



UNIÓN DE ASOCIACIONES DE INGENIEROS TÉCNICOS INDUSTRIALES Y GRADUADOS EN INGENIERÍA DE LA RAMA INDUSTRIAL DE ESPAÑA (UAIITIE)

“CONVOCATORIA 2017”

II PREMIO NACIONAL DE INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

Título del Trabajo:

**Las energías renovables en los estadios de fútbol y
piezoelectricidad por flexión**

AUTOR/ES:
Adrià Olomí Farré

BLOQUE TEMÁTICO:
Energías renovables - Piezoelectricidad

NIVEL EDUCATIVO:
Bachillerato

COORDINADOR:
Marcelino Serio López

Marzo del 2017

Resumen

El presente trabajo de investigación se centra en el estudio del uso actual de las energías renovables en los estadios de fútbol y, como resultado directo de este estudio, en una apuesta de mayor investigación en el campo de la piezoelectricidad como fuente de energía.

Nuestro mundo necesita solucionar los problemas ocasionados en el medio ambiente por el excesivo uso de fuentes de energías fósiles y las energías renovables son el camino. Las grandes instalaciones deportivas como los estadios de fútbol son precisamente centros de gran consumo energético y, por este motivo, las energías renovables se están convirtiendo en importantes en estos tipos de instalaciones, siendo la energía solar fotovoltaica la utilizada más ampliamente en la actualidad.

Pero hay otra fuente de energía renovable en un estado bastante incipiente en cuanto a sus posibilidades reales de aplicación debido a su todavía baja eficiencia y alto desembolso económico inicial. Se trata de la piezoelectricidad y más concretamente la piezoelectricidad por flexión, siendo experimentales hasta ahora la gran mayoría de proyectos de este tipo.

También a nivel experimental se ha desarrollado en este trabajo de investigación una instalación a pequeña escala con este tipo de energía. Ello nos ha permitido observar tanto diversas dificultades técnicas en su implementación como unos resultados obtenidos que demuestran y confirman su todavía muy pobre rendimiento.

No obstante esto no significa que la piezoelectricidad por flexión no sea un tipo de energía renovable por la que apostar. Porque si bien el coste inicial puede ser enorme sus posibilidades de futuro como fuente de energía limpia también lo son. No en vano no deja de ser curioso el interés que actualmente está demostrando alguno de los principales países productores de petróleo en la investigación sobre esta fuente de energía: la piezoelectricidad por flexión.

Palabras Clave

Piezoelectricidad.
Energías renovables.
Estadios sostenibles.

Índice

Resumen	2
Palabras Clave	2
Índice	3
1. Desarrollo	4
1.1 Introducción	4
1.2 Objetivos.....	5
1.3 Metodología	6
1.3.1 Las energías renovables utilizadas en los estadios de fútbol	6
1.3.1.1 Energía solar fotovoltaica	6
1.3.1.2 Energía eólica	8
1.3.1.3 Energía piezoeléctrica.....	9
1.3.1.4 Comparativa.....	10
1.3.2 Estudio sobre la piezoelectricidad por flexión	11
1.3.2.1 Piezoelectricidad por flexión.....	11
1.3.2.2 Proyecto en la ciudad de Masdar	11
1.3.2.3 Probando el generador piezoeléctrico de la serie MEAS-DT	12
1.3.2.4 Diseño y construcción del circuito de captación	14
1.3.2.5 Maqueta	16
1.4 Resultados.....	17
1.5 Conclusión	18
2. Tablas	19
3. Figuras	19
4. Referencias	20

1. Desarrollo

1.1 Introducción

Los múltiples avances tecnológicos y las exigencias de la sociedad actual nos ha llevado a producir y consumir energía de una manera exagerada y sin control de los recursos del planeta para poder obtenerla, sin atender a las posibles consecuencias negativas para el medio ambiente. Si bien es verdad que, por desgracia, este tipo de obtención de energía todavía está en auge, también lo es que la implementación de energías renovables está aumentando ya que la sociedad ha comenzado a tomar conciencia respecto a problemas como los de la contaminación y el cambio climático, siendo pues las energías renovables sinónimo de progreso y futuro.

El mundo del fútbol, que mueve masas y es muy activo económicamente, también se está sumando a esta causa y está buscando la manera de colaborar implementando las energías renovables en los estadios, acogedores éstos de miles de personas y que, por lo tanto, necesitan de una gran cantidad de energía. Puede parecer un tema un tanto futurista y poco presente en las instalaciones deportivas actuales pero en este trabajo se podrán observar ya soluciones reales utilizadas en algunos campos de fútbol, también en nuestro país. Se estudiará tanto la situación actual como algunos proyectos de nuevos estadios sostenibles donde las energías renovables son incluidas en su diseño arquitectónico dotando al conjunto de belleza y eficiencia.

Finalmente se concreta un proyecto a pequeña escala aprovechando la piezoelectricidad por flexión como propuesta de energía renovable, donde los resultados obtenidos nos muestran que todavía hay un largo camino por recorrer pero que merece la pena hacerlo.

1.2 Objetivos

Como punto de partida, el primer objetivo que se plantea en este trabajo de investigación es el estudio de las diferentes soluciones de consumo de energías renovables que actualmente se pueden encontrar en estadios de fútbol y sus posibles usos.

A partir de este estudio se pretende un segundo objetivo doble que consiste por una parte en la evaluación del rendimiento de las actuales instalaciones y, por otra, en realizar una parte práctica en la que se proponga un diseño sostenible y su implementación en una maqueta.

Este diseño se pretende hacer utilizando una fuente de energía renovable en estado más embrionario, como lo es la piezoelectricidad por flexión, de manera que a partir de su implementación se puedan obtener resultados que permitan valorar su rendimiento y sus posibilidades de futuro.

Todo ello nos ha de permitir adquirir un alto grado de aprendizaje sobre las energías renovables.

1.3 Metodología

1.3.1 Las energías renovables utilizadas en los estadios de fútbol

1.3.1.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una de las energías renovables más importantes utilizadas en la actualidad en los estadios de fútbol. Este tipo de energía consiste, básicamente, en la transformación directa de las radiaciones solares en energía eléctrica. Esta obtención de electricidad se puede dar gracias a los paneles solares formados por un número de células fotovoltaicas, dispositivos semiconductores encargados de liberar electrones cuando reciben la radiación solar.

La producción de estas células fotovoltaicas tiene un alto coste siendo esto uno de los inconvenientes de esta energía. Además, todavía hay mucho que hacer para mejorar su rendimiento. Y también hay que tener en cuenta que, a parte de las placas solares, es necesario un conjunto de diversos elementos en cualquier instalación de este tipo como acumuladores, reguladores de carga, inversores para convertir a corriente alterna, etc., los cuales pueden depender también del tipo de instalación según si ésta es para el autoabastecimiento o si se cede la energía eléctrica sobrante a la red pública.

Aún así podemos ver que ya son muchos los estadios que han apostado por este tipo de energía y con bastante éxito, no sólo a nivel de energía obtenida, tal y como se muestra en la siguiente tabla, sino también desde el punto de vista arquitectónico quedando los paneles solares integrados en la estética de su arquitectura.

Tabla 1 – Comparativa de producción eléctrica por energía solar de diferentes estadios

	Lincoln Financial Field	Estadio Kaohsiung	Itaipava Arena Pernambuco	RCDE Stadium	Camp d'Esports de Lleida
Localización	Filadelfia, EEUU	Kaohsiung, Taiwan	Recife, Brasil	Cornellà, España	Lleida, España
Número de paneles solares	11.000	8.844	3.652	2.700	483
Superficie ocupada (m²)	15.000	14.155	15.000	4.520	890
Energía generada (kWh/año)	3.324.220	1.140.000	1.500.000	705.000	112.000

Estos son datos del 2014. Tal y como se puede observar, no todas las instalaciones ofrecen el mismo rendimiento. El estadio de Kaohsiung, por ejemplo, cuenta con una superficie y un número de paneles cercano al Lincoln Financial Field y sin embargo su energía generada es tres veces menor. Incluso es bastante menor que la del Itaipava Arena Pernambuco teniendo este menor número de paneles pero con la misma superficie. Aún así, el caso de Kaohsiung es de destacar ya que cuando el estadio no está en uso cede su energía al barrio más cercano garantizándole electricidad al 80% de sus infraestructuras, siendo un ejemplo de diseño de infraestructuras urbanísticas.



Figura 1 – Estadio nacional de Kaohsiung – Autoría: Peelliden

1.3.1.2 Energía eólica

A diferencia de la energía solar fotovoltaica, la energía eólica tiene un papel mucho más discreto en los estadios de fútbol. De hecho en esta investigación tan sólo se ha podido observar el caso del Lincoln Financial Field en Filadelfia, EEUU.

Este tipo de energía utiliza como fuente de producción de electricidad el viento o corrientes de aire, transformando su energía cinética al mover las aspas de los aerogeneradores en electricidad mediante la rotación de un alternador.

Es evidente que la instalación de aerogeneradores en los estadios puede afectar a su estética, siendo más difíciles de integrar que las placas solares en su arquitectura. Pero esta integración se puede conseguir como es en el caso del Lincoln Financial Field, situándolos en la parte más alta de las graderías y usando aerogeneradores de eje vertical como el que se muestra en la siguiente figura. Este estadio cuenta con 14 turbinas eólicas del tipo UGE 4K que, en 2014, le proporcionaron una energía de 56.000 kWh/año con una velocidad media del viento de 5,5 m/s.



Figura 2 – Aerogenerador de eje vertical – Autoría: Ashley Dace

1.3.1.3 Energía piezoeléctrica

Este tipo de producción de electricidad se ha unido recientemente al grupo de energías renovables en los estadios de fútbol aunque su presencia es todavía muy discreta puesto que le queda todavía un largo camino por recorrer por diversos motivos que se comentarán a continuación. Casi todas las instalaciones han sido hasta la fecha de tipo experimental y temporal como, por ejemplo, la que Movistar implantó para un partido en el estadio Santiago Bernabéu de Madrid. Una de las pocas instalaciones permanentes es la del estadio Parque Misaki en Kobe, Japón.

La piezoelectricidad consiste en la obtención de energía eléctrica a causa de la compresión o flexión de determinados cristales como el cuarzo, el rubidio o la sal de Seignette. Al comprimir un cristal se produce un desplazamiento de electrones polarizándose así sus dos extremos. Las diferencias de potencial conseguidas son muy pequeñas y difíciles de almacenar. Esto, unido al hecho de que se precise una fuente continua de compresión o flexión como las pisadas de los espectadores en las gradas, hace todavía muy difícil y costosa su implantación efectiva en los estadios.

En el estadio Parque Misaki se pueden conseguir con esta tecnología una potencia media de 8.400 W durante los 90 minutos de un partido. Si se celebran una media de 25 partidos por año, esto representa una obtención de energía anual de

$$E = P \cdot t = 8.400W \cdot 1,5 \frac{h}{partido} \cdot 25 \text{partidos} = 315.000Wh = 315kWh / \text{año}$$

Contando también con los desplazamientos de desalojo después de los partidos el resultado final es de 327,6 kWh/año.

1.3.1.4 Comparativa

Habiendo hecho ya un repaso a la situación actual de los tres tipos de energías renovables más utilizadas en los estadios de fútbol se pueden ahora a comparar en la siguiente tabla atendiendo a los mejores valores observados en cada caso y a sus diferentes costes de producción.

Tabla 2 – Comparativa de coste de producción eléctrica por tipos de energía renovable

	ENERGÍA SOLAR	ENERGÍA EÓLICA	PIEZOELECTRICIDAD
Estadio	Lincoln Financial Field	Lincoln Financial Field	Parque Misaki
Energía generada (kWh/año)	3.324.220	56.000	327,6
Coste total de implantación (€)	28.000.000	244.160	52.650.000
Coste de producción por kWh (€/kWh)	8,42	4,36	160.714

- La energía solar es actualmente la más extendida en los campos de fútbol y la que claramente aporta mayor cantidad de energía a un coste con el cual tan sólo podría competir la energía eólica. Pero la energía eólica tiene el inconveniente de su dependencia del viento y aunque su coste de instalación sea algo menor su capacidad de producción también lo es. También la estética parece estar a favor de la energía solar respecto la eólica.
- La piezoelectricidad se distancia mucho de las otras dos energías debido a su descomunal precio de implementación que la hace actualmente inviable.

1.3.2 Estudio sobre la piezoelectricidad por flexión

1.3.2.1 Piezoelectricidad por flexión

Recordamos que el efecto piezoeléctrico consiste en que algunos materiales de estructura cristalina adquieren una polarización eléctrica al ser sometidos a una presión, es decir, a una deformación mecánica, la cual también podría ser una flexión si el material es laminado ya que al doblarse sufriría la presión necesaria en sus caras para conseguir dicha polarización.

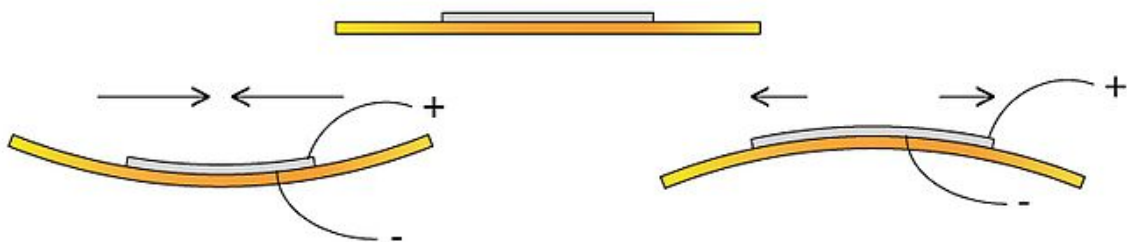


Figura 3 – Piezoelectricidad por flexión (bending) – Autoría: Sonitron Support

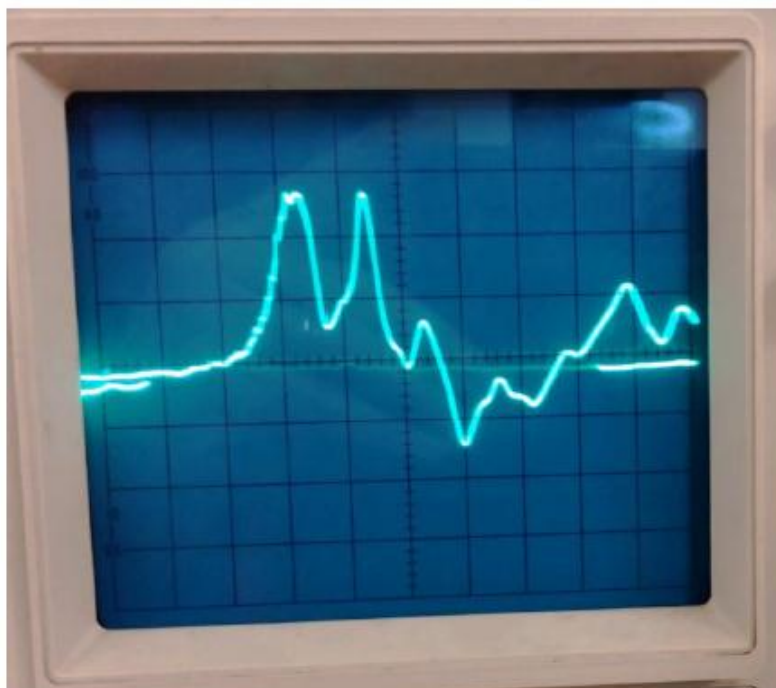
1.3.2.2 Proyecto en la ciudad de Masdar

En Masdar, la ciudad ecológica en construcción en las afueras de Abu Dhabi, la empresa Atelier DNA de Nueva York ha proyectado un campo de 1203 tallos de 55 metros de altura. Cada tallo, con una base de hormigón entre los 10 y 20 metros de diámetro y contruidos a partir de fibra de carbono flexible, alberga en su interior los discos de material piezoeléctrico capaces de generar energía eléctrica al ser flexionados por el viento.

1.3.2.3 Probando el generador piezoeléctrico de la serie MEAS-DT

Encontrar en el mercado un generador piezoeléctrico no es fácil al no ser su uso todavía muy extendido. Tanto es así que son muy pocos los negocios de componentes electrónicos que los conozcan y donde poder adquirirlos. En este estudio se ha podido disponer de un sensor-generador de la serie MEAS-DT adquirido en Electrónica Embajadores, de Madrid.

La primera prueba realizada consistió en conectarlo directamente a un osciloscopio para comprobar las tensiones que se podían adquirir al flexionarlo manualmente. La siguiente figura muestra los resultados obtenidos configurando la base de tiempo horizontal del osciloscopio a 2 ms/cm y la vertical a 5 mV/cm. La tensión observada era alterna al flexionar en ambos lados y, aunque era mayor cuanto más rápido se flexionaba, la tensión máxima conseguida no superaba los 13 mV.



Escala vertical: 5 mV/cm

Escala horizontal: 2 ms/cm

Tensión máxima: 13 mV

Ciclo alterno

Período:

$$T = 6 \text{ cm} \cdot 2 \text{ ms} = 12 \text{ ms}$$

Frecuencia:

$$f = 1/T = 1/0,012 \text{ s} = 83,33 \text{ Hz}$$

Figura 4 – Tensiones obtenidas con el generador piezoeléctrico

Se realizaron después diversas pruebas del conexionado en serie de varios de estos generadores sin conseguir un aumento significativo de la tensión. Cabe destacar que para conseguirlo se deberían flexionar al mismo tiempo todos los elementos y hacerlo de la misma manera, cosa muy difícil que pueda suceder realmente.

Finalmente se procedió al filtrado con un puente de diodos para eliminar las tensiones negativas puesto que el objetivo era aprovechar las tensiones en un solo sentido para pensar luego en un posterior almacenamiento de carga, puesto que las muy pequeñas tensiones conseguidas por las flexiones son insuficientes incluso para encender un LED. Además, éstas son de una muy corta duración.

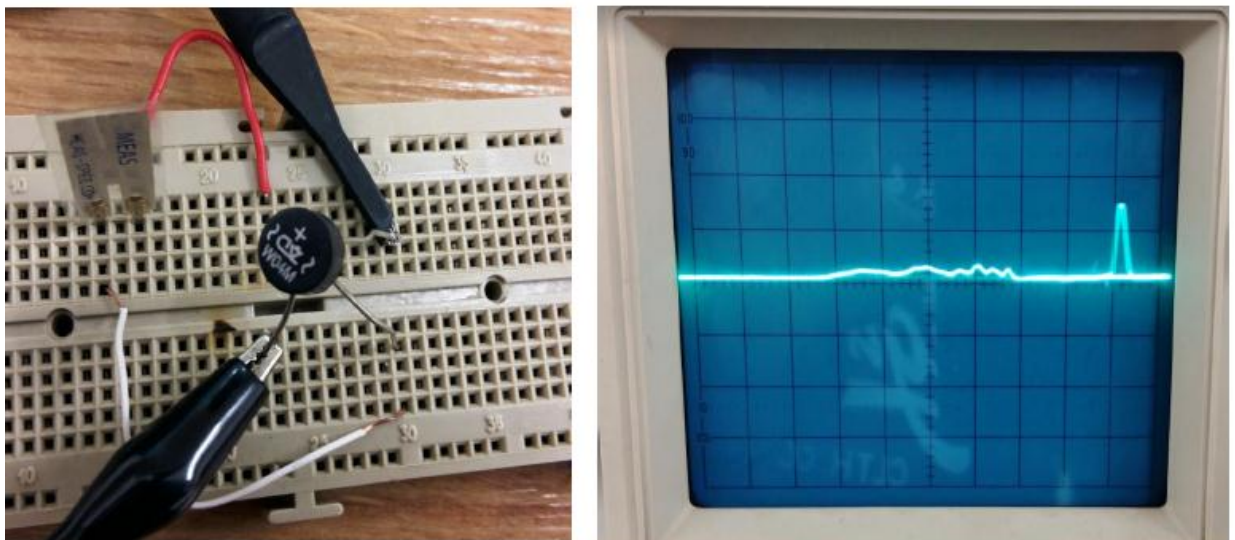


Figura 5 – Filtrado de las tensiones obtenidas con el generador piezoeléctrico

Se hace necesario pues, después del filtrado, el almacenamiento de la carga conseguida en cada flexión.

1.3.2.4 Diseño y construcción del circuito de captación

El conjunto de pruebas realizadas muestra la necesidad de definir un circuito de captación o almacenamiento de la carga, tal y como se muestra en la siguiente figura, y que se comenta a continuación.

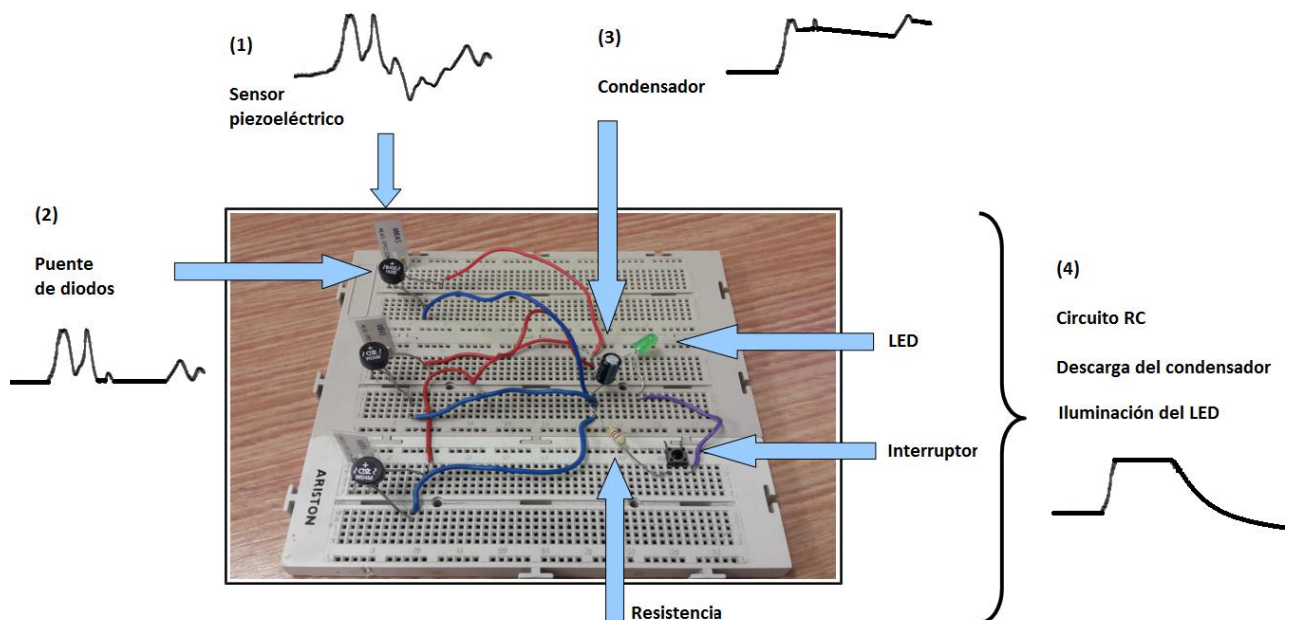


Figura 6 – Circuito de captación

- Cada generador **(1)** necesitará su propio puente de diodos **(2)** para filtrar y permitir así, a cada flexión, la generación de una diminuta tensión, es decir, un pequeñísimo traslado de carga.
- Cada uno de los conjuntos generador-puente de diodos se conectan en paralelo a un condensador **(3)** y éste permitirá ir almacenando estas pequeñas cargas que cada conjunto vaya produciendo a lo largo del tiempo.

- Si por cada flexión se obtiene como máximo 0,01 V serán necesarios cientos de flexiones para llegar a almacenar en el condensador valores de tensión de entre 2 V y 5 V que permitan encender un LED.
- Cuando el condensador ya haya adquirido la carga suficiente ésta podrá ser empleada para, por ejemplo, encender un LED que es el caso de este estudio.
- Para que el condensador no libere su carga de manera instantánea sino que pueda hacerlo de una manera un poco más prolongada en el tiempo, será necesario conectarle una resistencia a la salida de manera que, cada vez que se apriete un pulsador, la carga se pueda liberar en el circuito RC **(4)** formado de esta manera, sabiendo que el tiempo de descarga del condensador en un circuito RC serie es $t = 5RC$. Es decir, ya no instantáneo.

1.3.2.5 Maqueta

Finalizada la construcción y comprobación de un circuito de captación se pensó en el sistema de producir la flexión de los generadores piezoeléctricos sin manipulación directa, es decir, de una manera que pudiera ser aplicado en la realidad. Para ello, en la maqueta se utilizan 6 generadores y a cada uno de ellos se le asocia un molino que pudiera moverse con corrientes de aire para flexionarlos.

Este sistema mejora el rendimiento al conseguirse más flexiones por unidad de tiempo y podría ser utilizado, por ejemplo, en el tejado de una instalación deportiva. En este estudio la maqueta se utiliza para el encendido de un LED como simulación de un foco en dicha instalación.

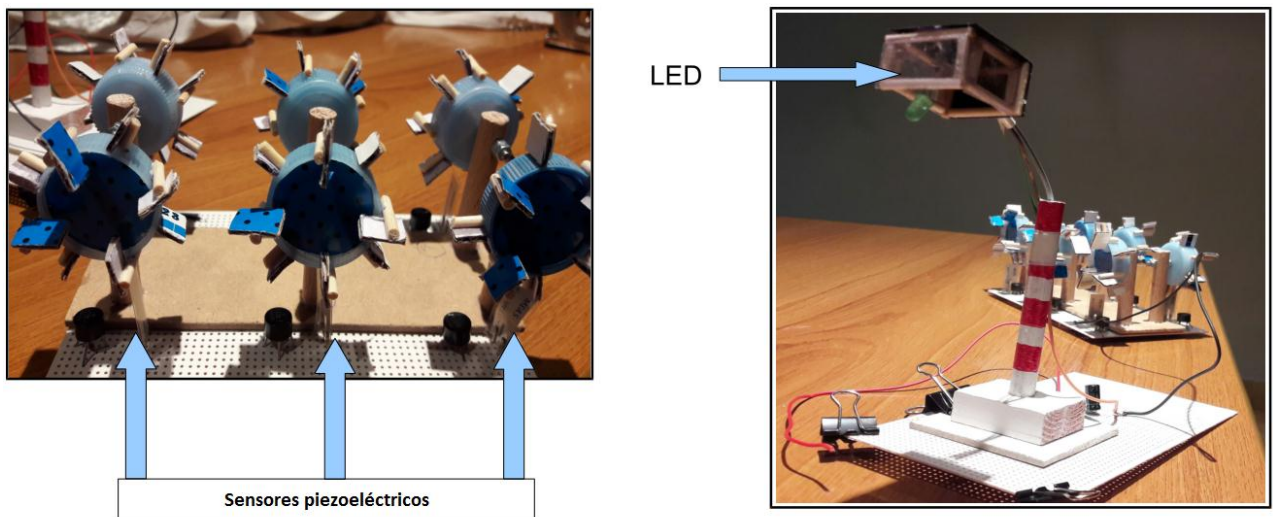


Figura 7 – Maqueta con molinos para la flexión de los generadores piezoeléctricos

1.4 Resultados

Un condensador como acumulador de carga y un circuito RC para liberarla permiten encender el LED pero de una manera **muy ineficiente**. Esto es así porque la intensidad que permite dar al LED disminuye rápidamente en el tiempo, por lo que se hace necesario acumular más carga en el condensador y ésta pasa absolutamente por la necesidad de producirse previamente cientos, prácticamente miles, de flexiones en los generadores piezoeléctricos para conseguirlo. Es decir, el punto de partida es ya la gran ineficacia de los generadores piezoeléctricos utilizados para este propósito.

- Para un condensador de $100 \mu\text{F}$ y una resistencia de 120Ω el tiempo de descarga es $t = 5RC = 5 \cdot 120 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,06 \text{ s}$. Si el condensador se consigue cargar hasta que adquiriera una diferencia de potencial de 20 V podrían aprovecharse un poco más de las $2/3$ partes de este tiempo de descarga. Es decir, el LED podría estar encendido $0,04 \text{ s}$.
- Para conseguir 20 V en el condensador, a razón de $0,01 \text{ V}$ que se obtiene como máximo en cada flexión, hacen falta 2000 flexiones. Esto significa que, si hay 6 molinos cada uno debería proporcionar más de 330 golpes para conseguirlo. Incluso si eso fuera posible en tan sólo 1 segundo, todo este esfuerzo sólo permitiría el encendido del LED durante el 4% del tiempo.

Además, **el coste económico es enorme**. La mayor parte de los componentes electrónicos utilizados para la maqueta no son caros pero no se puede decir lo mismo de los generadores piezoeléctricos adquiridos por $3,14 \text{ €}$ cada uno. Esto puede no parecer caro pero lo es, y mucho, teniendo en cuenta la gran cantidad de éstos que serían necesarios en una instalación real y el **muy pobre rendimiento** que demuestran ofrecer.

1.5 Conclusión

El uso de las energías renovables en los estadios de fútbol está ya muy extendido y va en aumento, lo cual es una gran noticia puesto que no se trata de un uso anecdótico, tal y como muestran estadios como el Lincoln Financial Field, capaz de autoabastecerse, o el Estadio Nacional de Kahosiung, capaz de abastecer otras infraestructuras urbanas con sus excedentes. Y como ejemplo de apuesta en este sentido, qué mejor que el proyecto del Qatar Foundation Stadium, sede del Mundial 2022 y que contará con centenares de placas solares alrededor de todo el estadio.

La situación actual observada de los tres tipos de energías renovables más utilizadas en los estadios de fútbol muestra que el desarrollo y posibilidades de aprovechamiento de la piezoelectricidad está todavía a una enorme distancia de las energías eólica y solar. La piezoelectricidad es todavía una tecnología de muy alto coste y bajo rendimiento. Así, mientras el coste de producción de energía eléctrica es de 8,42 €/kWh a partir de la energía solar, y de 4,36 €/kWh a partir de la energía eólica, para el caso de la energía piezoeléctrica el coste es de 160.714 €/kWh. Es decir, un 19.087 veces más cara que la solar.

Ahora bien, aunque incluso la parte práctica de este estudio corrobore el alto coste económico y el pobre rendimiento de la piezoelectricidad, ¿cabe realmente ignorarla como posible fuente de energía? Creemos que no y que hay que seguir investigando puesto que, **aunque sea a muy largo plazo y con un gran desembolso económico inicial, la piezoelectricidad puede tener el éxito garantizado** ya que es una energía inagotable y que no contamina el medio ambiente. No deja de ser curioso que esto parezcan tenerlo claro en un país como el Emirato Árabe de Abu Dhabi, gran productor mundial de petróleo y gas, con su proyecto de ciudad ecológica de Masdar, si bien hay que admitir que su capacidad económica actual para esta apuesta es sin duda mayor que la de muchos otros países.

2. Tablas

Tabla 1 – Comparativa de producción eléctrica por energía solar de diferentes estadios... 7

Tabla 2 – Comparativa de coste de producción eléctrica por tipos de energía renovable. 10

3. Figuras

Figura 1 – Estadio nacional de Kaohsiung – Autoría: Peeldden.....7

Figura 2 – Aerogenerador de eje vertical – Autoría: Ashley Dace.....8

Figura 3 – Piezoelectricidad por flexión (bending) – Autoría: Sonitron Support.....11

Figura 4 – Tensiones obtenidas con el generador piezoeléctrico.....12

Figura 5 – Filtrado de las tensiones obtenidas con el generador piezoeléctrico.....13

Figura 6 – Circuito de captación14

Figura 7 – Maqueta con molinos para la flexión de los generadores piezoeléctricos16

4. Referencias

Alternative Energy. (2009). New solar stadium in Taiwan. Recuperado de <http://www.alternative-energy-news.info/new-solar-stadium-in-taiwan/>

Carrillo, F. (2014). Sostenibilidad y eficiencia energética en los estadios del Mundial Brasil 2014. Recuperado de <http://upthegreen.blogspot.com.es/2014/07/sostenibilidad-y-eficiencia-energetica.html>

Ciutat del futur. (2015). Producció d'energia solar des del Camp d'Esports per a la ciutat. Recuperado de <http://www.ciutatdelfutur.cat/camp-de-esports/>

González, S & Jaramillo, J.L. (2010). Metodología de diseño de un generador piezoeléctrico para harvesting de energía. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/106829336/Metodologia-de-diseno-de-un-generador-piezoelctrico>

Ibáñez, J. (2013). E-STEP: generador piezoeléctrico. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/14982/Ib%C3%A1%C3%B1ez.pdf>

Marimar, M. (2016). Energía eólica. Recuperado de <http://elblogverde.com/energia-eolica/>

Malvino, A.P. (1994). Principios de electrónica. Aravaca (Madrid). McGRAW-HILL.

Martin, J & Roca J.F. (2009). Instal·lacions solars fotovoltaiques. Recuperado de http://ioc.xtec.cat/materials/FP/Materials/0801_IEA/IEA_0801_M06/web/html/index.html

U.S. Energy Information Administration. (2016). Open Data – Net generation: Lincoln Financial Field. Recuperado de <https://www.eia.gov/opendata/qb.php?category=1232255&sdid=ELEC.PLANT.GEN.58231-SUN-PV.M>