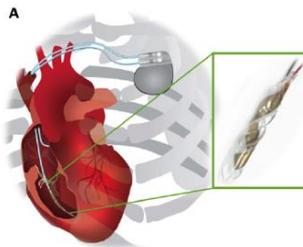


RECUPERACIÓN DE ENERGÍA POR TECNOLOGÍA PIEZOELÉCTRICA: UN HORIZONTE DE MÚLTIPLES ALTERNATIVAS

A. Moure

Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC, C/ Kelsen 5, Madrid
28049

alberto.moure@icv.csic.es




III Semana Iniciación a la Investigación Nebrja
 Aplicaciones de la tecnología piezoeléctrica
 Del 7 al 11 de junio de 2021
 Organiza: Universidad Nebrja - Santander de recuperación de energía en el transporte de superficie.
www.nebrja.com



Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV) es uno de los 130 centros pertenecientes al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Pertenece al Área de Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC.

Su función es llevar a cabo investigaciones en el campo de la Ciencia y la Tecnología de los Materiales Cerámicos y Vidrios

4 Departamentos:

- Cerámica
- Electrocerámica
- Químico-Física de Superficies y Procesos
- Vidrios

+ Unidades de Servicio de Asistencia Técnica a la Industria



Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV) es uno de los 130 centros pertenecientes al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Pertenece al Área de Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC.

Su función es llevar a cabo investigaciones en el campo de la Ciencia y la Tecnología de los Materiales Cerámicos y Vidrios

Líneas de investigación

- Materiales cerámicos y vidrios para la energía, el medio-ambiente y el transporte.
- Procesamiento avanzado de materiales y sistemas cerámicos con aplicación estructural y multifuncional.
- Cerámicas y Vidrios con impacto social e industrial.

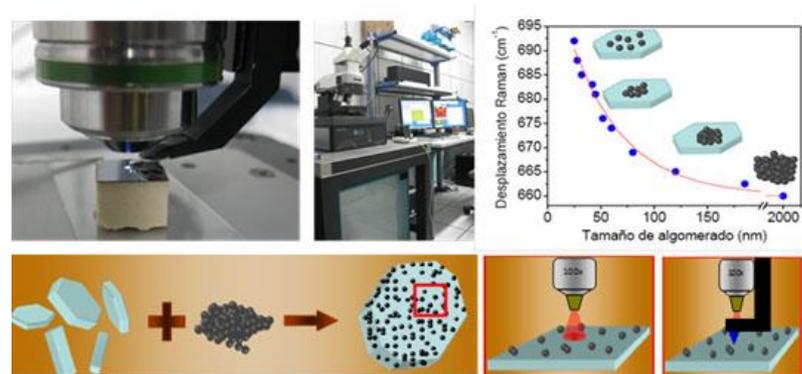


Grupo liderado por el Profesor José Francisco Fernández Lozano

- 3 científicos en plantilla
- 8 investigadores postdoctorales
- 5 investigadores predoctorales
- Ciencia básica y alta implantación industrial
- Producción científica 5 años:
 - 34 proyectos nacionales, europeos o industriales (>3.1 M€)
 - 177 publicaciones
 - 9 patentes (3 licenciadas)

Diseño Seguro de cerámicas y nanocomposites micro- nanoestructurados

- Estabilidad de nanopartículas durante el ciclo de vida
- Nuevas funcionalidades
 - Bactericidas basados en ZnO embebidos en estructuras vitrocerámicas
 - Filtros UV inorgánicos basado en semiconductores como TiO_2 , ZnO or SiO_2 en nanoestructuras seguras. Aplicaciones en cosméticos y composites plásticos
 - Catalíticos: nanoestructuras soportadas en soportes micrométricos para aplicaciones catalíticas heterogéneas

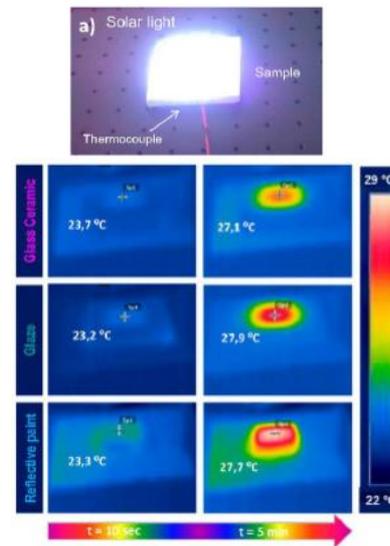
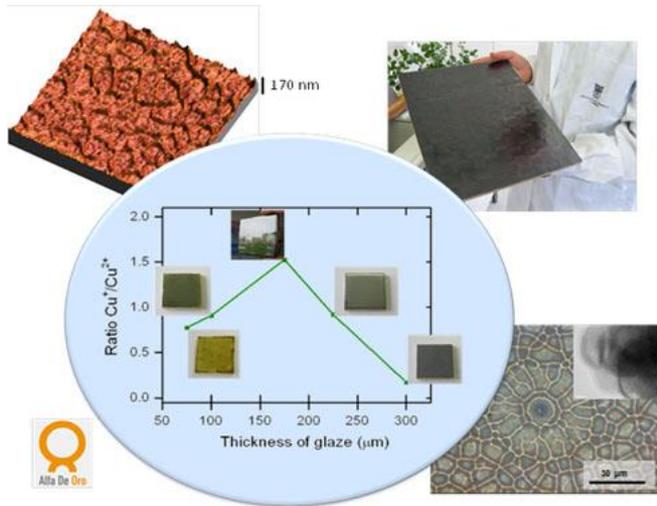


Marcadores de seguridad

- Uso de nano y micropartículas con señal electromagnética relevante y característica que pueda usarse en documentos de seguridad, textiles, etc. para autenticación y evitar falsificaciones

Procesos avanzados de cerámicas tradicionales

- Escalado de preparación de materiales nanoestructurados e introducción en la producción industrial de cerámicas tradicionales
- Aplicaciones:
 - Nuevas funcionalidades: superficies hidrófobas o esmaltes confortables



Premios Alfa de Oro

- Uso de materias primas alternativas
- Reciclado de productos de demolición

- Aditivos en envases alimentarios.
 - Desarrollo de un material vitrocerámico añadido a plástico de envases: eliminación de listeria > 99.9%

Patente licenciada por empresa Encapsulae S. L.

Aditivo tecnológico para envases alimentarios: control de *Listeria monocytogenes* en productos cárnicos

José F. Fernández, Alberto Moure,
Julian J. Reinoso¹ y Javier Menéndez²

¹ Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC,
C/ Kelsen, 6
28040 Madrid
² Encapsulae S.L.,
C/ Lituania, 10, nave 2
13006 Castellón

Mayo 2020

44 eurocarne nº 286



49 Seguridad Alimentaria, Conservación Aditivo para envases alimentarios que mata la LISTERIA

Basado en un humectante recogido en la lista de aditivos alimentarios, es capaz de reducir de forma drástica la población de esta bacteria

José F. Fernández, José J. Reinoso, Alberto Moure
Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC
Javier Menéndez
Encapsulae S.L.

trata de una infección muy grave debida a la bacteria *Listeria monocytogenes*. A pesar de que presentan una baja morbilidad (se dan pocos

ALTO IMPACTO DE ESTA PATENTE EN MEDIOS

MENÚ LA RAZON

EN DIRECTO: Andalucía suma dos nuevos brotes y no descarta declarar confinamientos

SALUD

Crean un aditivo para destruir la listeriosis en los envases

La población de bacterias se reduce en 24 horas de 100.000 de colonias a cero

COPE

Busca en COPE

El tema del día

Una gran iniciativa para prevenir la listeriosis

Una gran iniciativa para prevenir la listeriosis
0:02 / 7:01

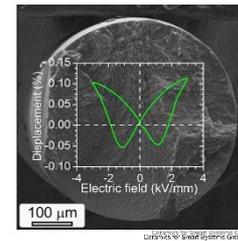
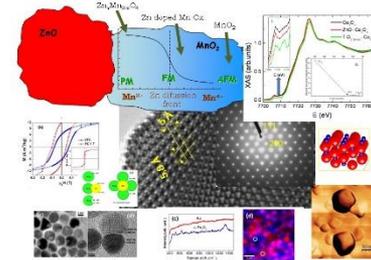
COPE.es



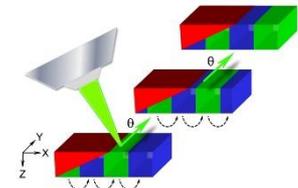
<https://www.rtve.es/noticias/20191106/crean-primer-aditivo-para-envases-alimentarios-elimina-listeria/1988451.shtml>

Nuevos materiales y funcionalidades

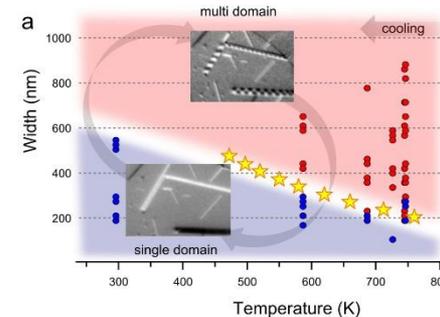
- Nanoestructuras y estructuras de baja dimensionalidad
- Piezocerámicas libres de plomo
 - Preparación de estructuras de composición (K, Na) NbO₃-modificado libres de plomo como sustitutos de PZT
 - Movimiento de paredes de dominio por luz



LIGHT-MATTER COUPLING
Domain motion by light



- Materiales magnéticos nanoestructurados
 - Imanes permanentes basado en nanocomposites sin tierras raras
 - Control y diseño de propiedades magnéticas en ausencia de campos magnéticos por deformaciones.



- Estudio de intercaras en diodos comerciales de alternadores de automóviles



- Recuperación de energía por elementos piezoeléctricos





Ciudad inteligente: usar la tecnología para promover de manera eficiente un desarrollo sostenible que mejore la vida de los ciudadanos

Clave: sistemas intercomunicados que permitan (IoT):

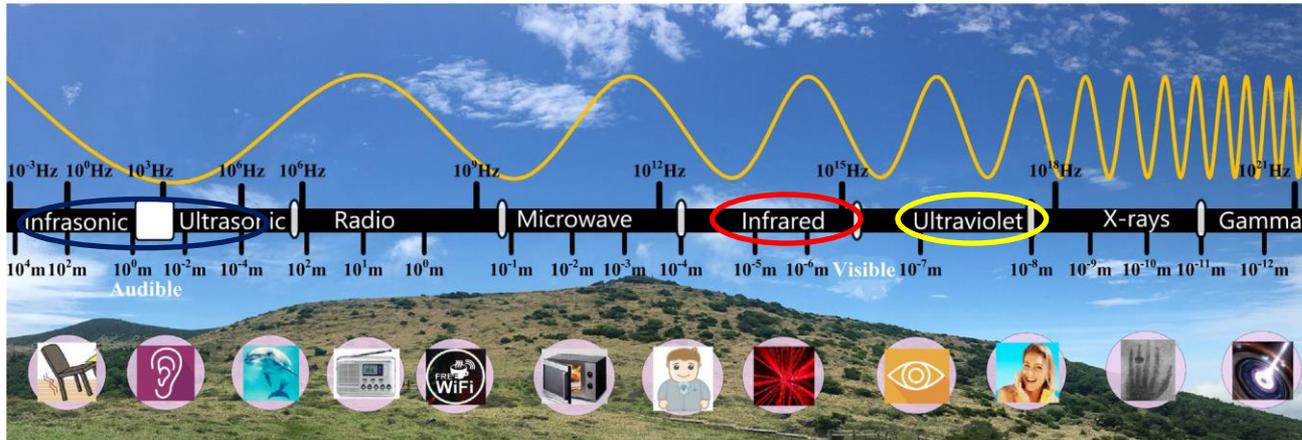
- Mejora del medio ambiente
- Optimizar los servicios públicos y los recursos naturales
- Mejora de las comunicaciones con los ciudadanos

Necesidades energéticas más allá de combustibles fósiles: cuestiones medioambientales y de eficiencia



Alternativa: recuperar energía de usar fuentes de “pequeña escala” ambientales: microondas, vibracionales, térmicas, etc.

Fuentes de energía como radiaciones electromagnéticas: distintas respuestas en frecuencias determinan la forma de recuperar la energía y la capacidad de recuperación



T. Tan, et al. *Applied Energy* 254 (2019) 113717

Energía solar: materiales fotovoltaicos

Energía térmica: materiales termoeléctricos

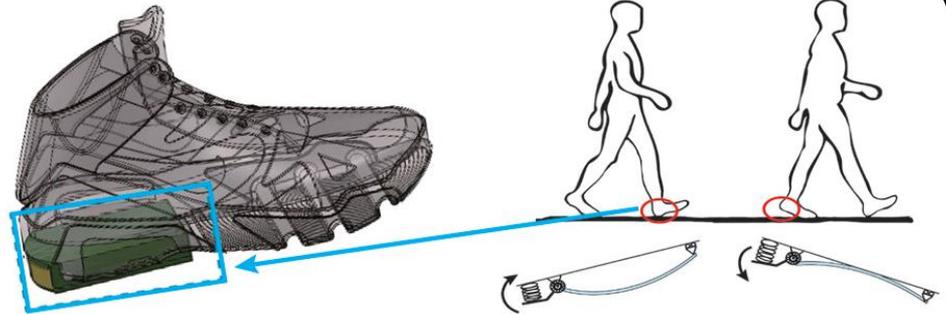
Energía acústica y vibraciones: materiales piezoeléctricos

Ventajas de los generadores piezoeléctricos: alta eficiencia a escalas pequeñas, alta densidad de potencia, amplio rango de frecuencias en aplicación, ausencia de piezas móviles

Fuentes ambientales de energía mecánica y vibracional



Ambiental: olas marítimas, viento, lluvia, energía sísmica,...



Humano: al andar, movimientos en articulaciones, mandíbula, etc.

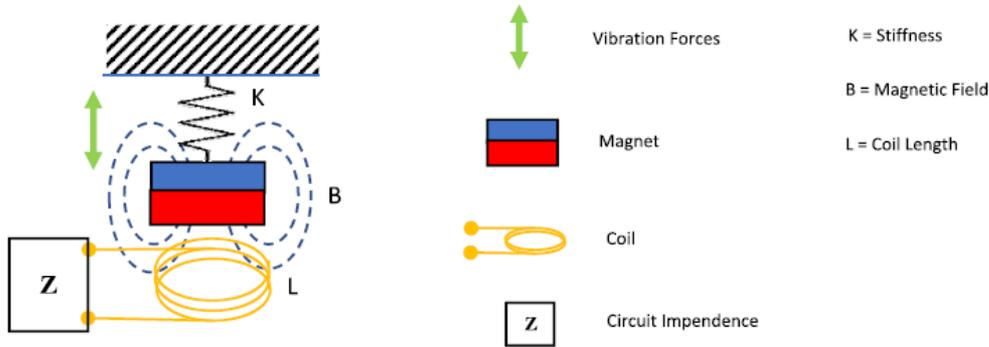


Máquinas: motores, neumáticos, amortiguadores

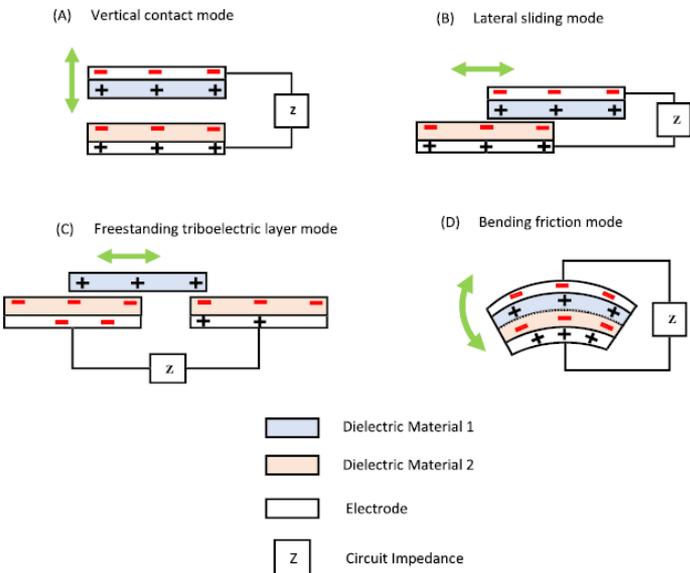


Infraestructuras: puentes, carreteras, vías de tren, etc,

Diferentes aproximaciones a la transformación de energía mecánica y vibracional a energía eléctrica: dispositivos electromagnéticos, electrostáticos, magnetorestrictivos y piezoeléctricos



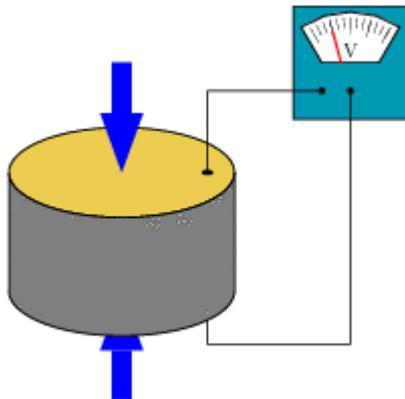
Electromagnético: energía mecánica produce un movimiento relativo de una parte magnetizada y un elemento conductivo.



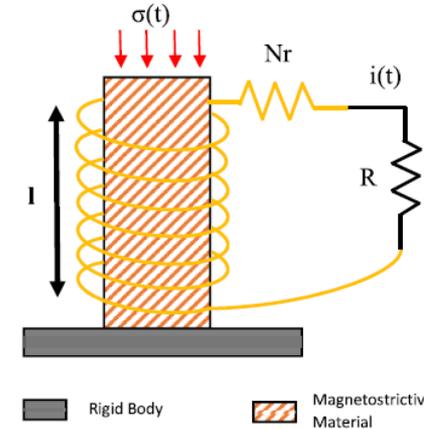
Electrostático o triboeléctrico: cuando la energía vibracional separa o deforma las superficies cargadas de dos materiales diferentes: la variación de potencial produce un movimiento de cargas libres (corriente)

Materiales magnetostrictivos como la aleación Fe-Ga se deforman al inducir un campo magnético y viceversa, la aplicación de compresión cambia el flujo magnético

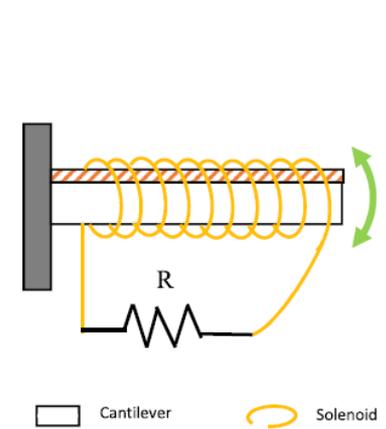
Materiales Piezoeléctricos



(A) Compression Magnetostrictive Model



(B) Bending Magnetostrictive Model



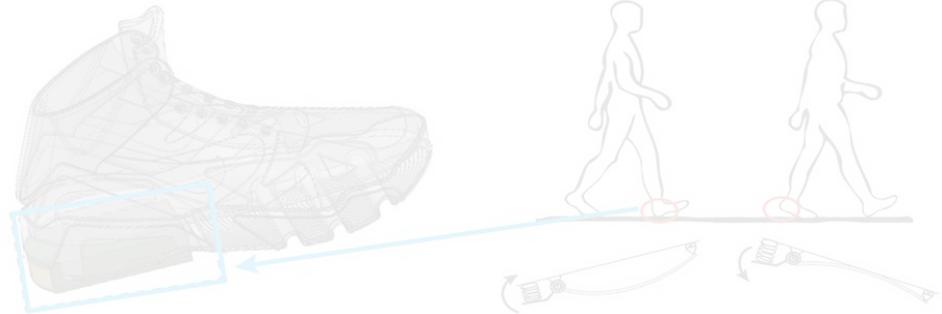
Ventajas: compactos, sin partes *móviles*, mayor facilidad para optimizar tamaño y peso

¿Aplicaciones?

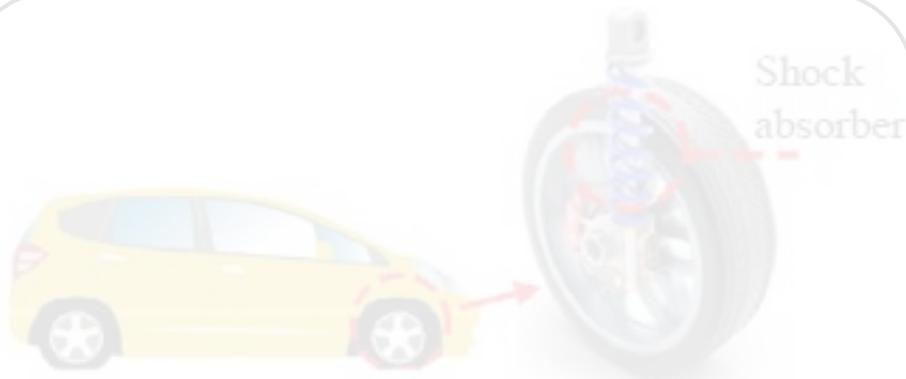
Fuentes ambientales de energía mecánica y vibracional



Ambiental: olas marítimas, viento, lluvia, energía sísmica,...



Humano: al andar, movimientos en articulaciones, mandíbula, etc.



Máquinas: motores, neumáticos, amortiguadores



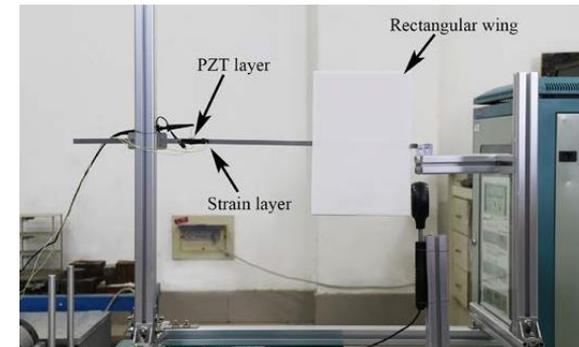
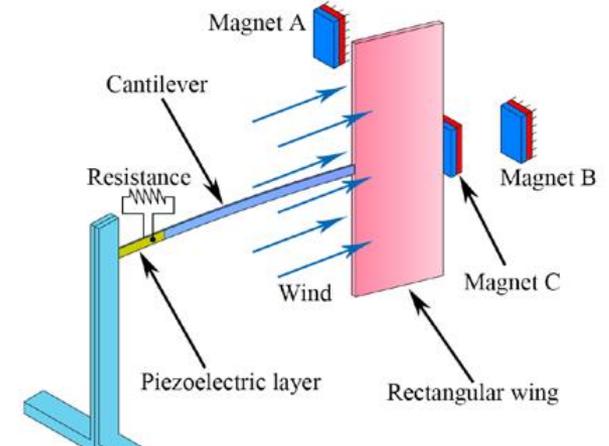
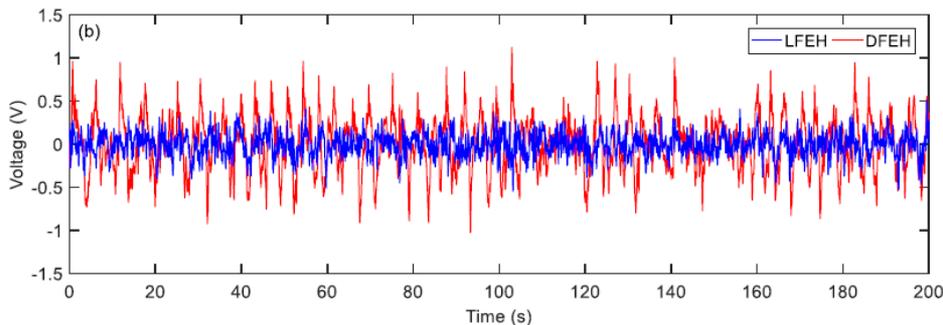
Infraestructuras: puentes, carreteras, vías, de tren, etc,

GENERADO POR VIENTO

Vela deformando un cantilever

- Amplio rango de velocidad del viento
- Ajuste de resonancia por la rigidez de la vela y la longitud

Señal de salida



Rangos de recuperación:

- Picos de potencia:

- 1-5 mW/cm³ a 5-9 m/s 60 mm de vela

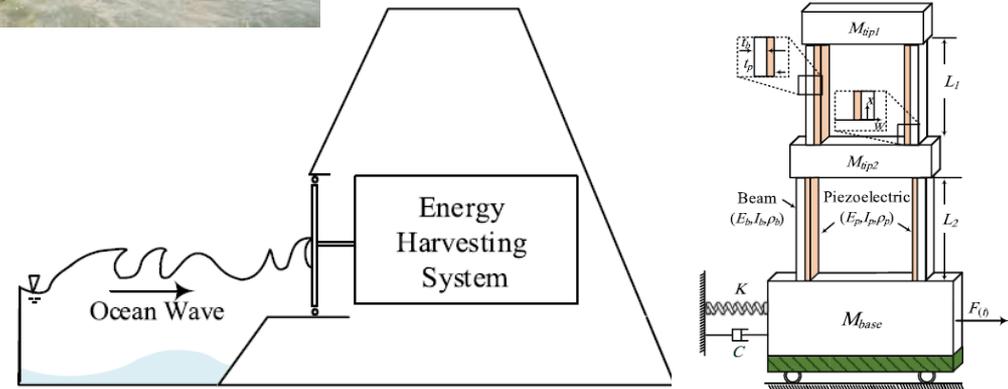
- 0.1- 0.4 mW/cm³ a 2.5-4.5 m/s 100 mm de vela

OLAS MARÍTIMAS

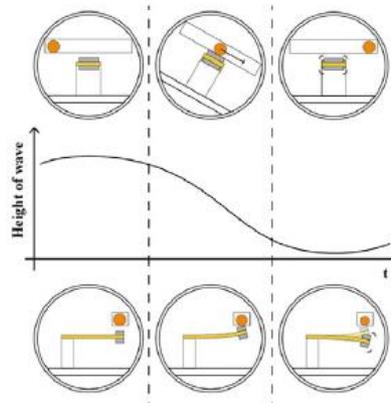
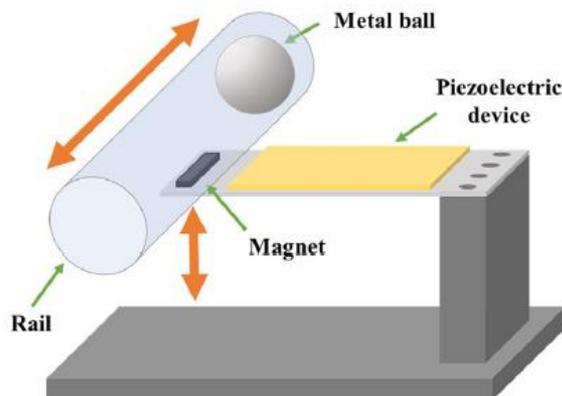
70% superficie ocupada por mares
885 TWh energía eléctrica anual



- Recuperación al romper la ola



- Recuperación en el movimiento ondulante



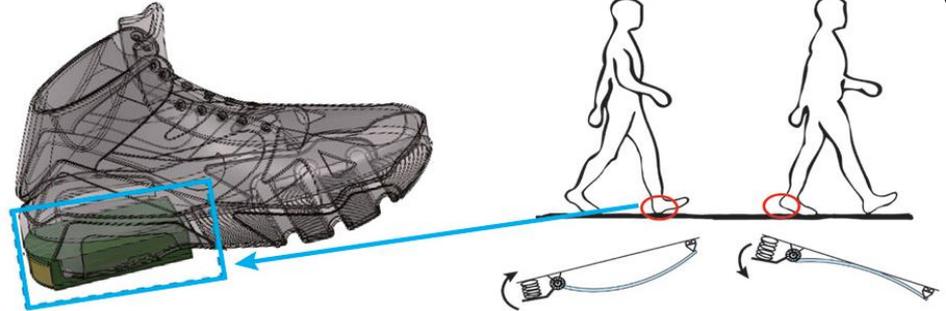
Potencia máxima: $68.9 \mu\text{W}$ en $95 \text{ k}\Omega$

En boyas, barcos, etc.

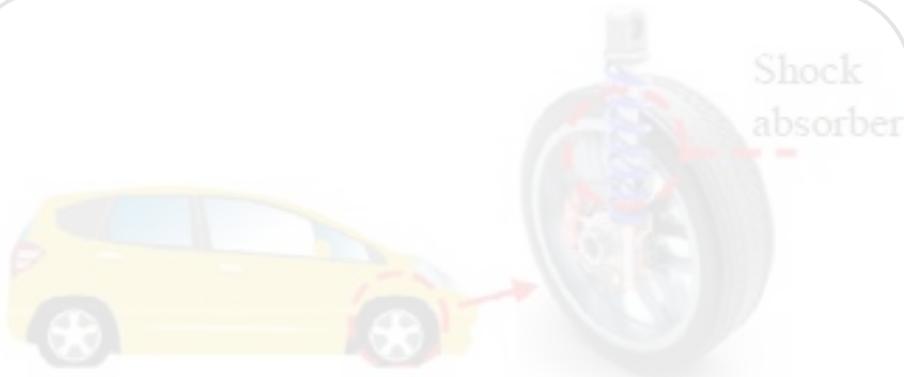
Fuentes ambientales de energía mecánica y vibracional



Ambiental: olas marítimas, viento, lluvia, energía sísmica,...



Humano: al andar, movimientos en articulaciones, mandíbula, etc.



Máquinas: motores, neumáticos, amortiguadores



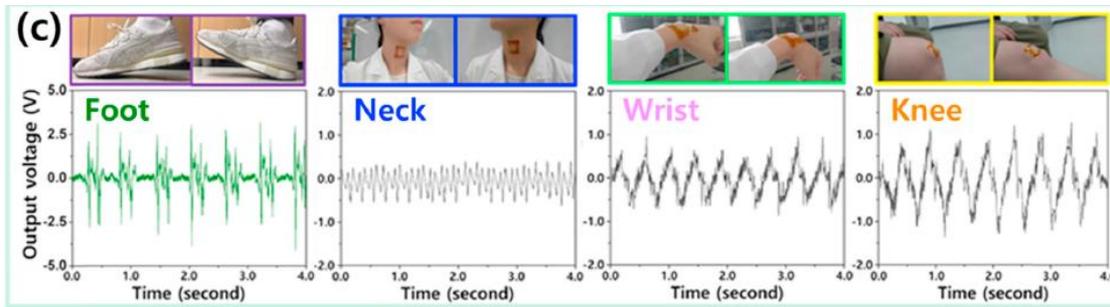
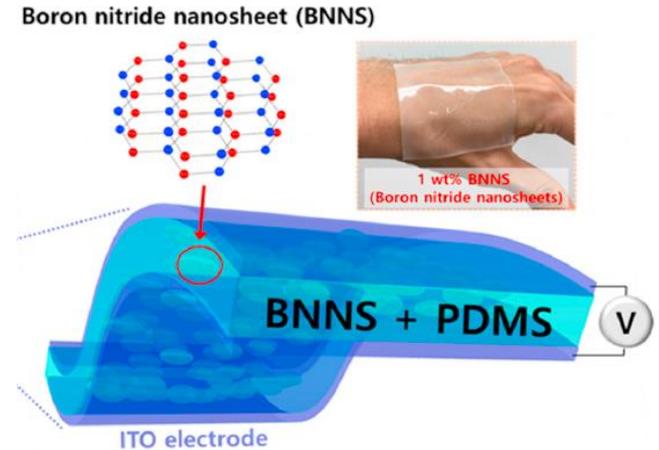
Infraestructuras: puentes, carreteras, vías de tren, etc,

MOVIMIENTOS DEL CUERPO

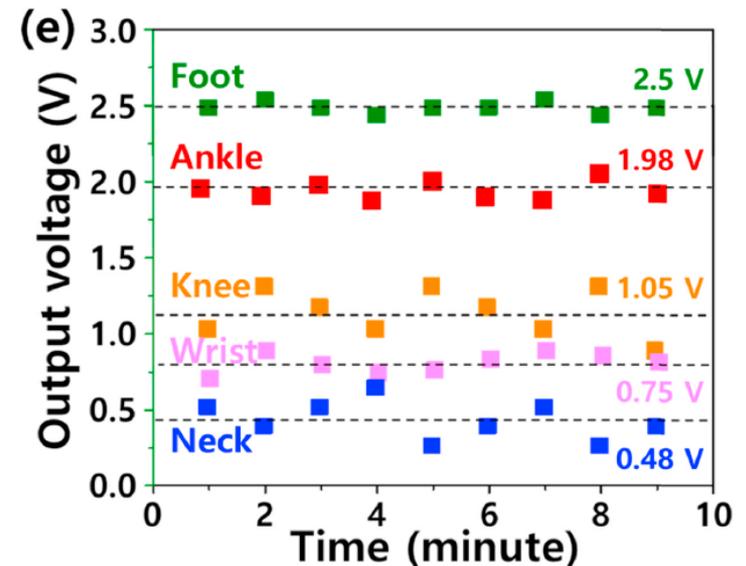
Dispositivos autónomos: sensores o pequeños dispositivos inalámbricos

Composite nanocapas de nitruro de boro (2D) con un polímero

Adaptado a distintas partes del cuerpo:



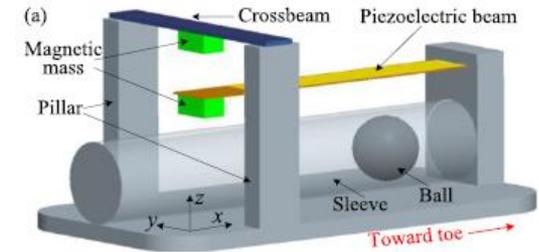
Pie: 2.5 V
Codo: 1.98 V
Cuello: 0.48 V
Muñeca: 0.75 V
Rodilla: 1.05 V



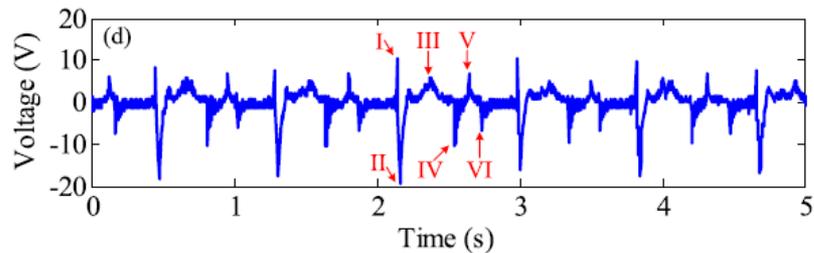
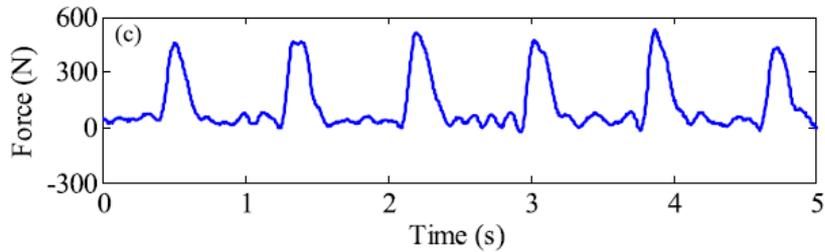
MOVIMIENTOS DEL CUERPO: PASOS

Al caminar: por golpeo con el suelo o por el fuerza compresiva del peso del cuerpo en un dispositivo en el zapato

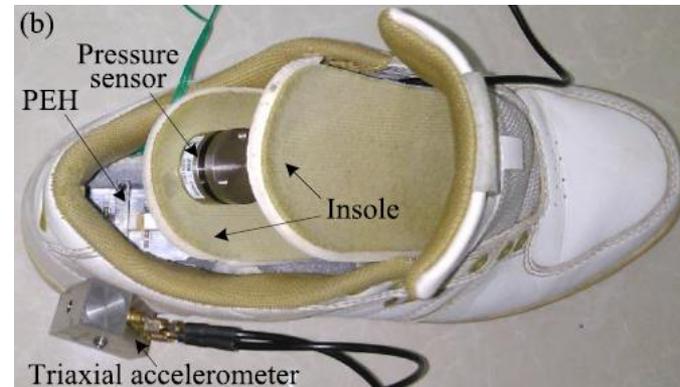
Sistema cantilever con bola magnética



Recuperación



Voltajes pico de casi 20V!



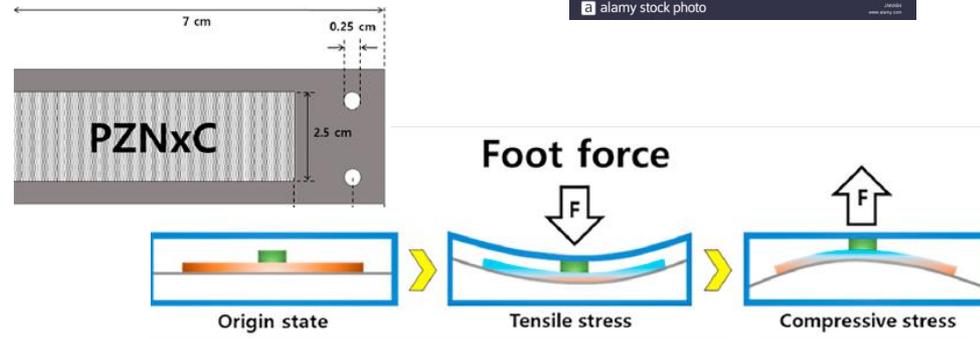
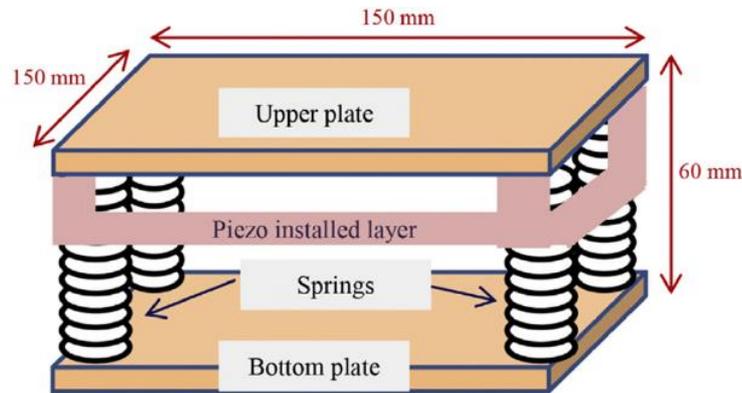
Desarrollo: simplificar el dispositivo, acumulador de energía...

Aplicaciones en elementos en hogares

Ejemplo: baldosa generadora de energía transmisión de información de forma inalámbrica o como acumulación de energía



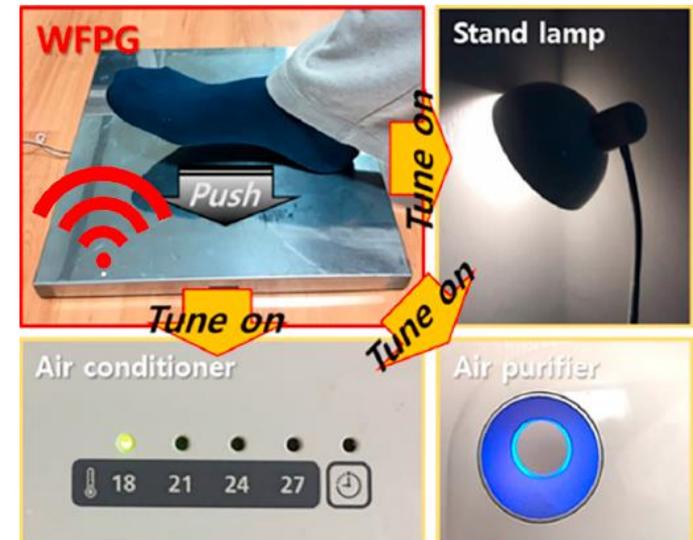
Elemento piezoeléctrico



Señales de salida: 42 V, 52 μ A

Paso de persona de 50–80 kg es capaz de transmitir señal inalámbrica

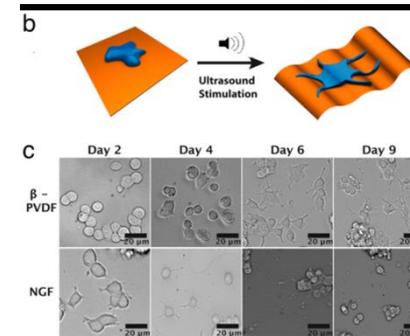
¿Sistema de acumulación de energía por baterías?



APLICACIONES BIOMÉDICAS

Implantes médicos para el diagnóstico o tratamientos:

- marcapasos,
- desfibriladores,
- estimuladores para crecimiento óseo o neuronal
- liberadores de medicamentos-



Problema: durabilidad de las baterías que hacen necesarias intervenciones quirúrgicas
Solución: sistemas autogeneradores

Imprescindible piezoeléctricos biocompatibles: Proteins, Peptides, biopolímeros biocompatibles como el PVDF

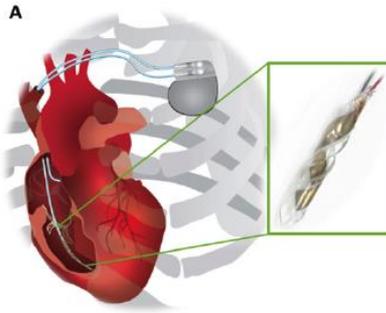
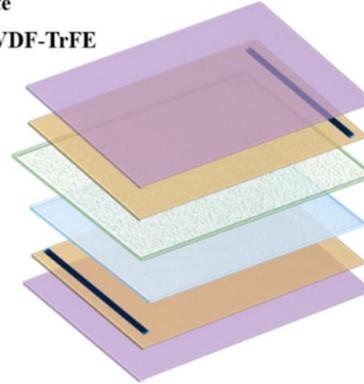
The poly(vinylidene fluoride) (PVDF)

A partir del movimiento del corazón

Estructura helicoidal bioinspirada con capa piezoeléctrica PVDF que transforma los movimientos del corazón en señal eléctrica

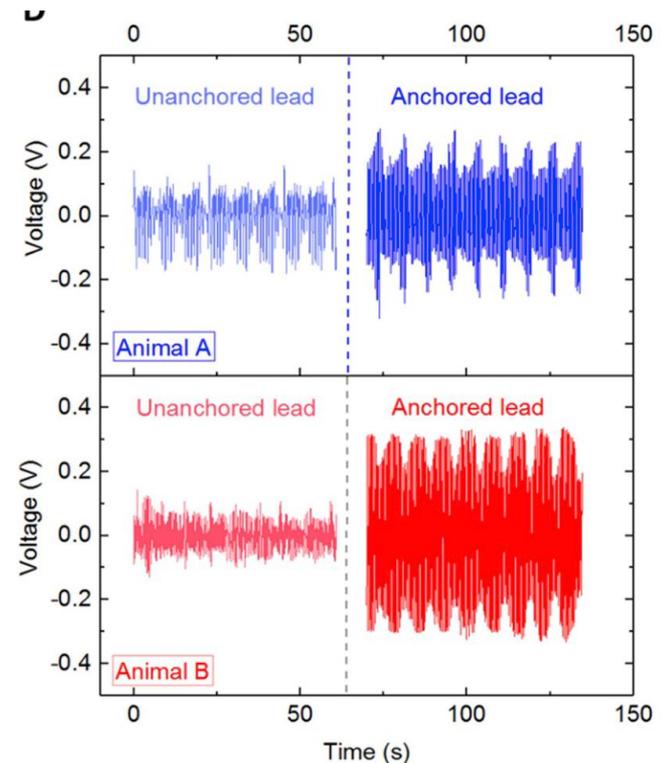


-  Porous PVDF-TrFE
-  Graphite
-  Solid PVDF-TrFE
-  Au
-  PDMS



Integrado con un marcapasos:
sensor o acumulador de energía

Prueba en corazón de cerdo

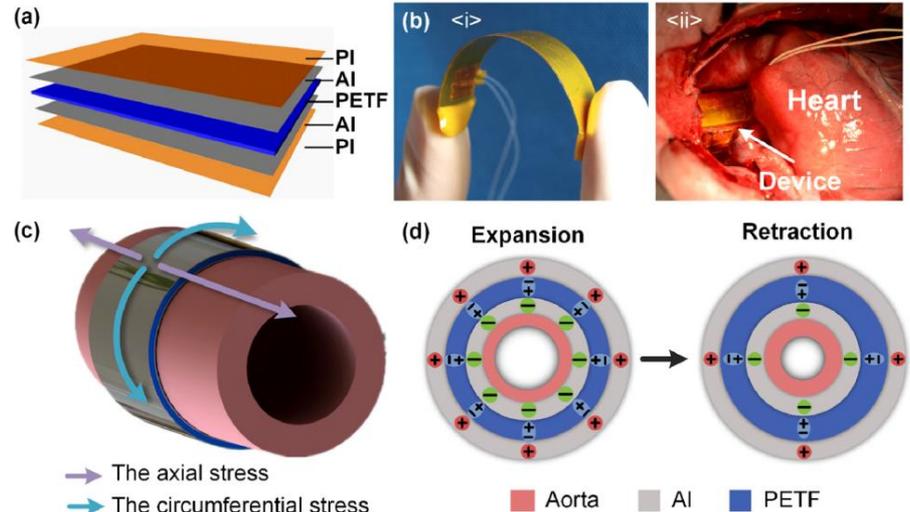
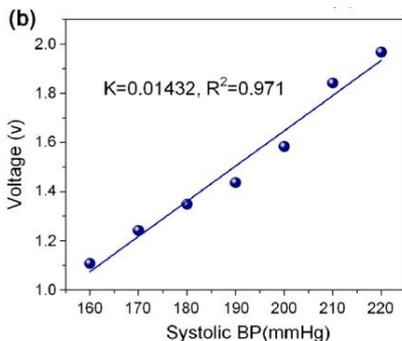
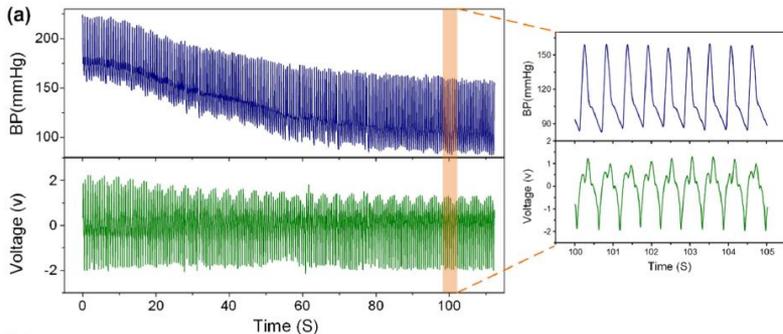


CONTROL DE LA PRESIÓN ARTERIAL

Hipertensión: responsable de diversas patologías como problemas cerebrovasculares, arteroesclerosis, daños de retina o renales o problemas cardiacos

Implantación de sensores: diagnóstico y eficacia del tratamiento con medicamentos
Sistemas autoalimentados eléctricamente

Piezoeléctrico basado en una lámina delgada de PVDF

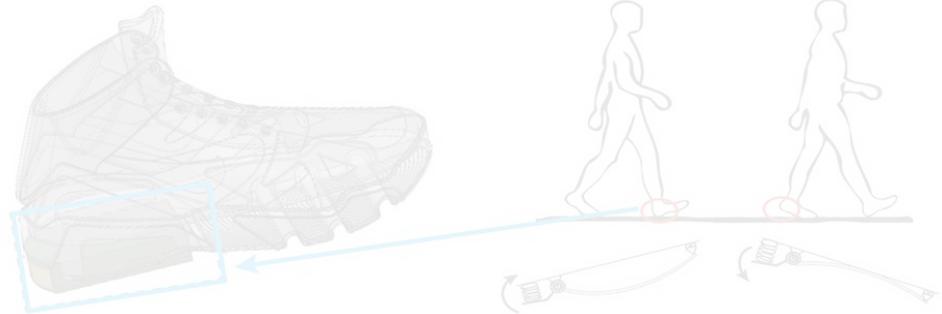


Calibración: permite establecer la presión en cada momento a partir del voltaje proporcionado por el piezoeléctrico

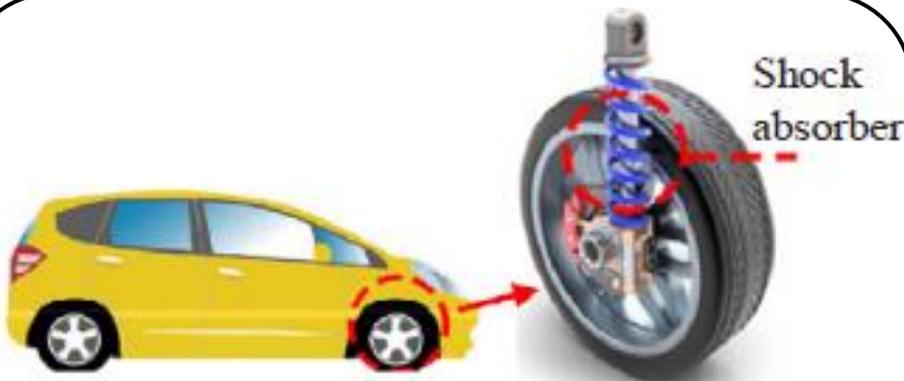
Fuentes ambientales de energía mecánica y vibracional



Ambiental: olas marítimas, viento, lluvia, energía sísmica,...



Humano: al andar, movimientos en articulaciones, mandíbula, etc.



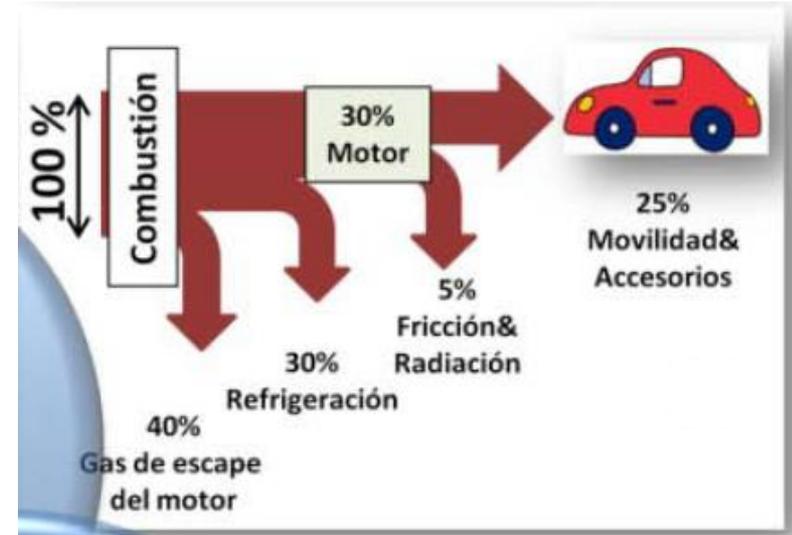
Máquinas: motores, neumáticos, amortiguadores



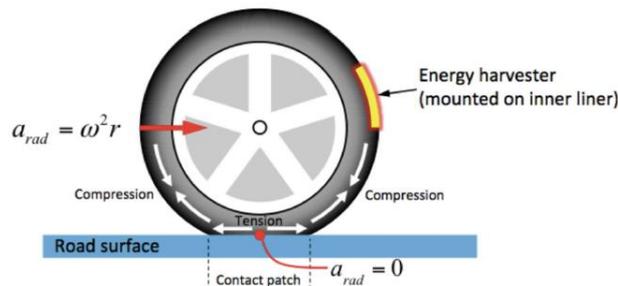
Infraestructuras: puentes, carreteras, vías de tren, etc,

Mayoría de la energía de un coche de combustión se pierde en forma térmica o mecánica

- Térmica: elementos termoelectricos.
- Mecánica: elementos piezoelectricos en diversas partes del vehículo, como los neumáticos, motor o suspensiones

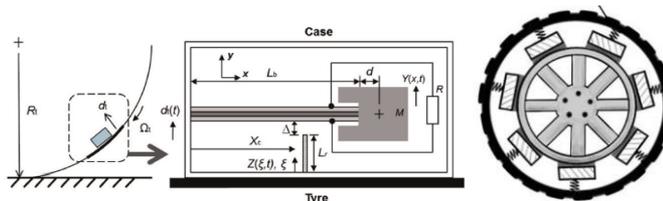


NEUMÁTICOS



Recuperación por impacto o deformación

Diversas soluciones tipo cantiléver o arrays



Retos:

- Frecuencia de giro variable: dificultad para trabajar en resonancia
- Limitación de espacio para los dispositivos
- Baja señal de salida

Recuperación o sensorización

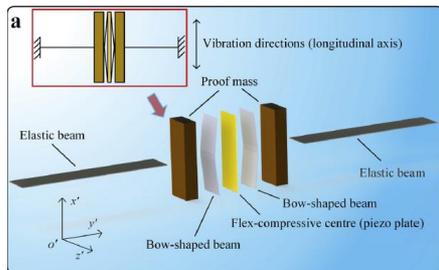
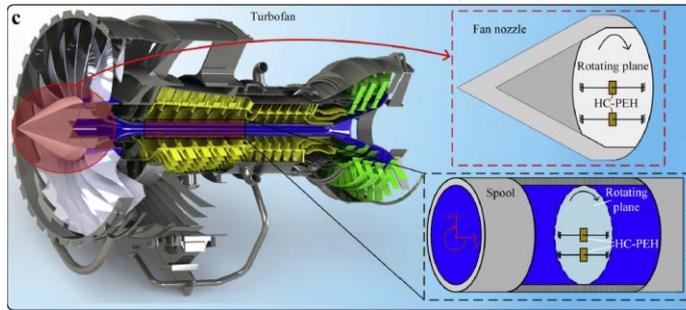
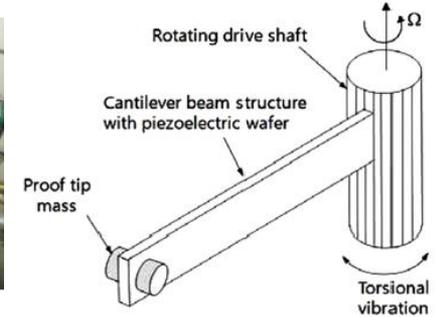
MOTOR

Recuperación de energía mecánica por torsión

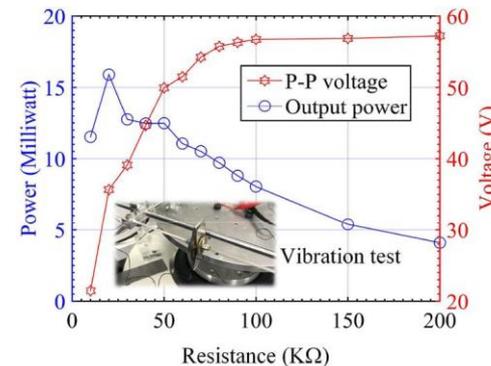
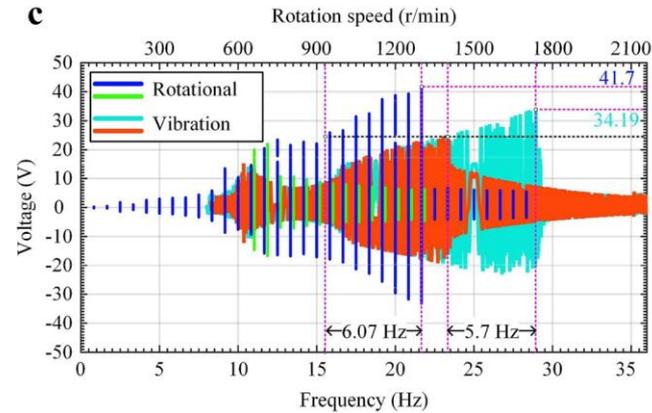
Motor de coche

Turbina de avión

Cantilever: esquema básico



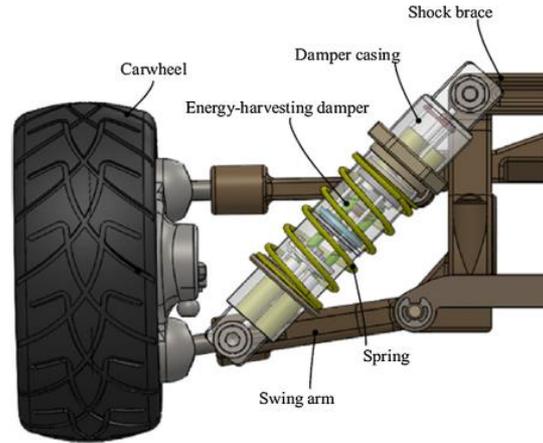
Cantilever + címbalo:
Recuperación energía vibracional y torsional



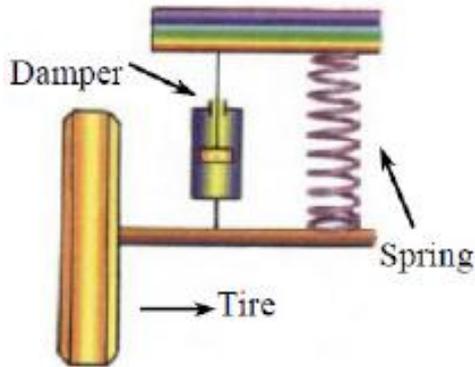
¿Temperaturas?

SUSPENSIÓN

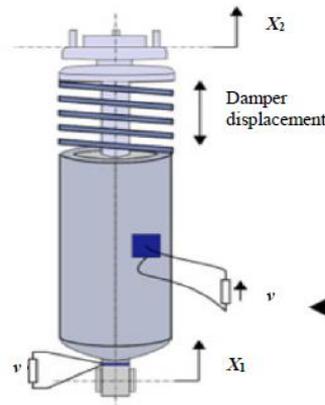
Absorción de la vibración



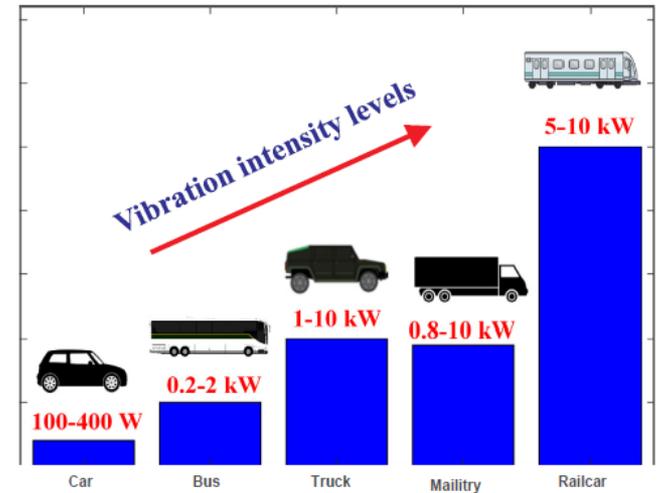
Configuraciones



Cantiléver



Elemento piezoeléctrico trabajando en compresión/extensión



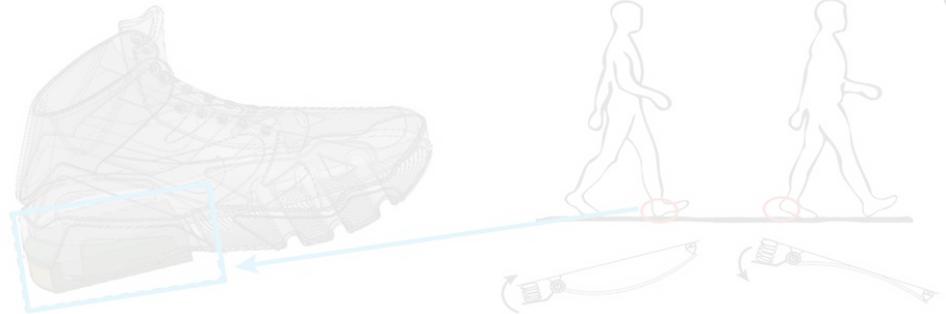
Potencialmente: altas energías de recuperación

Recuperaciones en el orden de 10-100 W

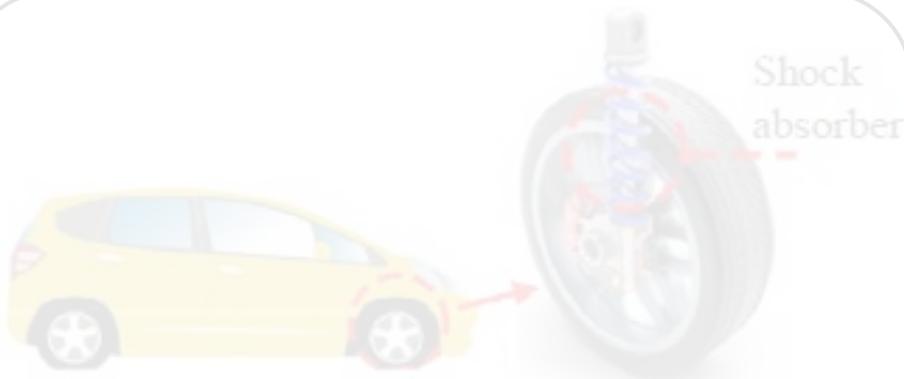
Fuentes ambientales de energía mecánica y vibracional



Ambiental: olas marítimas, viento, lluvia, energía sísmica,...



Humano: al andar, movimientos en articulaciones, mandíbula, etc.



Máquinas: motores, neumáticos, amortiguadores



Infraestructuras: puentes, carreteras, vías de tren, etc,



Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting



A. Moure^{a,*}, M.A. Izquierdo Rodríguez^b, S. Hernández Rueda^b, A. Gonzalo^{a,c}, F. Rubio-Marcos^a, D. Urquiza Cuadros^d, A. Pérez-Lepe^b, J.F. Fernández^a

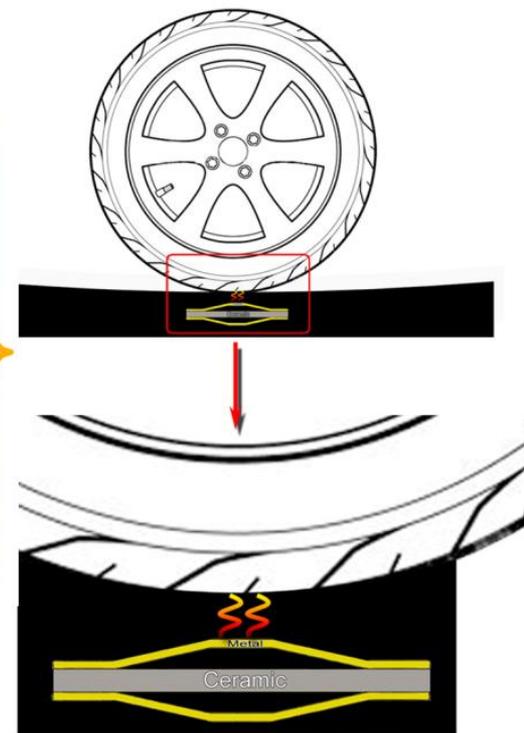
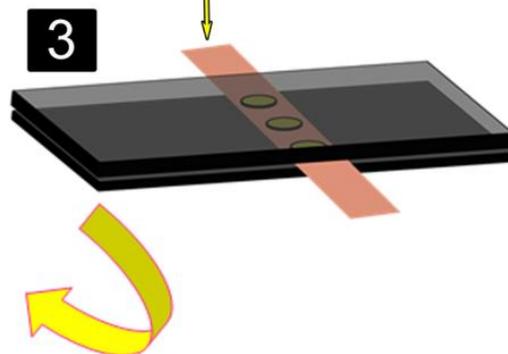
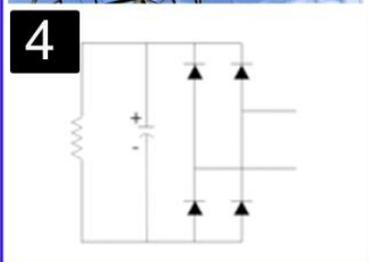
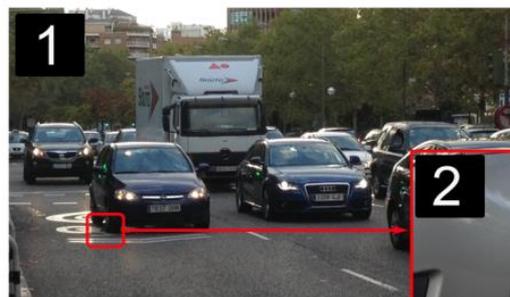
^a Ceramics for Smart Systems Group, Electroceramic Department, Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC, Kelsen 5, 28049 Madrid, Spain

^b Centro de Tecnología Repsol, Ctra. Extremadura, N-V, Km 18, 28935 Móstoles, Spain

^c Departamento de Física de Materiales, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, E-28040 Madrid, Spain

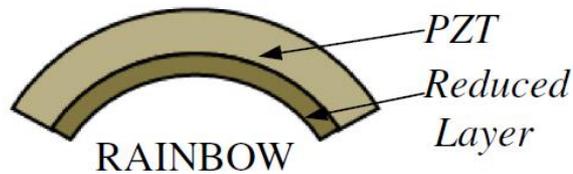
^d CEIS (Centro de Ensayos, Innovación y Servicios, S. L.), Cr. Villaviciosa de Odón a Móstoles, km. 15, 28935 Móstoles, Madrid, Spain

Phenoms: Piezoelectric Harvester of Energy from Mechanical Stresses

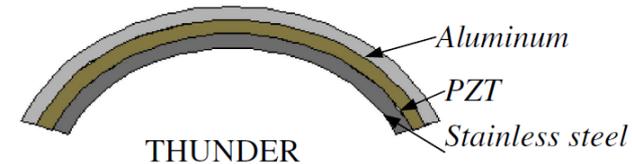


Idea

Transductores tipo RAINBOW y THUNDER



Alta fragilidad: no suficientemente robusto para aguantar la carga del vehículo



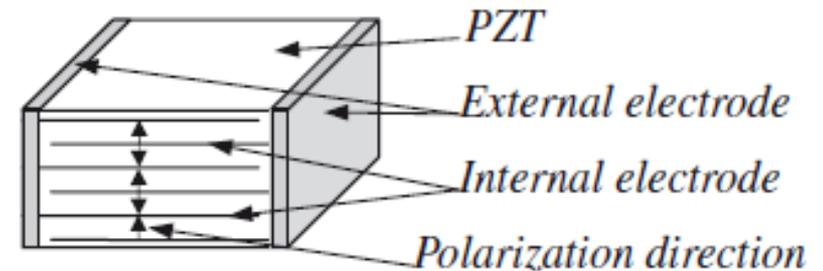
Alta eficiencia y alta capacidad de almacenamiento de energía, pero su rigidez no permite soportar las cargas de deformación del asfalto

Transductor multicapa

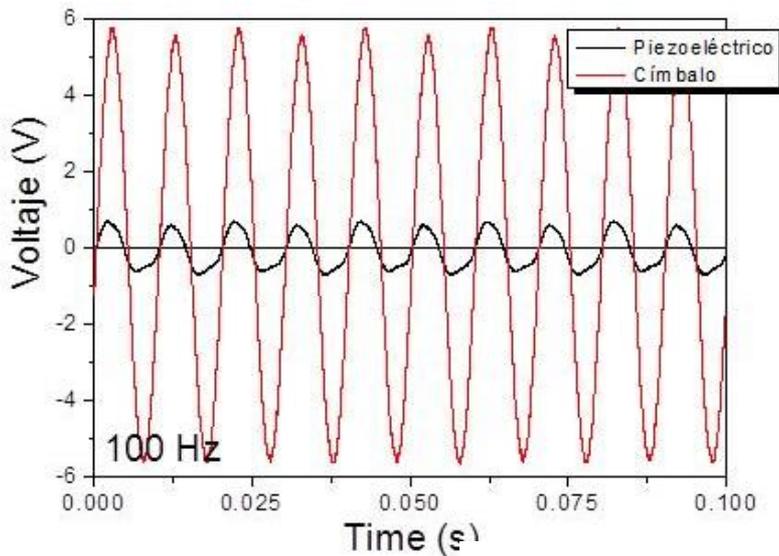
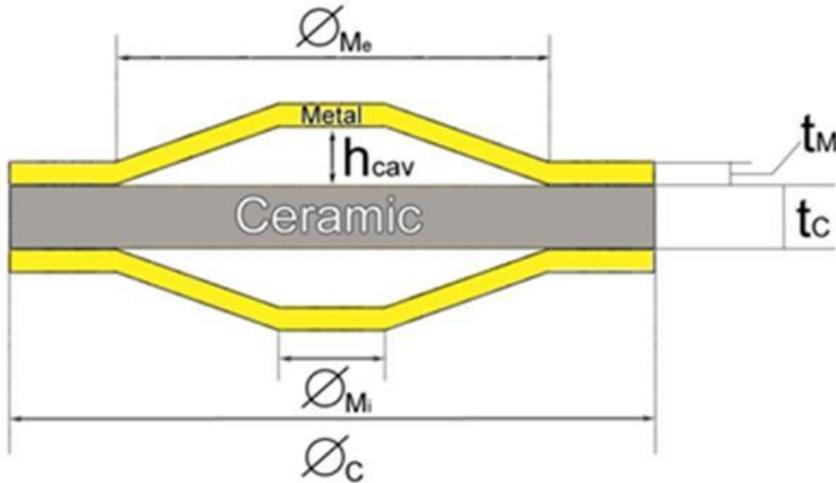
Altos coeficientes piezoeléctricos y baja fatiga High k , λ_{\max} and fatigue life.

Baja capacidad de almacenamiento de energía

Alta rigidez, no adecuada para las características del paso del vehículo



Composite metal-cerámica que permite la amplificación de la señal eléctrica con respecto a la cerámica piezoeléctrica



Dispositivo

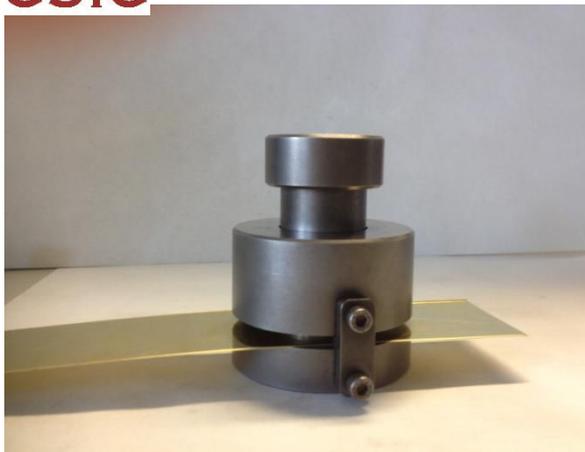
$$d_{33}^{\text{eff}} = d_{33} - Ad_{31}$$

A: factor adimensional. Depende del diseño del címbalo

Cerámicas PZT usadas

Properties	Symbol & unit	NCE51
Relative Dielectric Constant	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1850
Dielectric Loss Factor	$\tan \delta (10^{-4})$	190
Coupling Factors	k_p	0.65
	k_{31}	0.37
	k_{33}	0.72
	kt	0.51
Piezoelectric Charge Constants	$-d_{31} \times 10^{-12} \text{ C/N}$	195
	$d_{33} \times 10^{-12} \text{ C/N}$	460
Piezoelectric Voltage Constants	$-g_{31} (10^{-3} \text{ Vm/N})$	13
	$g_{33} (10^{-3} \text{ Vm/N})$	27
Mechanical Quality Factor	Q_m	80
Density	$\rho (\text{g/cm}^3)$	7.80
Elastic Compliances	$s_{11}^E 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	16
	$s_{33}^E 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	19
Curie Temperature	T_c	340

PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CÍMBALC PIEZOELÉCTRICO EN EL ICV



Preforma de la chapa metálica



Forma de la chapa metálica



Pegado chapa-cerámica



Secado del epoxy

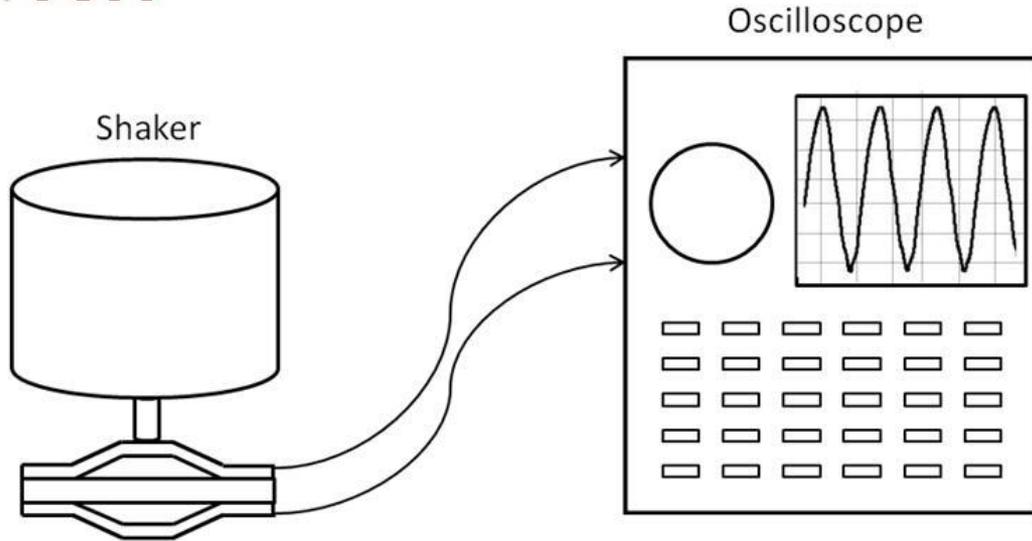


Fabricación

Címbalo	Metal	Presión formado (MPa)	Espesor del metal (mm)	Diámetro cerámica piezoeléctrica(mm)	Altura del címbalo (mm)	Simétrico
Serie 1-6	Latón	15	0.3	29	1	Sí
B 1-5	Latón	15	0.3	29	0.25	Sí
BF 1-9	Latón	15	0.25	29	0.25	Sí
AA 0-5	Latón	15	0.3	29	1	No
AB 1-8	Latón	15	0.3	29	0.25	No
LA29 1-13	Latón	30	0.3	29	15	Sí
S 1-19	Acero	30	0.25	29	0.8	Sí
SB 1-4	Acero	30	0.25	29	0.20	Sí
AAS 1-3	Acero	30	0.25	29	0.8	No
SABA 1-3	Acero	30	0.25	29	0.20	No
SP 1-13	Acero	4	0.25	29	0.65	Sí
L 1-11	Latón	30	0.4	30	1	Sí
L0330 1-31	Latón	30	0.3	30	1	Sí
LB330 1-4	Latón	30	0.3	30	0.25	Sí
A30 1-3	Acero	30	0.25	30	1	Sí

Dependencias:

Tipo de metal, espesor, diámetro de la cerámica y altura del címbalo

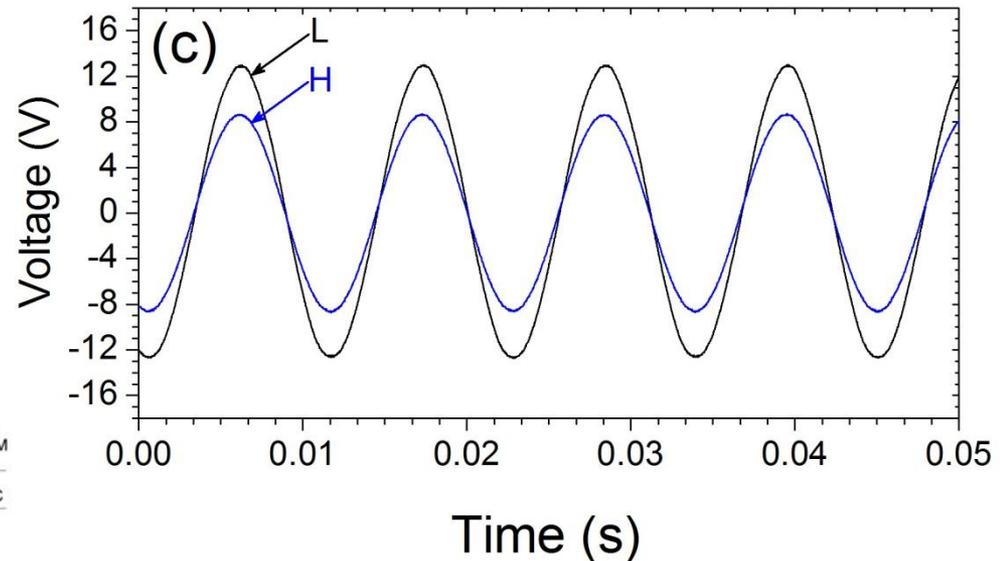
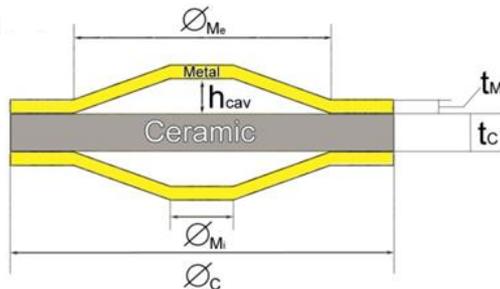


Señal medida en osciloscopio

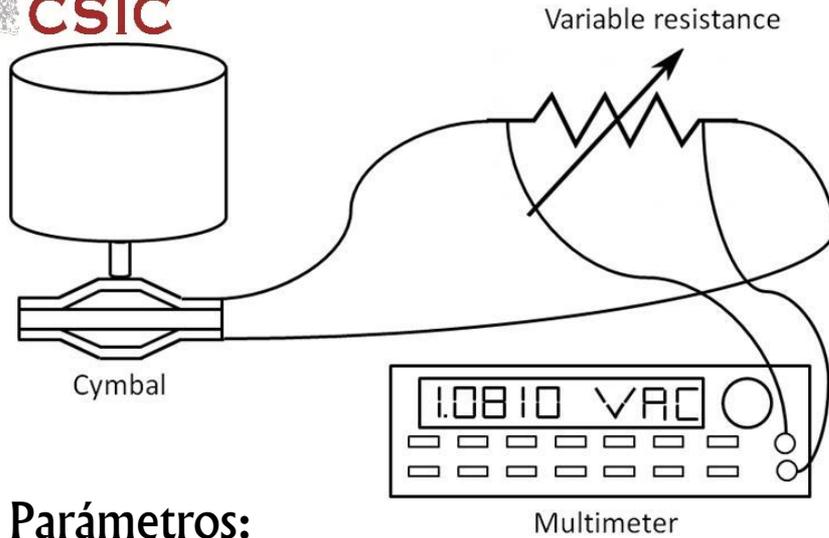
Dependencia del voltaje con la altura del címbalo

$-h_{cav}$:

- L: 0.25 mm
- H: 1 mm



Pero címbalos con $L=0.25$ mm se deforman!

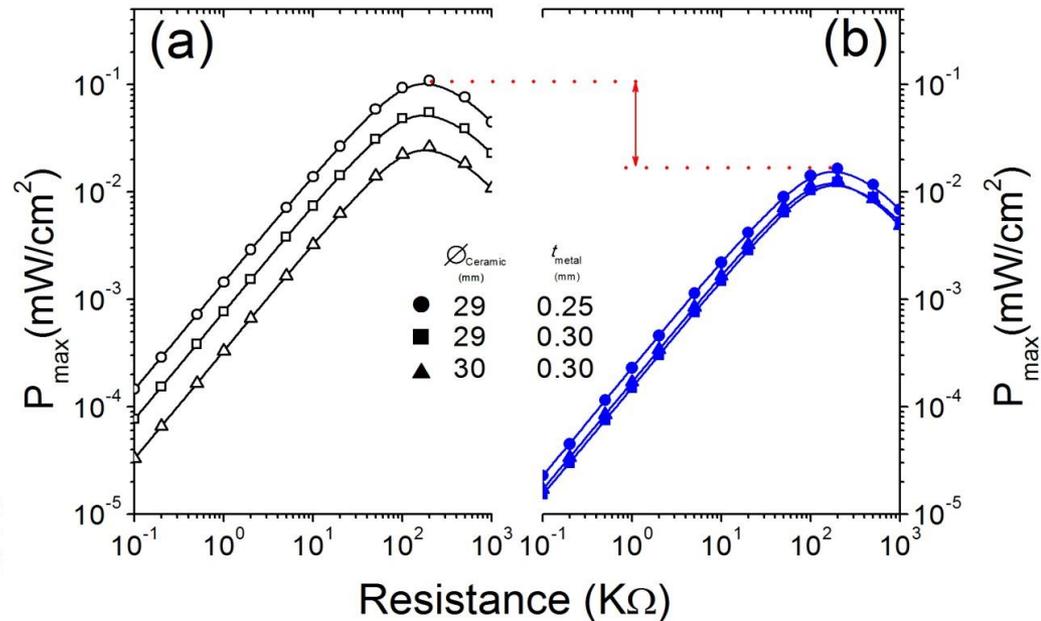
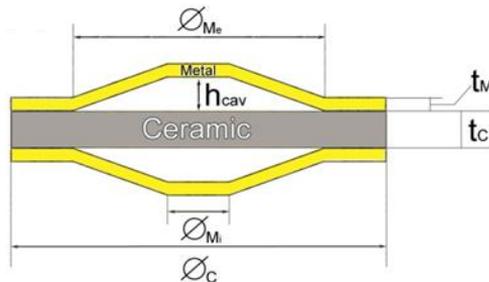


Potencia disipada en una resistencia variable

$$P = V_{ac}^2 / R$$

Parámetros:

- t_M : 0.25 and 0.30 mm
- ϕ_C : 29 y 30 mm
- h_{cav} :
 - L: 0.25 mm
 - H: 1 mm

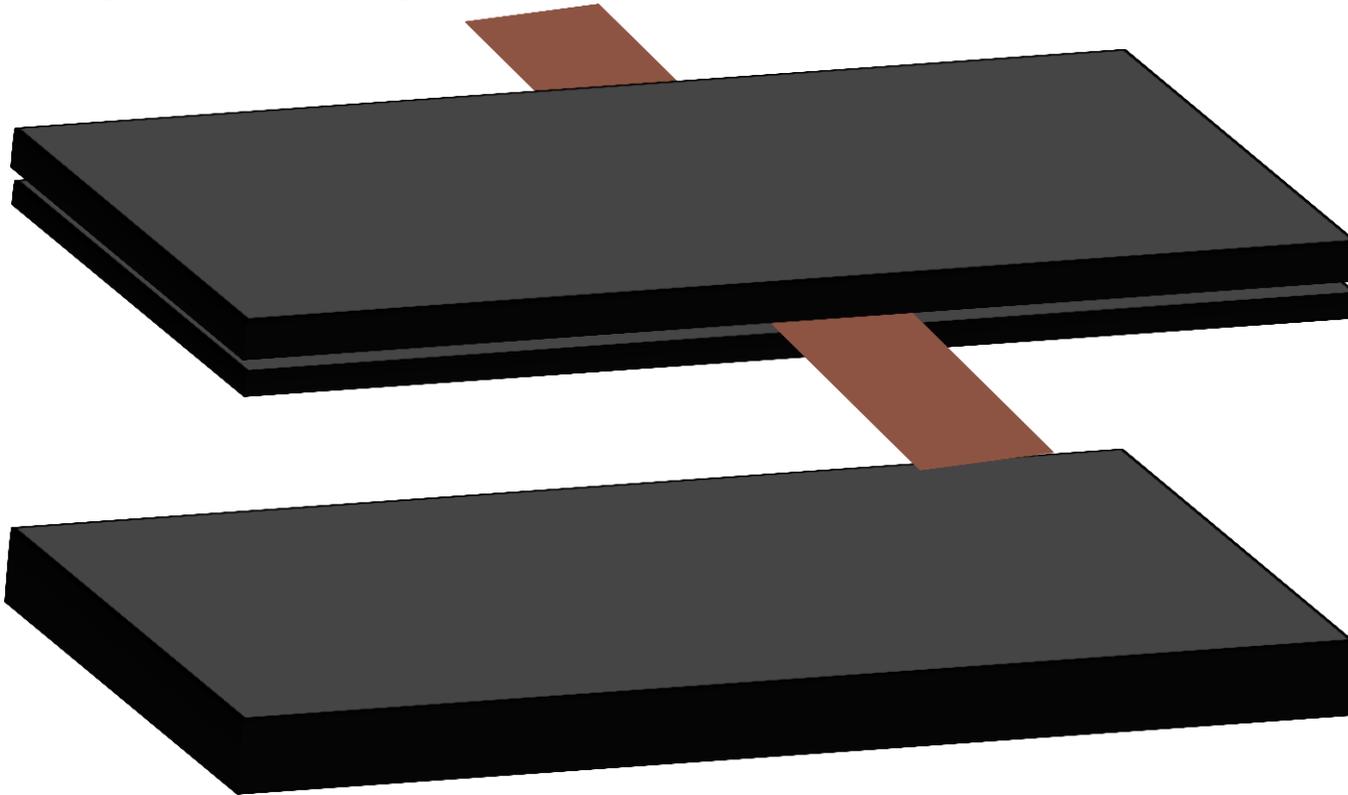


Condiciones elegidas:

$t_M = 0.30$ mm; $h_{cav} = 1$ mm; $\phi_C = 29$ mm

Caracterización nivel laboratorio

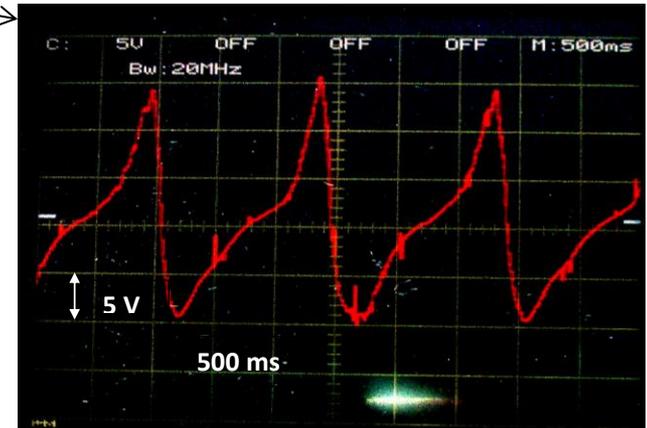
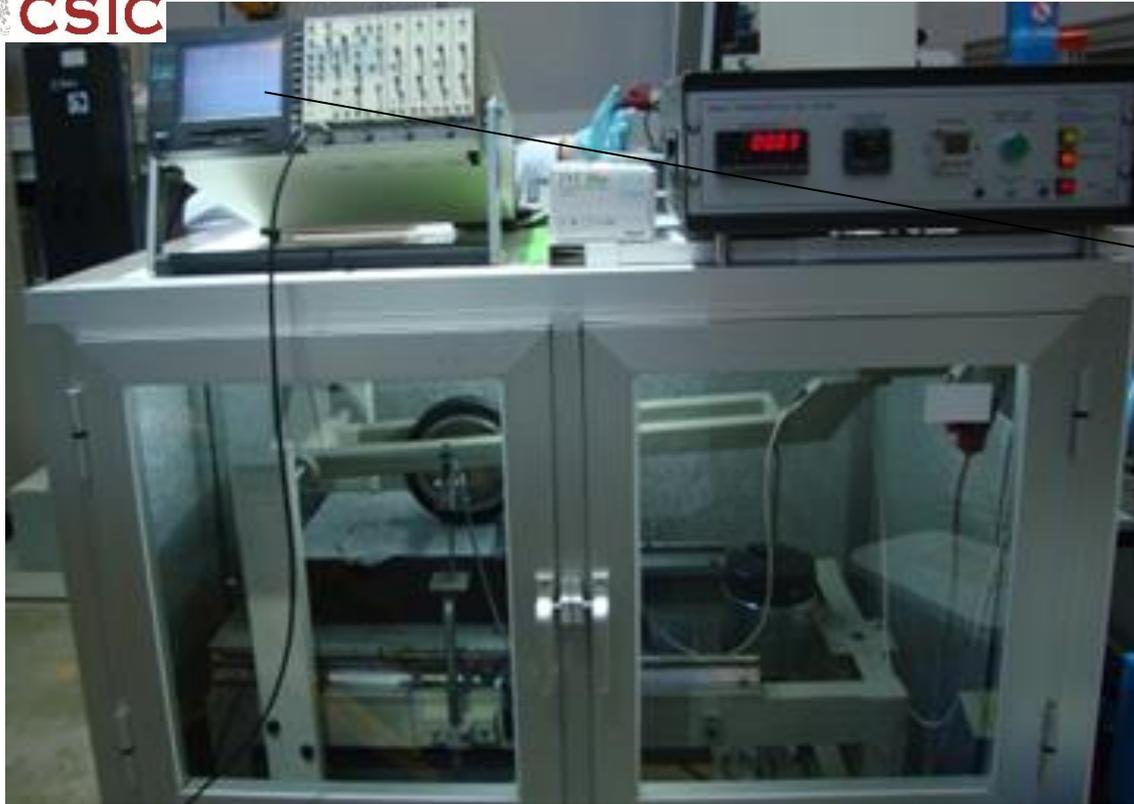
Los címbalos se integraron en Repsol en probetas de asfalto comercial
Capa superior de asfalto: 2 cm de espesor (máxima energía de deformación)
y aglomerados grandes: Mezcla 35/50



Capa de
incorporación:
betún 70/100
con sílica 5-15%.

Capa soporte: betún 35/50 mezclado con rellenos sílicos y cálcicos asphalt.
Espesor: 4 cm.

Integración

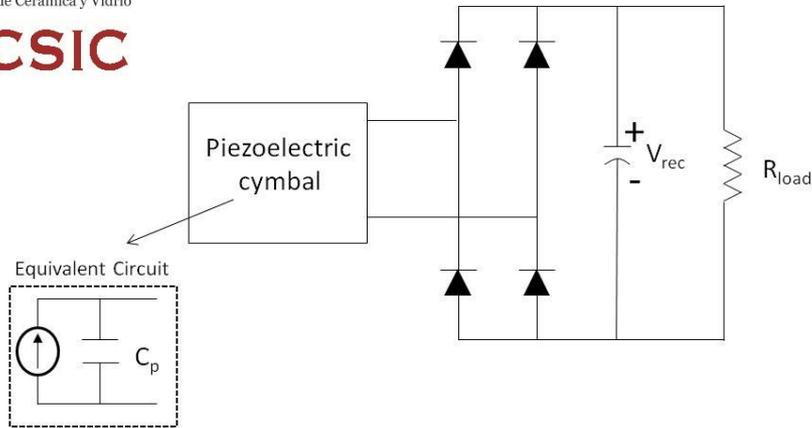


Voltaje de pico para cada paso de rueda: 12,5 V a 2 Hz

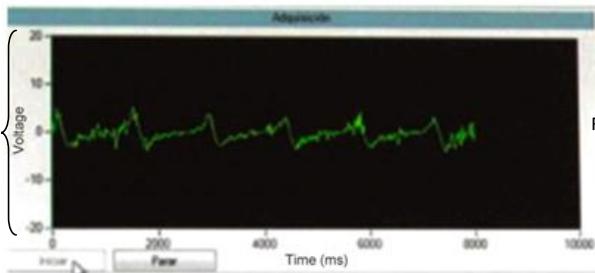
Demostrada la capacidad de recuperar energía para cada paso de rueda (vehículo)

Pero dificultad para recuperar energía en esta configuración directa

CIRCUITO RECTIFICADOR



Circuito rectificador de onda completa con un capacitor de salida para almacenar la energía



From 2 to 27 μ W

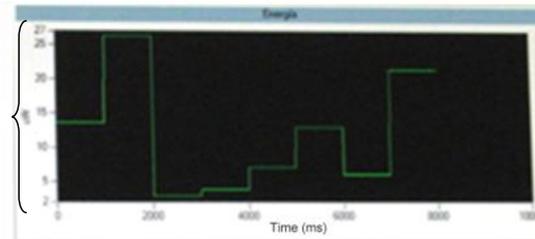
Voltage rms
0002,7543 V

Resistance
1,0000 MOhms

Intensity rms
0002,7543 μ A

Power
0007,5861 μ W

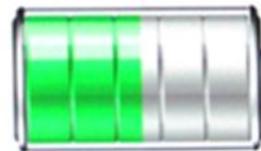
Energy
0075,8608 μ J [uWs]



Runtime
0000,54 horas

Power harvesting
0400,0013 mWs

Capacity
1200,0002 mAs



01
Baterías
Totalmente
Cargadas
(800 mAh)

Se disipan 16 μ W en un címbalo en cada paso de rueda en una resistencia de 1 $M\Omega$

**Caracterización
integración**

¿Cuanta energía se puede generar en condiciones reales de tráfico?

DENSIDAD DE TRÁFICO EN MADRID



http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMovilidadTransportes/MOVLIDAD/Ficheros/IMD_2012_A4.pdf

CSIC
M-30 LA PAZ, (Autovía)

Bus	Pesados	Taxis	Motos	Ligeros	TOTAL	HP	ValorHP	%HP
-----	---------	-------	-------	---------	-------	----	---------	-----

Tramo *Ventas (Puente) - O'Donnell (Puente)*

<i>Sentido 1</i>	0	0	0	0	0	157.570	19	9.800	6,22%
<i>Sentido 2</i>	0	0	0	0	0	135.700	14	9.169	6,76%
TOTAL	0	0	0	0	0	293.270	14	18.787	6,41%

PRAGA, de (Puente)

Bus	Pesados	Taxis	Motos	Ligeros	TOTAL	HP	ValorHP	%HP
-----	---------	-------	-------	---------	-------	----	---------	-----

Tramo *Chopera (Paseo) - Antonio López*

<i>Sentido 1</i>	0	0	0	0	0	81.015	14	6.070	7,49%
<i>Sentido 2</i>	0	0	0	0	0	64.466	7	4.511	7,00%
TOTAL	0	0	0	0	0	145.481	14	9.796	6,73%

M-30 MARQUÉS DE MONISTROL, (Autovía)

Bus	Pesados	Taxis	Motos	Ligeros	TOTAL	HP	ValorHP	%HP
-----	---------	-------	-------	---------	-------	----	---------	-----

Tramo *Rey (Puente) - Castilla (Puente)*

<i>Sentido 1</i>	0	0	0	0	0	69.947	7	6.226	8,90%
<i>Sentido 2</i>	0	0	0	0	0	73.247	14	5.821	7,95%
TOTAL	0	0	0	0	0	143.195	14	10.549	7,37%

ALCALÁ

Bus	Pesados	Taxis	Motos	Ligeros	TOTAL	HP	ValorHP	%HP
-----	---------	-------	-------	---------	-------	----	---------	-----

Tramo *Gran Vía - Cibeles (Plaza)*

<i>Sentido 1</i>	2.156	617	10.558	5.237	25.265	43.943	8	3.187	7,25%
<i>Sentido 2</i>	2.255	763	10.071	5.175	30.598	49.192	18	3.944	8,02%
TOTAL	4.411	1.380	20.629	10.412	55.863	93.135	18	6.044	6,49%

ESTIMACIÓN ENERGÍA RECUPERADA A PARTIR DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

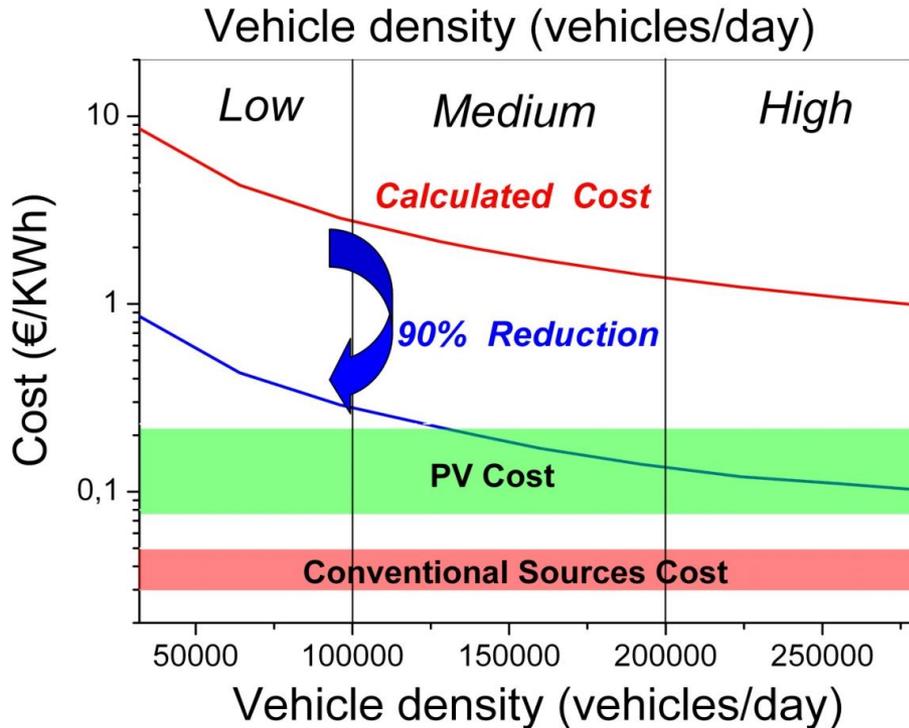
- Vehículos ligeros: 0.2 MPa → 4.2 μW (1MΩ) por cada címbalo
- Seis címbalos en serie en cada carril separados 1 cm: 30000 címbalos en 100m → 0.126 W en esos 100 m

Tramo	Vehículos totales	Energía-100 m (KWh)	Energía-100m por año (MWh)	Densidad de energía (KWh/m ²)	Densidad de energía eficiente
Ventas (Puente) - O'Donnell	157.570	1.65	14.49	5.18	45.29
Ventas (Puente) - O'Donnell	135.700	1.42	12.48	4.46	39.01
Chopera (Paseo) - Antonio López	81.015	0.85	7.45	4.14	46.57
Rey (Puente) - Castilla (Puente)	73.247	0.77	6.74	6.42	56.14
Rey (Puente) - Castilla (Puente)	69.947	0.73	6.43	6.13	53.61
Chopera (Paseo) - Antonio López	68.195	0.72	6.27	4.48	39.20
Independencia (Plaza)-Velázquez	65.223	0.68	6.00	4.29	37.50
Chopera (Paseo) - Antonio López	64.466	0.68	5.93	4.24	37.06
Total	715.363	7.51	65.80	4.91	44.30

Cubriendo 16.3 Km de las carreteras de la Comunidad (0,53 % del total) producirían un 10 % de la energía total producida en Madrid (2.361.803 MWh)

¿Cuanto cuesta?

Basado en nuestros resultados experimentales

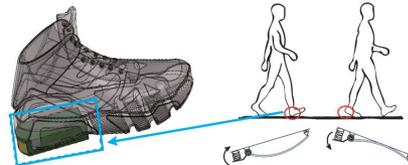


- Coste címbalos piezoeléctricos por m^2 : 1125 €/m^2
- Coste instalación, caleado y baterías: 70 €/m^2
- Amortización a 15 años:
Para una densidad media de vehículos
Coste (inicial): 1.98 €/Kwh

¿Cómo lo mejoro?

- Nuevos materiales con mejores propiedades
- Optimización del diseño de los címbalos
- Reducción de las pérdidas eléctricas en los procesos de recolección de energía

Los sistemas piezoeléctricos pueden aplicarse a distintas formas de recuperación de energía mecánica y vibracional por su mayor simplicidad y ausencia de elemento móviles



Centro de investigación: avanzar en materiales y dispositivos aplicables que den una solución específica para cada aplicación de forma eficiente y económica

Gracias por vuestra atención