



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**
BARCELONATECH

Visión de la aplicación de los sistemas piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica a partir del viento en edificios

Jasiel Alejandro Sotelo Uribe

Universitat Politècnica de Catalunya
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Barcelona, España
Año 2015

Visión de la aplicación de los sistemas piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica a partir del viento en edificios

Tesina presentada como requisito parcial para optar al título de:
Máster de Tecnología en la Arquitectura: Innovación en los procesos constructivos

Jasiel Alejandro Sotelo Uribe

E-mail: arq.jasielsotelo@gmail.com

Director TFM:

PhD. Arq. Joan Lluís Zamora Mestre

Director del Master:

Convocatoria: Septiembre 2015

(Dedicatoria)

*A mis padres que siempre me han apoyado
en todos los pasos de mi formación y a mis
hermanas y hermanos, gracias.*

Resumen

En el presente trabajo final de máster, se estudia la tecnología piezoeléctrica, utilizada principalmente para generación de energía a micro escala. En este caso va a tener un enfoque en la captura de la energía del viento, para transformarla en energía eléctrica. Se analizan los dispositivos existentes para ver su funcionamiento, pasando por las fases de captura de la energía, transformación y su almacenamiento. Una vez revisadas todas las tecnologías existentes se estudian las posibilidades que tiene dentro de la arquitectura, replanteando elementos presentes en los edificios, así como la propuesta de sistemas nuevos.

Palabras clave: Piezoeléctrico, energía del viento, Recolección de energía, Vibración, Generador

Abstract

The present work studies piezoelectric technology, which is used mainly for micro-scale energy generation. In this case it's gonna have a focus in wind power to transform it into electric power. Existing energy harvest devises are analyzed to study how they work, going through the phases of energy capturing, transformation and storage. Once the existing technologies are reviewed, the possibilities of architecture application are studied, rethinking present elements in buildings as well as the proposal of new systems.

Keywords: Piezoelectric, Wind-power, Energy Harvest, Vibration,
Piezoelectric Generator

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Delimitación del ambito de estudio	XIV
Justificación del tema	XIII
Introducción	1
1. Objetivos	5
1.1 Objetivos Generales	5
1.2 Objetivos particulares	5
2. Estado del arte científico	7
2.1 Piezoelectricidad	7
2.1.1 Historia de la piezoelectricidad	8
2.1.2 Materiales Piezoelectricos	9
2.1.3 Aplicaciones	10
2.2 Energy Harvest	12
2.3 Referencias del capítulo	13
3. Estado del arte ingeniería	15
3.1 Transductores piezoeléctricos	15
3.2 Circuito de control (Transformación de la energía)	17
3.3 Almacenamiento de la energía	18
3.3.1 Sistema de baterías recargables	18
3.3.2 Sistema de supercondensadores	19
3.3.3 Sistema híbrido de supercondensadores y baterías ion-litio	21
3.4 Generadores piezoeléctricos a partir del viento	22
3.5 Referencias del capítulo	29
4. Estado del arte en la arquitectura	33
4.1 Vibro-wind	33
4.2 Estructura de MEMS de ZnO	37
4.3 Solar Ivy	40
4.4 Södern torn stockholm	42
4.5 Referencias del capítulo	45
5. Conclusiones	47

6. Recomendaciones de diseño49

Justificación del tema

La idea de desarrollar este tema surge por la inquietud de encontrar información acerca de generadores de viento más efectivos para ser utilizados en la obtención de energía en entornos urbanos. Además, con el requerimiento de que fueran sistemas integrables a los edificios.

Los sistemas piezoeléctricos son dispositivos diseñados para obtener “energía limpia”, adicionalmente, permiten dar un toque estético ya que pueden ser integrados en “fachadas cinéticas”. Por lo anterior, se optó por investigar más sobre esta tecnología.

Por otro lado, la ventaja de usar el viento como fuente de energía es que está presente durante las 24 horas del día, a diferencia de los sistemas solares que solo son efectivos durante las horas de sol.

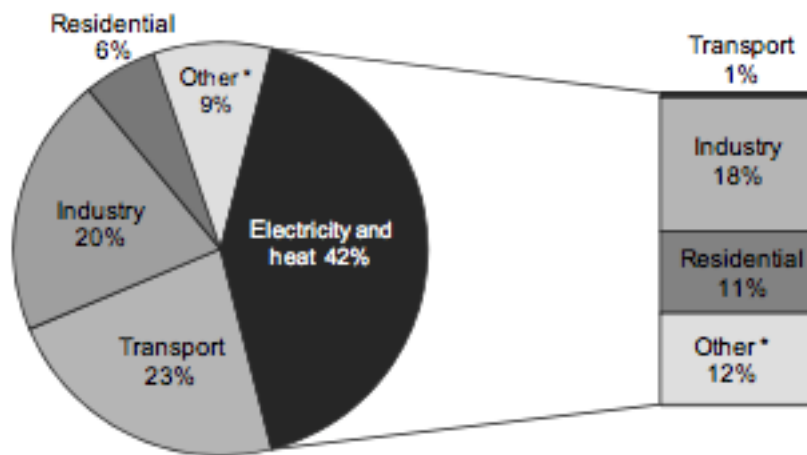
Finalmente, dada la importancia de la información por recabar, se consideró de gran interés aportar ideas con base en el análisis de la misma, que condujeran a la posibilidad de aplicar los sistemas piezoeléctricos a partir del viento, en edificios de áreas urbanas.

Delimitación del ambito de estudio

Se estudiará la posibilidad de emplear los sistemas piezoeléctricos en la arquitectura. El trabajo cuenta con ejemplos de diferentes dispositivos que pueden ser utilizados en edificios de cualquier tamaño, desde una vivienda unifamiliar, hasta edificios medianos y rascacielos. Estos dispositivos están proyectados para trabajar con velocidades de vientos características del entorno urbano, pudiéndose usar desde velocidades de 2 m/s.

Introducción

La demanda de combustibles fósiles y de carbón para generar energía eléctrica crece cada día más, este tipo de energía es costosa en términos monetarios y medio ambientales, ya que emiten toneladas de partículas de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera contribuyendo al efecto invernadero y a la contaminación del medio ambiente. Además, este tipo de energía es finita.



Img. 1. Emisiones de CO₂ por sector. *Fuente: International Energy Agency 2012*

El sector que más partículas de CO₂ emite es el de producción de energía eléctrica y calor, representando más del 40 por ciento del total de emisiones a nivel mundial; se genera para cubrir necesidades en edificaciones principalmente para industria o de tipo residencial.

Es por eso, que desde hace décadas científicos e investigadores se han dado a la tarea de encontrar nuevas fuentes de energía que sean limpias y renovables, como la energía eólica. Sin embargo, hay algunas limitaciones en los

generadores de energía eólica tradicionales, por ejemplo: el uso de turbinas de rotación grande para cosechar la energía del aire requiere una inversión financiera y de infraestructura significativas, amplia área de bienes raíces y un compromiso a largo plazo; además, se tiene que tomar en cuenta el factor del ruido que producen estas turbinas, por lo que suelen utilizarse en las afueras de la ciudad.



El edificio Strata SE1 se encuentra en Londres y se promocionó en su momento (2010), como el primer edificio con turbinas eólicas integradas al diseño de la fachada. Se calcula que las tres turbinas de viento pueden producir hasta 50 MW/h de energía eléctrica al año, que es aproximadamente el 8% del consumo total de energía del edificio. Cada turbina puede producir un máximo de 19 kW de potencia de salida.

Img. 2 Edificio Strata SE1, Londres.

Las tres turbinas tuvieron un coste extra de £1.5 millones en total, pero solo pueden producir un 8% de las necesidades de energía del edificio. Con esos recursos, los diseñadores hubiesen podido diseñar algo que excediera esas expectativas.

A pesar de utilizar turbinas de cinco palas por encima de las de tres palas, las cuales reducen el ruido aéreo causado por el giro de las turbinas eólicas, las alternativas consideradas por los diseñadores no son suficientes. Los residentes se han quejado por el ruido y las vibraciones causadas por los aerogeneradores. Para reducir la vibración, cada turbina se cambió y se montó con cuatro

amortiguadores contra la vibración, que puede prevenir que las turbinas tiemblen mientras giran. Sin embargo, los nuevos informes siguen mostrando que hay cierta cantidad de ruido y vibraciones que no han sido resueltos, y se sugirió que las turbinas deben apagarse entre 11 p.m.-07 a.m. cada noche. Como resultado, se ha observado que las cuchillas no giran durante muchas partes del día bajando considerablemente la energía generada.

En el caso de las turbinas eólicas en pequeña escala que son utilizables en edificios, no han demostrado ser muy efectivas en la relación generación de energía/precio. Es por eso que, es de gran interés buscar otras opciones que tengan aplicación en entornos urbanos donde los espacios son restringidos, por ejemplo colocarlos alrededor de los edificios, como una alternativa a los aerogeneradores rotativos convencionales.

Las tecnologías para la recolección de energía (Energy Harvesting) son opciones de generación de energías limpias, generalmente en escalas pequeñas y son utilizadas para alimentar pequeños dispositivos, que lo hacen de continuamente. Con esto se elimina la necesidad de baterías, lo que resulta de gran utilidad en sensores remotos donde no hay fácil acceso.

En el presente trabajo se analiza a fondo el funcionamiento de los sistemas piezoeléctricos para generadores de energía, que representan un tipo de opción de las tecnologías de recolección de energía; asimismo, se presentan aplicaciones a mayor escala para el suministro de energía en edificios. Considerando que los sistemas piezoeléctricos son capaces de transformar la energía mecánica como la vibración, en energía eléctrica, se estudian dispositivos para cosechar la energía de la vibración inducida por el viento.

Tomando en cuenta que uno de los retos de mayor trascendencia para la arquitectura moderna es considerar la auto sustentabilidad en los proyectos de diseño para cualquier construcción, en este trabajo, se plantea una propuesta de aplicación de los sistemas piezoeléctricos en el diseño de los edificios.

1. Objetivos

1.1 Objetivos Generales

Hacer un análisis extensivo de los avances de los sistemas piezoeléctricos para su posible aplicación en edificios, para transformar la energía del viento en energía eléctrica.

1.2 Objetivos particulares

- 1) Analizar las partes que componen un sistema para la recolección de energía.
- 2) Recopilar información actualizada sobre los sistemas piezoeléctricos que convierten la energía del viento en energía eléctrica y que han demostrado ser eficientes.
- 3) Proponer alternativas innovadoras del uso de sistemas piezoeléctricos para ser aplicados en las diferentes partes de un edificio.

2. Estado del arte científico

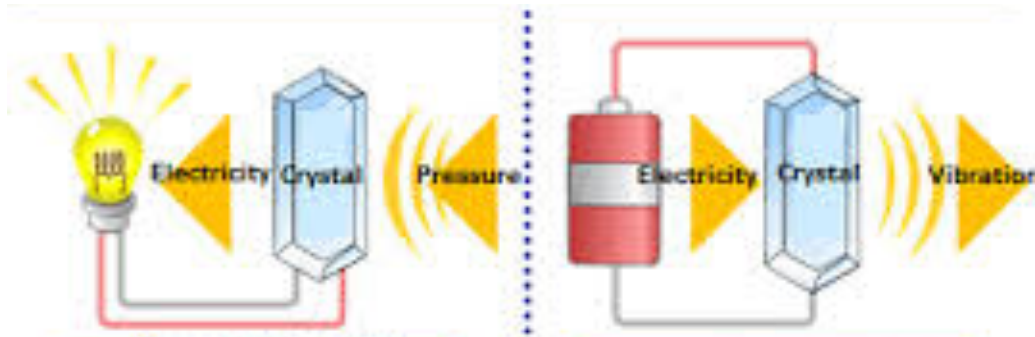
Se estudia la naturaleza del fenómeno de la piezoelectricidad, los tipos de materiales que lo contienen y las aplicaciones que tiene en general. Por ultimo se verá que es el “energy harvest” (recolección de energía) y sus diferentes métodos para recolectar energía.

2.1 Piezoelectricidad

La piezoelectricidad es la carga eléctrica que se acumula en ciertos materiales sólidos (tales como: cristales, ciertas cerámicas y la materia biológica, como el hueso, el ADN y diversas proteínas) [1] en respuesta a la tensión mecánica aplicada. La palabra significa electricidad resultante de la presión. Se deriva del griego piezo o piezein (πιέζειν), lo que significa apretar o prensar.

El efecto piezoeléctrico se entiende como la interacción electromecánica lineal entre la mecánica y el estado eléctrico en materiales cristalinos sin simetría de inversión. [2] Es un proceso reversible en que los materiales que exhiben el efecto piezoeléctrico directo (la generación interna de carga eléctrica resultante de una fuerza mecánica aplicada) también exhiben el efecto piezoeléctrico inverso (la generación interna de una tensión mecánica resultante de un campo eléctrico aplicado) . (Img. 3)

Por ejemplo, cristales de titanato de circonio de plomo (también llamados PZT) generarán piezoelectricidad medible cuando su estructura estática se deforma por aproximadamente 0,1 % de la dimensión original. Por el contrario, los mismos cristales cambiarán aproximadamente 0,1 % de su dimensión estática cuando un campo eléctrico externo se aplica al material. El efecto piezoeléctrico inverso se utiliza en la producción de ondas sonoras ultrasónicas . [3]



Img. 3 Efecto piezoeléctrico directo (Izq.) y efecto piezoeléctrico inverso (Der.)

2.1.1 Historia de la piezoelectricidad

El efecto piezoeléctrico fue descubierto por los hermanos Pierre y Jacques Curie en 1880, los primeros experimentos se realizaron en cristales especialmente preparados como el cuarzo, topacio, turmalina, azúcar de caña y sal de Rochelle [4]. Mientras los hermanos Curie predijeron y demostraron que la electricidad es generada a partir de la tensión aplicada para dar el efecto piezoeléctrico directo, no probaron el efecto contrario. El efecto inverso (es decir, que la aplicación del campo eléctrico crea una tensión mecánica) fue matemáticamente probado por LIPPMAN posteriormente, en 1881, utilizando los principios termodinámicos fundamentales.

Aunque el descubrimiento piezoeléctrico fue un tema de gran interés científico, no fue hasta 1916, durante la Primera Guerra Mundial, Paul Langevin produjo el primer uso de ingeniería para un material piezoeléctrico en la forma de detección de submarinos ultrasónica.

Desde la segunda guerra mundial, el desarrollo de dispositivos y materiales piezoeléctricos en los Estados Unidos se ha mantenido dentro de las empresas que hacen el desarrollo. Nuevos materiales fueron desarrollados como los cristales de cuarzo que fueron el primer material piezoeléctrico explotado comercialmente, pero los científicos buscaron materiales de mayor rendimiento. Por el contrario, los fabricantes japoneses compartieron sus hallazgos, superando rápidamente los desafíos técnicos y de fabricación y la creación de nuevos mercados. Desde finales de los 60, los esfuerzos de los japoneses en la investigación de materiales ha tenido como resultado la creación de materiales cerámicos piezoeléctricos competitivos con los materiales de Estados Unidos, con la ventaja de que están libres de restricciones de patentes caras. Principales

desarrollos piezoeléctricos japoneses incluyen nuevos diseños de filtros de cerámica piezoeléctrica para radios y televisores, zumbadores piezoeléctricos y transductores de audio que se pueden conectar directamente a los circuitos electrónicos; también los encendedores piezoeléctricos, que generan chispas para sistemas de encendido en motores pequeños (y encendedores de gas-parrilla) por la compresión de un disco de cerámica. Además, transductores ultrasónicos que transmiten ondas de sonido a través del aire habían existido desde hace bastante tiempo, pero su primera aplicación para su uso comercial importante, fue en los primeros mandos a distancia para televisión.

Estos transductores ahora se montan en varios modelos de automóviles, ayudando al conductor a determinar la distancia desde la parte trasera del coche a cualquier objeto que pueda estar en su camino. [5]

2.1.2 Materiales Piezoelectricos

Hay materiales con propiedades piezoeléctricas en estado natural como el cuarzo, turmalina y sal de Rochelle, entre otros. Ejemplo de materiales artificiales son: Titanato de circonio de plomo PZT), Óxido de cinc (ZnO), Fluoruro de polivinilideno (PVDF). Estos últimos tres, son los más comunes para aplicaciones de recolección de energía.

Los tres grupos de materiales piezoeléctricos más comunes son: Cristales individuales, cerámicos, y polímeros (Cuadro 1).

Materiales piezoeléctricos	Ejemplos
Cristal individual	Cuarzo, Niobato de magnesio de plomo- titanato de plomo (PMN-PT)
Cerámicos general	Oxido de zinc, nitrito de aluminio, Titanato de circonio de plomo (PZT), Niobato de potasio de sodio (KNN), Titanato de bario (BT)
Polímeros Duros y suaves	PZT4, PZT8, PZT5A, PZT5H, PVDF

Cuadro 1. Clasificación de materiales piezoeléctricos y ejemplos

Una visión más profunda en la estructura cristalina de mono-cristales y cerámicos propone que 20 de los 32 grupos puntuales cristalográficos son piezoeléctricos debido a su entramado asimétrico. Por otra parte, 10 de ellos son polares y se llaman piroeléctrico. Un subgrupo tiene polarización conmutable y se llama ferroeléctrico. La superposición de los efectos piezoeléctricos y ferroeléctricos aumenta el rendimiento electromecánico. Además de ser uno de los cerámicos más conocidos, PZT también está disponible comercialmente en grandes cantidades y por un precio asequible.

Los cerámicos PZT duros se caracterizan por histéresis reducida, baja despolarización, y bajas pérdidas, y por lo tanto, se utilizan para transductores de ultrasonidos de alta potencia y sensores con mayor estabilidad de temperatura.. Las áreas de aplicación típicas son de baja frecuencia, actuadores de alta tensión y sensores con alta sensibilidad.

A veces, los piezocerámicos para aplicaciones de sensor, se especifican como un posible candidato para aplicaciones de generador. Sin embargo, los materiales cerámicos apropiados para los generadores piezoeléctricos, especialmente diseñados para el uso en electrónica, no están disponibles comercialmente. [6]

2.1.3 Aplicaciones

Los materiales piezoeléctricos hacen la conversión de la energía ambiental disponible a electricidad posible donde la vibración y la fuerza de presión estén disponibles. Las aplicaciones más básicas de esta tecnología se encuentran en los mecheros para cigarrillos o de cocina, donde se ejerce una presión sobre un cristal y éste desprende una pequeña carga de energía en forma de chispa para encender el gas. Otra aplicación muy común es en los relojes de cuarzo, para eliminar la necesidad de baterías.

En aplicaciones para “Energy Harvest” se encuentran mayormente como generadores para la autonomía de pequeños dispositivos que no requieren mucha energía, como diferentes tipos de sensores; de esa manera se elimina la necesidad de baterías.

Últimamente, el uso de materiales piezoeléctricos en suelos, se experimentó en la estación de trenes en Tokio Japón y pistas de baile. (Img. 4 y 5)



Img. 4 Pista de baile discoteca “WATT” en Rotterdam.



Img. 5 Estación de tren Tokio, Japón.

En un estudio realizado por Rocha et al. (2010), también experimentaron integración de los materiales piezoeléctricos en suelas de zapatos. Se ha informado que la energía obtenida de los movimientos humanos se puede utilizar para funcionar aparatos electrónicos. [7]

2.2 Energy Harvest

“Energy Harvesting” se define como la captura de pequeñas cantidades de energía de una o más fuentes que se encuentran alrededor, acumulándola y almacenándola para su uso posterior. También llamada “Energy scavenging” o en castellano “Sistemas de recolección de energía”. [8]

-Tipos de energía de entrada en los sistemas de recolección de energía:

Energía Mecánica: Se basa en pequeñas vibraciones y tensiones mecánicas.

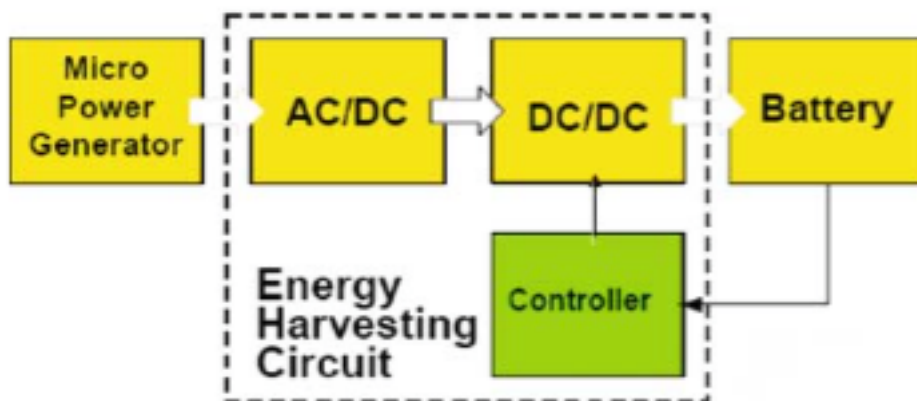
Energía Térmica: Cambios de calor. Utilizada sobre todo en hornos y calentadores industriales.

Energía Solar: Mediante la captura de la luz solar a través de sensores fotovoltaicos (fotodiodos, fototransistores, células fotovoltaicas). También es posible su funcionamiento con luz artificial.

Energía Electromagnética: Basándose en las inductancias y en su comportamiento cuando son excitadas por un campo magnético.

Otros tipos de energía: energía química, biológica, entre otras. [7]

Un circuito simple de “Energy Harvesting” consiste en un diodo rectificador (AC/DC) y un convertidor DC-DC, como se muestra en la figura (6) . La adición de este convertidor DC-DC ha mostrado una mejora de recolección de energía en un factor de 7. [9].



Img. 6: Circuito simple para cosecha de energía.

2.3 Referencias del capítulo

- [1] Holler, F. James; Skoog, Douglas A; Crouch, Stanley R (2007). "Chapter 1". *Principles of Instrumental Analysis* (6th ed.). Cengage Learning. p. 9.
- [2] Gautschi, G (2002). *Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers*. Springer.
- [3] Krautkrämer, and H. Krautkrämer (1990). *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer.
- [4] Manbachi, A. and Cobbold R.S.C. (2011). "Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection". *Ultrasound* **19** (4): 187–196.
- [5] Imran Patel (2011). Ceramic Based Intelligent Piezoelectric Energy Harvesting Device, *Advances in Ceramics - Electric and Magnetic Ceramics, Bioceramics, Ceramics and Environment*, Prof. Costas Sikalidi
- [6] Thomas Rödiger and Andreas Schönecker (2010) "A Survey on Piezoelectric Ceramics for Generator Applications"
- [7] Oriol Barrufet Ibós (2011) "Sistema piezoelèctric d'energy harvesting per l'enllumenat d'evacuació d'emergència d'un edifici" 1, PFC Ingeniería Industrial Universidad Politécnica de Cataluña.
- [8] Heung Soo Kim, Joo-Hyong Kim and Jaehwan Kim (2011) "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration"
- [9] Shashank Priya, Daniel J. Inman, (2009) "Energy Harvest Technologies", Springer pp. 56

3.Estado del arte ingeniería

En este capítulo se analizan las partes que componen un dispositivo para “energy harvest” empezando por los transductores piezoeléctricos, que es el elemento que contiene el material piezoeléctrico, siguiendo con los sistemas para el control de la energía y que termina en el almacenamiento de la misma. Después veremos como se aplican para el diseño y experimentación de dispositivos que son capaces de generar energía eléctrica a partir de movimientos mecánicos generados particularmente por el viento.

3.1 Transductores piezoeléctricos

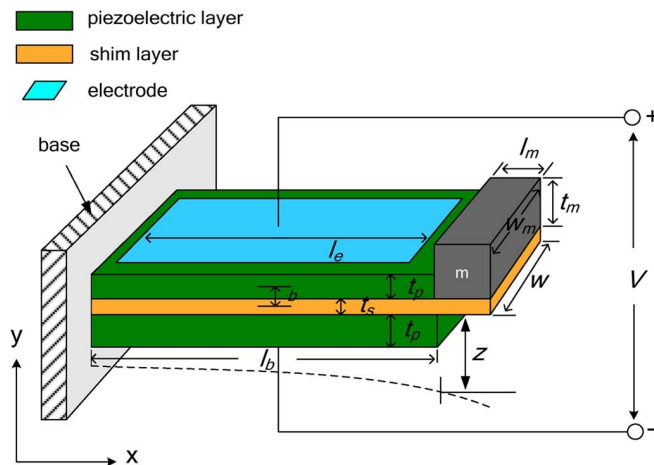
Los transductores convierten una forma de energía en otra. Hay dos tipos de transductores piezoeléctricos, los que funcionan con el efecto piezoeléctrico directo (sensores) y los que funcionan con el efecto inverso (actuadores). Los sensores convierten la energía mecánica en eléctrica, es por eso que les llaman “generadores” y los actuadores convierten la energía eléctrica en energía mecánica, es por eso que se les llama “motores”. En la mayoría de los casos el mismo elemento puede ser utilizado para realizar las dos tareas.

Hay muchos tipos de transductores piezoeléctricos pero pocos trabajan mediante vibración. Una viga en voladizo piezoeléctrico es la forma más común para la recolección de la energía de las vibraciones. Puede ser en forma de unimorfo (unimorph) con una capa piezoeléctrica en la parte superior de la viga o en la forma de e (bimorph) con una capa piezoeléctrica en ambas superficies, por arriba y debajo de la viga, respectivamente. La estructura en voladizo proporciona bajas frecuencias resonantes, reducidas aún más mediante la adición de una masa en el extremo de la viga, en una estructura de bajo volumen y altos niveles de tensión en las capas piezoeléctricas.

El generador piezoeléctrico de viga en voladizo bimorph (bimorfo) ha sido desarrollado y modelado matemáticamente por Roundy et al. Como se muestra en la imagen, el generador prototipo fue fabricado uniendo una capa de PZT-5A a cada lado de una cuña central de acero de anchura constante con una masa de prueba hecha por níquel y aleaciones de tungsteno en el extremo libre. El impulsor de condición de vibración se ajusta para ser de $2,5 \text{ m / s}^2$ de

aceleración de entrada y a 120 Hz, que resultaron ser los valores típicos de vibración que se produce en edificios de oficinas, entornos de fabricación, y en los hogares.

La potencia de salida máxima del prototipo es de 80 mW bajo la carga resistiva de 250-kW. Se propone el modelo de circuito equivalente de dicho generador piezoeléctrico en voladizo, cuyo resultado analítico ha sido verificado para que sea aceptable de acuerdo con la de los experimentos antes mencionados. Después este modelo se utilizó como base para optimizar las dimensiones de diseño del generador dentro de una restricción general de tamaño de 1 cm³. Dos diseños fueron construidos a partir de PZT-5H unidos a una cuña central de latón de 0,1 mm de grosor comprado de “Sistema Piezo, Inc.” Un diseño usando una capa PZT de espesor 0,28 mm, 3,2 mm de anchura y 11-mm de longitud de la viga produce hasta 375 μ W de potencia de salida con una aceleración de entrada de 2,5 m / s² a 120 Hz. El tamaño de la “masa de prueba” de tungsteno es 471.3 mm³ (Img. 7). [2]



Img. 7. Generador tipo Viga en voladillo

3.2 Circuito de control (Transformación de la energía)

Un circuito de control es importante para la regulación de la potencia que entra en el sistema de almacenamiento de energía. Cuando la energía entra en el sistema, un condensador o supercondensador inicial carga hasta un voltaje límite, después de lo cual se permite a la carga fluir a la batería de ion-litio. El voltaje de la batería se controla para evitar la sobrecarga de la batería. Cuando la potencia de entrada es insuficiente para cargar la batería, el voltaje del supercondensador se reduce significativamente, por lo que el ciclo termina. En el sistema híbrido, la carga de la batería se conserva hasta que el supercondensador se descarga por debajo de límite de tensión y la batería entra en un ciclo de descarga para suministrar energía a la carga [3]. Un algoritmo similar se puede utilizar en circuitos de gestión de energía para garantizar la longevidad de una batería de ion-litio. Este estudio encontró que el número de ciclos de carga / descarga disminuye por un factor de cuatro cuando se utiliza un sistema híbrido supercondensador y baterías Li-ion.

Otro componente del circuito de control es el convertidor intensificador DC-DC o también llamado convertidor elevador, que puede aumentar en gran medida la eficacia de un sistema de almacenamiento. Convertidores DC-DC se utilizan comúnmente para regular la salida de fuentes altamente variables, tales como fuentes de viento y celdas solares. Hay de dos tipos, convertidores de modo interceptor y convertidores “buck-boost” (impulso de carga). Ambos utilizan un condensador, un inductor y un interruptor con otros componentes. El inductor o condensador se utiliza para almacenar energía, que se libera cuando el interruptor cambia de posición. El inductor de acoplamiento es crucial para el rendimiento del diseño, y en función del circuito, la eficiencia de potencia del convertidor oscila entre el 67% y el 86% [4].

Hay una variedad de convertidores DC-DC comercialmente disponibles que podrían ser utilizados para integrar los sistemas de baja tensión tal como un supercondensador con voltajes que serían de otro modo incompatibles, tales como una batería. Por ejemplo, el convertidor “buck-boost” LTC3533 de “Linear technologies” funciona a voltajes de entrada y salida de 1,8 V a 5,5 V con eficiencias de hasta el 96%. El LTC3785 es un dispositivo similar que se ha demostrado para producir 3,3 V a 3 A partir de una fuente de entrada de 2,7 V a 10 V con eficiencias tan altas como 96%. La eficiencia y el consumo de energía del convertidor DC-DC son factores importantes a considerar en el diseño del sistema de almacenamiento.

3.3 Almacenamiento de la energía

El componente final de un recolector de energía es el sistema de almacenamiento. El sistema de almacenamiento debe ser capaz de almacenar la energía rectificadas por el circuito de acondicionamiento. Sistemas de almacenamiento potenciales incluyen baterías y supercondensadores controlados por los cargadores inteligentes que pueden prevenir sobre-descarga y proporcionar salidas reguladas.

3.3.1 Sistema de baterías recargables

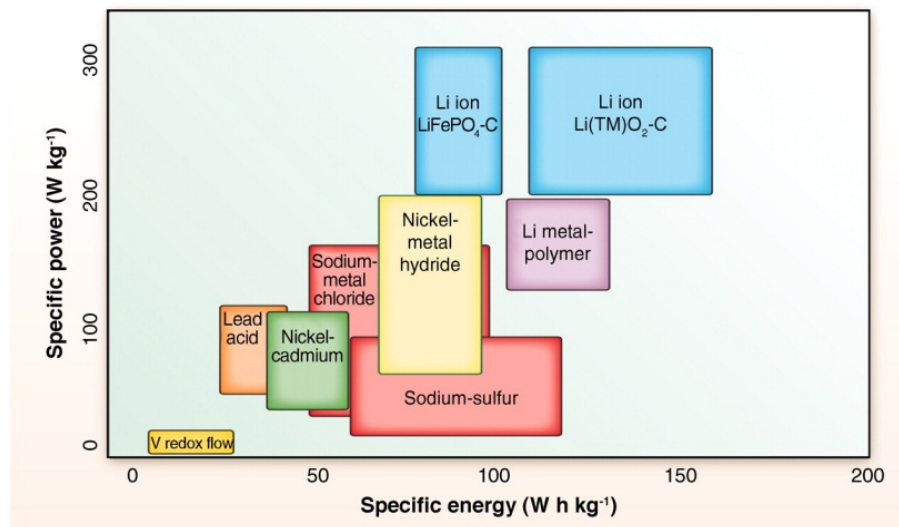
Sistemas de baterías recargables comunes utilizados para el almacenamiento de energía incluyen el ácido de plomo (ácido-Pb), hidruro metálico de níquel (NiMH), de níquel-cadmio (NiCd), de azufre de sodio (NaS), hidruro de sodio metálico (NaMH) y de iones de litio (Li-ion). Entre las características relevantes para el desempeño de un sistema de baterías incluyen su capacidad de energía, la densidad de energía, esperanza de vida, la temperatura de funcionamiento y la tasa de autodescarga.

La capacidad de energía se refiere a la energía total que una batería puede almacenar. Capacidad de potencia es la medida máxima de energía que puede ser transferida dentro o fuera de la batería con el tiempo. La densidad de energía y densidad de potencia son la capacidad de energía y potencia por unidad de volumen, respectivamente. Alta capacidad de energía y potencia son deseables en una batería. La vida útil de la batería es el número de ciclos de carga y descarga que la batería puede realizar a través del tiempo antes de que deba ser reemplazado. La temperatura de funcionamiento es la temperatura óptima de funcionamiento de la batería. Las altas temperaturas disminuyen la vida útil, mientras que las temperaturas bajas disminuyen la capacidad de la potencia para la mayoría de las baterías. Tasa de auto-descarga es la cantidad de energía de la batería que se desecha con el tiempo cuando no está conectado a una carga [5].

Cada sistema de batería tiene diferentes propiedades de almacenamiento. De iones de litio, las baterías de NiCd y NaS tiene la densidad de potencia más alto entre las baterías. NiCd y baterías de ácido-Pb son excelentes proveedores de energía pulsada, pero son grandes y pesados. Además, las baterías de ácido-PB y NiCd tienen altas densidades de energía, pero son difíciles de recargar, debido a esto, no se desempeñan bien en aplicaciones en las que las baterías requieren recargarse muchas miles de veces en un período de vida. Las baterías NaS son más pequeñas y ligeras que las baterías de NiCd. También tienen alta densidad

de energía, alta flexibilidad ciclica, bajo mantenimiento y alta eficiencia coulombica. Sin embargo, las baterías NaS son sensibles a la sobrecarga y sobre-descarga y operan a temperaturas muy altas, que van desde 270°C - 350°C. Su requisito de entrada de calor constante es inconveniente y poco realista para un sistema auto-sostenible [6].

Baterías de ion-litio tienen el mayor potencial en términos de sistemas de almacenamiento de batería, superan a las baterías NiMH, NiCd y ácido-Pb en el suministro de energía y reteniendo alta potencia específica por al menos un factor de 2,5, como se muestra en la Img 8. Son particularmente valiosos debido a su pequeño tamaño, peso ligero, de alta densidad de energía, así como sus voltajes de salida y alta eficiencia de almacenamiento. Las baterías de ion-litio tienen una baja auto-descarga, mientras no esté en uso, una de las relaciones de peso-energía más altos y sufren menos de efecto memoria. Además, tienen un ciclo de vida largo y capacidad de velocidad [5]. Las desventajas de las baterías de ion-litio incluyen alto coste y un efecto de auto-daño cuando está profundamente descargada. Cuando esto ocurre, la vida útil de la batería puede caer a niveles peligrosamente bajos. A pesar de las desventajas de las baterías de ion-litio, siguen siendo el dispositivo de batería superior para el diseño.



Img. 8. Potencia y energía específica de diferentes baterías [5]

3.3.2 Sistema de supercondensadores

Supercondensadores, también conocidos como supercapacitores, ultracondensadores y condensadores electroquímicos, se han utilizado con éxito en un número de aplicaciones. Se utilizan para el frenado regenerativo en los vehículos de transporte, para los productos de consumo, tales como teléfonos celulares y cámaras, y para los recolectores de energía solar y eólica [7].

La estructura de un supercondensador permite capacitancias 100 a 1.000 veces mayores que las de los condensadores tradicionales. La gran capacitancia de los supercondensadores los hace una opción de almacenamiento de energía viable para diversas aplicaciones. Un supercondensador puede ser modelada eléctricamente como dos condensadores con una resistencia interna en serie; sin embargo, esta resistencia es nominal en comparación con la resistencia interna de una batería. Debido a su menor resistencia, los supercondensadores pueden tener más de diez veces las densidades de potencia que las baterías normales.

Mientras supercondensadores pueden operar en un rango relativamente amplio de temperaturas y voltajes, -40°C a 85°C y 0,8 a 2,0 voltios por celda, que se hacen funcionar bien dentro de estos intervalos para evitar que el tiempo de vida sea acortado significativamente. Por cada 100 mV o 10°C que un supercondensador se hace funcionar por encima de su voltaje nominal y temperatura, la vida útil del supercondensador se reduce a la mitad. Además, si el supercondensador se hace funcionar fuera de su rango de voltaje, las reacciones químicas pueden comenzar a ocurrir, haciendo que el supercondensador actúe más como una batería. Las reacciones de oxidación y reducción resultan en la formación de impurezas dentro de la célula lo que disminuye el tiempo de vida y la capacitancia del supercondensador [8].

A diferencia de las baterías, que almacenan energía a través de reacciones químicas dentro de la célula, supercondensadores almacenan y transfieren físicamente la carga a través de las placas de electrodo. Esto significa que supercondensadores pueden durar a través de cientos de miles de ciclos, mientras que las baterías tienen un tiempo de vida significativamente más corta. Los supercondensadores tienen una densidad de potencia en el rango de 18 kW / kg, significativamente mayor que la de una batería de ion-litio. La capacidad de un supercondensador para cargar y descargar en decenas de segundos es beneficioso para muchas aplicaciones, especialmente aquellas en las que hay una fuente de carga variable, como en la cosecha de energía con fuentes de energía renovables variables como el sol y el viento. Las baterías, por el contrario, toman horas para cargar o descargar completamente. Sin embargo, los supercondensadores carecen de una densidad de energía tan alta como la de las

baterías; Por lo tanto, para necesidades de gran almacenamiento de energía las baterías son más adecuadas.

Los supercondensadores son una opción de almacenamiento de energía viable sobre las baterías debido a su alta densidad de potencia, amplia gama de temperaturas de funcionamiento y una larga vida útil; sin embargo, hay algunas desventajas de supercondensadores que también deben ser considerados. Los supercondensadores son ideales para aplicaciones que requieren una descarga rápida, pero no para aquellos que requieren la descarga de energía lenta y constante. Muchas aplicaciones potenciales de un dispositivo piezoeléctrico requieren un sistema de almacenamiento para descargar energía a un ritmo constante. Un supercondensador es incapaz de almacenar una gran cantidad de energía debido a su baja capacidad de energía, lo que los hace inadecuado como único sistema de almacenamiento de energía [7].

3.3.3 Sistema híbrido de supercondensadores y baterías ion-litio

Un sistema híbrido con una batería de iones de litio y un supercondensador tiene las características deseables de ambos. Cualidades como la larga vida útil y una gran gama de temperaturas de funcionamiento de supercondensadores se complementan con la alta densidad de energía de las baterías de ion-litio. Una batería de iones de litio generalmente limita la longevidad de un sistema de almacenamiento. Sin embargo, el uso de un supercondensador para gestionar la carga de la batería de ion-litio aumenta la vida útil del sistema de almacenamiento. Las baterías de ion-litio normalmente se someten a un ciclo de carga que comienza con un período de carga de corriente constante, seguido de un período de carga de voltaje constante hasta que se alcance un estado lleno de carga (SOC). El período de carga de corriente constante, carga un 70% -80% de la batería en un 20% -30% del tiempo total de carga, mientras que el período de carga constante de voltaje tiene la función de cargar los 20% -30% que faltan, en el tiempo de carga restante. Con el fin de aumentar la longevidad de una batería de Li-ion, la carga debe ocurrir en una corriente de baja corriente; el número de ciclos de carga/descarga debe ser lo más bajo posible; y la batería no debe someterse a carga irregular en la etapa de voltaje constante, ya que esto disminuye la vida útil de la batería.

Un supercondensador reduce el número de ciclos experimentados por la batería suavizando las fluctuaciones de poder de la fuente, extendiendo así la longevidad del sistema de almacenamiento. Supercondensadores de acoplamiento a la

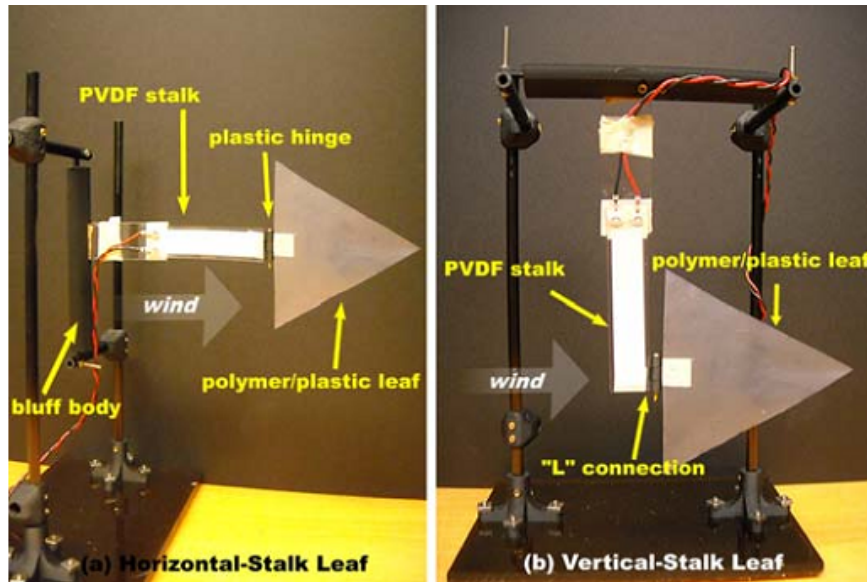
batería de iones de litio en el sistema de almacenamiento reducen el efecto de la capacidad de la tasa en la batería y aumenta el pico de corriente que se proporciona a la carga. Las descargas repetidas de alta corriente también reducen la vida de la batería y con ello la longevidad del sistema de almacenamiento. El supercondensador puede almacenar la energía de la batería durante los periodos de baja carga y liberar la energía extra necesaria durante los períodos de carga alta. Esto permite que todo el sistema proporcione una corriente de descarga pico global superior, sin exceder la corriente de descarga máxima permitida para la batería de iones de litio. El uso de un sistema de este tipo, aumenta la densidad de energía del sistema hasta en un 8% y extiende la vida útil del sistema de almacenamiento [3].

3.4 Generadores piezoeléctricos a partir del viento

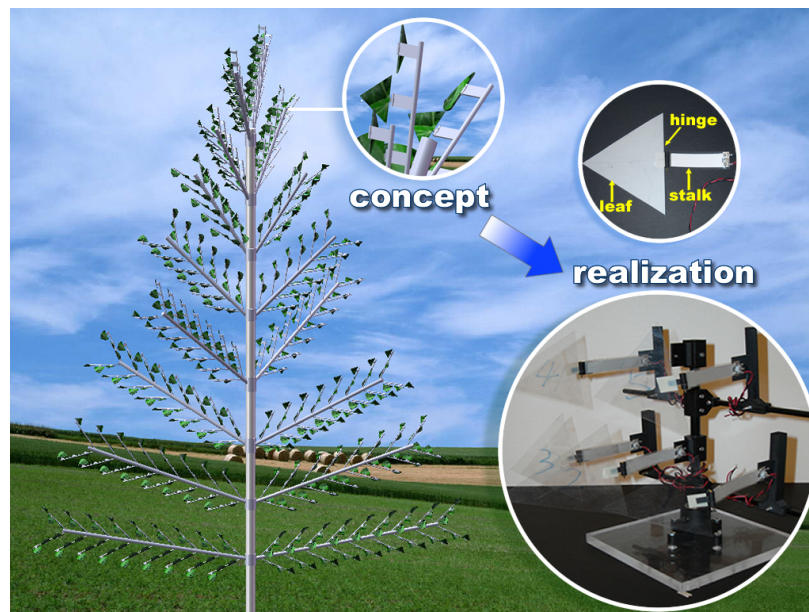
Los transductores requieren de presión mecánica o vibración para generar energía eléctrica, en los trabajos que veremos a continuación podremos ver los métodos que se utilizan para cosechar energía a partir del viento, utilizando diversos tipos de dispositivos compuestos de partes móviles que convierten la energía del viento en mecánica y posteriormente en energía eléctrica.

Recientemente la investigación sobre los generadores eléctricos “piezo–viento” ha ido progresando con la tendencia de aumento de fuentes de energía renovables.

Li et . al (2009) propusieron un nuevo diseño de tallo vertical de “tipo L” para cosechar más energía que se compone de un tallo con material PVDF, una bisagra de plástico y una hoja de polímero. Los vórtices causan las fuerzas de presión fluctuantes las cuales son perpendiculares al movimiento que conducen las vibraciones y la hoja se mueve a través de la fuerza de flexión y el momento del tallo de PVDF (Img. 9) .



Img. 9. Diferentes configuraciones del prototipo . (a) Hoja con tallo Horizontal, (b) Hoja con tallo vertical.

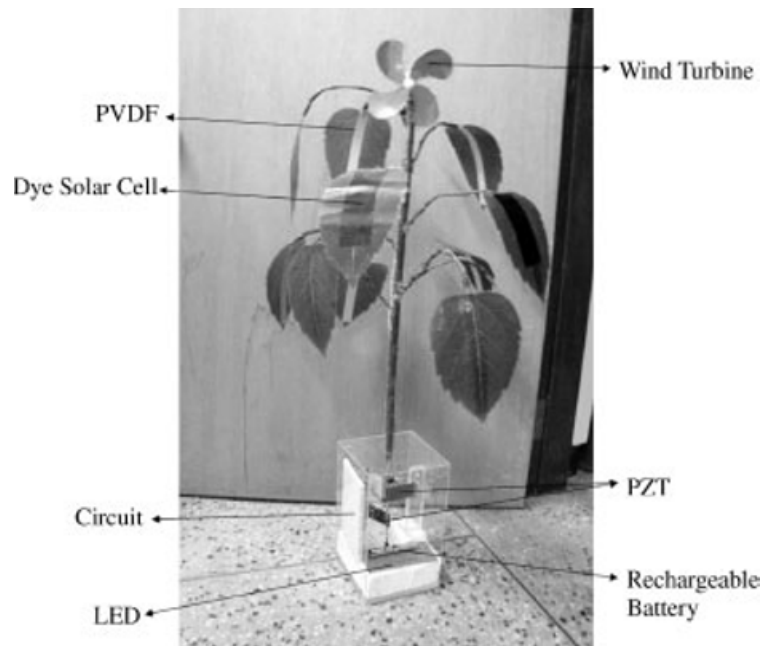


Img. 10. Diseño del concepto de árbol.

En la Img. 10 se muestra la colocación de los generadores piezoeléctricos en una estructura en forma de árbol. [9]

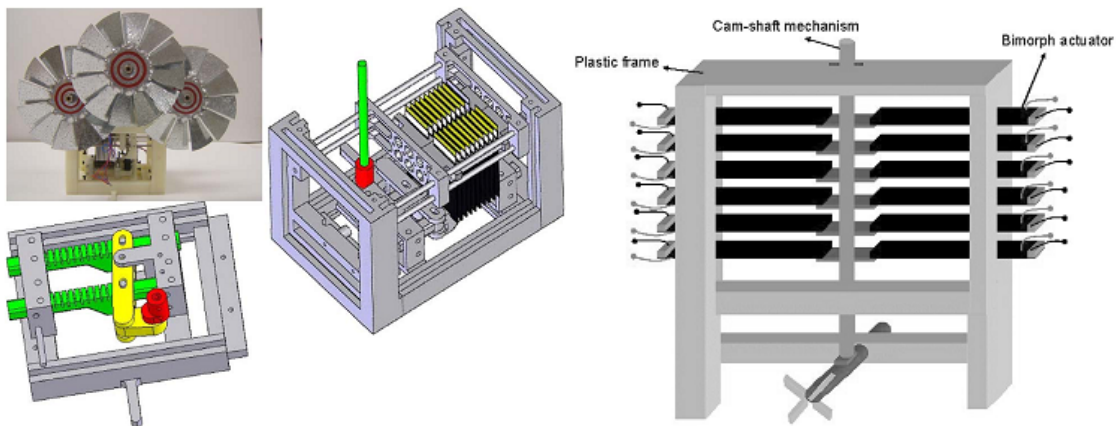
Además, S. J. Oh et. al (2009) hicieron un diseño para recolectar energía en forma de árbol mediante la incorporación de PVDF en las hojas y PZT en la parte

del tronco del árbol, donde la curvatura puede ser causada por el viento fuerte. PVDF están incrustados en las hojas, ya que son menos rígidas (Img. 11). [10]



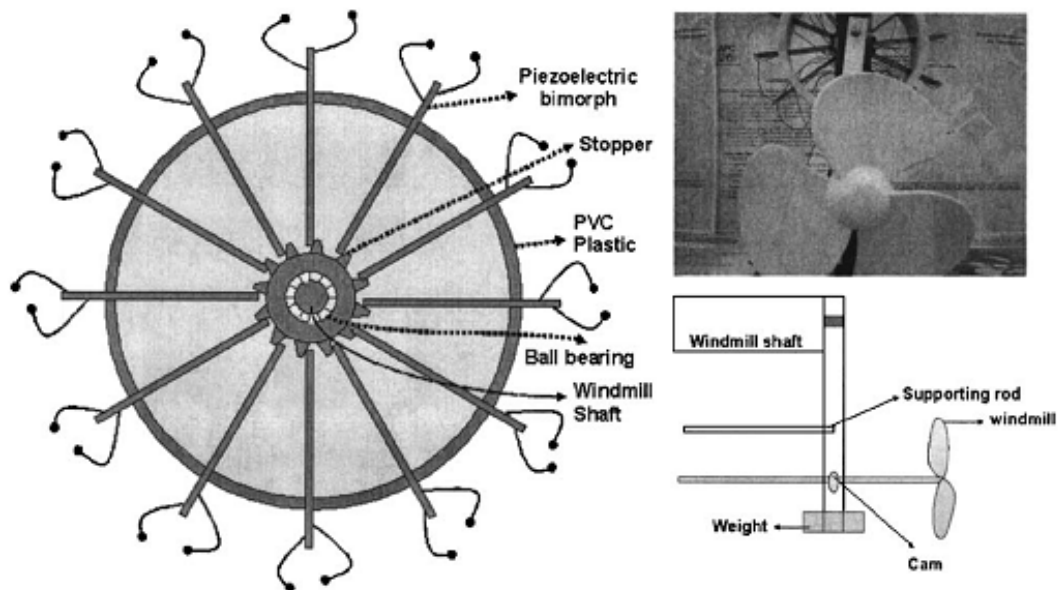
Img. 11. [10]

En el diseño de Chen (2007), “bimorfos” piezoeléctricos son colocados en dos columnas y 6 filas y entre columnas, un mecanismo de árbol de levas con seis ganchos rectangulares da movimiento a los bimorfos. Por mecanismo de movimiento giratorio de leva del eje obtenido a partir de ventilador se convierte a movimiento lineal por la altura de 4 mm y a la frecuencia de 12 Hz, 1,2 mW se obtiene a través de 1,7 k Ω (Img. 12). [11]




Img. 12. Diseño optimizado para generadores eólicos pequeños. (Izquierda), prototipo de generador eólico de movimiento rotativo a lineal (derecha).

Por otro lado, se desarrollan tipos rotatorios de generadores eólicos piezoeléctricos. Priya et al. (2005) diseñaron un molino de viento piezoeléctrico con diez bimorfos piezoeléctricos en forma de voladizo, el viento hace girar el ventilador y el torque generado mueve el “molino de viento”, por lo que los bimorfos golpean la rueda dentada del centro (Img. 13). A 10 mph de velocidad, se obtuvo una potencia de 7,5 mW a través de la carga óptima 6,7 k Ω . También, a medida que el número de bi-morfos aumenta, el voltaje de salida obtenido también aumenta, mientras que la carga que coincide, disminuye. [12]



Img. 13. Esquema del aerogenerador piezoeléctrico.

Datos de la patente:

Número de publicación	US8294336 B2
Tipo de publicación	Concesión
Número de solicitud	US 12/544,522
Fecha de publicación	23 Oct 2012
Fecha de presentación	20 Ago 2009
Fecha de prioridad 	18 Oct 2005
También publicado como	US20100052324
Inventores	Shashank Priya
Cesionario original	Board Of Regents, The University Of Texas Systems

Chen et. al (2007), [11] estudiaron la energía eléctrica generada por un tipo de entrada de viento AC y simuló las salidas del aerogenerador de tipo vertical bajo el flujo de vientos residuales. Para el área característica de 0.006 m y en la velocidad del viento de 14 m/s, la eficiencia es de alrededor de 60%, con el resultado de salida de 6,96 W y ya que el 90% es pérdida mecánica, 0.464 W podrían entregarse a un generador de tipo vertical. Mientras que simulaciones mostraron $10\mu W$ (nano watts) en energía de salida, la eficiencia global del generador piezoeléctrico se puede calcular en 0,003%.

En el trabajo realizado por Bryant et al. (2011), dos grados de libertad se utilizan por la deformación de la viga y la rotación de la solapa cerca de la junta, la cual permite una respuesta de aleteo modal y así sucesivamente se da la recolección de energía. El nivel de energía recolectada varía de acuerdo a la amplitud y frecuencia de los ciclos límite y también depende de las condiciones iniciales. La principal contribución de este trabajo, es la energía máxima que se puede alcanzar cuando el solape y la viga se van desviando con una fase de 90 grados de diferencia. (Img. 14)

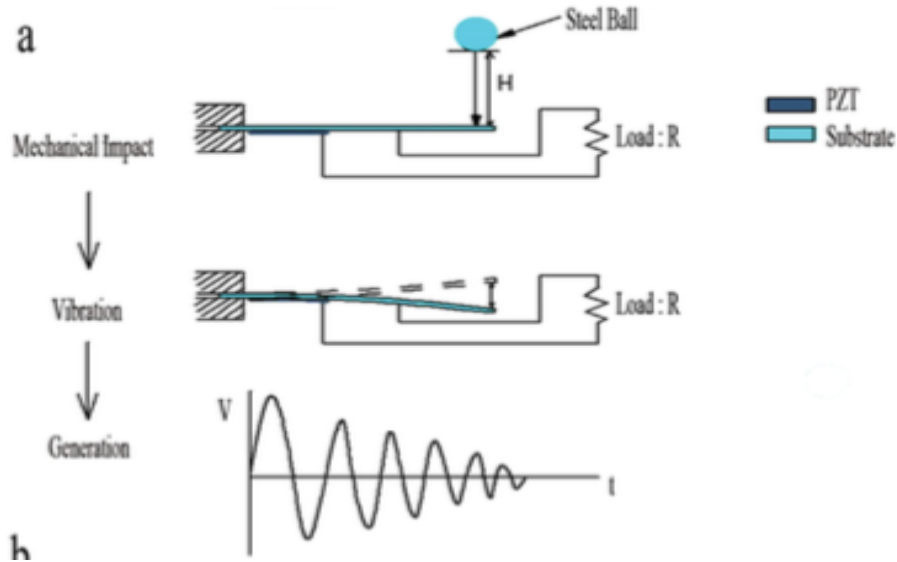


Img. 14 . Generador de tipo viga con dos grados de libertad.

De Merqui et al. (2010), propusieron una cancelación de la salida de electricidad en el modo aero-elástico acoplado de doble-torsión de un generador piezoeléctrico de voladizo de “tipo ala” en el modo continuo de electrodos; ellos propusieron el uso de electrodos segmentados. Esto permite la recolección de energía a altas frecuencias donde se observan modos de torsión en el ala. Mayores amplitudes mecánicas, significan que se puede observar mayor aprovechamiento de la energía con una baja amortiguación que se puede ver en la velocidad de aleteo. [11]

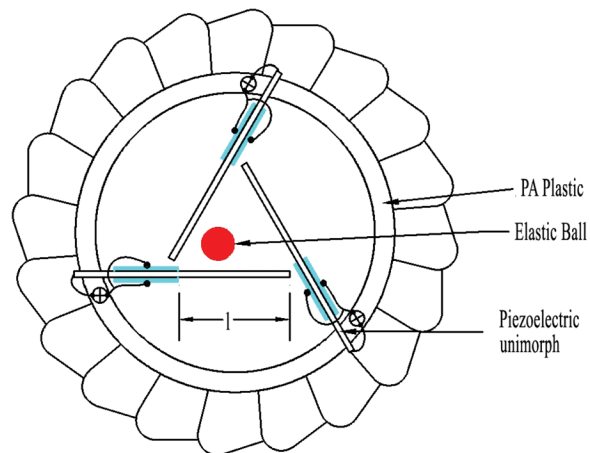
Para mejorar la potencia de salida de un colector de energía eólica piezoeléctrico de rotación, se propone provocar el impacto para permitir la excitación de vibración de modo efectiva de los voladizos piezoeléctricos y obtener la deformación óptima, lo que mejora la transformación de la energía mecánica / eléctrica[13]. La fuerza de impacto se introduce mediante la formación de un bimorfo piezoeléctrico en voladizo, polígono que está fijado en la circunferencia de la superficie interna de la rotación del ventilador. Bolas elásticas se colocan en el interior del polígono. Cuando el viento hace girar el dispositivo, las bolas golpean los voladizos piezoeléctricos, y por lo tanto la electricidad se genera por el efecto piezoeléctrico. El punto de impacto se elige cuidadosamente para utilizar el primer modo de flexión tanto como sea posible, y por lo tanto maximizar la eficiencia de la cosecha. El diseño permite que cada bimorfo sea golpeado en un área similar y cada bimorfo es golpeado en esa área en diferentes momentos. Como resultado, una frecuencia de salida relativamente estable se puede obtener. La frecuencia de salida también se puede cambiar por la elección de diferentes dimensiones bimorfos, que también harán al dispositivo más simple y reducirá los costos. Se construyó un prototipo de colector de energía piezoeléctrica que consta de doce voladizos piezoeléctricos (Img. 15). Los

voladizos piezoeléctricos fueron hechos de bronce fosforoso y el titanato de circonio plomo (PZT) basado en voladizo bimorfo.

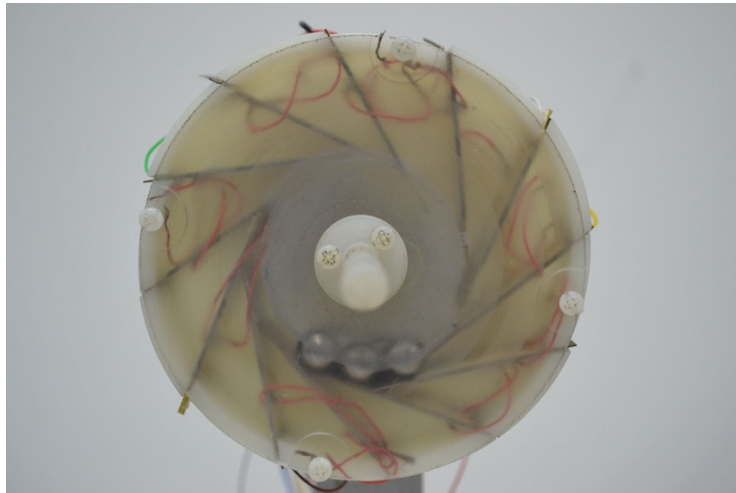


IMG. 15 Representación esquemática de una unidad básica del colector de energía piezoeléctrico de impacto inducido.

Tiene unas dimensiones de 47 mm x 20 mm x 0,5 mm, y las bolas elásticas se hicieron a partir de acero con un diámetro de 10 mm. La potencia de salida óptima DC era 613 IW a través de la resistencia 20 kX a una velocidad de rotación de 200 r / min con un diámetro del círculo inscrito de 31 mm. [13]



Img. 16. Diagrama esquemático del molino que muestra la disposición de los bimorfospiezoeléctricos



Img. 17 Prototipo de colector de energía piezoeléctrico rotatorio utilizando elementos para inducir el impacto.

3.5 Referencias del capítulo

[1] <http://www.piezo.com/tech2intropiezotrans.html> Capturado en Mayo 2015

[2] Alireza Khaligh (2010) “Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 57, NO. 3,

[3] F. Ongaro, S. Saggini, and P. Mattavelli. Li-ion battery-supercapacitor hybrid storage system for a long lifetime, photovoltaic-based wireless sensor network. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(9):3944–3952, 2012.

[4] A.Odabaee. Buck-boost dc-dc regulator evolve. *Electronics Weekly*, (2341):14–15, 2008.

[5] B. Dunn, H. Kamath, and J.-M. Tarascon. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 344(6058):938–935, 2011.

[6] K.C.DivyaandJ.Ostergaard.Batteryenergystoragetechonologyforpowersystems. *Electric Power Systems Research*, 79(4):511–520, 2009.

[7] ICPE '07. 7th Internatonal Conference on Power Electronics, 2007. *Energy storage technology markets and applications: ultracapacitors in combination with lithium- ion*, 2007.

[8] P. P. Barker. Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource appli- cations. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, 1:316–320, July 2002.

[9] Li S., Lipson H., (2009) " Vertical-Stalk Flapping-Leaf Generator For Parallel Wind Energy Harvesting", *Proceedings of the ASME/AIAA 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*.

[10] Myers, R., Vickers, M., Kim, H., Priya, S. (2007), "Small scale windmill", *Applied Physics Letters*, vol.90, no.5

[11] GülnihalÇevik, Mahmut F. Akşit, AsifŞabanoviç (2011) "Piezoelectric Wind Power Harnessing – An Overview" SET2011, 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies, İstanbul, TÜRKİYE, 4-7 (2011)

[12] Priya, S. (2005) , "Modeling of Electric Energy Harvesting using piezoelectric windmill", *Appl. Phys. Lett.* 87,

[13] Ying Yang, Qinlong Shen, Jiamei Jin, Yiping Wang, Wangjie Qian, and Dewang Yuan (2014) "Rotational piezoelectric wind energy harvesting using impact-induced resonance"

4.Estado del arte en la arquitectura

Para la utilización de dispositivos piezoeléctricos en la arquitectura la clave es la repetición, ya que la cantidad de energía que produce un solo elemento es muy poca. A continuación se muestran una serie de dispositivos que fueron diseñados para su implementación en la arquitectura.

4.1 Vibro-wind

"Vibro-wind" es un recolector de energía del viento a medida que fluye alrededor de los edificios comerciales y residenciales, a través del mecanismo de las estructuras vibratorias. La ciencia básica implica la extracción de energía a partir de cuerpos inducidos a vibrar por la acción de flujo de fluido y vórtices alrededor de las estructuras flexibles. El enfoque ha sido el de considerar los efectos del viento en múltiples estructuras flexibles que interactúan, como cientos de pequeños voladizos montados en una superficie. [1]

El oscilador Vibro-wind es una estructura compuesta que consta de una viga en voladizo piezoeléctrico a un bastidor en un extremo y se adhiere a una viga de acero de espesor de 0,006 pulgadas en el otro extremo. El extremo libre de la viga de acero se inserta en un cuerpo como espuma cuya forma es un cilindro de sección transversal no circular. La forma del cuerpo como y tamaño, desempeñan un papel en estos tres componentes del rendimiento. Se describen las características de un oscilador óptimo teórico. [2]

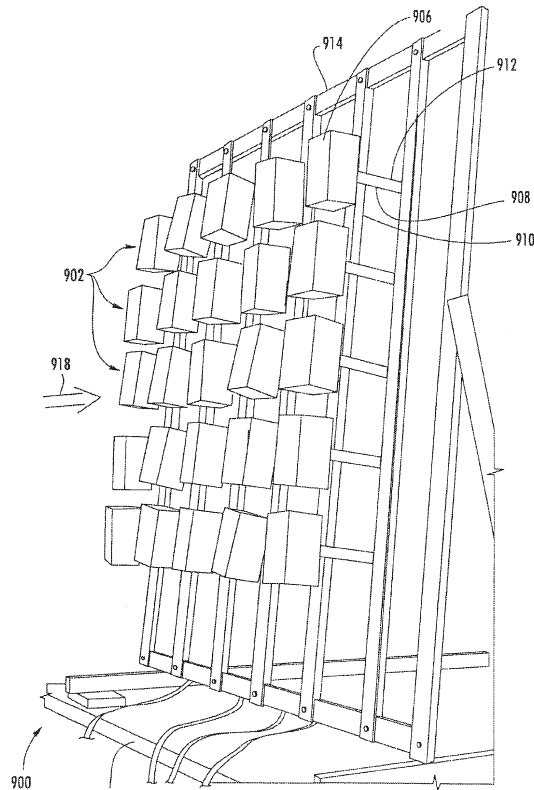


Img 18. Estructura Vibro-wind durante pruebas al aire libre.

En esta aplicación el viento excita decenas hasta cientos de pequeños elementos vibrantes en los paneles unidos a la estructura, la conversión de la energía cinética en energía eléctrica se pueden utilizar en la operación del edificio. Hay dos pasos cruciales en este proceso: una es la conversión de la energía eólica en la vibración y la segunda es la conversión de la energía cinética de vibración mecánica en energía eléctrica. Las estimaciones de potencia del dispositivo son comparables a los paneles solares y pueden complementarlos durante las horas nocturnas, sobre todo en las zonas urbanas (Img. 18).

Además de la generación de energía durante la noche en las zonas urbanas, los dispositivos vibro-viento pueden ser eficaces en entornos de velocidad del viento alrededor de 2-3 metros por segundo (m/s), por debajo de la turbina típica giratoria con velocidades de puesta en marcha de 9- 10 m/s . De este modo, la tecnología vibro-viento puede tener una mayor aplicabilidad que los sistemas rotativos en ambientes de poco viento.

Se construyó una estructura de 25 [5 x 5] osciladores para el estudio en un túnel de viento. Los osciladores están hechos de espuma de poliestireno y tienen una frecuencia natural en un rango de 8-10Hz. El conjunto más grande se puso a prueba en condiciones de viento al aire libre. Una de las formas de cuerpo elegido es el cilindro cuadrado de 2 x 2 cm con 6cm de longitud unido al acero. Dobladores piezoeléctricos se adjuntan a cada una de las vigas en voladizo.

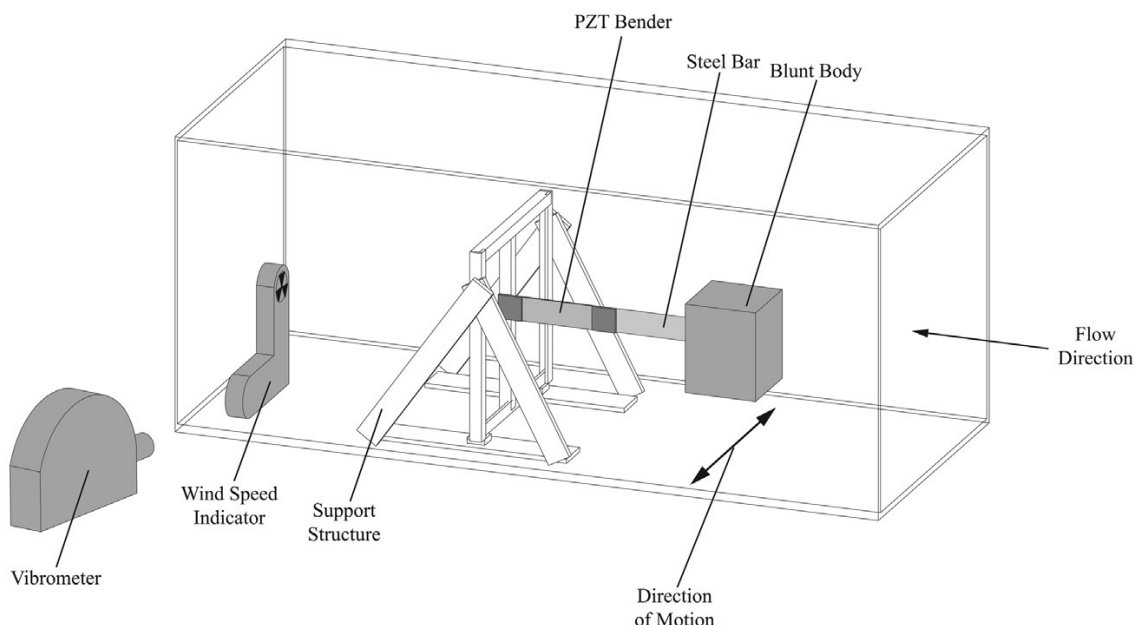


Img. 19. Vibro-wind

Los cilindros de espuma de poliestireno de peso ligero también eran fácilmente excitados en condiciones de viento transitorios y alcanzaron grandes amplitudes incluso en ráfagas de corta duración. (Img. 19)

Cada oscilador se conectó a un puente rectificador completo y la carga eléctrica de todos los osciladores se almacenó en un capacitor. Estos experimentos preliminares han sido un éxito y han animado a continuar con estructuras más grandes. Se fue capaz de almacenar Julios de energía en un pequeño capacitor, lo suficiente para iluminar LEDs para visualización. Sin embargo, hasta la fecha la eficiencia del sistema piezo-rectificador no es alto. Se requiere más optimización para su aplicación comercial.

En la variación de la velocidad del viento para los experimentos al aire libre se compara con la tensión generada durante las pruebas de túnel de viento constante. Las pruebas al aire libre muestran que la salida del rectificador sumará carga al capacitor en pasos correspondientes a la naturaleza transitoria de las ráfagas de viento.



Img. 20. Análisis de un elemento

Los candidatos para la conversión de la energía de vibración en energía eléctrica son electromecánico, piezoeléctricos, piezo-polímero y fenómenos electrostáticos. Un empuje fundamental de este proyecto es la obtención de energía eléctrica a partir de una gran variedad de osciladores mecánico-eléctrico. La investigación actual sobre captación de energía de vibración utilizando materiales piezoeléctricos, se ha centrado en el problema del oscilador individual. Los investigadores resaltaron que su objetivo de diseño ha sido convertir la energía eléctrica de AC generada en diversos piezoeléctricos osciladores, en energía eléctrica DC almacenada, ya sea en un capacitor o una batería para su uso en sistemas de edificios. (Img. 20)

Permite la recolección de energía en las velocidades del viento alrededor de 2 m/s, mientras que las turbinas de viento a gran escala requieren por lo menos 9 m/s, y funciona en lugares con poco sol.

Este proyecto propone poner paneles de unos 250 osciladores de cuatro pulgadas por metro cuadrado en los laterales de los edificios. Tales matrices emplean cepa piezoeléctrica para aplicaciones de potencia directa o carga de las baterías. Se ha estimado que las matrices pueden emitir hasta $54 \text{ W} / \text{m}^2$, una cifra que es comparable con el 60 a $100 \text{ W} / \text{m}^2$ de salida de los paneles solares comerciales. [2]

Datos de la patente:

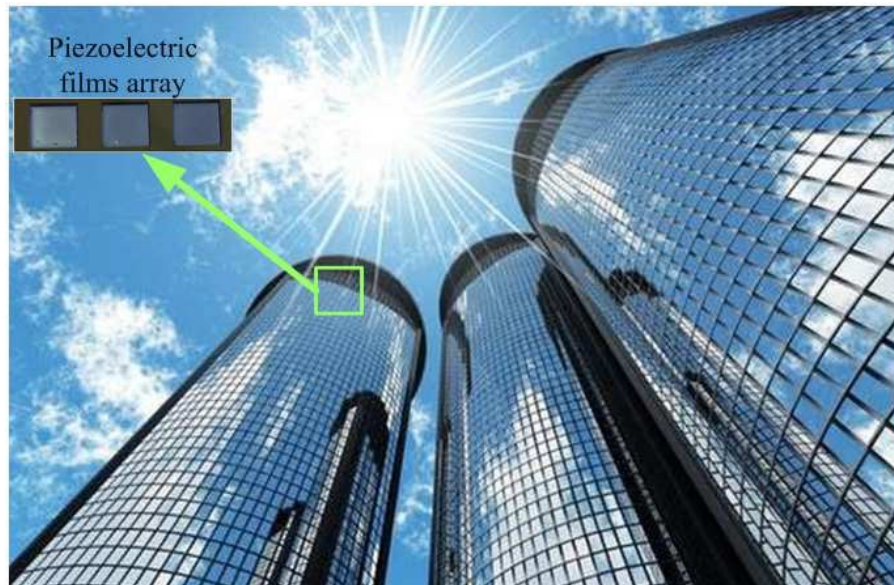
Número de publicación	US20120292915 A1
Tipo de publicación	Solicitud
Número de solicitud	US 13/502,932
Número de PCT	PCT/US2010/053810
Fecha de publicación	22 Nov 2012
Fecha de presentación	22 Oct 2010
Fecha de prioridad 	22 Oct 2009
También publicado como	WO2011050294A2 , WO2011050294A3
Inventores	Francis C. Moon
Cesionario original	Cornell University

4.2 Estructura de MEMS de ZnO

Existe un tipo de dispositivo novedoso para recolector energía que consta en una estructura reticular de delgadas películas cuadradas de material piezoeléctrico de óxido de cinc (ZnO). Está diseñado y fabricado para la energía del viento ambiental en edificios altos, en ciudades principalmente. [2] Este dispositivo está fabricado con la tecnología “Micro Electro Mechanical System” (MEMS). Es una estructura con 5 capas y tiene un grosor de unos 2.5 μ m. La captación de energía del viento en edificios altos requiere una gran área o una gran cantidad de generadores, los costos de duplicación son el principal obstáculo en la aplicación de los dispositivos antes mencionados.

La tecnología MEMS tiene la ventaja de fabricación en serie, las estructuras producidas también tienen buena consistencia. Este tipo de métodos de fabricación se van a emplear para resolver las dificultades de duplicado por máquina. Los dispositivos existentes para recolección de energía por medio de MEMS, por lo general se utilizan como captadores de energía por vibración, el de tipo “viga en voladizo” y el de “estructura de capa fina”. Por lo general estos sistemas son adaptados, pero pocas veces los recolectores de energía de este tipo, son diseñados y fabricados en particular para la energía del viento ambiental

en edificios altos en ciudades. Se han hecho experimentos en el túnel de viento para medir las capacidades de captación de energía que tienen. Estos dispositivos podrían ser utilizados en edificios altos, al ser adheridos a la superficie exterior del mismo. (Img. 21)

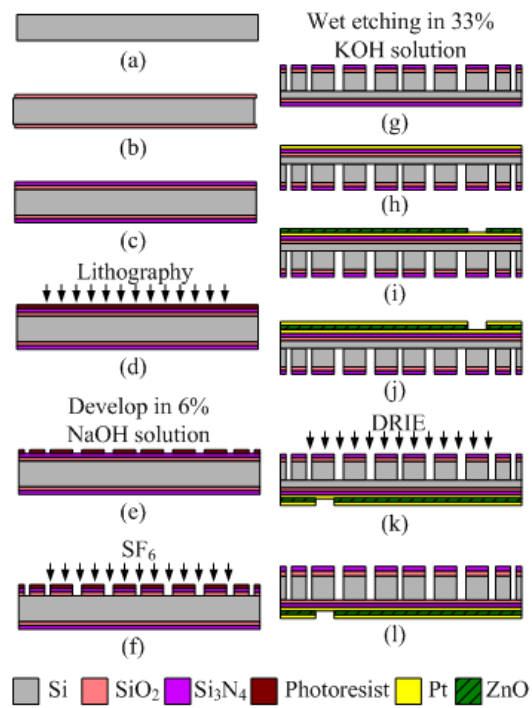


Img. 21. Proyección de la aplicación del sistema de recolección de energía en edificios.

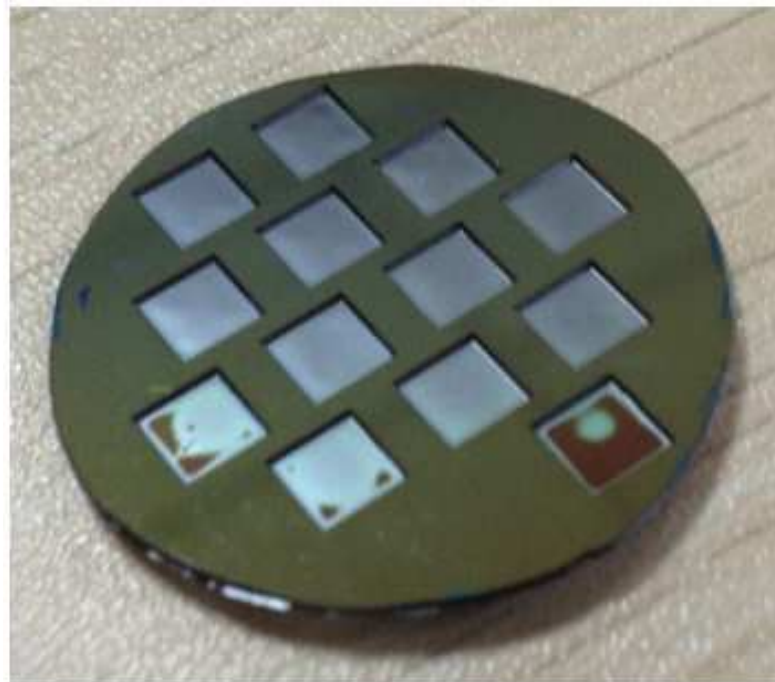
Diseño y fabricación

La película que se utiliza, tiene una estructura de múltiples capas, existen en total cinco capas que son respectivamente, la capa de SiO_2 , la de Si_3N_4 , de platino inferior, la de ZnO , y arriba la capa de platino, de acuerdo con el orden desde la parte inferior a la superior. Las capas SiO_2 y Si_3N_4 se cultivan en las superficies de la tableta de silicio en el comienzo de la fabricación y el espesor de las dos capas son 200 nm y 300 nm respectivamente. Esta relación de las dos capas puede reducir la tensión de la película y dos capas también pueden desempeñar un papel de capa de aislamiento.

Procesos de litografía y el grabado húmedo se llevan a cabo para producir las cavidades cuadradas de la parte trasera de la tableta. La capa de ZnO espesor de 300 nm y la capa de platino arriba se pulverizaron sobre la capa de platino inferior en secuencia. (Img. 22) [2]



Img. 22 Los esquemas de fabricación



Img. 23. Se muestra el panel de silicio que contiene las películas de material piezoeléctrico.

El diseño cumple con su función ya que la capa delgada es estable incluso con experimentos con vientos fuertes. Material ZnO más grueso o mayor coeficiente piezoeléctrico (como los PZT) podrían mejorar la densidad de poder efectivamente.

4.3 Solar Ivy



Img. 24. Solar Ivy.

El sistema Solar Ivy es un sistema de placas fotovoltaicas delgadas y que también pueden generar energía cuando aletean con el viento, mediante material piezoeléctrico (Img. 24) Estas hojas fotovoltaicas que generan electricidad a partir

del sol y del viento, se pueden integrar fácilmente en el lado de un edificio para producir energía. El concepto, diseñado por SMIT (Sustainably Minded Interactive Technology), consiste en una fina capa de material de película en la parte superior de polietileno con un generador piezoeléctrico unido a cada hoja. [4]

Una tira de 4 x 7 pies de Solar Ivy es capaz de generar 85 vatios (W) de energía.



Img 25. Detalle de los elementos movibles

Puede ser fácilmente montado en una pared vertical debido a su peso ligero. Otro atributo de Solar Ivy es que sus hojas no son estáticas, lo que les permite moverse y atrapar la luz solar desde muchas direcciones. Debido a la forma orgánica de cada panel, se ven y actúan como hojas reales, proporcionando una imagen de una planta enredadera.

Diseñado por un equipo de un hermano y una hermana, Samuel Cochran y Teresita Cochran, la SMIT Grow o Solar Ivy se encuentra todavía en fase de concepto, a la espera de financiación para poner su producto en juego. Hay dos versiones de Solar Ivy - uno con el generador piezoeléctrico y otro sin él. Lo ideal es que les gustaría desarrollar ambos conceptos, pero los costos son prohibitivos en este punto para incluir el mini-generador. [5]

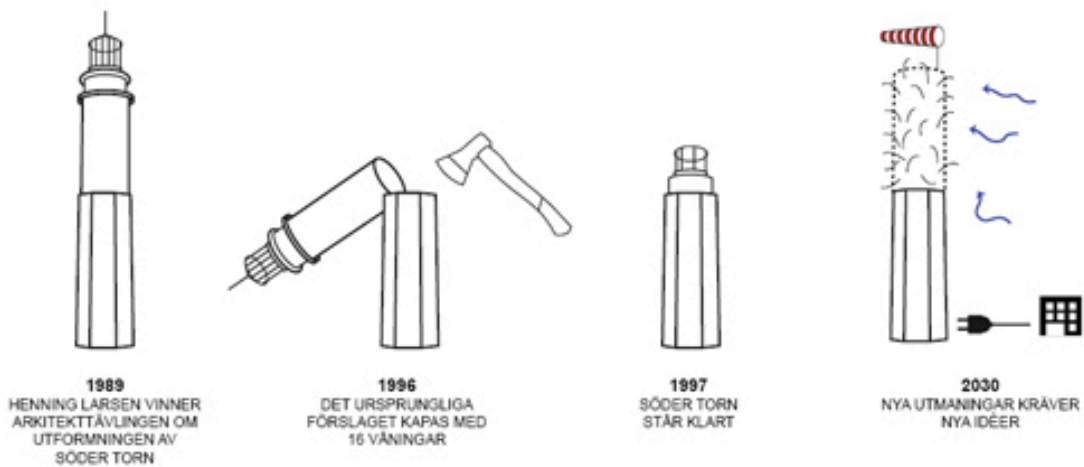
4.4 Södern torn stockholm

El fundador de Belatchew y arquitecto principal Rahel Belatchew Lerdell, ha propuesto convertir el exterior del edificio Torn Söder en un mar que agita elementos similares a pelos que generan electricidad al ser movidos por el viento. (Img. 26)



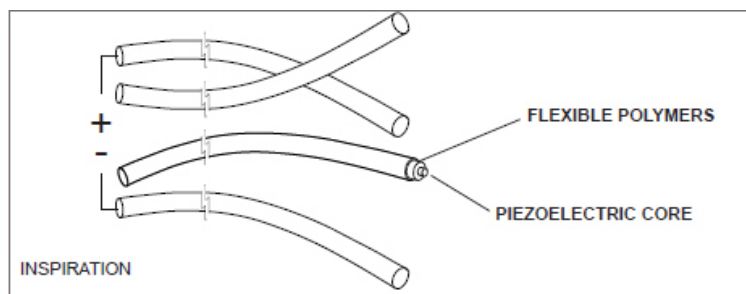
Img. 26. Proyecto Torre Söder en Estocolmo

Como fue concebido originalmente por Henning Larsen, el edificio fue aumentando cuarenta niveles con una aguja en la parte superior. Sin embargo, el resultado final fue acortado por dieciséis plantas, y sus materiales y ventanas se han cambiado (Img 27). Larsen y Mober quieren devolver el edificio a sus proporciones originales. [6]

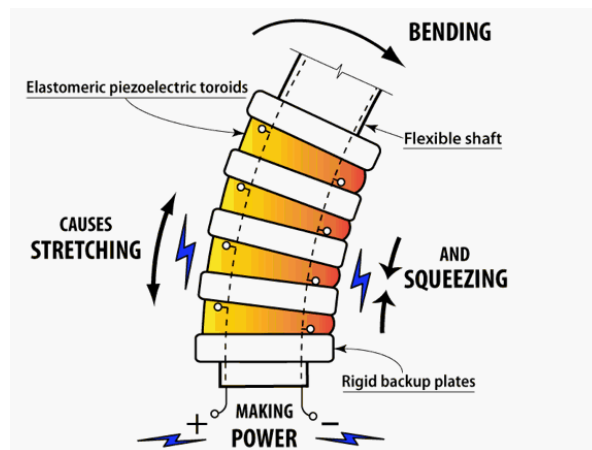


Img. 27. Antecedentes y proyecto de la Torre.

En la práctica, esto significa que cada paja se une, para poder ser almacenada por el edificio. Los “pelos” consisten en un núcleo de cerámica con un revestimiento de polímero flexible (Img. 28 y 29). Si bien la tecnología piezoeléctrica no se ha intentado en edificios como Söder Torn hasta la fecha, se está avanzando en la tecnología. [6]



Img. 28. Detalle de elementos flexibles de fachada.



Img. 29. Esquema de funcionamiento de un elemento.

4.5 Referencias del capítulo

[1] J.M. Kluger , F.C. Moon, R.H. Rand (2013), “Shape optimization of a blunt body Vibro-wind galloping oscillator”

[2] Francis C. Moon (2010) <http://www.windtech-international.com/editorial-features/features/articles/vibro-wind-energy-technology-for-architectural-applications>

[3] Novel Wind Energy Harvesting Device for City Building Based on ZnO Films Array (2014) Shaohua Wu¹, Lidong Du, Zhan Zhao, Deyi Kong², Zhen Fang

[4] solarivy.com/solarlvy_productSheet_062211.pdf Consultado en Marzo 2015

[5]http://www.solaripedia.com/13/285/solar_ivy_uses_pvs_and_piezoelectrics.html

[6] <http://thecreatorsproject.vice.com/blog/strawscrapper-the-future-of-sustainable-architecture>. Consultado en Marzo 2015

[7] <http://belatchew.com/en/2013/11/05/strawscrapper/> -Consultado en Marzo 2015

5. Conclusiones

Se ha logrado integrar un panorama amplio, acerca del conocimiento de los sistemas de obtención de energía en el ámbito científico, de las ingenierías y de la arquitectura, particularmente de los aspectos metodológicos para transformar energía mecánica en energía eléctrica a partir de la energía eólica, haciendo énfasis en la energía piezoeléctrica. El análisis realizado a las diferentes metodologías documentadas, indican de manera general que a pesar de que hay prometedores avances, aún quedan aspectos que requieren más estudios que orienten a una aplicación más eficiente de las nuevas tecnologías creadas para la obtención de “energía limpia”, con posibilidades de uso en edificios ubicados en un entorno urbano.

La energía piezoeléctrica a partir del viento, representa la opción más adecuada para utilizarla en ambientes de espacios restringidos como el de los edificios en las grandes ciudades. Promete un mayor confort a quienes habitan esos edificios.

Los transductores o generadores piezoeléctricos más utilizados para la recolección de energía por medio de vibración son los de tipo de viga en voladizo bimorfe, ya que son los que mejor se adaptan a los requerimientos de generar energía por medio del viento y además, son de los transductores que tienen más avance en cuanto a generación de energía.

La mayoría de los dispositivos revisados contaban con este tipo de transductor, como por ejemplo el dispositivo “Vibro-wind” que fue el que alcanzó mejor eficacia en cuanto a energía generada. Por otro lado en el aspecto económico el más efectivo es el dispositivo que utiliza estructuras de MEMS de ZnO, ya que todos los elementos pueden ser fabricados.

Aunque la recolección de energía piezoeléctrica se ha investigado a fondo desde finales de 1990, sigue siendo una tecnología emergente. Campos de aplicación

de recolección de energía hasta ahora, se centran principalmente en dispositivos de baja potencia, debido a su eficiencia de transducción limitada.

La eficiencia de estos sistemas aún no es suficiente para alcanzar los requisitos de energía mínimos requerido para su uso en edificios, la energía deseada se podrá obtener con el avance en la creación de los materiales piezoeléctricos y del sistema de almacenamiento. A pesar de esto pudieran ser utilizados para alimentar ciertos elementos de bajo consumo en edificios.

La mayor pérdida de energía ocurre durante la etapa de almacenamiento de energía, lo que plantea la necesidad de mejorar los sistemas de circuitos de control de carga y descarga de los dispositivos.

A medida que se ha mejorado esta tecnología se observan conceptos e ideas para aplicarlo en la arquitectura. Para esto es necesario la repetición de los elementos generadores, habiendo otra gran limitante que es el tema económico, el cual es bastante significativo comparado con la energía que resulta de cada uno.

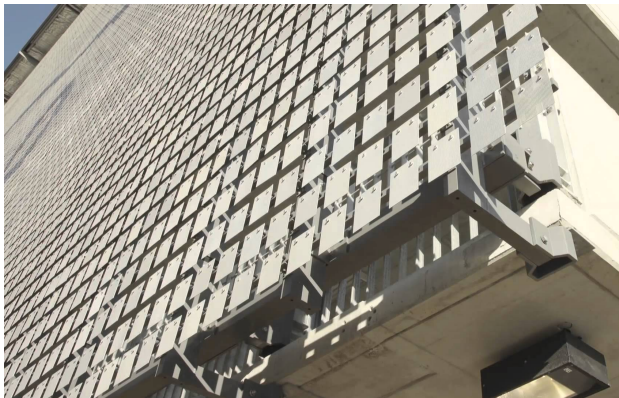
6.Recomendaciones de diseño

En esta última parte se hace un ejercicio en el que se analizan las partes de un edificio para ver las posibilidades de integración de los sistemas piezoeléctricos en elementos comunes a los cuales se les puede realizar una reingeniería, para que sean capaces de generar energía eléctrica a partir del movimiento que les causa el viento en ellos. A demás de eso se revisan otras posibilidades dentro de elementos que no son muy comunes en los edificios pero que presentan interés innovativo.

Las fachadas cinéticas son una buena opción para esta tecnología, ya que contienen una gran cantidad de elementos móviles, a los cuales se les puede añadir el material piezoeléctrico. Con lo cual se pudiera lograr una fachada aparte de estética, funcional.



Las fachadas cinéticas del Arquitecto Ned Kahn cuentan con miles de piezas rectangulares, las cuales revelan los patrones del viento.



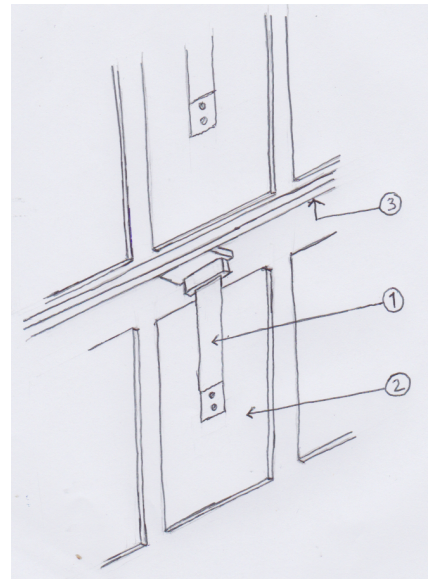
Se realiza una alternativa material flexible, sirve para proteger el material piezoeléctrico y también como unión entre la estructura y la placa de aluminio.

Ventajas:

- Gran número de repetición.
- Diseño estético

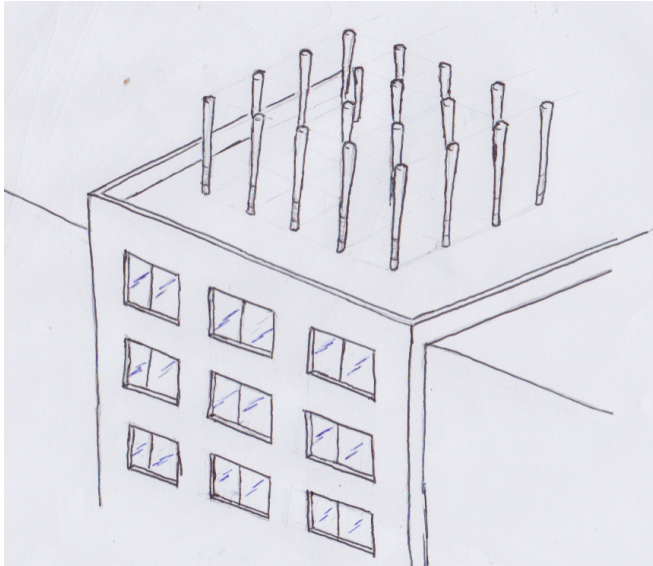
Desventajas:

- No a todas las fachadas se les puede adaptar.
- Un edificio con balcones tendría limitaciones.
- Limitación visual desde la parte de adentro

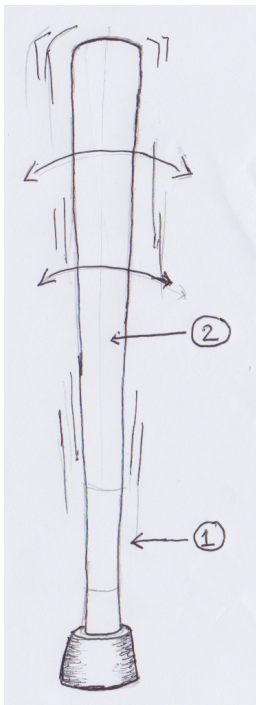


- 1.- Generador de tipo viga en voladizo bimorfo de PZT.
- 2.- Placa de aluminio.
- 3.- Estructura de acero.

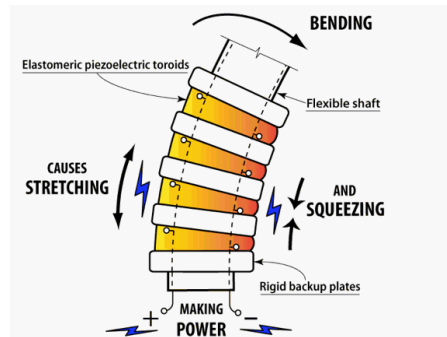
Se proponen estructuras basadas en la turbina eólica sin aspas "Vortex bladeless". Con la diferencia que este aerogenerador funciona con el sistema convencional de carbón e imanes y en este caso se aplicarían capas de material piezoeléctrico apiladas. Este tipo de estructura requiere de vientos un poco más intenso que en los generadores piezoeléctricos convencionales. Por lo cual resulta más apropiado para estar en la azotea, que es donde se encuentra el viento más fuerte.



Se mueve gracias a los remolinos de viento que se forman en la superficie de la estructura. Esto es denominado fenómeno de vórtice. Diseñada por David Suriol.



- 1.- Material piezoeléctrico.
- 2.- Estructura de Fibra de vidrio .



La azotea es la parte que concede más libertades a la hora del diseño, se pueden colocar los diseños inspirados en árboles, los sistemas de turbinas piezoeléctricas e incluso quizá implementar la tecnología piezoeléctrica en esculturas cinéticas.

Ventajas:

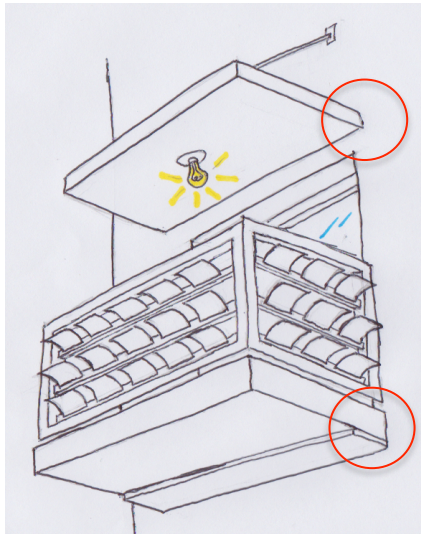
- Gran numero de repetición.
- Gran cantidad de material piezoeléctrico puede ser colocado en una sola turbina.
- Pocas partes móviles.

Desventajas:

- Costo más elevado ya que se requiere la fabricación del chasis.

El barandal cuenta con elementos móviles en los cuales se puede aplicar más de un elemento piezoeléctrico en cada uno de ellos.

En la sección se puede ver donde se ubica la serie de generadores piezoeléctricos.



sección 1

sección 2

Ventajas barandal:

- Del balcón es el elemento con mejores posibilidades
- Posibilidades de jugar con el diseño.

Desventajas barandal:

- Muy al alcance de niños y mascotas

Ventajas balcón:

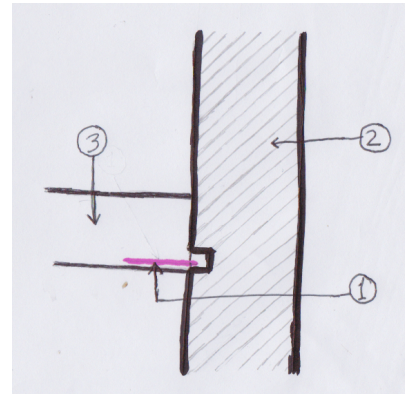
- Tiene ya la forma en voladizo, por lo cual se va a estar generando momento constante.
- La integración de los elementos piezoeléctricos es fácil .

Desventajas balcón:

- El concreto no tiene casi nada de elasticidad por lo cual la fatiga es el factor más importante.

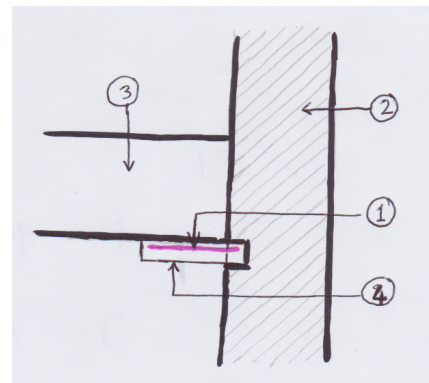
Ventajas voladizo:

- Tiene ya la forma en voladizo, por lo cual se va a estar generando momento constante.
- La integración de los elementos piezoeléctricos es fácil .
- Puede ser de materiales flexibles como metal



sección 1

- 1.- Generador de tipo viga en voladizo bimorfo de PZT.
- 2.- Muro
- 3.- Voladizo cubre sol.



sección 2

- 1.- Generador de tipo viga en voladizo bimorfo de PZT.
- 2.- Muro
- 3.- Losa de concreto balcón.
- 4.- Cubierta protectora de aluminio.

Desventajas voladizo:

- El concreto no tiene casi nada de elasticidad por lo cual la fatiga es el factor más importante.

Se ha alargado la base del balcón para provocar más momento, para generar más movimiento en el elemento y así producir mayor electricidad. El material del forjado es de acero ya que es más flexible.



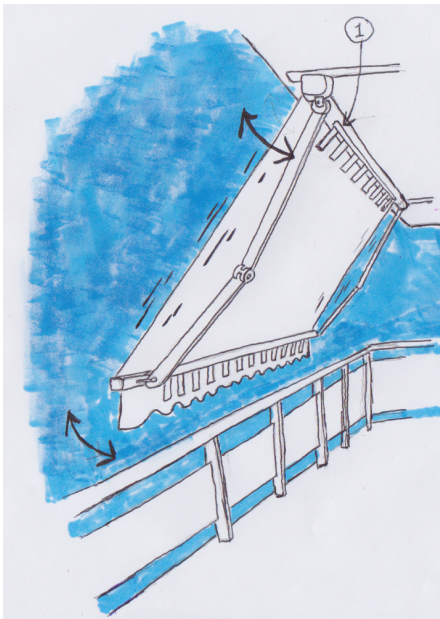
Ventajas:

- Mayor generación de electricidad.

Desventajas:

- Tiene limitaciones con el número de elementos piezoeléctricos.
- La fatiga podría seguir siendo un factor importante después de un tiempo considerable
- No es muy practico en entornos urbanos además que podría tener limitantes de reglamento de construcción por sobresalir tanto del limite de propiedad.

Se colocaron generadores de tipo viga en voladizo en las faldas del toldo y en la parte superior. Cuando el viento mueve el toldo este hace vibrar los generadores piezoeléctricos.

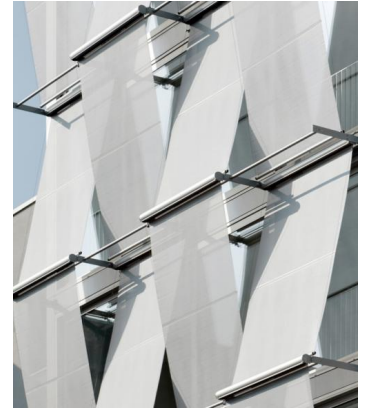


Ventajas:

- Económico.
- El principio es sencillo.
- Se le puede adaptar a uno ya existente.

Desventajas:

- Tiene limitaciones con el número de elementos piezoeléctricos.



Otras posibilidades.

1.- Generador de tipo viga en voladizo bimorfo de PZT.

Puertas

Las puertas convencionales no son de mucha ayuda para nuestro propósito, ya que se mueven solo cuando es necesario. Otro tipo de puerta que pudiera ser más aplicable para los sistemas piezoeléctricos es el de la puerta rotatoria. La cual gira principalmente por la fuerza de las personas al empujarla, pero se podrían buscar maneras de mejorar el giro para que este en constante movimiento con el viento. En la cual se podría utilizar el elemento central de las turbinas piezoeléctricas, pero cambiándolos a orientación horizontal e incluso se pueden repetir estos mismos elementos para mejorar

Ventajas:

- Se puede aplicar un gran número de generadores.
- Diseño estético

Desventajas:

- No son muy comunes.
- No se mueven tanto con la fuerza del viento

