura 25.- Visualización de agrupación de piezoeléctricos bajo la rodadura.

operar las capas de rodadura por daño de la infraestructura. Aunque se pueden preservar de forma localizada los piezoeléctricos ante una operación de mantenimiento o conservación, se prefiere tener en cuenta este valor de 5-6 años, como valor mínimo para rentabilizar la instalación. Así, el coste de la instalación de 1 rec es de 38,514 €, en una primera aproximación. Esto arroja unos valores de entre 9 y 10 años para rentabilizarla.

Así pues, es necesario identificar qué parámetros, de los tenidos en cuenta de forma estándar, es preciso mejorar para reducir los costes. Estos han sido:

1. 5% más de energía al mismo precio por calidad y selección del pzt.

2. Reducción de las pérdidas estimadas de transformación y control del 15% a un 10%.
3. Reducción de las pérdidas estimadas en distribución de señal del 15% a un 5%.
4. Reducción en costes fijos en un 25%.
5. Reducción asumible en el precio de un piezoeléctrico (PZT) a 0,1€/ud.
6. Mejorar objetivo de un 40% más de energía por acoplamiento mecánico.

Actuando sobre estos parámetros, del todo asumibles en la duración del proyecto, el coste de 1 rec se reduce a 19,400€.

El enfoque de las estimaciones y la disposición en la carretera apuntan a obtener el máximo de energía a acumulada. El uso que más se requiere en la carretera es sin duda la iluminación. Por tanto, se han lanzado estos números de obtención de energía y costes de instalación, contra dos escenarios que hacen referencia a lo que paga la administración por la electricidad para abastecimiento de luminaria y a una eventual venta de energía alternativa. En ambos casos la energía cuesta entre 0,18 y 0,32 €/KWh.

Se obtiene así unos valores correspondientes a 5-6 años para rentabilizar (*break even point*) la inversión, con unos valores de coste de la energía de 0,11 €/KWh (suponiendo que podemos alargar su vida en servicio hasta los 20 años) (Tabla 7).

Tabla 7.- Valores clave para rentabilidad de instalación de piezoeléctricos en carreteras para iluminación.

Energía media por vehículo en un PZT	11,467μW
1STACK 18x20PZT	4,128 Wh
Definición de rec: Disposición de stacks consecutivos capaz de generar:	1 kWh
nº de STACK necesarios p/PANEL DE ILUMINACION 100 Wh	24 (2,42 m lineal)
1 rec instalado (optimizado)	19.398 €
Rentabilidad (TIR 14%)	5-6 AÑOS
Coste de la energía (20 años + mantenimiento intermedio)	0,1107 €/KWh

7. Discusión de resultados

a) Conclusiones clave de la etapa de Prototipado

Los datos aportados por el prototipo en cuanto a cantidad y calidad de energía recuperada en la carretera demuestran que la **tecnología es viable**. En esta primera etapa del proyecto, se han demostrado en el laboratorio y se han dado respuesta a los dos incertidumbres técnicas principales del proyecto: 1) la deformación del piezoeléctrico para entregar energía es posible hacerla en condiciones de embebido total y 2) la diferencia de potencial generada con cada impacto de rueda es suficiente para ser transformada por un circuitaje eléctrico y obtener una señal acumulable.

En la concepción puramente energética del proyecto, se quiso conocer cuál es la cantidad máxima de energía recuperable en una distribución o empaquetamiento en carretera de discos piezoeléctricos. Los discos fueron embebidos en una capa asfáltica, con un diseño basado en las típicamente usadas como capas anti-fisuras. Se cablearon hacia afuera del asfalto mediante banda de cobre y se conectó a un circuito transformador-rectificador, hasta obtener una energía acumulada con el paso periódico de rueda contra una carga capacitiva (1MΩ). Se estimó este diseño de capas de discos bajo rodadura

extendidas no en todo el carril de carretera sino sólo en las bandas de rodadura probable (ampliadas respecto a la anchura de rueda). En esta situación, cada impacto en cada disco es capaz de generar 10 μW de potencia, que aplicados en un entorno de alta densidad de tráfico, como carreteras peri-urbanas podrían generar 1 KWh en 3,5 metros longitudinales (de carretera de dos carriles). Este diseño es capaz de abastecer la carretera de su uso en luminaria basada en LED (es el requerimiento más demandante), y por supuesto en balizamiento, seguridad activa, etc. Se han estimado los costes de la instalación y la rentabilidad, con un break even point a los 5-6 años desde instalación, que es el tiempo previsto de manutención de las capas de rodadura, para un coste que oscila entre el coste de la energía en grid y el valor de una hipotética compra de energía alternativa (0,18-0,32 €/KWh). A tenor de estos datos, la tecnología resulta rentable, en tanto en cuanto se puede disponer de una energía capturada de los propios vehículos en paridad grid. Se apunta, para llevar a cabo y poner en situación la invención, la creación de un consorcio a través de un socio constructor, una administración de carreteras y una compañía eléctrica para conseguir un retorno de inversión rápido.

b) Oportunidades y Escenarios de Uso

b.1) Modelo de Negocio "Sensorización para Infraestructuras"

Las compañías energéticas tienen como un objetivo completar su cesta energética con otros productos que sus clientes puedan demandar a medio-largo plazo, mediante la evaluación de Fuentes de Energía Alternativas y Transporte/Almacenamiento de **Alta Densidad**. Esto conlleva la concentración de la producción y la generación y una posterior distribución hasta el punto de consumo, con unas pérdidas y costes asociados. Este proyecto apunta a que el consorcio formado podría ser un proveedor de energía de **baja intensidad** deslocalizada, con las siguientes ventajas y oportunidades, atendiendo a los materiales piezoeléctricos:

- Uso cercano a la fuente, *prosumers*, zonas remotas, materiales inteligentes, materiales para la energía.
- Materiales y sensores llegarán a ser *commodities*. Las arquitecturas y el conocimiento tendrán el máximo valor.
- Aplicaciones viables en infraestructuras, *smart city* y sensorización continua de la infraestructura (health-structure monitoring).

El disponer de una fuente de energía de baja intensidad deslocalizada y puntual encuentra su aplica-

ción natural o más eficiente en un uso muy cercano a la fuente discreta de energía. El segundo escenario de uso que se proponía inicialmente estaba basado en la alimentación de sensores y englobaba de forma cualitativa todos aquellos usos donde es importante, y además rompería una barrera técnica actual, disponer de sensores autónomos wire-less, capaces de ser integrados en el material asfáltico, sin necesidad de batería (duración máxima de 2-3 años) ni cableado. Estas características hacen posible, en el ámbito puramente de carreteras e infraestructura vial, una mejor integración de los sensores (de un tamaño aproximadamente un 70% menor al no contener la batería) de forma masiva, a la hora de construir o rehabilitar la carretera. La auscultación permanente de carreteras aportaría una información fundamental acerca de la evolución a lo largo de la vida útil del firme y la detección de los tiempos y formas de actuación como mantenimiento preventivo (frente a rehabilitación curativa, de mayor coste). Se estima que los costes en mantenimiento de infraestructura vial pueden reducirse un 50% con un seguimiento y control de la infraestructura (que actualmente se lleva a cabo mediante programas caros de auscultación desde la superficie). Esto resulta de especial interés para la adjudicación de contratos de auscultación en países emergentes, en cuyo caso presentan una red de carreteras en mal estado pero disponen de capacidad para acometer trabajos de rehabilitación y nueva construcción, con monitorización inteligente.

c) Diseño de Producto

A tenor de los resultados obtenidos en el prototipo, y atendiendo a factores constructivos de la infraestructura, valorando la inclusión en el concepto de *smart city*, todo conduce a que la mejor forma para explotar una futura comercialización y/o atracción de capital por parte de socios industriales es la fabricación de un Producto Final.

Por tanto, se propone en la siguiente memoria como trabajo futuro y con el ánimo de atraer inversión al proyecto, acometer un trabajo de diseño de producto final. La línea de trabajo es la de un producto de rápida salida al mercado. Se trataría de una **lámina de captura energética residual de baja intensidad**. Este producto generaría energía de baja intensidad de forma autónoma, para dos escenarios: la obtención de energía con consumo eficiente y como fuente de energía autónoma para sensores de inteligencia bajo carretera. La sensorización es un commodity y el valor añadido se centra concretamente en el abastecimiento de energía autónoma para aplicaciones deslocalizadas, remotas o junto a consumo, así como en inteligencia de carreteras y ciudades.

Dentro del capítulo referido a costes cabe destacar que una lámina asfáltica tiene un coste que ronda los 8-20 €/m² dependiendo del uso y de los materiales de fabricación. Por otro lado la sensorización

abarcaría los costes de sensor (80 €), el nodo (700 €) y la antena más el software (2000 €); ésta última siendo móvil y pudiéndose utilizar la misma en todo el proyecto.

En una carretera convencional nos encontramos con consumos energéticos derivados de varias fuentes. Las carreteras españolas cuentan con 1,9 millones de puntos de luz, de los cuales, 1,5 están situados en autopistas y autovías y 400.000 en travesías de ciudades. El consumo energético de la red de iluminación de las carreteras españolas se eleva anualmente a 1900 GWh/año. Otra fuente de consumo de energía son los semáforos. En España hay 300.000 semáforos instalados cuyo sistema de iluminación proviene de las bombillas LED los cuales tienen un consumo de electricidad de 85,76 GWh/año. Quedan unos 100.000 por sustituir, ascendiendo la cifra de consumo energético a 185,76 GWh/año. Por último, si se elige un panel de mensaje variable de dos zonas gráficas del inventario de PMVs de las carreteras españolas, la potencia máxima consumida estaría entre los 4000 W para los más antiguos, hasta los 400 W en los más modernos.

8. Conclusiones

- El proyecto REC ha cubierto las etapas de conceptualización de la idea, establecimiento del roadmap del proyecto, dotación de recursos, lanzamiento y prototipado final. Los datos obtenidos en el prototipo forman una base de decisión para proseguir con los escenarios de uso futuros.
- El prototipo se ha construido en las instalaciones de Repsol y ha sido capaz de demostrar que la tecnología de almacenamiento de energía a partir de pulsos generados por los vehículos es viable.
- La señal pulsante obtenida en cada impacto de rueda ha sido transformada y estabilizada a través de un circuito eléctrico, contra una carga capacitiva que hace las veces de una batería.
- Se detectan dos escenarios de oportunidad para mayor rentabilidad: **diseño de producto** (lámina de captura para energía de baja intensidad), y auscultación permanente de carreteras (ligado también al concepto de Smart city), mediante la **integración de sensores** autónomos wire-less alimentados a través de transductores piezoelectricos. En ambos modelos, se necesita un socio para acortar tiempos de puesta en mercado. Ambos escenarios supondrán un avance en la innovación en carreteras.

*Editado en Madrid,
27 de noviembre de 2014*