

# Captación de energía en la carretera mediante transductores piezoeléctricos

**Antonio Pérez Lepe**, aperezlepe@repsol.com  
Centro de Tecnología Repsol

**Silvia Hernández Rueda**  
Centro de Tecnología Repsol

**María Ángeles Izquierdo Rodríguez**  
Centro de Tecnología Repsol

**José Francisco Fernández Lozano**, jfernandez@icv.csic.es  
CSIC Instituto de Cerámica y Vidrio

**Alberto Moure Arroyo**, alberto.moure@icv.csic.es  
CSIC Instituto de Cerámica y Vidrio

**María Pilar Ochoa Pérez**, pilar.ochoa@upm.es  
Universidad Politécnica de Madrid

**Domingo Urquiza Cuadros**, durquiza@ceis.es  
Centro de Ensayos, Innovación y Servicios (CEIS)

El diseño de las carreteras se centra fundamentalmente en la función de soporte a los vehículos (necesidades mecánicas) y las funciones de seguridad y confort. En las últimas décadas, otras funcionalidades y propiedades, una vez superadas las anteriores, han cobrado importancia: disminución de la huella ambiental en todo el ciclo de vida, rodaduras especiales, eliminación de gases nocivos (NO<sub>x</sub>), captación de energía... Es esta última línea la que explora el presente trabajo, donde se presentan los resultados más relevantes del proyecto REC (Roads as energetic roads), el cual intenta cambiar el concepto de infraestructura de transporte hacia el concepto de infraestructura activa e inteligente. El reto acometido es el de captar energía mecánica vibracional mediante la incorporación de elementos piezoeléctricos bajo la rodadura de la carretera. El trabajo concluye con que la tecnología de almacenamiento de energía a partir de pulsos generados por el tránsito de vehículos es viable y competitiva.

**Palabras clave:** energía, inteligente, piezoeléctricos, carretera

The design of a highway is mainly focused on the structural or mechanical needs to sustain traffic as well as safety and comfort issues. Over the past few decades, other properties and functionalities have called the attention for many research groups: low-CO<sub>2</sub> footprint, special surfacing and wearing courses, NO<sub>x</sub> reduction, energy harvesting... The latter line is explored in the present work, where the main results of project REC (Roads as energetic crops) are delivered. The project tries to shift a surface transport infrastructure towards the concept of active and intelligent infrastructure. The challenge is to harvest vibrational mechanical energy through piezoelectric elements under the surface of the road. The main conclusion is that the technology for the storage of energy upon the generation of single pulses under vehicle traffic is viable and competitive.

**Keywords:** energy, intelligent, piezoelectric, highway

## 1. Introducción

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. Una referencia clara de estos esfuerzos en I+D fue el proyecto cénit "Fénix", en España, y otros proyectos en Europa, EEUU o Latinoamérica.

El objetivo a largo plazo del presente artículo es 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. El proyecto REC "Roads as energetic crops" se enmarca 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. Pero, ¿de qué energía puede disponerse en la carretera y para qué usos sería conveniente?

- 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,...

## Piezolectricidad 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 materiales piezoeléctricos (Curie y Lippmann, 1880-81), los cuales recogerían la energía transmitida por el vehículo al firme y la transformarían en corriente eléctrica (o diferencia de potencial eléctrico).

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. Este fenómeno se conoce como efecto directo (Lippmann, 1881) 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 (Curie, 1880) es ampliamente utilizado en actuadores piezoeléctricos para dispositivos electrónicos.

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. 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. Sin embargo, los mate-

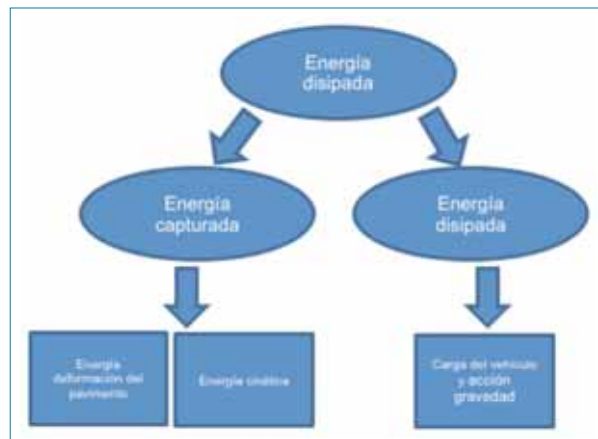


Figura 1: Figura 1. Disipación de energía potencial desde el vehículo.

riales cerámicos piezoeléctricos tienen varias limitaciones, entre ellas: su baja estabilidad mecánica al ser sometidos a tensiones mecánicas; la pérdida de eficiencia por altas pérdidas dieléctricas y procesos de despolarización; la mejor respuesta (mayor entrega de energía) se produce en unos rangos de frecuencias de excitación concretos; y la última pero no menos importante, se trata de compuesto con un contenido mayoritario en plomo, >65% en peso. Sin embargo, los materiales cerámicos piezoeléctricos presentan enormes ventajas como son: su producción a bajo coste en diferentes formas; su facilidad de ajuste de las propiedades mediante modificaciones de la composición de los mismos. El proyecto REC aborda el desarrollo de materiales cerámicos piezoeléctricos encapsulados en estructuras metálicas que permiten soslayar algunas de las limitaciones antes mencionadas y su validación como elementos para el aprovechamiento de la energía vibracional en la carretera.

## 2. Resultados

### 2.1 Diseño de los transductores embebidos

En la propuesta de proyecto se fijó como prioritario situar bajo la rodadura un transductor piezoeléctrico tal que no dañara la propia infraestructura, entendiendo como transductor cualquier elemento capaz de transformar la energía desde una forma (mecánica) a otra (eléctrica). Así se valoraron 2 alternativas para dichos transductores: discos y fibras piezoeléctricas. De estas dos se selecciona la opción de discos ya

## Captación de energía en la carretera mediante transductores piezoeléctricos

que maximiza la conversión de presión a electricidad presentando 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.

La mejor respuesta piezoeléctrica (mayor entrega de energía) se produce en un rango de frecuencias concreto, el llamado 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. 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 solitud 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.

El material piezoeléctrico seleccionado para el prototipo es un disco cerámico comercial (de circonato-titanato de plomo (PZT). La temperatura de Curie, definida como la tempe-

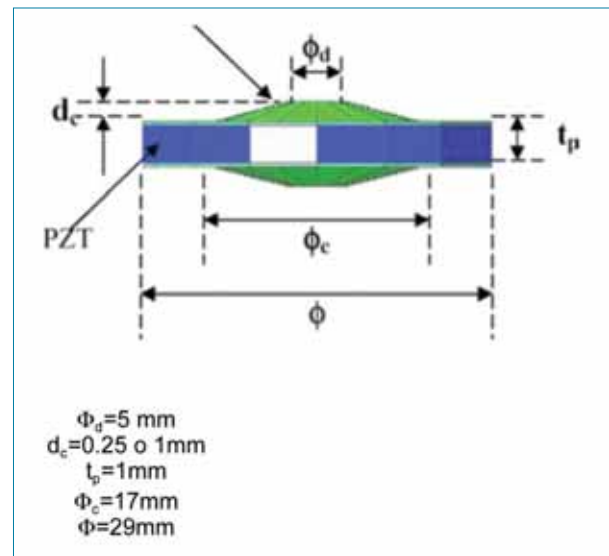


Figura 2. Esquema y dimensiones de los címbalos preparados.

ratura 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 procesado 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 diseño de los címbalos se realizó con base en el análisis de la respuesta estructural del sistema címbalo-disco piezoeléctrico mediante aproximación mediante elementos finitos. 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 (dc), según el esquema que recoge la Figura 2.

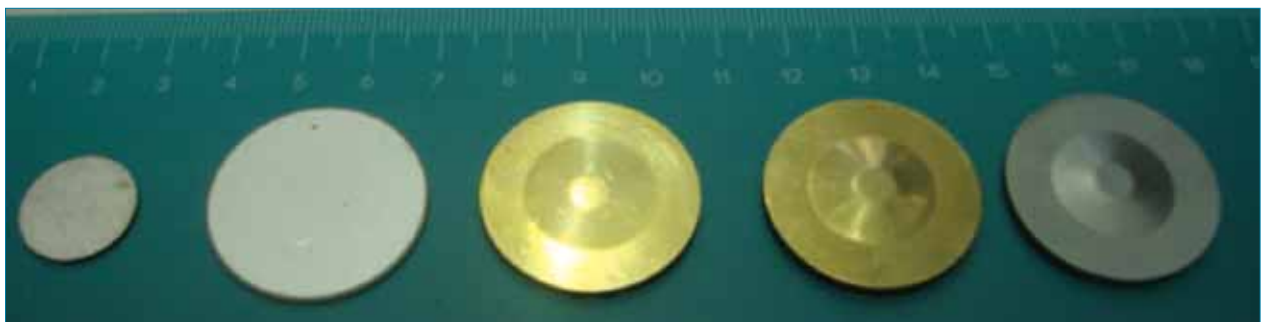


Figura 3. Vista de los diferentes discos y címbalos ensayados en el prototipo Wheel Track.

## 2.1 Diseño del equipo de ensayo 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 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.

## 2.3 Diseño de capas asfálticas para acoger los discos

1. Diseñar un mástico bituminoso (host layer) que contenga el disco piezoeléctrico en su interior.
2. Diseñar la capa que se sitúa bajo la rueda y la capa de rodadura sobre la capa host.

### 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. 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 de cobre con el osciloscopio para las medidas de voltaje. 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. 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.

### 2. 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 (ver Tabla 1). El espesor seleccionado ha sido 4 cm.

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 silícea
- Capa cerrada con betún 70/100, arena caliza y silícea
- Capa abierta con betún 35/50, arena caliza y silícea

El mejor comportamiento lo ofrecen las capas cerradas. 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.

**Tabla 1. 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	2,0
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

# Captación de energía en la carretera mediante transductores piezoeléctricos

## 2.4 Diseño del circuitaje eléctrico/electrónico

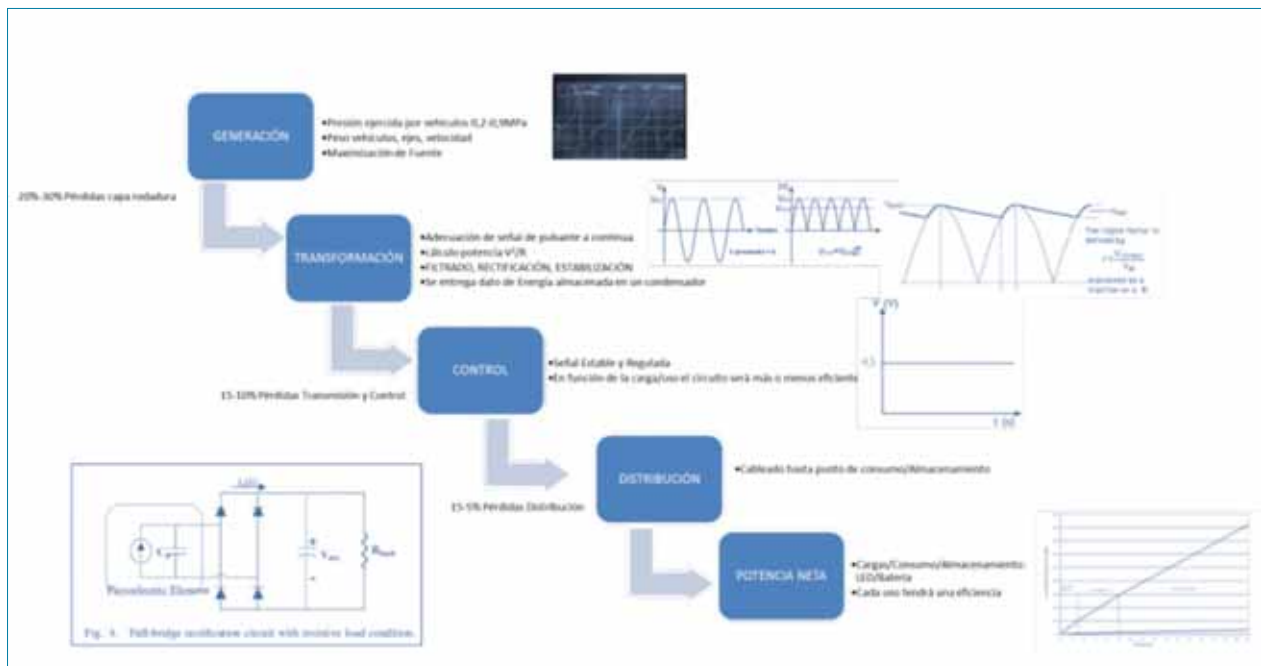
La etapa posterior a la obtención de energía pulsante consta de un circuito rectificador de onda completa con condensador de filtro a la entrada y un condensador de almacenamiento de energía a la salida. El circuito seleccionado conlleva por tanto las etapas de filtrado, de rectificación de señal mediante 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. La figura 4 es una infografía clave en el proyecto, y que podría ser extrapolable a muchos proyectos de captura de energía.

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

timaciones en condiciones de contorno reales que se han considerado en el presente trabajo. 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 W de potencia.

## 3. Discusión de resultados y estimaciones de energía generada

El valor conseguido en prototipo CTR es de 16 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 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).



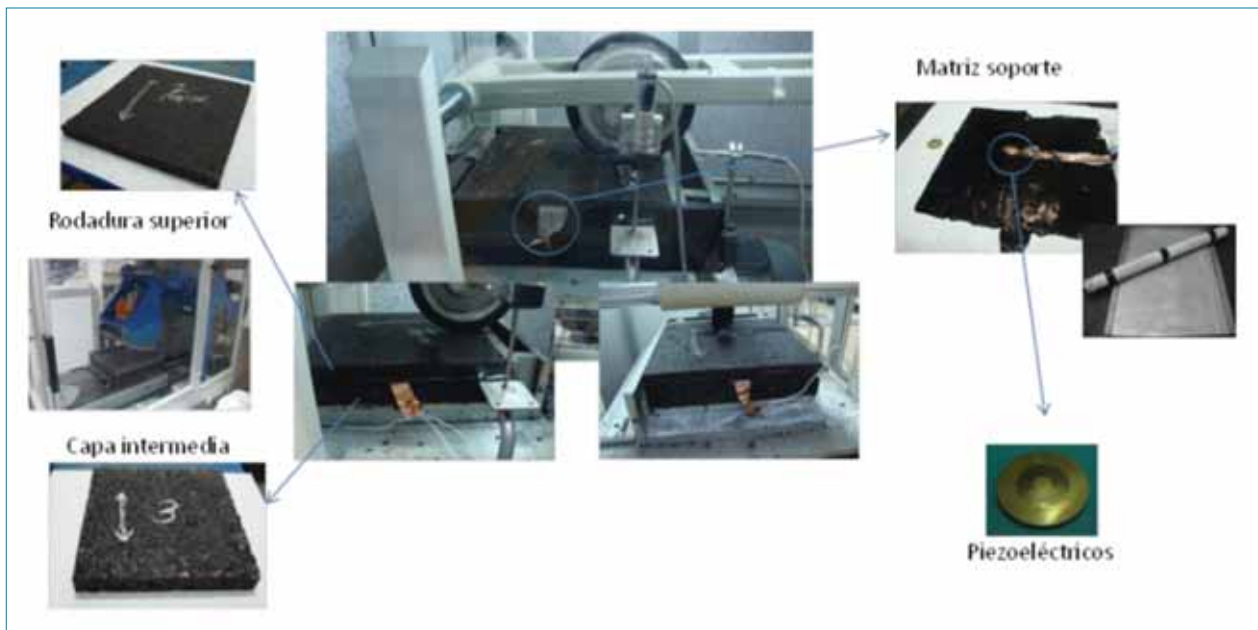


Figura 5. Visión completa del prototipo Wheel Track.

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 (Figura 5). 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.

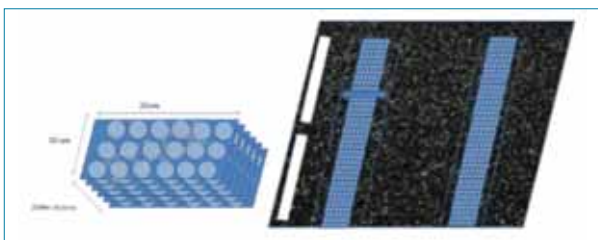


Figura 6. Visualización de agrupación de piezoeléctrico bajo la rodadura.

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 teniendo en cuenta que entre 5 y 6 años se suelen hacer trabajos de conservación de 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 19,4 €. Se obtiene así unos valores correspondientes a 5-6 años para rentabilizar (break even point) la inversión. Teniendo ahora en cuenta que los piezoeléctricos pueden durar en servicio unos 20 años y si logramos conservar su instalación a pesar de las opera-

# Captación de energía en la carretera mediante transductores piezoeléctricos

ciones de conservación, se obtienen unos valores de coste de la energía de 0,11 €/KWh, valores del todo competitivos.

## 4. 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: 1) diseño de producto: lámina de captura para energía de baja intensidad para múltiples escenarios en movilidad, 2) auscultación permanente de carreteras (ligado también al concepto de Smart city), mediante la integración de sensores autónomos wire-less alimentados a través de transductores piezoeléctricos. En ambos modelos, se necesita un socio para acortar tiempos de puesta en mercado. Ambos escenarios supondrán un avance en la innovación en carreteras.

## 5. Referencias

- Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. Hongdu ZHAO,<sup>3</sup> Jian YU\* and Jianming LING. Journal of the Ceramic Society of Japan 118 [10] 909-915 (2010).
- Effects of Electrically Conductive Additives on Laboratory-Measured Properties of Asphalt Mixtures. Baoshan Huang, Xingwei Chen, and Xiang Shu. J. Mater. Civ. Eng. 21, 612 (2009).
- Patente USRE43044. Electrically conductive pavement mixture.
- Advantages and limitations of cymbals for sensor and actuator applications. P. Ochoa, J.L. Pons, M. Villegas, J.F. Fernandez. Sensors and actuators 132 (2006).
- Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks. G. Park, C. R. Farrar, M. D. Todd, W. Hodgkiss, T. Rosing. Los Alamos National laboratory Report LA-14314-MS. February 2007.
- Research on the Electrical Energy of Piezoelectric-embedded Asphalt Mixture. Ning Tang, Changjun Sun, Shaoxu Huang, Pan Pan, Shaopeng Wu. Applied Mechanics and Materials Vols. 303-306 pp 26-31(2013).
- Banco de ensayos para materiales piezoeléctricos en aplicaciones viales. M. Vázquez Rodríguez, F. J. Jiménez Martínez J. de Frutos. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol 50, 2, 65-72, (2011).
- Recent Progress in Piezoelectric Conversion and Energy Harvesting Using Nonlinear Electronic Interfaces and Issues in Small Scale Implementation. Daniel Guyomar, Mickaël Lallart. Micromachines 2, 274-294 (2011).
- Nano-science and -technology for asphalt pavements. M.N. Partl, R. Gubler, M. Hugener. Journal of the AAPT 68, 284 (1999).
- The "cymbal" electromechanical actuator. Aydin Dogan, Jose F. Fernandez, Kenji Uchino, and Robert E. Newnham. IEEE 0-7803-3355-1/96 (1996).

#28

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Las mezclas semicalientes no difieren en su comportamiento de las convencionales” (Lecturas recomendadas: NCHRP 779, número 15)

#INGENIERÍA