

Recolectores de energía piezoeléctricos aplicados al sensado inalámbrico

Piezoelectric energy harvesters applied to wireless sensing

Presentación: 09/09/2024

Sebastián Pablo Machado

Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca (CIC), 11 de abril 461, 8000 Bahía Blanca, Argentina
smachado@frbb.utn.edu.ar

Mariano Febbo

Instituto de Física del Sur (IFISUR), Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur (UNS), Avda. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina
mfebbo@uns.edu.ar

Resumen

La creciente demanda de energía y la necesidad de fuentes energéticas limpias han impulsado un notable aumento en la actividad de investigación enfocada en la gestión eficiente de recursos energéticos. Entre las técnicas emergentes, la captación de energía (conocida como *Energy Harvesting* en inglés) se destaca por su capacidad para recolectar energía residual a partir de fuentes ambientales limpias y accesibles, tales como luz, vibraciones y gradientes térmicos. Dentro de estas técnicas, el aprovechamiento de la energía mecánica en forma de vibraciones resulta particularmente interesante, ya que no depende de la disponibilidad de luz solar. Este trabajo presenta algunos de los recolectores de energía piezoeléctricos que hemos desarrollado específicamente para la alimentación de sensores inalámbricos. La innovación principal de estos dispositivos radica en su capacidad de autoalimentación, eliminando la necesidad de cables o baterías, lo que a su vez reduce los costos industriales de mantenimiento y permite un monitoreo remoto continuo, favoreciendo la detección temprana de problemas.

Palabras clave: energía, piezoelectrico, dinámica, resonancia.

Abstract

The increasing demand for energy and the need for clean energy sources have driven a remarkable increase in research activity focused on the efficient management of energy resources. Among the emerging techniques, energy harvesting stands out for its ability to collect waste energy from clean and accessible environmental sources, such as light, vibrations and thermal gradients. Within these techniques, the use of mechanical energy in the form of vibrations is particularly interesting, since it does not depend on the availability of sunlight. This work presents some of the piezoelectric energy harvesters that we have developed specifically for powering wireless sensors. The main innovation of these devices lies in their self-powering capacity, eliminating the need for cables or batteries, which in turn reduces industrial maintenance costs and allows continuous remote monitoring, favoring the early detection of problems.

Keywords: energy, piezoelectric, dynamics, resonance.

Introducción

Los sistemas de recolección de energía, basados en la transformación de las vibraciones mecánicas en energía eléctrica, son cada vez más utilizados en nuevas aplicaciones específicas, debido a la reducción en el consumo de energía de los sistemas electrónicos de hoy en día. El concepto de recolección de energía se encuentra



típicamente relacionado y aplicado en lugares remotos o aislados donde la energía eléctrica de red no está disponible o en sistemas rotantes, donde el cableado es problemático. En la actualidad existe una gran variedad de aplicaciones de modelos recolectores de energía. Varios países han experimentado con la piezoelectricidad en la carretera (esencialmente, transforma la energía cinética en corriente eléctrica), incluido Israel, que ya ha puesto esta tecnología en algunos de sus carreteras (Innowatech, 2013). En 2009, la empresa East Japan Railway Company instaló pisos piezoeléctricos en su estación de tren de Tokio. La energía generada por el tránsito de peatones es suficiente para abastecer a todas las pantallas de la estación. Italia ha firmado un contrato para colocar esta tecnología en un tramo de la autopista de Venecia a Trieste y un club de baile en San Francisco ha puesto a prueba la tecnología en su pista de baile para alimentar su iluminación (Gatto, 2012). En California se ha propuesto un nuevo proyecto de ley para la implementación de la tecnología piezoeléctrica en las carreteras del Golden State. La tecnología podría producir hasta 44 megavatios de electricidad por año de un solo carril, en un tramo de un kilómetro de la carretera, suficiente para abastecer a 30.800 hogares durante un año (Gatto, 2012).

Las aplicaciones industriales de recolectores de energía son muy variadas y abarcan diferentes sectores como el automotriz, donde Volvo se encuentra desarrollando prototipos para el ahorro de energía en camiones y autobuses (Aliwell et ál., 2012). ABB ha presentado soluciones integradas y modulares de captación de energía para la industria de procesos. Sus intereses parecen cubrir desde la instrumentación de campo para el monitoreo de la condición de máquinas hasta motores y productos de potencia (Aliwell et ál., 2012). Por otro lado, en Europa se presentó (Cain, 2012) un gigantesco proyecto a nivel de siete países integrantes “European Metrology Research Programme” para establecer estándares que permitan desarrollar dispositivos recolectores de energía en beneficio del sector de la energía eólica. El monitoreo de la “salud” estructural de los generadores eólicos, a través de sensores distribuidos sobre toda la estructura, es vital para impedir su rotura o mal funcionamiento y evitar así pérdidas millonarias.

Respecto de la bibliografía en revistas científicas, la cantidad de trabajos sobre “energy harvesting” es considerable, por eso aquí citaremos sólo algunos. Entre los más relevantes en lo que se refiere a sistemas resonantes lineales, es decir aquellos en donde la frecuencia de resonancia del recolector es sintonizada con la frecuencia característica de la fuente, podemos citar el trabajo pionero de (Stephen, 2006) donde se analiza en detalle la conversión de la energía de vibración de un sistema masa-resorte-amortiguador (lineal) a energía eléctrica a través del acoplamiento electromecánico más simple (bobina más imán permanente). La utilización de materiales piezoeléctricos como sistemas generadores de energía en el régimen resonante, ha sido ampliamente estudiada en los últimos 5 años como se puede ver en el “review” de Beeby et ál., (2006).

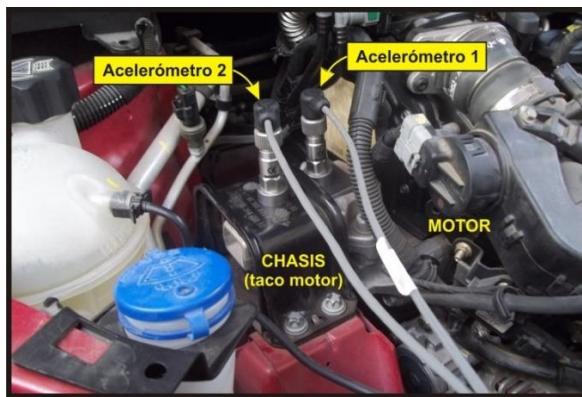
En este trabajo se presenta el desarrollo de recolectores de energía aplicados para el sensado autónomo de diferentes aplicaciones que incluyen: sistemas rotantes, automóviles y maquinaria agrícola.

Desarrollo

El primer caso corresponde al diseño de recolectores de energía en vehículos de transporte. En los vehículos de combustión interna, se pierde aproximadamente el 70-80% de la energía del combustible, mientras que solo el 20-30% se usa para mover el automóvil. Una de las pérdidas en los vehículos se produce en el motor, principalmente en forma de vibraciones. Este trabajo presenta el desarrollo de un dispositivo de recolección de energía que puede capturar energía mecánica de un automóvil en diferentes relaciones de transmisión (ver Fig. 1). El diseño estructural del recolector se orienta hacia la creación de una estructura con múltiples modos resonantes en un ancho de banda de frecuencias de entre 1600 rpm y 4600 rpm, rango obtenido a partir de pruebas de conducción en un vehículo diésel convencional (Gatti et ál., 2018). El dispositivo de recolección se basa en una viga compuesta de fibra piezoeléctrica de alta resistencia a la fatiga, ubicada entre dos sistemas masa-resorte, lo que le confiere su carácter multimodal (ver Fig. 2). Para predecir el comportamiento dinámico del dispositivo, se emplea un modelo analítico unidimensional basado en una formulación lagrangiana. Las ecuaciones resultantes ofrecen una descripción cuantitativa precisa del sistema, que además es validado numéricamente mediante un modelo de elementos finitos tridimensional (Abaqus). Además, se realizan pruebas experimentales cuyos resultados se comparan con las predicciones teóricas. Los resultados experimentales muestran una excelente concordancia con los hallazgos teóricos, confirmando la naturaleza multimodal del dispositivo en su ancho de banda operativo. Asimismo, se evidencia una potencia de salida significativa para distintas velocidades del motor, suficiente para alimentar sistemas inalámbricos de monitorización de bajo consumo (Gatti et ál., 2017).

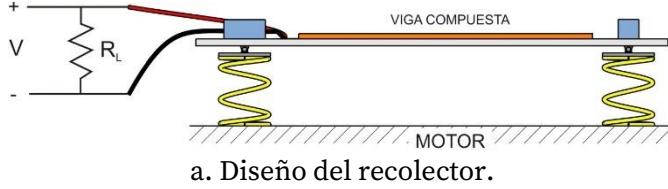


a. Vehículo en marcha.

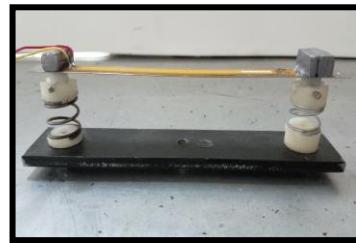


b. Detalle de sensores sobre el motor.

Figura 1. Mediciones sobre el vehículo.



a. Diseño del recolector.



b. Fabricación del dispositivo.

Figura 2. Dispositivo de energía multimodal.

En la Fig. 3 se muestra la respuesta en frecuencia del dispositivo sometido a diferentes aceleraciones. Se observa que el pico de máxima generación corresponde a un rango de frecuencia en ruta. Sin embargo, los valores de voltaje generado por el dispositivo en ciudad son apenas inferiores al máximo.

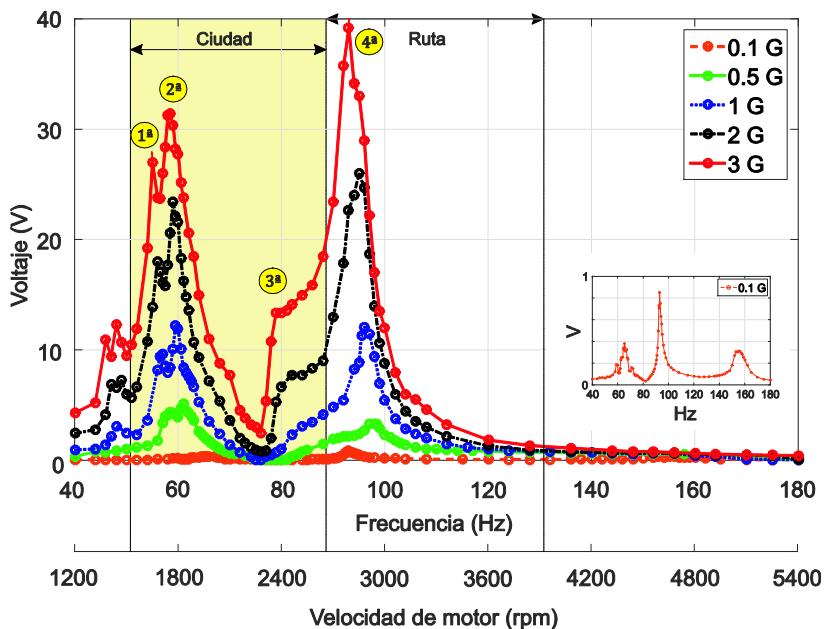


Figura 3. Dispositivo de energía multimodal.



Sistemas rotantes

En beneficio de los generadores eólicos se propone un novedoso dispositivo de conversión ascendente de frecuencia en un escenario de rotación de frecuencia extremadamente baja basado en un recolector de energía piezoelectrica de múltiples vigas e impactos múltiples (Febbo, et ál., 2022). La estructura de múltiples vigas giratorias consta de una lámina piezoelectrica agregada a una viga superior, una gran masa sísmica agregada a una viga inferior y un tope elástico que puede eventualmente reemplazarse por un zumbador (ver Fig. 4).

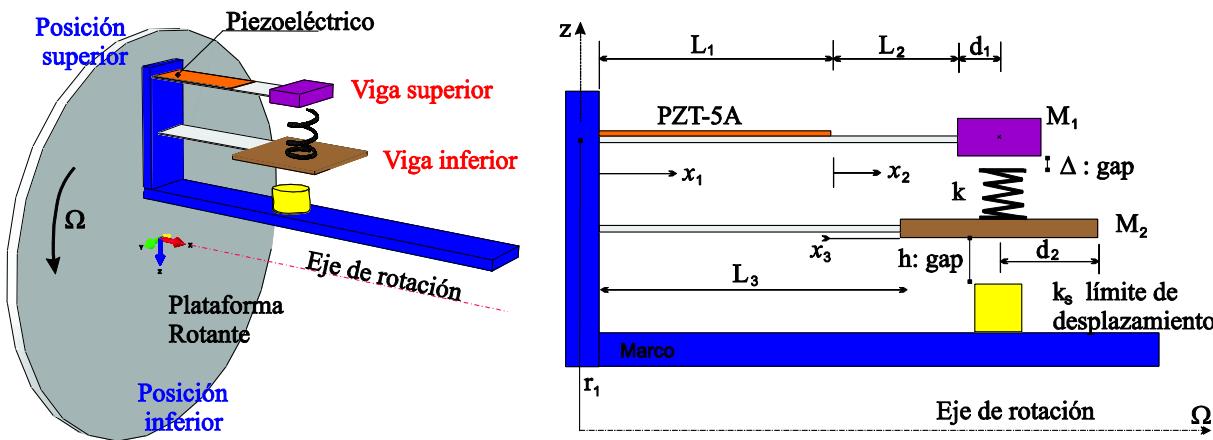


Figura 4. Dispositivo de energía compuesto por múltiples vigas giratorias.

En la mitad del ciclo de rotación, la viga inferior impacta la viga superior por medio de un resorte que genera energía mediante un mecanismo de conversión ascendente de frecuencia. En la otra mitad del ciclo, la viga superior y la inferior se separan entre sí y la viga inferior impacta un tope elástico o un zumbador que se utilizan para recuperar simultáneamente la energía cinética de la colisión, generar energía (zumbador) y prevenir posibles daños a la estructura. Se propone un modelo analítico que gobierna las ecuaciones electromecánicas y la dinámica de impacto para proporcionar un medio para predecir la energía de salida generada (Febbo, et ál., 2022). El modelo se basa en la teoría estructural de Euler-Bernoulli para las vigas y un modelo constitutivo no lineal piezoelectrico. Se estudian dos posibilidades de generación de energía diferentes, dependiendo de la selección del tope elástico o del zumbador. Cuando el resorte elástico actúa como tope, la colisión entre la viga inferior y el tope es más elástica. La sustitución del tope de resorte por un zumbador piezoelectrico añade al sistema un mecanismo adicional de conversión de energía. Mediante la realización de varias pruebas experimentales (ver Fig. 5), se valida el modelo analítico calculando la energía acumulada. Los resultados demuestran que el elemento zumbador mejora significativamente la potencia cosechada cuando sustituye al tope elástico. Los ensayos experimentales se llevaron a cabo utilizando un motor eléctrico junto con un variador de velocidad para proporcionar el movimiento de rotación, como se muestra en la Fig. 5. El voltaje generado por el dispositivo se adquiere a una tasa de 100 muestras/s. utilizando una conexión Bluetooth a través de una placa Arduino.

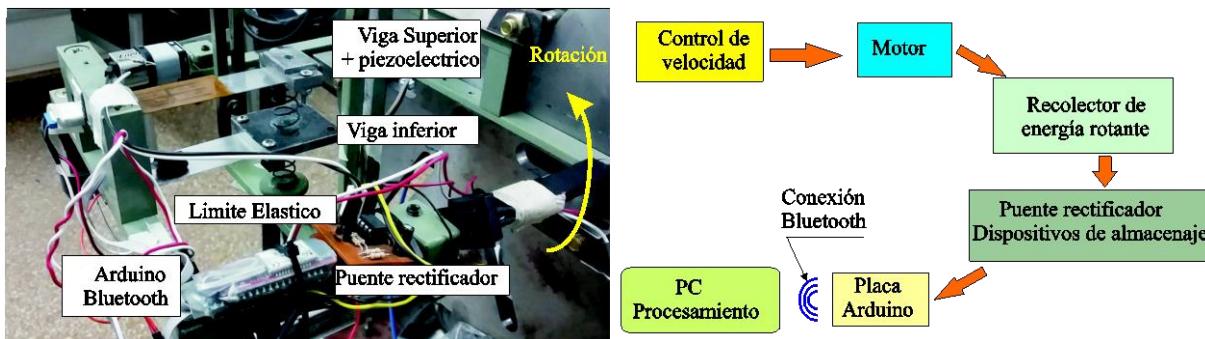


Figura 5. Configuración experimental utilizada para el dispositivo recolector.



La adquisición de la señal inalámbrica es recibida en una PC para su posterior procesamiento. En este caso se establece una resistencia de carga relativamente baja de 10 kohms en todas las mediciones de voltaje a diferentes frecuencias de rotación debido al límite de adquisición de voltaje de la placa Arduino de 5 voltios. Para estimar la potencia utilizable del dispositivo, se construyen y prueban circuitos rectificadores acoplados a los elementos piezoelectríficos. En la Fig. 6 se muestra la energía eléctrica generada para diferentes velocidades de rotación entre 0.8 y 2.5 Hz (50-150 rpm), considerando una resistencia de carga de 10 kΩ. Las curvas azules continua y de trazo corresponden a considerar el límite de desplazamiento elástico y rígido (“buzzer”), respectivamente. Comparando ambas curvas se observa que para la rotación más baja el caso elástico genera mayor energía. Sin embargo, este comportamiento se modifica a medida que aumenta la velocidad de rotación. Para finalizar, la curva verde muestra la generación obtenida a partir de conectar las señales de voltaje de ambos materiales piezoelectríficos, incrementando considerablemente la energía producida por el dispositivo.

La cantidad de potencia recogida es adecuada para la detección autónoma de turbinas eólicas de 30 kW con velocidades de rotación de entre 50 y 150 rpm.

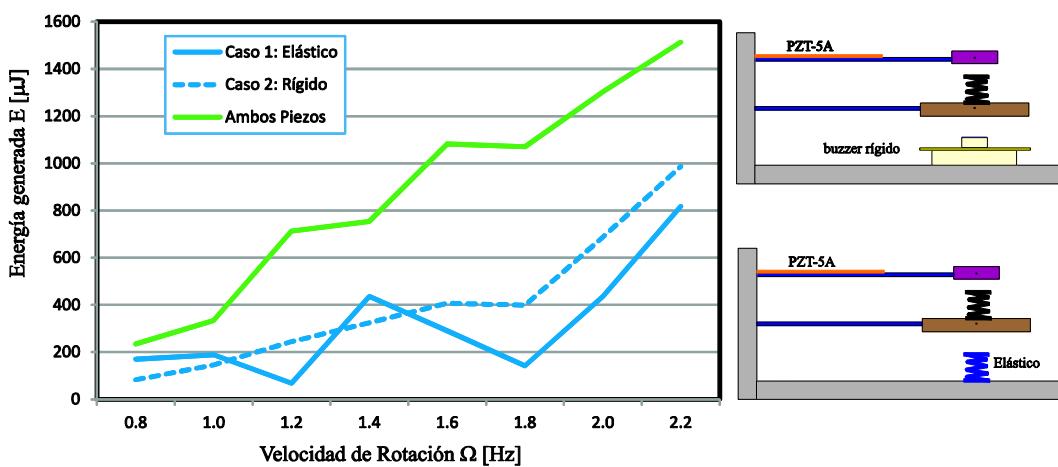
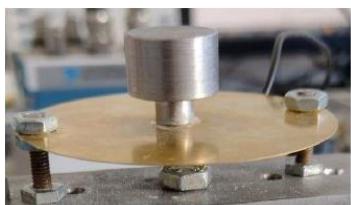


Figura 6. Energía eléctrica generada para diferentes velocidades de rotación, $R = 10 \text{ k}\Omega$.

Maquinas agrícolas

En este caso se presenta tres tipos diferentes de recolectores de energía piezoelectrífica (PEHs) para una unidad autónoma de detección de incendios, compuesta de diferentes materiales PZT (Machado et ál., 2023). Las configuraciones incluyen una viga en voladizo con dos zumbadores PZT-5H, una viga bi-empotrada con PZT-5J y un zumbador piezoelectrífico cilíndrico hecho de PZT-5H parcialmente sujetado en dos puntos (ver Fig. 7).

Inicialmente, la caracterización de las constantes físicas de los PZTs para cada tipo de PEH se realizó utilizando un modelo analítico unidimensional y junto con resultados experimentales. Estas constantes se utilizan para desarrollar un modelo de elementos finitos tridimensional en COMSOL para predecir las capacidades de generación de energía, abordando las geometrías complejas que desafían el modelado analítico convencional (ver Fig. 8). Las dimensiones de los PEHs se seleccionaron para resonar a aproximadamente 150 Hz, coincidiendo con la vibración primaria de ciertos motores de cosechadoras agrícolas. Se observa que los tres modelos presentan una respuesta en frecuencia similar (ver Fig. 8).



a. Buzzer.



b. Viga MIDE.



c. Buzzer cantilever.

Figura 7. Tres prototipos recolectores de energía.

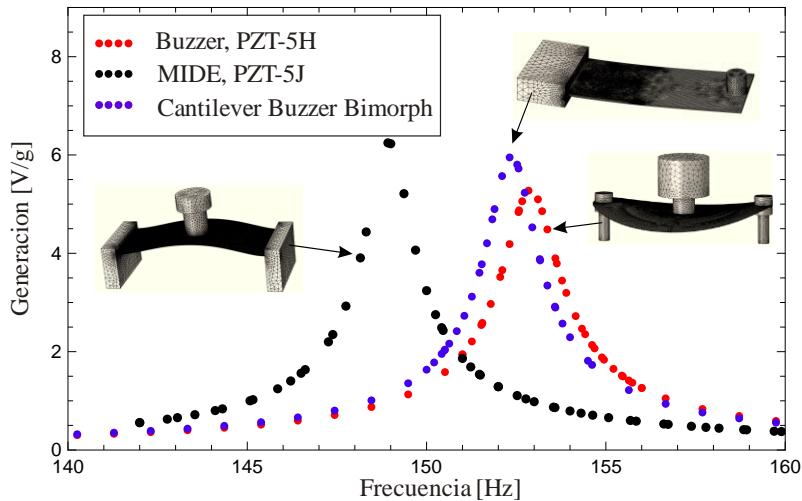
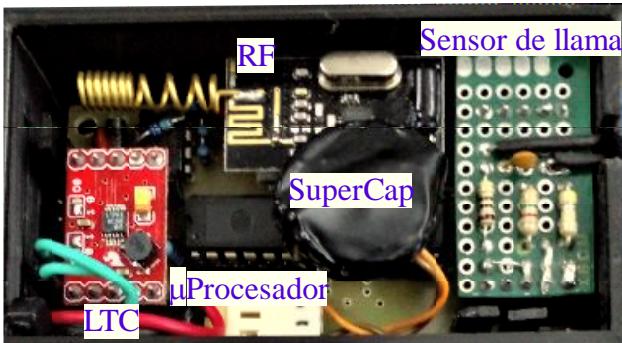
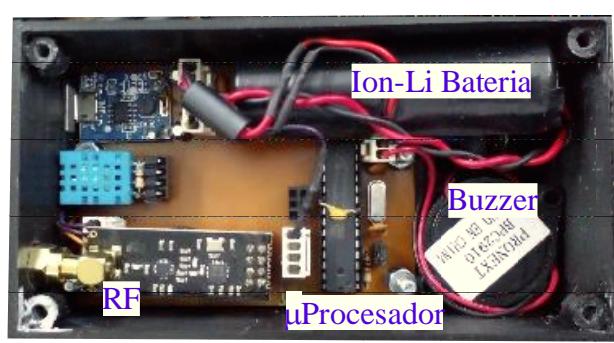


Figura 8. Frecuencia de generación de voltaje para los tres recolectores propuestos.

Las comparaciones de rendimiento se llevaron a cabo probando cada diseño con una unidad de sensor de incendios inalámbrica sometida al mismo perfil de aceleración registrado desde una cosechadora agrícola. La unidad de sensor de llama para prevenir incendios consta de dos módulos: un transmisor y un receptor (ver Fig. 9). El módulo transmisor comprende una unidad de detección, regulación y rectificación de potencia (LTC3588), un supercondensador de 10 F, un microprocesador AT MEGA 328, un sensor de incendios (sensor UV) y un módulo de transmisión de RF. El módulo receptor consta de un receptor de RF, un microprocesador AT MEGA 328 y una batería de Ion-Li para proporcionar energía al módulo receptor ubicado en la cabina de la cosechadora agrícola. También está preparado para ser alimentado mediante conexión USB.



a. Diseño del transmisor.



b. Diseño del receptor.

Figura 9. Unidad de sensado y transmisión inalámbrica.

Para probar los tres diseños en un entorno vibratorio real, registramos las vibraciones del motor de una cosechadora agrícola en una tarjeta SD montada sobre la cubierta del ventilador del motor. Utilizando los datos de aceleración registrados, sometimos los tres diseños a una prueba vibratoria de treinta minutos, con el transmisor de la unidad de sensor de incendios como carga eléctrica. Las pruebas demostraron que los tres diseños podían alimentar de manera suficiente el transmisor de la unidad de sensor de incendios si se les daba el tiempo adecuado. Entre los diseños, la viga bi-empotrada cargó la unidad de detección de incendios más rápido, seguida por el voladizo bimorfo y el zumbador parcialmente fijado. Estos hallazgos sientan las bases para un futuro proceso de optimización del diseño.

Conclusiones

En este trabajo se han presentado los desarrollos realizados para tres aplicaciones diferentes, cada una de las cuales planteó desafíos específicos en términos de maximizar la generación de energía a partir de fuentes variadas.

En el caso de los automóviles, el diseño de un recolector de energía capaz de operar eficientemente a diferentes velocidades requirió una intensa investigación, culminando en el desarrollo de un dispositivo multimodal con un amplio ancho de banda. Para la aplicación en el sensado de palas de aerogeneradores, se desarrolló un prototipo capaz de recolectar suficiente energía en escenarios de muy bajas frecuencias de excitación, aprovechando el fenómeno de impacto para optimizar la impedancia de generación según los requisitos de los componentes electrónicos utilizados en el monitoreo de la salud estructural de los aerogeneradores. Finalmente, en la recolección de energía en máquinas agrícolas, específicamente en cosechadoras, se abordó un entorno caracterizado por altas aceleraciones, lo que demandó el desarrollo de recolectores de energía suficientemente robustos para operar sin sufrir daños.

En todas las aplicaciones presentadas, se están llevando a cabo pruebas de campo adicionales para perfeccionar los prototipos y alcanzar una versión final optimizada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Facultad Regional Bahía Blanca - Universidad Tecnológica Nacional; a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur y a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires.

Referencias

- Aliwell S., Kompis Z. and Vodera C. (2012). Highlights of Energy arvesting & Storage Europe 2012 (Part One), Energy Harvesting Journal.
- Beeby, S. P., Tudor M. J. and White, N. M., (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications Meas. Sci. Technol. 17 R175–R195.
- Cain, M. (2012). Could energy harvesting make wind more reliable. Renewable Energy Focus, pp18-20.
- Febbo, M. y Machado, S. P. (2022). Rotational multi-beam energy harvester with up-conversion mechanism in an extremely low frequency scenario. Mechanical Systems and Signal Processing Volume 1681, 108737.
- Gatto, M. (2012). Funding for piezoelectricity Project, Energy Harvesting Journal.
- Gatti, C. D., Ramirez, J. M., Febbo, M., Machado, S. P. (2017). Determinación de función objetivo para la optimización de un recolector de energía en vehículos de transporte. Revista: Mecánica Computacional Vol XXXV, págs. 1329-1339.
- Gatti, C. D., Ramirez, J. M., Febbo, M., Machado, S. P. (2018). Multimodal piezoelectric device for energy harvesting from engine vibration Journal of Mechanics of Materials and Structures 13(1), pp. 17-34.
- Innowatech, Inc.(2013) <http://www.innowattech.co.il/>
- Machado, S. P., Febbo, M (2023). Dispositivos autónomos para el sensado inalámbrico de máquinas agrícolas. Revista: Mecánica Computacional Vol. XL, págs. 947-956.