

# Optimización de un Energy Harvester Piezoeléctrico para Sistemas Embebidos

Luz Antuanet Adanaqué Infante, Fernando López Aramburú

luzadanaque@gmail.com, flopeza69@hotmail.com

**Resumen.** Proveer de energía los circuitos es el factor más limitante en las redes de sensores wireless (WSN). Las baterías pueden entregar energía a un nodo sensor solo por algunas horas (al 100% del duty cycle). Como resultado, los problemas de las WSN residen en la adquisición de datos en baja velocidad para minimizar el duty cycle. Asimismo, existen muchos ambientes capaces de proveer suficiente energía en forma de luz, viento, vibración y caída de agua, que puede ser recogida para alimentar nodos de los sensores indefinidamente. La eficiencia en el proceso de recolección de energía (energy harvesting) es importante, es un factor determinante en el funcionamiento del circuito debido al coste de este tipo de sistemas. Este harvester convierte la energía del viento obtenida del ambiente en energía eléctrica ac o dc, dependiendo del tipo de generador utilizado.

**Abstract.** Provide power circuits is the most limiting factor in wireless sensor networks (WSN) factor, the batteries can deliver power to a sensor node only for a few hours (at 100% duty cycle), as a result, the problems of WSN reside in data acquisition to minimize low-speed duty cycle. Also, there are many environments capable of providing sufficient light energy in the form of wind, vibration and fall of water, which can be picked for feeding sensor nodes indefinitely. Efficiency in the process of collecting energy (energy harvesting) is important, it is a determining factor in circuit performance due to the cost of such systems. This harvester converts wind energy obtained from the environment in ac or dc power, depending on the type of generator used.

## Fundamento Teórico

Los circuitos utilizados en la recolección de energía eólica pueden ser activos o pasivos. El puente de diodos, generalmente, no es adecuado para valores de tensión en ingreso menores a 0.5V, debido a la tensión de forward-bias asociada a los diodos. En cambio, la rectificación a través de los diodos activos MOS es posible. Este enfoque necesita una señal para controlar la tensión, que es más grande que la tensión umbral del MOSFET (0.4V).

Un diodo activo es un comparador-controlador que reemplaza al diodo a unión, para el energy harvesting se combina un rectificador síncrono con un diodo activo. La tensión mínima de ingreso que puede ser rectificable es 1.25V.

Como la tensión rectificada es baja aún, un sistema de energy harvesting necesita un circuito adicional para recargar la batería, porque el efecto doblador del puente pasivo puede reducir la carga de los otros circuitos que forman parte del sistema.

## Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es encontrar la mejor implementación para un rectificador que pueda ser insertado en la unidad de gestión de energía (PMU), haciendo una comparación entre dos tipos de rectificadores pasivos y tres activos. A través de la implementación de un circuito impreso de prueba que contiene los cinco tipos de rectificador con la finalidad de evaluar la performance y elegir la mejor solución para éste. Para ello, se ha realizado numerosas simulaciones de los rectificadores a baja tensión, con componentes activos y pasivos.

## Descripción del sistema

### 1. Ventilador o generador

Para la conversión de la energía eólica en energía eléctrica, se ha elegido un generador comercial pequeño, capaz de generar energía suficiente en la alimentación de

un nodo, que, a su vez, sirve para transmitir datos relevantes a través de sensores apropiados. En la tab.1, se muestran los datos de la caracterización de los ventiladores usados para la implementación del proyecto.

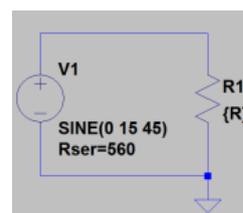
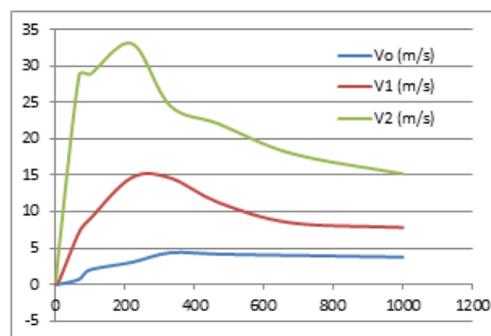


Fig.1. Representación del ventilador en LTSpice



Tab.1. Caracterización del ventilador I: Potencia vs Resistencia para tres velocidades del viento

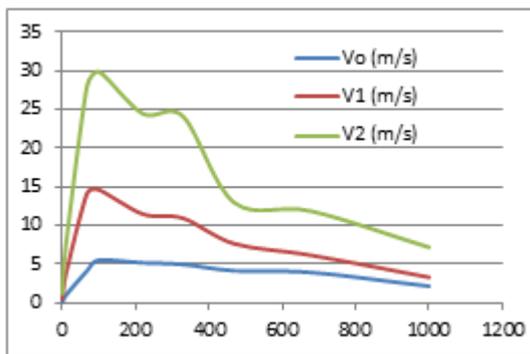
De la caracterización es posible evaluar la potencia máxima teórica extraíble del generador y la velocidad máxima del viento incidente, parámetro que se debe tener consideración una vez elegido el lugar en donde funcionará el dispositivo. Se muestran también los gráficos de la variación de la potencia extraída en función a la resistencia de carga aplicada, y a la velocidad del viento incidente.

Es necesario optimizar la unidad de gestión de energía (PMU) considerando las características del generador, las turbinas de viento y la performance del nodo sensor, para satisfacer los requerimientos de la aplicación.

Para el análisis, se cuantifica la energía del viento  $P_{Wind}$ , utilizando la relación de ésta con la velocidad de ingreso del viento y la energía disponible a la salida del circuito.

Para poder transmitir la mayor cantidad de potencia, es necesario observar la variación de los parámetros eléctricos característicos. Observando la figura de la potencia generada en función de la corriente y la tensión, mientras variamos la velocidad del viento, no podemos encontrar ninguna estrategia de control a tensión o corriente constante, por eso es necesario construir un gráfico de la potencia en función de la resistencia de carga.

Las medidas de la potencia en salida han sido calculadas usando el generador y el rectificador a diodos Schottky para tres velocidades del viento y diez resistencias de carga.



Tab.3. Caracterización del ventilador II: Potencia vs Resistencia para tres tipos de velocidad del viento incidente

De los gráficos, podemos observar que el máximo valor de energía eléctrica (13mW) se puede obtener de la turbina de viento en presencia de una resistencia de carga de 100ohm.

Para maximizar la potencia transmitida, es decir, para diseñar la electrónica de conversión de energía y de seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT) podemos utilizar un convertidor DC/DC. En la conversión de energía, se presta atención al convertidor AC/DC, y han sido analizadas diversas soluciones activas y pasivas con la finalidad de evaluar las prestaciones. A continuación se muestra un resumen de los diversos tipos de rectificadores analizados.

## 2. Rectificador con diodo activo

Está constituido por dos estados en cascada. El primero tiene la función de rectificar las semiondas positiva y negativa que están a la salida del generador, comandado por un comparador a bajo consumo, el cual enciende el transistor solo en el caso en que su potencial de ingreso no invertible supere al invertible.

El objetivo del circuito es reducir la caída de tensión entre el generador y la carga a través del uso de circuitos activos a baja potencia.

En el esquema, se nota la presencia de un condensador y una resistencia en retroacción positiva, junto a dos resistencias conectadas en serie entre el potencial positivo y el potencial negativo en salida del rectificador. Estos

componentes sirven para aumentar la histéresis del comparador, dado el sobrepico en términos de potencia consumida que se registran posteriormente.

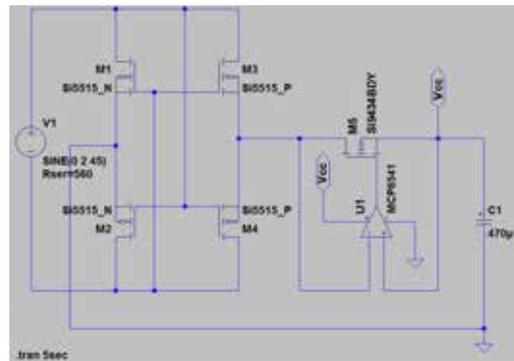


Fig. 2. Circuito rectificador activo a dos estados

El diseño del comparador se efectúa pensando en el consumo de potencia y en la velocidad, puesto que un comparador lento que no enciende velozmente el MOS disminuye la eficiencia total del sistema.

## 3. Rectificador doblador de tensión a puente

Este circuito entrega una tensión de salida en dc que es el doble de la amplitud ac en ingreso. Se gana una eficiencia máxima del 92% para una amplitud de 1V. Aun con amplitudes de 100mV, la eficiencia puede superar el 70%.

El puente a diodos pasivo, generalmente, no es adecuado para valores de tensión al ingreso menores a 0.5V, debido a la tensión de forward-bias asociada a los nodos. Sin embargo, la rectificación de los diodos MOS activos es posible, este enfoque necesita una señal de control de tensión, que es más grande que la tensión umbral del MOSFET (aprox. 0.4V).

Como la tensión rectificada pe es aún baja, un sistema de energy harvesting necesita un circuito adicional para cargar la batería. En todo caso, el efecto doblador del puente pasivo puede reducir la carga de los otros circuitos.

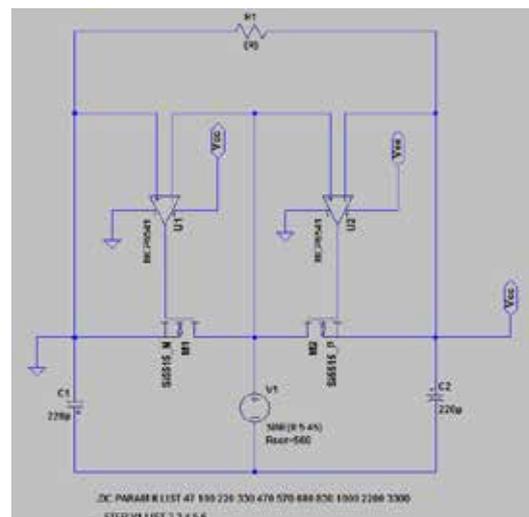


Fig. 3. Esquema del doblador de tensión a puente.

Diseño del diodo activo: Un diodo puede ser descrito como un switch controlado inteligentemente, donde sus estados ON/OFF son determinados comparando la tensión

a través de sus terminales: cuando la tensión en el ánodo es mayor que la tensión en el cátodo, el switch está encendido en el caso inverso, el switch está apagado.

El switch está implementado con un MOSFET, donde el source y drain están conectados al ingreso de un comparador, y la salida está conectada al gate del MOSFET.

El uso de componentes activos (comparador y MOSFET) introduce un consumo de potencia adicional, que es muy bajo en comparación a la potencia consumida por un diodo unión-base.

Diseño del doblador de tensión: Es un diseño convencional, utilizado en los tubos a rayos catódicos presentes en las TV para generar tensiones altas. El diseño del circuito tiene dos detectores que toman los picos negativos y positivos de la forma de onda de la señal en ingreso. La carga es conectada a través de las salidas negativas y positivas de los detectores de pico, donde la tensión de carga es el doble de la tensión ac que está al ingreso. Si reemplazamos el diodo a unión base con un diodo activo base, el circuito podrá operar a bajas tensiones en el ingreso.

Selección de MOSFET: El estado de operación del MOSFET es controlado por una tensión diferencial entre el terminal de gate y el terminal de source. Por ello, elegir el tipo de MOSFET y el rango de salida del comparador es muy importante.

Para evitar la corriente de fuga a través del cuerpo del diodo, el MOSFET debe estar conectado en el modo siguiente:

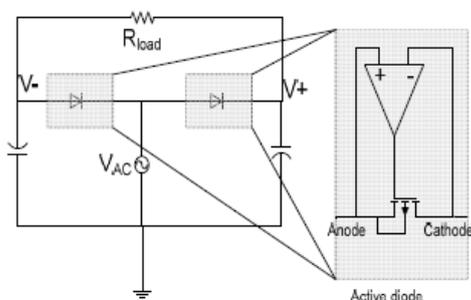


Fig. 4. Puente a diodos hecho con un diodo activo

Luego, dependiendo del tipo de MOSFET que se usa para cada tipo de doblador, la tensión de salida del comparador tiene algunas condiciones para encender o apagar los MOSFET.

Técnica de estabilización: El circuito no puede trabajar bien cuando la carga es muy ligera (o la impedancia de carga es muy alta). La tensión a través del MOSFET es muy baja para ser sensada por el comparador cuando el flujo de corriente es bajo. Una forma de afrontar este problema es agregando un resistor en serie con el MOSFET, así la tensión al ingreso vista por el comparador es amplificada. De cualquier modo, este enfoque aumenta la pérdida de conducción y reduce así la eficiencia.

#### 4. Rectificador activo AC-DC

La unidad de gestión de energía (PMU) se utiliza para controlar la dinámica del ventilador, sujeta a las condiciones ambientales, tales como la variación de la velocidad del viento.

Encontramos dentro un supercapacitor de rápida respuesta dinámica, que se utiliza para desacoplar la interrelación entre la energía fluctuante entregada por el generador de la turbina de viento y la operación síncrona del nodo del sensor wireless.

El diseño de la power management unit utiliza:

- 1) El rectificador ac-dc con MOSFET en vez de usar diodos, para rectificar la baja amplitud en tensión ac generada por el ventilador cuando hay poco viento.
- 2) Un convertidor dc-dc boost con un algoritmo que emula una resistencia que extrae la máxima potencia disponible, ósea un MPPT (maximun power point tracking).

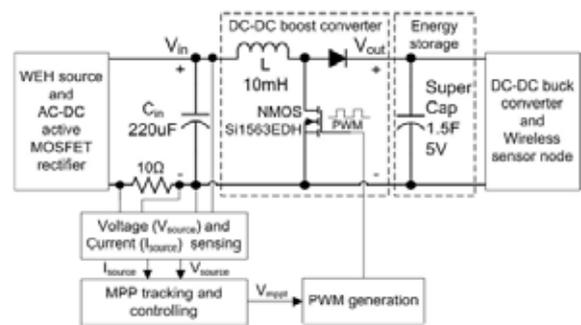


Fig. 5. Convertidor dc-dc Boost con MPPT

El rectificador activo está conformado por un convertidor de tensión negativo y un diodo activo. Compuesto por 4 MOSFET standard, 2 PMOS usados para llevar los ciclos negativos y positivos de la tensión en ac a la salida en tensión continua (Vdc) y 2 NMOS que proveen un camino para el nodo Vgnd, que lo hace retornar a un potencial bajo.

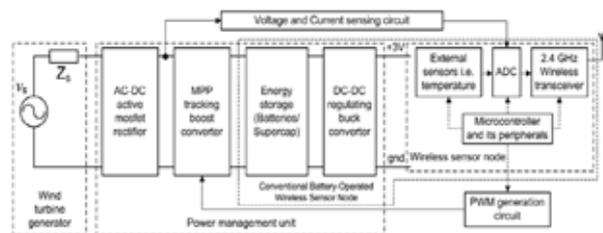


Fig. 6. Diagrama de bloques del harvester con circuito panda.

El primer estadio, convierte la semionda negativa de la entrada senoidal en una positiva. No sirve un circuito de encendido adicional porque la corriente tiene un camino alternativo a través del cuerpo del diodo en el MOSFET, siempre que éste no se encuentre activado.

El segundo estadio, del rectificador sirve para controlar las secuencias de conmutación ON y OFF del MOSFET que se encuentran en el primer estadio para facilitar el proceso de rectificación.

El diodo activo está compuesto por un comparador veloz y de bajo consumo de potencia, que muestra continuamente la tensión que pasa por cada MOSFET.

El problema de este método (sensor de tensión) es que la diferencia de tensión entre el ingreso ac y la salida en dc es muy pequeña, o el comparador es muy lento para medir estos valores, por eso existen excesivas oscilaciones durante las conmutaciones ON y OFF. Gracias a estas oscilaciones no deseadas, una parte de la energía eléctrica recolectada, se pierde, y así se reduce la eficiencia total del sistema.

Para superar el problema asociado a las bajas tensiones a través de los MOSFET, podemos sensar la corriente ac de la fuente.

El circuito sensor de corriente es simple y ahorra energía utilizando dos comparadores del tipo cero-crossing, que tienen un consumo de potencia muy bajo (90uW). La fuente de tensión de los comparadores es de 3V, tomada de la capacidad de almacenamiento.

Cuando el valor pico de la tensión ac al ingreso durante los ciclos positivos y negativos más grandes que la salida Vdc, la corriente iac fluye a través de la resistencia Rsense. Posteriormente, el comparador sensa el flujo de la corriente ac midiendo la tensión a través del Rsense. El comparador genera las señales de control con las combinaciones respectivas para el encendido o apagado del MOSFET.

Con +ve semiciclo ac: PMOS1 y NMOS2 encendidos.  
Con -ve semiciclo ac: PMOS2 y NMOS1 encendidos y PMOS1 y NMOS2 apagados.

El uso del circuito de sensado de tensión conlleva a una pérdida mayor de energía en el rectificador activo, por ello se reduce la eficiencia de la conversión de potencia total. Por eso, el circuito de sensado de corriente, que produce mejores prestaciones y mejor performance que el enfoque precedente, es utilizado en el rectificador activo para controlar la conmutación del MOSFET.

Entonces, la comparación se hace entre el rectificador activo basado en los MOSFET usando el enfoque que sensa la corriente, y el rectificador pasivo basado en diodos convencionales. Y se hace a través de la caída de tensión que atraviesa los dos MOSFET y dos diodos, y plotear para un rango de resistencias de carga. Donde se ve que a una misma resistencia de carga, el rectificador pasivo registra una mayor pérdida de tensión (0.6V) respecto al rectificador activo (0.15V).

$$n_{rect} = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Para encontrar la mejor solución para rectificar las bajas amplitudes de tensión ac generadas por la turbina de viento, especialmente cuando existe una baja velocidad de éste. Se ha discutido el uso de acoplamiento directo para encontrar una carga óptima del energy harvesting, respetando sus valores nominales.

Otro enfoque es aquello de considerar el convertidor boost como un emulador de resistencia a anillo abierto, con una adecuada selección de componentes para tener la impedancia de carga óptima del harvester en el punto

MPP. Ambos enfoques requieren un setup inicial, así como la impedancia de carga, que debe estar fija. En práctica este no es el caso en el cual la impedancia de carga tiende a variar (como en el proceso carga/descarga del super capacitor), es decir, el método del acoplamiento directo más allá del método de la emulación de la resistencia a anillo abierto, no puede ser usado en este contexto.

Para superar esto, se propone un microcontrolador basado en la emulación de la resistencia, con un esquema de retroacción (de la resistencia de control) a anillo abierto, para usarlo como MPPT del energy harvester de viento, para diversas condiciones dinámicas. El esquema propuesto no necesita un setup inicial, a diferencia de los enfoques anteriores, porque existe un microcontrolador junto a una resistencia de retroacción, para instaurar automáticamente el sistema de wind energy harvesting en sus puntos de MPPT.

Finalmente, el circuito MPPT propuesto se basa en la emulación de la resistencia de carga para igualarla con la impedancia de la fuente, este método está sujeto a un control a anillo cerrado, para monitorear y emular continuamente la resistencia de referencia óptima y también los cambios en la impedancia de carga.

Los módulos componentes del circuito son:

Un convertidor boost para gestionar la transferencia de energía del ventilador a la carga. Un MPPT basado en el enfoque de la emulación de un resistor, y su circuito de control que manipula el punto de operación del ventilador para mantener la energía recolectada en el MPPT. Y un circuito de generación del PWM.

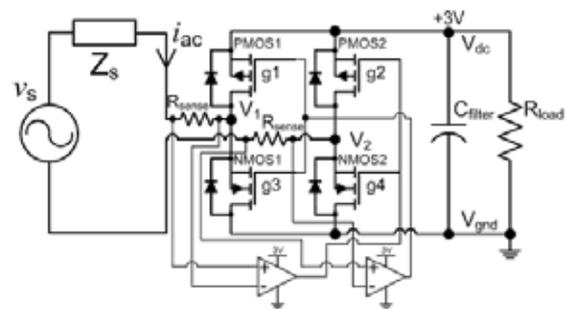


Fig. 7. Rectificador activo AC/DC

En el gráfico, podemos observar que cuando la resistencia de carga iguala a la resistencia de la fuente del ventilador, la energía recolectada es siempre la máxima, para diversas velocidades.

Para otras condiciones de carga, diferentes de la resistencia interna del ventilador (sean cargas ligeras o pesadas) la energía eléctrica generada en la salida por el generador disminuye significativamente.

Esto verifica que la técnica MPPT basada en la emulación de la resistencia se puede usar en sistemas de wind energy harvesting a baja escala, para obtener la máxima energía del ventilador.

Circuito Buck: Reduce la tensión en dc, usa una batería de 4 celdas (4.8V).

Circuito Boost: Usado para aumentar la tensión, puede interactuar con baterías de una o dos celdas, con una carga de 5V.

Circuito Buck-Boost: Convertidor que invierte la polaridad de la tensión.

Las pérdidas en los convertidores son del tipo:  
 - Pérdidas de Conducción: Se encuentra una caída de tensión en el diodo.

- Pérdidas de Conmutación: Se registran pérdidas en el circuito Snuber, en el núcleo del inductor y en el transformador.

Otras pérdidas son la corriente de control del Standby.

## 5. Circuito a 4 diodos schottky

Se diseñó un rectificador pasivo con un puente de 4 diodos Schottky a baja tensión inversa (comparable a la máxima tensión pico del generador).

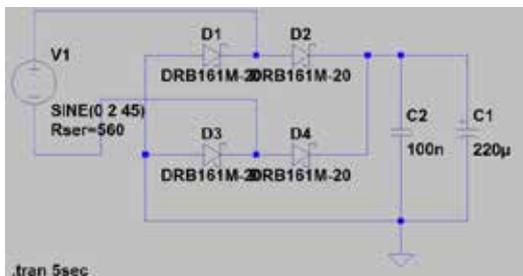


Fig. 8. Esquema del circuito a 4 diodos Schottky en LTSpice.

## 6. Circuito a dos integrados dual Schottky

Esta representación es igual al circuito precedente, pero en vez de utilizar los dispositivos RB161M, utilizamos chips que tengan dentro de su estructura dos diodos Schottky.

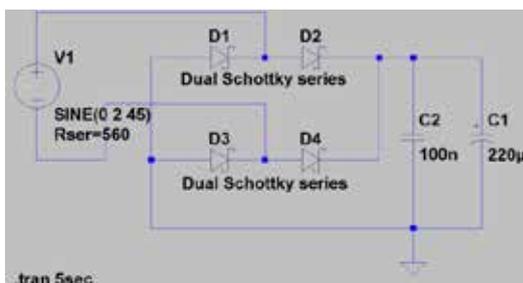


Fig. 9. Esquema del circuito a dos dual Schottky.

## Implementación de los circuitos

La elección de los componentes del circuito se efectuó teniendo siempre claros los requisitos y las características indispensables del proyecto. Vale decir, considerando en primer lugar el consumo de potencia y las pérdidas de los componentes activos y pasivos, en segundo lugar las dimensiones y demás parámetros físicos y eléctricos.

Por ejemplo, los MOSFET han sido elegidos en base a la tensión umbral y a la resistencia que se encuentra entre el drain y el source, parámetros que influyen en gran medida en el funcionamiento del circuito, porque operan con tensiones bajas (0.5 - 5V).

Otros factores son el package, la dimensión de los componentes, y su disponibilidad en el mercado. En la práctica, nos tenemos que adaptar a la oferta existente, logrando una implementación aproximada, del punto de vista comportamental, a la implementación simulada en el PSpice y sucesivamente en LTSpice, que aún puede ser mejorada con el uso de componentes ad hoc y de tecnología integrada, tratándose de bajas potencias.

## Pruebas efectuadas y Resultados obtenidos

Para encontrar la mejor solución rectificadora de las bajas amplitudes en el voltaje ac, generados por la turbina de viento, especialmente cuando hay una baja velocidad del viento, se comparan diversos tipos de rectificadores activos en los MOSFET, y los rectificadores pasivos basados en diodos convencionales.

La comparación se realiza mediante la medición de la caída de tensión a través de los dos MOSFET y los dos diodos, y graficadas en un rango determinado de resistencias de carga. Donde se puede observar que a una misma resistencia de carga, el rectificador pasivo registra una mayor pérdida en voltaje que el rectificador activo.

El pcb ha sido objeto de diversos test para verificar la funcionalidad efectiva y para calcular los parámetros de interés.

Las mediciones han sido efectuadas para todos los circuitos, de las simulaciones, el rectificador activo mostraba un comportamiento más favorable que un rectificador pasivo, sucesivamente se ha hecho un confronto los rectificadores pasivos basados en diodos schottky, elegidos intencionalmente para minimizar la caída de tensión en los límites de las condiciones de trabajo del circuito que es objeto de estudio.

Una vez medidos los datos (tensión de ingreso, de salida y corriente), han sido hallados a través de Matlab y las curvas de eficiencia con excel. Las medidas han sido repetidas para las 3 velocidades del ventilador utilizado como fuente, a cada una de las velocidades de viento, para 10 resistencias de carga relativas a:

- Potencia en salida en función de la resistencia de carga (para las 3 velocidades).

- Eficiencia en función de la resistencia de carga (para las 3 velocidades).

Dado que los comparadores que componen el rectificador activo han sido alimentados a través de una fuente externa, por ello necesitamos sustraer la potencia absorbida por ellos durante su funcionamiento. Considerando que estos últimos, del tipo MCP6541, la contribución es mínima, del datasheet del componente se encuentra una corriente de trabajo de 600nA, por cada comparador, que a una tensión de 2V, para los dos comparadores, entrega una potencia total absorbida equivalente a:

$$P_{tot} = (600nA \times 4V) \times 2 = 4.8\mu W$$

Considerando que las potencias en consideración son del orden de décimas de mW, la contribución debido a los

comparadores es ciertamente despreciable, entonces es posible calcular todas las grandezas que nos interesan, despreciando esta pequeña contribución.

## Gráficos Obtenidos

Se ha realizado la caracterización de cada rectificador para un rango de 10 resistencias, de sus valores de potencia, tensión y corriente en salida, considerando como potencia en el ingreso los valores hallados de la caracterización del ventilador a tres valores diversos de velocidad.

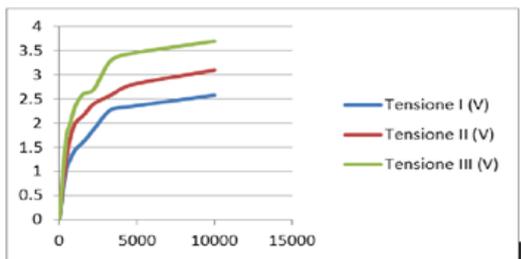
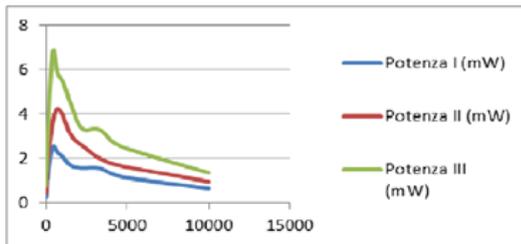


Fig. 13. Potencia y tensión a la salida del ventilador

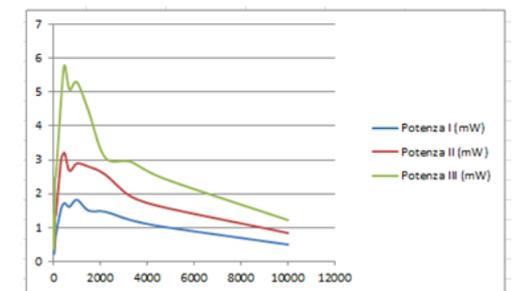
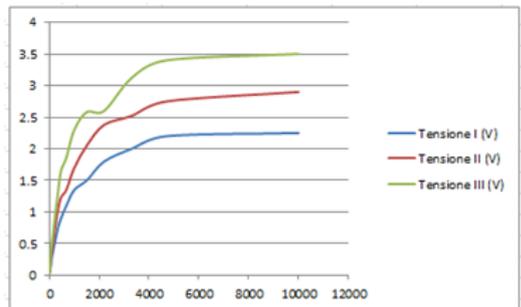


Fig. 14. Potencia y tensión en salida del circuito two dual Schottky

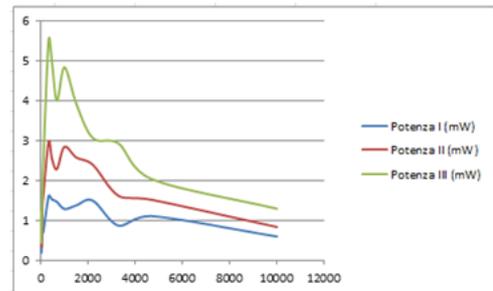
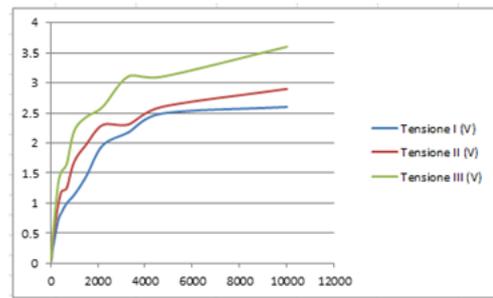


Fig. 15. Potencia y tensión en salida del circuito Four Schottky

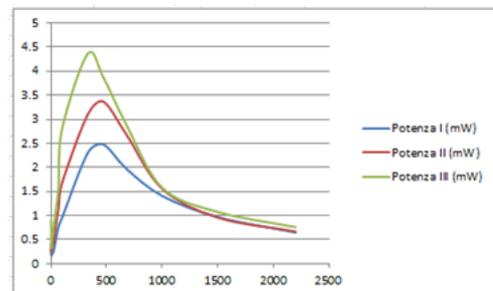
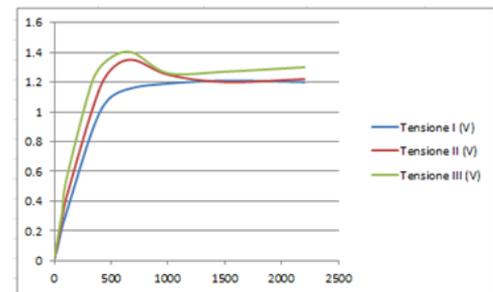
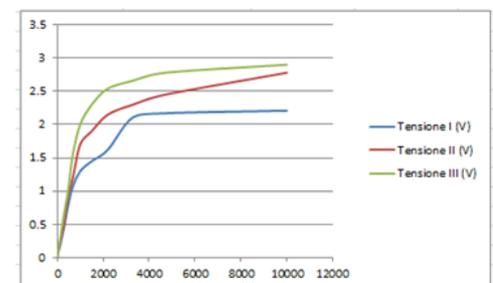


Fig. 16. Potencia y tensión en salida del circuito rectificador con diodo activo



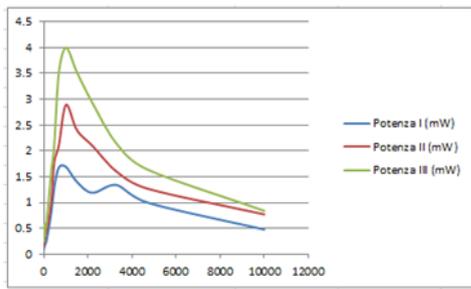


Fig. 17. Potencia y tensión en salida del circuito rectificador a puente doblador de tensión

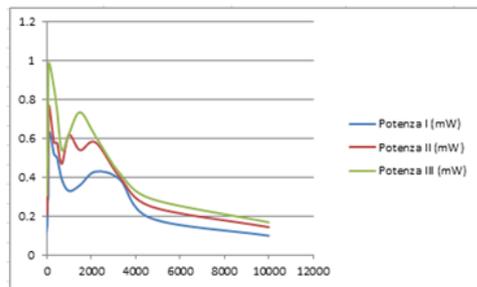
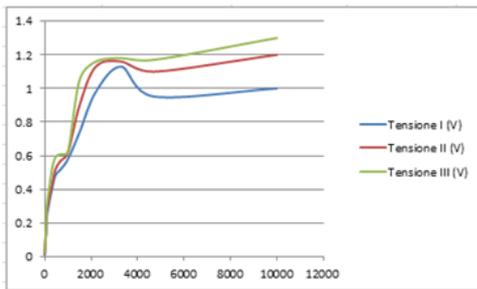


Fig. 18. Potencia y tensión en salida del circuito rectificador AC-DC

De la caracterización de cada rectificador para un rango de 10 resistencias, se ha encontrado la máxima potencia de salida a un valor de R cercano a  $500\Omega$ , se ha hecho una comparación entre las eficiencias de los rectificadores activo y pasivo, para una resistencia de  $330\Omega$ ,  $500\Omega$  y de  $680\Omega$ .

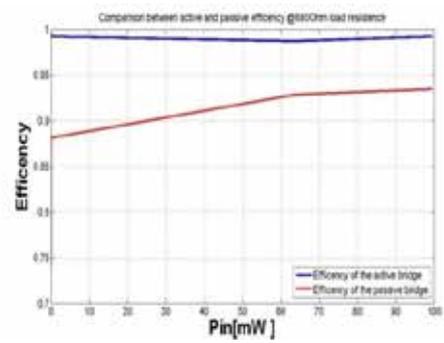
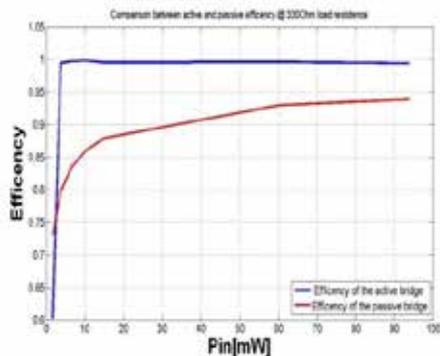


Fig. 19. Potencia y tensión en salida del circuito rectificador AC-DC

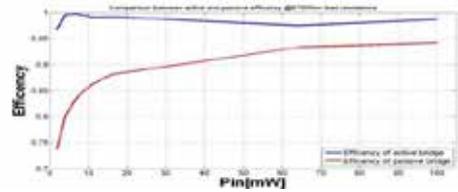


Fig. 20. Potencia y tensión en salida del circuito rectificador AC-DC

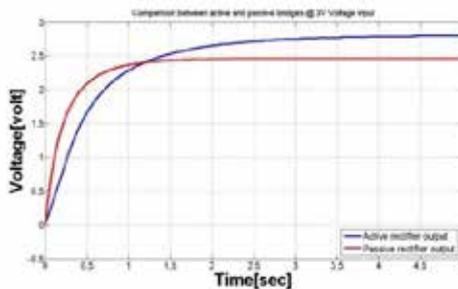
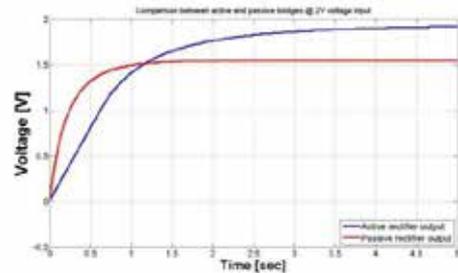
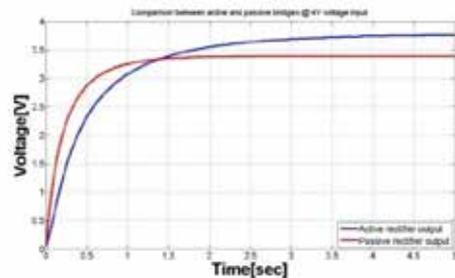


Fig. 21. Potencia y tensión en salida del circuito rectificador AC-DC



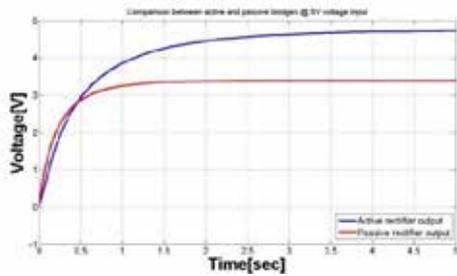


Fig. 22. Potencia y tensión en salida del circuito rectificador AC-DC

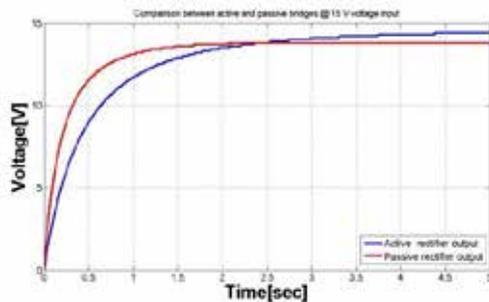
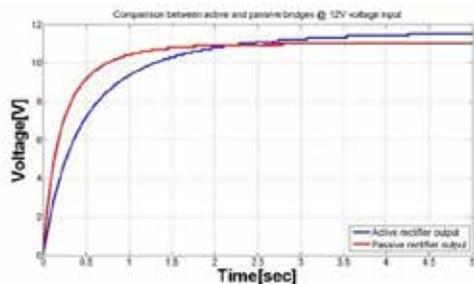


Fig. 23. Potencia y tensión en salida del circuito rectificador AC-DC

## Conclusiones

Para entender los beneficios de la gestión de la energía, estos convertidores deben ser capaces de mantener la regularidad de sus voltajes de salida, cuando no hay carga, mientras se mantengan a alta eficiencia.

De todo el análisis, se puede deducir que la solución activa ofrece mejores prestaciones en el uso como rectificador en el circuito a baja potencia y baja tensión, gracias a la mayor conductibilidad del MOS y a la topología particular del circuito, que permite aprovechar al máximo la fuente utilizada.

## Referencias bibliográficas

- [1]. "Optimized wind energy harvesting system using resistance emulator and active rectifier for wireless sensor nodes", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 26, NO. 1, JANUARY 2011, pp 38-50.
- [2]. "A bridge voltage doubler AC/DC converter for low-voltage energy harvesting applications", Shuo Cheng, Ying Jin, Yuan Rao and David P. Arnold.
- [3]. "An comparator based active rectifier for vibration energy harvesting systems" Yang Sun, In-Young Lee, Chang-jin Jeong, Seok-kyun Han, Sang-gug Lee, ISBN 978-89-5519-155-4, Feb. 2011.
- [4]. "High efficiency DC-DC converters for battery-operated systems with energy management", R. Erickson & D. Maksimovic.
- [5]. "Resistor emulation approach to low-power energy harvesting", Thurein S. Paing and Regan Zane.
- [6]. "AmbiMax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes" C. Park and P.H.Chou.
- [7]. "An active voltage doubling AC/DC converter for low-voltage energy harvesting applications" IEEE transactions on Power electronics Vol 26N08 August 2011, pp 2258-2265.
- [8]. "Elementi di progettazione dei Sistemi VLSI", Mauro Olivieri