Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

# Rectificadores para los sistemas de recolección de energía con aplicación en dispositivos wearable

## Rectifiers for energy harvesting in application wearable devices

**Vázquez-Valdés, S.E.[a], Juárez-Aguirre, R.[b], López-Huerta, F.[a,b]**

[a] Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana, Adolfo Ruiz Cortines 455, Boca del Río 94294, Veracruz, México.
[b] Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Veracruzana, Adolfo Ruiz Cortines 455, Boca del Río 94294, Veracruz, México.
elizabethvazquezval@gmail.com; rauljuarez@uv.mx; frlopez@uv.mx

**Innovación:** Electrónica.

**Área de aplicación industrial:** Aprovechamiento de la energía.

Recibido: 15 junio 2020
Aceptado: 06 abril 2021

### Abstract

Wearable technology is currently a growing industry with a great impact on people's lives. This happens by presenting a wide variety of devices that help simplify everyday life and even contribute to health care, from a smart device to bracelets that can measure a person's blood pressure, heart rate or sleep quality. Resulting in an increasing energy demand year by year, for this reason it is considered that energy collectors are considered an alternative to reduce the use of batteries and care about the environment as well, getting as a result the emergence of autonomous devices that can generate their own energy to function. The disadvantage that these systems have is that to adequately supply power to a wearable device is that most transducers generate an alternating current signal, and a direct current signal is required, and for this a signal conditioning stage is necessary, i.e., a rectifier circuit for this application. Therefore, the objective of this study is to show the operation and the importance of the rectification stage in Energy Harvesting systems, as well as the evolution they have had by improving the efficiency in the use of energy with different topologies and electronic devices for possible applications in wearables.

**Keywords:** CMOS, Energy Harvesting, Rectifier, Wearable.

**Resumen**

Actualmente, la tecnología Wearable es una industria en crecimiento, por el impacto que tiene en la vida cotidiana de las personas. Esto al presentar una gran variedad de dispositivos, desde un dispositivo inteligente hasta pulseras que pueden monitorear la presión arterial, el ritmo cardiaco o la calidad del sueño de una persona contribuyendo al cuidado de la salud. Esto ha propiciado que la demanda de energía aumente año con año, considerando a los recolectores de energía una alternativa viable y sustentable para el suministro de energía de los dispositivos wearable, permitiendo incrementar la vida útil de las baterías y creando dispositivos autónomos, los cuáles pueden generar su propia energía para funcionar. El inconveniente que estos sistemas presentan para suministrar la energía adecuadamente a un dispositivo wearable es que la mayoría de los transductores generan una señal de corriente alterna y se requiere una señal de corriente continua, para esto es necesario una etapa de acondicionamiento de la señal, es decir, un circuito rectificador para dicha aplicación. El objetivo de este trabajo es mostrar el funcionamiento y la importancia que tiene la etapa de rectificación en los sistemas Energy Harvesting, cuáles son los principales circuitos rectificadores y sus limitaciones, para el desarrollo de futuras investigaciones.

**Palabras clave**: CMOS, Recolección de Energía, Rectificador, Wearable.

## 1. Introducción

El impacto que ha tenido la tecnología Wearable en los últimos años en el ámbito del cuidado de la salud, debido a su uso en el monitoreo de diferentes datos fisiológicos que se pueden medir y controlar en una persona como la frecuencia cardíaca, la temperatura, la presión sanguínea, los niveles de glucosa en sangre o la tasa de respiración [1-3], lo cual ha despertado el interés en el mejoramiento de estos dispositivos en relación al suministro de energía, buscando alternativas de sistemas que sean amigables con el medio ambiente. Es así como surgen los sistemas de Recolección de Energía (Energy Harvesting), que capturan pequeñas cantidades de la energía presente en el ambiente o de la que se genera de fuentes externas (como la luz solar, el viento, la radio frecuencia, la temperatura, los movimientos mecánicos y las vibraciones) [4], y la convierten en energía eléctrica que puede ser almacenada o utilizada para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo de potencia, como los dispositivos Wearables.

Sin embargo, existe un inconveniente al querer utilizar los recolectores de energía para el fin mencionado, y es que no todos los recolectores de energía brindan la corriente directa (CD) o corriente continua (CC), que se necesita para alimentar un dispositivo Wearable, sino que generan una corriente alterna en la salida (CA). En la Figura 1, se pueden observar las diferentes fuentes de energía ambiental y los transductores que se utilizan en cada caso para captar la energía; a excepción de los transductores de efecto termoeléctrico y las celdas fotovoltaicas, los demás transductores proporcionan una CA en su salida la cual tendrá que ser rectificada si se pretende utilizar como suministros en aplicaciones Wearables.

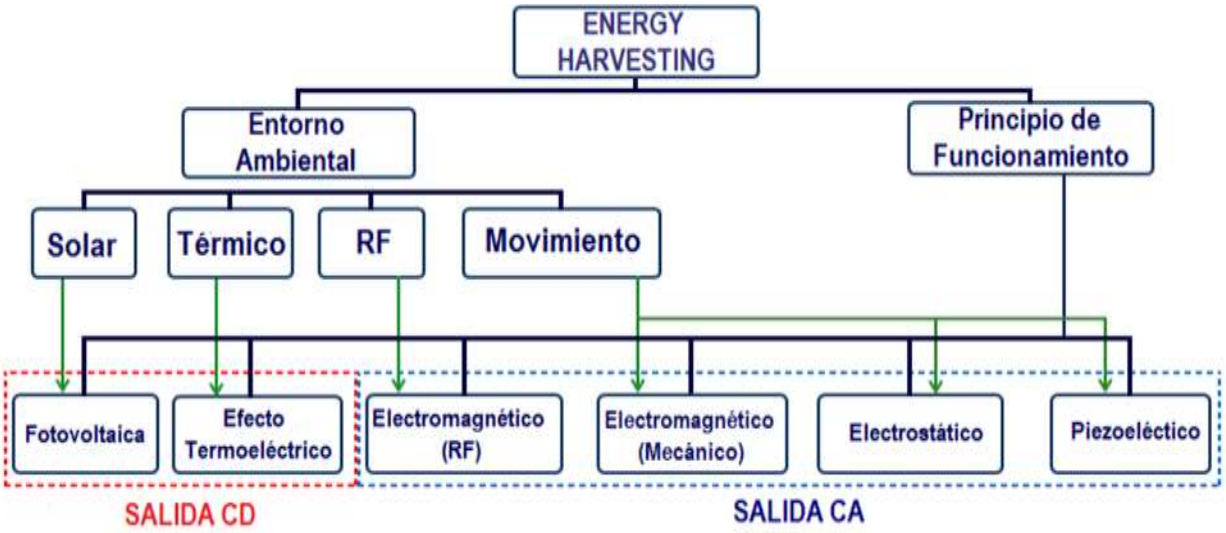



**Figura 1.** Diagrama a bloques de las principales tecnologías de captación de energía [5,6].

Como se pudo apreciar en la figura anterior (fig. 1), hay un campo extenso en cuanto a transductores de recolección de la energía, por lo que, en este trabajo el enfoque de los circuitos rectificadores será para los transductores piezoeléctricos, considerando que una persona puede generar cierta cantidad de energía con el movimiento de su cuerpo [7], y aprovecharla para la alimentación de posibles aplicaciones en dispositivos wearables. La densidad que se puede generar es 10 µW a 100 µW, todo dependiendo de las características que posea el transductor piezoeléctrico, es decir, la amplitud de la corriente del transductor $I_p$, la cual varia con la excitación mecánica del mismo [8-10], la potencia alcanzada por estos sistemas es suficiente para que puedan operar los dispositivos Wearable.

Para poder utilizar los sistemas de Energy Harvesting para mejorar la vida útil de las baterías en dispositivos Wearable o en un futuro como alternativa de estas, se requiere de un circuito de acondicionamiento que sea eficiente y de tamaño suficientemente pequeño para portarlos, es por esta razón que los rectificadores son de suma importancia para la utilización y el aprovechamiento de la recolección de energía.

En la Figura 2, se muestra el proceso de un sistema de recolección de energía, donde primero se captura la energía del medio circundante como el de la luz, el calor, el viento, la radiación y la vibración, para después transformar esa energía por medio de un transductor en energía eléctrica, la siguiente etapa o proceso es el acondicionamiento de la señal por medio de un circuito rectificador, y es en esta parte donde se centra este trabajo, porque se convertirá la CA en CD; luego le sigue una etapa de regulación que mantendrá el nivel de voltaje que necesita el dispositivo al que se le suministra energía o el elemento que la almacenara, el cual puede ser un capacitor, supercapacitor o batería y finalmente la carga eléctrica, que en el caso de este trabajo se considera un dispositivo Wearable [11-12].




**Figura 2.** Diagrama a bloques general de un sistema de recolección de energía [11-12].

El propósito principal de utilizar los EH (Energy Harvesting) en un dispositivo wearable es aprovechar la mayor cantidad de energía que una persona puede generar con movimientos esenciales como caminar, correr o simplemente mover un brazo al saludar y de esta manera contribuir a la generación de dispositivos que pueden llegar a ser autónomos y sustentables [2,13].

En el diagrama de la Figura 3, se define el contenido de la investigación descriptiva realizada en los sistemas de energy harvesting, es importante considerar cada uno de estos bloques como una metodología para trabajos de desarrollo de nuevos rectificadores o su implementación en aplicaciones en dispositivos wearables.

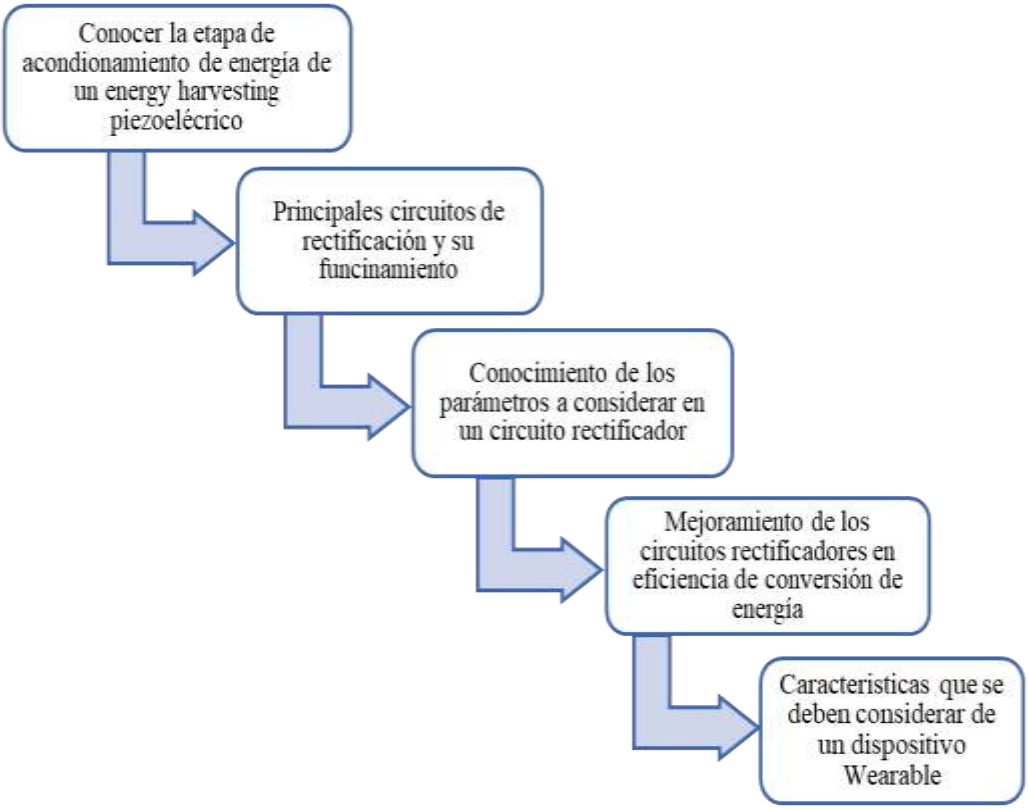



**Figura 3.** Investigación descriptiva.

## 2. Circuito de acondicionamiento de la señal

Como ya se mencionó, los Energy Harvesting, cuyos transductores proporcionan CA en la salida (Figura 1), necesitan el acondicionamiento de esa señal, tal es el caso de los Energy Harvesting con transductor piezoeléctrico, capturan la energía residual del ambiente, procesos industriales o de actividades humanas, las cuales proporcionan una señal de voltaje y corriente oscilatorias y bipolares, esto hace que no se pueda aplicar esa energía directamente a los dispositivos Wearables, por lo que es necesario utilizar los circuitos llamados rectificadores [14].

Un rectificador es un circuito que transforma la energía de una fuente de CA en CC. Existe un circuito estándar, el cual se muestra en la Figura 4, este consta de una fuente de alimentación de CA y de un puente rectificador de diodos, el cual proporciona una salida de CC [15].

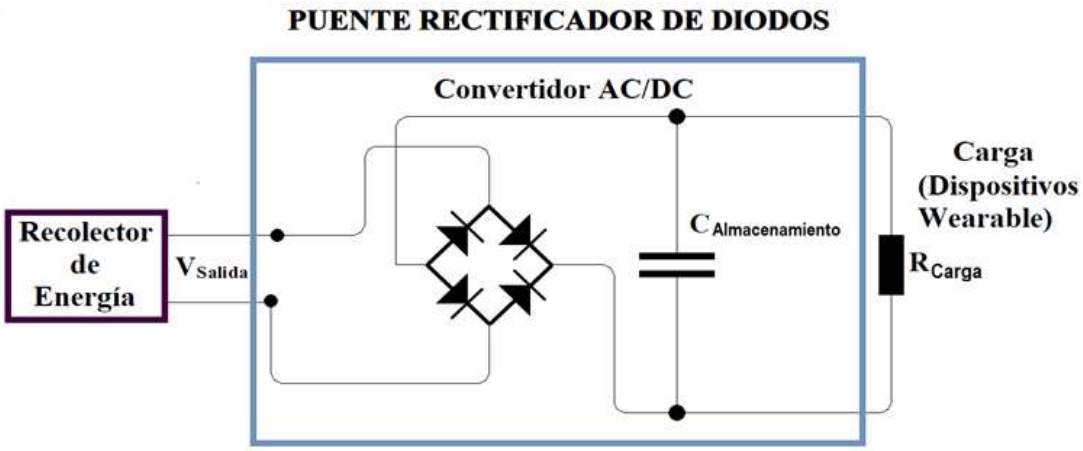



**Figura 4.** Circuito estándar de un rectificador [16].

El inconveniente con este tipo de circuitos es su baja eficiencia de conversión de energía, que se debe a que no pueden rectificar señales cuyas amplitudes son menores que el voltaje de umbral, este voltaje ocurre donde comienza a conducir u operar el dispositivo rectificador, en este caso el diodo, cuyo voltaje es de 0.7V y 0.3V para diodos de silicio y diodos de germanio, respectivamente [17], lo que representa una limitante en el aprovechamiento de la generación de energía del recolector, que generan voltajes inferiores a estos.

### 2.1. Principio de funcionamiento de un rectificador con puente de diodos

En la Figura 5, se muestra el circuito rectificador con puente de diodos (también llamado puente de Graetz) [18]. Como se logra observar, la entrada de este circuito es una señal de corriente alterna, la cual consta de dos semiciclos uno positivo y otro negativo.

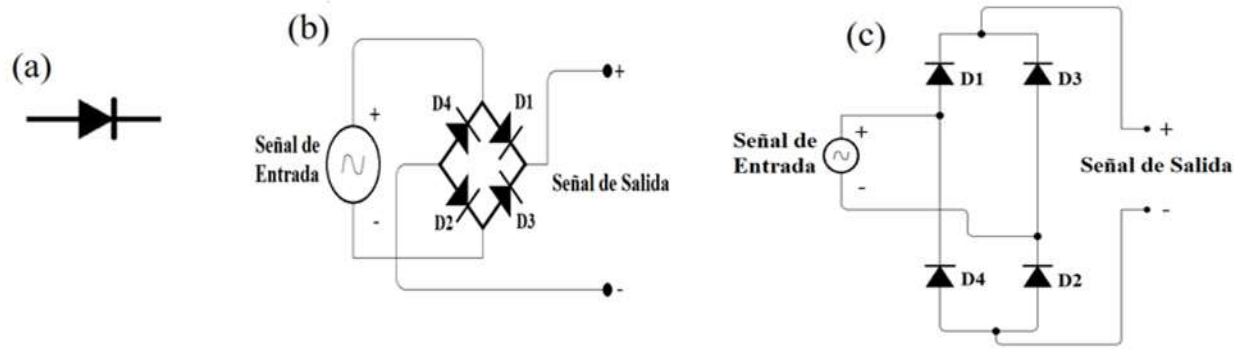



**Figura 5.** Puente rectificador, (a) símbolo de un diodo, (b) y (c) diferentes formas de representar el circuito [18].

Este circuito se comporta como si los diodos fueran interruptores, es decir, cuando el semiciclo positivo de la señal de entrada se presenta los diodos D1 y D2, se encienden y comienzan a conducir la corriente, mientras que los diodos D3 y D4 se encuentran apagados, y cuando el semiciclo negativo se presenta pasa lo contrario, los diodos D4 y D3 ahora conducen la corriente de ese semiciclo [15,18]. Esto se debe a que los diodos en cada semiciclo se encuentran polarizados de manera directa o inversa. En la Figura 6, se muestran las trayectorias que sigue la corriente desde la entrada a la salida del circuito con puente de diodos, dependiendo de que semiciclo de la señal de entrada circula por cada diodo.

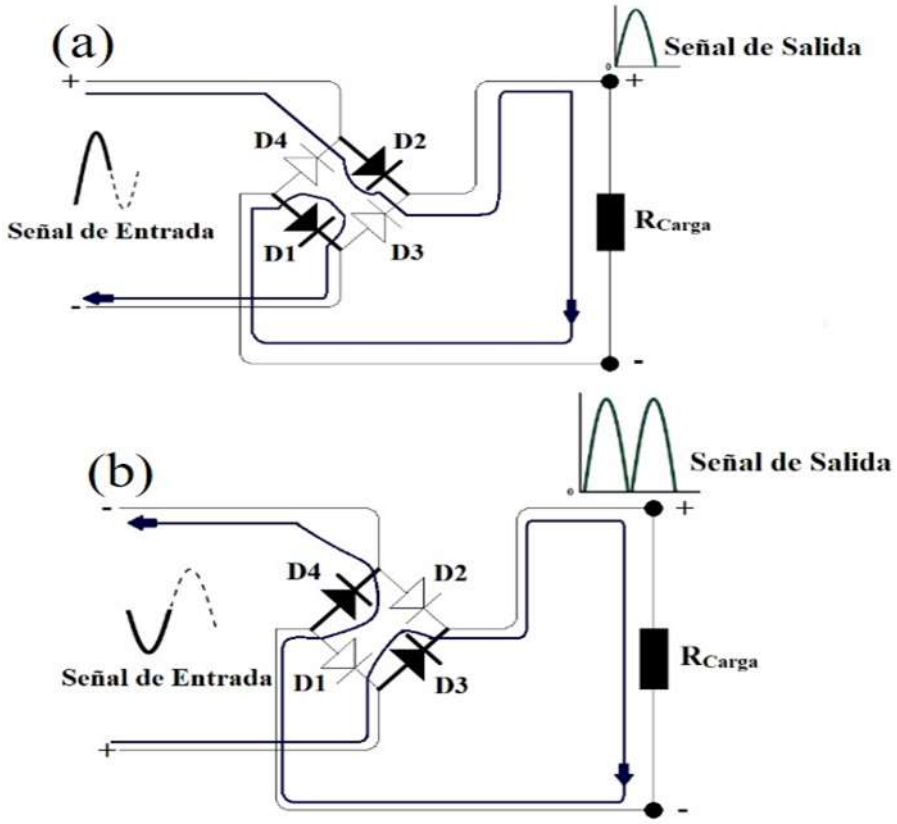
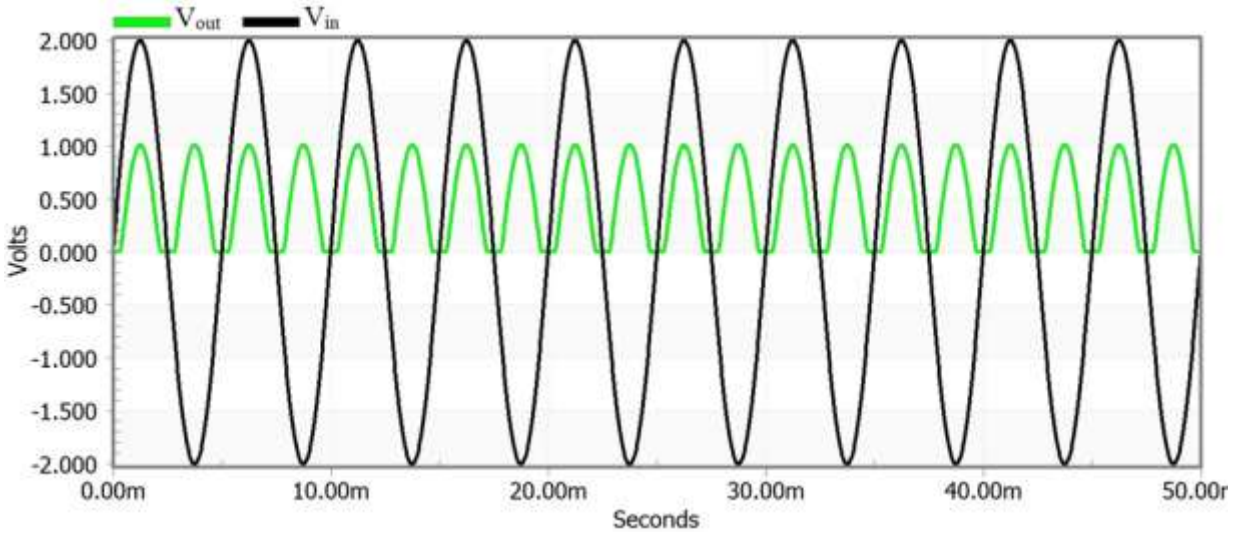



**Figura 6.** Trayectoria de como circula la corriente por el circuito según el semiciclo de la señal de entrada. (a) Semiciclo Positivo, (b) Semiciclo negativo [18].

Pero estos circuitos no son totalmente eficientes, como ya se mencionó antes, además de que ocupan un área considerable de silicio, si se pretende incorporar los sistemas de Energy Harvesting en los dispositivos Wearable, ya que uno de los beneficios que se busca es el tamaño ligero, peso y portabilidad.

En la Figura 7, se muestra la simulación de un circuito rectificador con puente de diodos (diodos utilizados en la simulación D1N4148), donde en el inciso (a) se puede observar el voltaje de entrada y salida del circuito, es decir, la señal que proviene del transductor y la señal rectificada, y en el inciso (b) el análisis de las simulaciones de diferentes voltajes de entrada, donde se ve claramente que este circuito empieza a rectificar a partir de los 0.7 V, debido al voltaje de umbral de los diodos que se utilizaron.

(a)




(b)

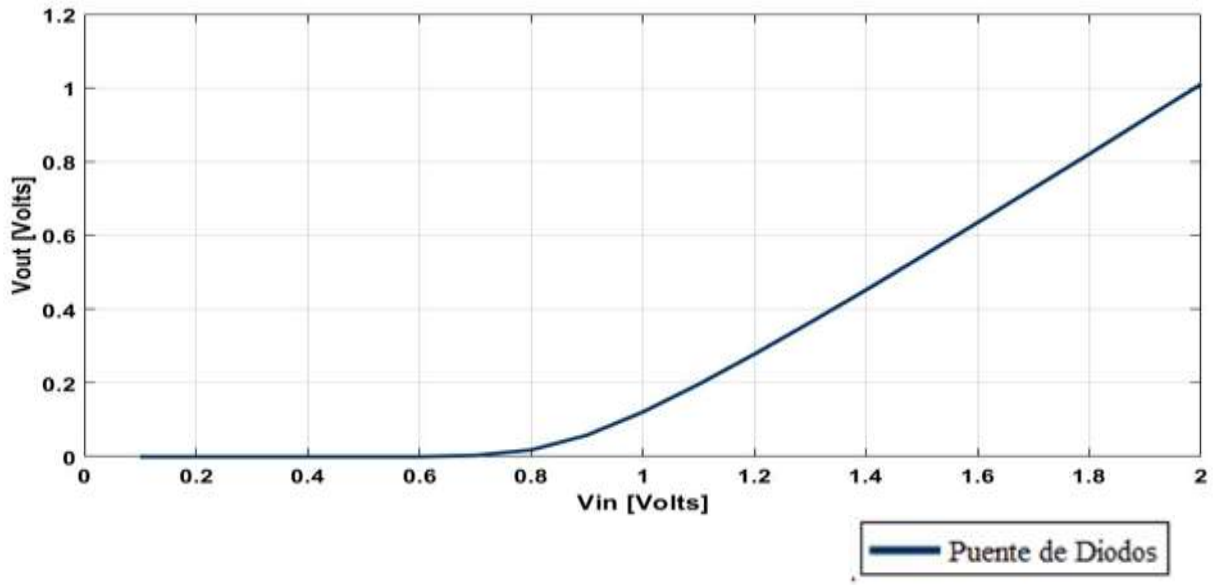



**Figura 7.** Circuito Rectificador con puente de diodos. (a) Simulación del $V_{in}$ y $V_{out}$ a una frecuencia de 100 Hz, (b) Relación $V_{in}$ y $V_{out}$.

Para determinar la eficiencia de un rectificador, existen dos parámetros importantes, que indican el porcentaje de la energía que es transformada por estos circuitos, es decir, que porcentaje de la CA proporcionada por el transductor se transformó en CC. La finalidad de estos parámetros es encontrar la mejor tecnología y topología que logre la máxima eficiencia de conversión de la energía sin perder la recolectada, aunque por la naturaleza de cualquier proceso siempre habrá perdidas [19].

Los parámetros para dicha medición son: la Eficiencia de Conversión de Voltaje (VCE) y la Eficiencia de Conversión de Potencia (PCE). Donde la VCE es la tensión de salida o voltaje rectificado en relación con el voltaje de entrada, es la medición de que tanto voltaje de la entrada del circuito fue rectificado [20], y la ecuación está dada por [21]:

$$VCE = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100\% \qquad \textbf{(Ec. 1)}$$

Y la PCE, que es la potencia rectificada entre la potencia de entrada que proporciona el transductor [20], y la ecuación es [21]:

$$PCE = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \qquad \textbf{(Ec. 2)}$$

En la siguiente sección se mencionarán estos parámetros, y se describirán los avances tecnológicos en los rectificadores y cómo han logrado resolver la problemática de la eficiencia de conversión de la energía, ya que los recolectores piezoeléctricos generan voltajes variables en el tiempo, de modo que la rectificación es necesaria [22], además de reducir el consumo de área, con la propuesta de diferentes topologías, usando dispositivos electrónicos como el transistor de efecto de campo metal óxido semiconductor (MOSFET) o tecnologías como el metal óxido semiconductor complementario (CMOS).

### 2.2. Desarrollo y tendencias de los circuitos rectificadores

Como se explicó antes, los circuitos rectificadores con diodos presentan una caída de voltaje, razón por la cual no se utilizan para acondicionar señales de voltajes bajos, al menos no por debajo del voltaje de umbral ($V_{th}$), además entre más alto sea el $V_{th}$ del diodo mayor será la perdida de potencia en el circuito, problema principal de los rectificadores convencionales [23]. En la Figura 8, se muestra una gráfica de la señal de voltaje de entrada ($V_{in}$) y salida ($V_{out}$) de un circuito rectificador con diodos.

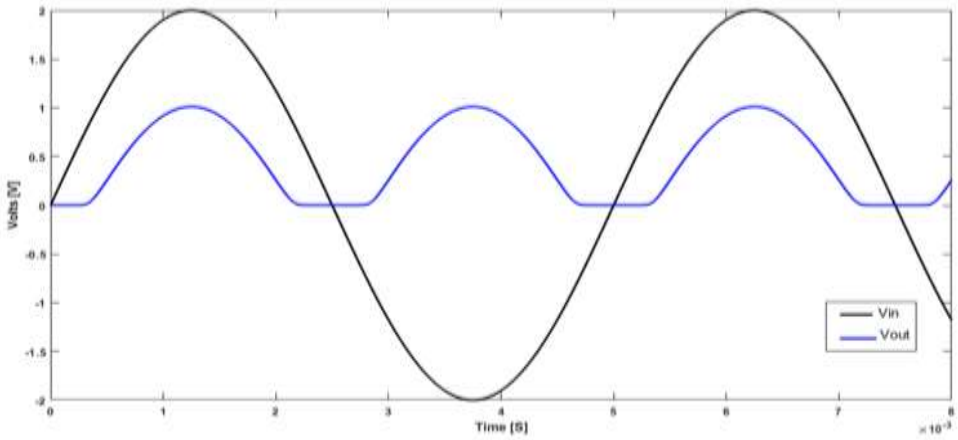



**Figura 8.** Rectificación de un circuito con puente de diodos.

Gracias a los avances tecnológicos y científicos, la tecnología CMOS, ha sido capaz de mejorar en un 69.65% la caída de la tensión de los circuitos con puente de diodos, esta caída de voltaje que resulta ser la limitante para no alcanzar el pico máximo de voltaje que entra al circuito rectificador en la señal de salida, ya rectificada, provocando la disminución del nivel de potencia obtenida y la eficiencia de conversión de voltaje [15,22].

La tecnología CMOS pertenece a una de las familias lógicas empleadas para la fabricación de circuitos integrados, y se caracteriza por utilizar un conjunto de dos transistores uno de canal tipo P- Metal óxido Semiconductor (PMOS) y otro de canal tipo N- Metal óxido Semiconductor (NMOS), y la ventaja principal es que posee una buena inmunidad al ruido, baja disipación de potencia, un amplio rango de voltajes de operación, alta impedancia de entrada y la capacidad de funcionamiento en un amplio rango de temperatura [24]. Por lo que las investigaciones acerca de los circuitos rectificadores han demostrado que al utilizar la tecnología CMOS, la VCE y la PCE aumentan considerablemente a comparación de los rectificadores con diodos, por ejemplo, eficiencias de conversión de voltaje por arriba del 87% y eficiencias de conversión de potencia del 81.9% en los principales circuitos propuestos con esta tecnología, además de optimizar el consumo de área de dimensiones reportadas de aproximadamente 0.009 $mm^2$ [21].

Las mejoras de los rectificadores radican en diferentes modificaciones: como la topología que se implemente y qué tecnología CMOS se use (dependiendo de la longitud del canal), estos son factores que influyen en que un rectificador sea mejor que otro en diferentes parámetros como la eficiencia de conversión de potencia y de voltaje, el área de consumo y el voltaje de umbral, como en el caso de la sustitución de los diodos por la tecnología CMOS. Por eso a continuación se presentan diversas topologías que pueden rectificar una señal de un transductor piezoeléctrico.

En la Figura 9, se puede observar un circuito muy similar al rectificador de puente de diodos, solo que ahora se utiliza tecnología CMOS, integrada por dos transistores el de tipo NMOS y otro del tipo PMOS, ambos son del tipo MOSFET (Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor) [25].

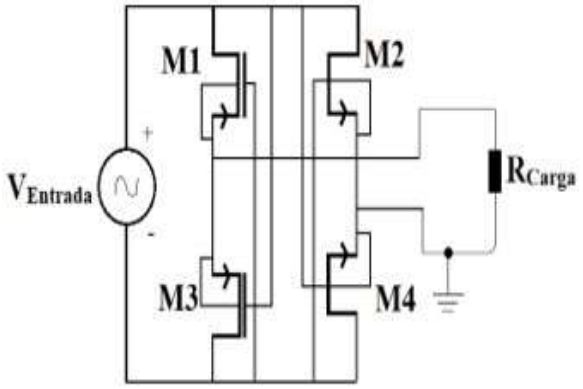



**Figura 9.** Rectificador con tecnología CMOS [15].

El rectificador CMOS de la figura anterior, utiliza dos transistores PMOS y dos transistores NMOS, M1 y M3, y M2 y M4 respectivamente. El funcionamiento es igual que en un puente de diodos, por cada semiciclo positivo M1 y M4, se activaran dejando fluir la corriente de ese semiciclo a la salida, mientras que M3 y M2 permanecerán apagados; el efecto contrario ocurrirá cuando el semiciclo negativo se presente, entonces los transistores que conducirán la corriente serán el transistor M3 y el transistor M2, obteniendo así una rectificación de onda completa con una eficiencia de conversión de potencia por arriba del 80% [21], cabe mencionar que el voltaje de umbral ($V_{th}$) de este tipo de tecnologías es menor o igual a 0.3 Volts (en tecnologías actuales), dependiendo de la longitud de canal del CMOS, esto

permite la rectificación de voltajes inferiores a los diodos.

En los últimos años se han desarrollado diferentes topologías con la tecnología CMOS con diferentes longitudes de canal y para diversos tipos de Energy Harvesting (ya que cada uno posee parámetros y características diferentes que los rectificadores tienen que cumplir), a continuación, en la Figura 10 se muestran algunos ejemplos de circuitos implementados, en el inciso (a) se tiene un rectificador CMOS con la topología de acoplamiento de compuerta cruzada, en el inciso (b) un rectificador con topología de compuerta completamente cruzada y (c) rectificador activo con interruptores PMOS acoplamiento cruzado [22,26].

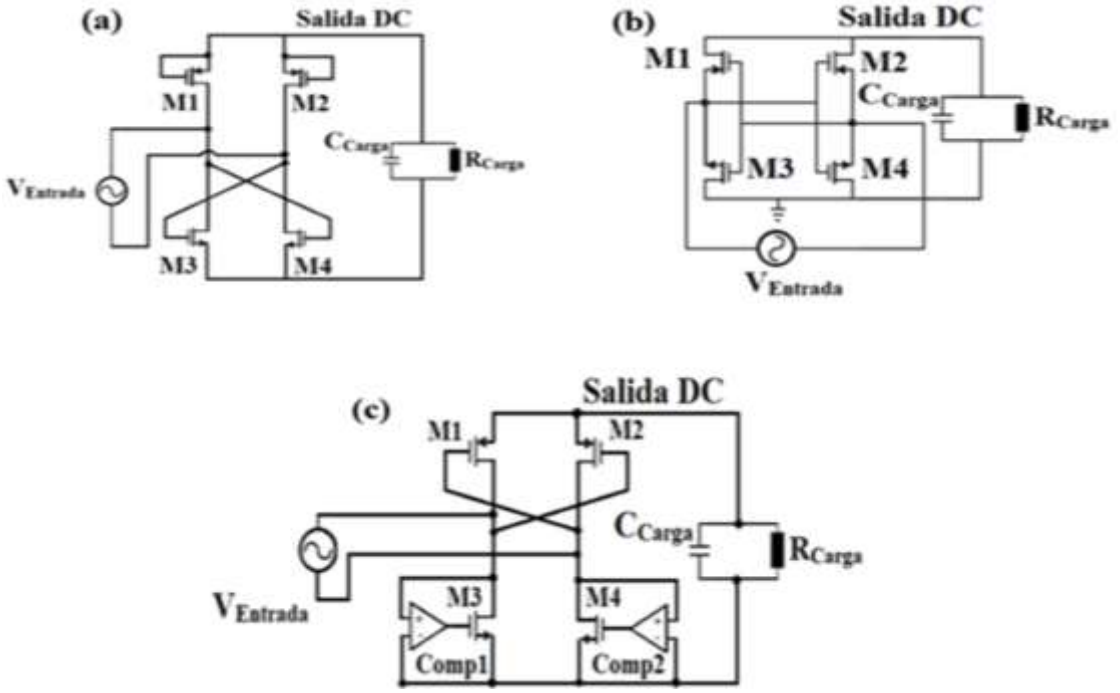



**Figura 10.** Rectificadores CMOS. (a) Topología de acoplamiento de compuerta cruzada, (b)Topología de acoplamiento de compuerta completamente cruzada y (c) Topología utilizando circuitos comparadores [21,22,26].

Los circuitos de la Figura 10 (a) y (b), muestran dos topologías de compuerta cruzada, basados en MOSFET rectificadores de puente completo, las cuales ayudan a la mejora de la conversión de energía, aumentando la PCE hasta alcanzar valores del rango del 70-80%, incluso en voltajes de entrada bajos (0.4-0.6 V) [22]. En el circuito del (a) un acoplamiento de compuerta cruzada reduce la caída del voltaje $V_{th}$ existente en un diodo durante la conducción de la corriente, ampliando el rango de entrada útil, esto es posible a la conexión de las compuertas cruzadas, obteniendo el aumento de la corriente directa [26]. Sin embargo, en los transistores M1 y M2, sigue ocurriendo una caída de voltaje.

El circuito (b) rectificador de compuerta completamente cruzada, podemos observar que todas las compuertas de los transistores están completamente cruzadas, para corregir esa caída de corriente en M1 y M2 del circuito anterior, logrando así que todos los transistores disminuyan $V_{th}$ y aumentar la corriente directa, teniendo mejores resultados en la VCE y PCE que el circuito del inciso (a) [27].

Pasando al circuito (c) de la misma Figura 10, tenemos que en este circuito se está utilizando comparadores (Comp1 y Comp2) que permiten controlar la operación de la compuerta de los

transistores NMOS (M3 y M4), comparando la señal de entrada con el potencial de tierra, logrando conmutar los transistores en encendido y apagado por completo, para minimizar la corriente de fuga inversa del rectificador [28-29], este circuito mejora la eficiencia de conversión de potencia y de voltaje de los dos circuitos anteriores.

Hay que enfatizar que los rectificadores se pueden clasificar en dos grupos: los rectificadores pasivos, los cuales presentan topologías simples para la rectificación de onda completa como los circuitos que constan de cuatro diodos o transistores, como las Figuras 5, 9 y 10 en los incisos (a) y (b); y los rectificadores activos, los cuales presentan un circuito de control, para accionar a los transistores, presentando un consumo de energía adicional e inclusive pueden requerir de un suministro de energía condicionado [22], un ejemplo de estos circuitos rectificadores activos es el analizado en la Figura 10 inciso (c). El principal problema con estos rectificadores de potencia activa es el arranque, ya que necesitan de una energía almacenada para funcionar, una solución sería usar componentes activos que pueden ser alimentados directamente desde la salida del generador [22] o realizar circuitos rectificadores que tengan una parte de rectificación pasiva que pueda poner en marcha la parte de rectificación activa [30].

En la Figura 11, se muestran las gráficas de un trabajo de investigación [26], donde los autores realizan una comparación entre las topologías principales de rectificadores con tecnología CMOS 0.18 µm TSMC (Circuitos de las Figuras 9 y de la Figura 10 los incisos (a) y (b)), basándose en voltajes de entrada bajos (<1V) y frecuencias bajas (< kHz), características que manejan los transductores piezoeléctricos, además de tener un consumo de potencia en el rango de los nanowatts a microwatts.

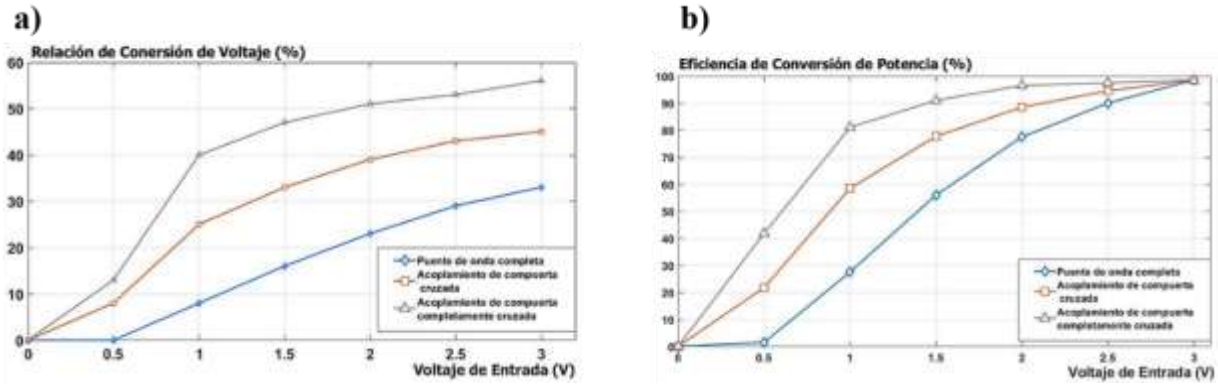



**Figura 11.** VCE y PCE en rectificadores CMOS. (a) VCE para rectificador de puente completo, acoplamiento de compuerta cruzada y acoplamiento de compuerta completamente cruzada, (B) PCE para rectificador de puente completo, acoplamiento de compuerta cruzada y acoplamiento de compuerta completamente cruzada [26].

Las gráficas anteriores (fig. 11) demuestran que los rectificadores de puente completo pueden presentar PCE por arriba del 90% a partir de voltajes de entrada de 2.5V, mientras que los rectificadores de compuerta cruzada y compuerta completamente cruzada presentan PCE en un rango de 80-90% en voltajes de entrada desde 1 a 2.5V, además de presentar VCE superiores al 40%, las simulaciones fueron realizadas con una resistencia de carga de 100 kΩ [26]. Estos parámetros son importantes a la hora de determinar el rectificador que se pretende usar en un sistema energy harvesting, ya que dependiendo de que transductor se esté utilizando, será el voltaje que se va a rectificar, por ejemplo, los rectificadores de acoplamiento cruzado suelen ser aplicados para rectificar voltajes de entrada inferiores a 0.5V [26].

Partiendo del conocimiento de los rectificadores considerados estándares o principales con tecnología CMOS, es que se han desarrollado investigaciones con algunas variantes, como el circuito rectificador de la Figura 10 inciso (c), el cual emplea la topología de compuerta cruzada con comparadores que ayudan a elevar las eficiencias de rectificación y el presentado en la tabla 1, donde Oh et al. muestran un rectificador de compuerta cruzada con comparadores añadiendo un circuito de control digital para el disparo de los transistores PMOS, reduciendo el consumo de corriente y la caída de voltaje que generalmente presentan los diodos pasivos [31], cabe mencionar que es un rectificador implementado para alimentar sensores wearables.

A continuación, se presenta en la tabla 1 las características eléctricas del trabajo de investigación antes mencionado y algunos otros de rectificadores específicamente para Energy Harvesting piezoeléctrico, donde se observa que la VCE y PCE puede variar dependiendo de la tecnología y la topología utilizada, claro que el tipo de recolector de energía también marca la pauta con sus parámetros de salida para buscar la mejor alternativa de diseño o implementación de rectificación.

**Tabla 1.** Características eléctricas de trabajos de rectificadores para Energy Harvesting.

| PARAMETROS | WANG [32] | DO [33] | OH [10] | ROBERT CHEN-HAO CHANG [34] |
|---|---|---|---|---|
| **Tecnología (µm)** | 0.18 SMIC | 0.18 | 0.13 | 0.18 TSMC |
| **$V_{IN}$ (Volts)** | 0.2 | 3 | 0.694 | 1.2- 3 |
| **$V_{OUT}$ (Volts)** | 0.181 | 2.9 | 0.703 | 1.16-2.92 |
| **Frecuencia (Hz)** | 100Hz | 200Hz | 200Hz | 200Hz |
| **VCE (%)** | 90.5%@50KΩ | | 98.7%@45KΩ | 97.33% @ 95KΩ |
| **PCE (%)** | 95.5%@50KΩ | 91.2%@100KΩ | 52.2%@45KΩ | 91.01@50 KΩ |
| **Área ($mm^2$)** | - | 0.016 | 0.2916 | 0.600 |

En la tabla anterior se comparan rectificadores activos con distintas características, tenemos topologías que utilizan tecnologías CMOS de 0.18µm y 0.13µm, los cuales mencionan el $V_{IN}$ que pueden rectificar, en el caso de los transductores piezoeléctricos este parámetro es importante por la señal analógica que generan, permitiendo rectificar señales de voltaje de 0.2V o menores a este, también vemos que tanto la VCE y la PCE se encuentran por arriba del 90%, lo cual indica un buen aprovechamiento de la energía recolectada, la diferencia en estos circuitos radica principalmente en las eficiencias de conversión de la energía para diferentes rangos de voltajes de entrada con distinta resistencia de carga, además del consumo del área de cada circuito.

El análisis de todos estos circuitos rectificadores da una visión de las causas que pueden limitarlos en su rendimiento, lo cual es importante para una investigación más profunda o para saber que rectificador cumple con los parámetros óptimos que se pueden emplear en un sistema energy harvesting con posible aplicación wearable.

## 3. Conclusiones

Los rectificadores son una parte esencial para la utilización de los sistemas de recolección de energía en los dispositivos que funcionan con corriente continua, específicamente los dispositivos Wearable.

Para poder diseñar o elegir un circuito de acondicionamiento para un dispositivo wearable, se debe considerar primero que tipo de Energy Harvesting se empleará para el

suministro de energía del dispositivo, ya que cada uno de los recolectores tienen parámetros de salida de energía diferentes como los voltajes, las frecuencias y las corrientes. Posteriormente hay que analizar qué energía requiere el dispositivo wearable, es decir, el voltaje y la potencia óptima, y dependiendo de esos dos factores se determina qué rectificador es el mejor para esa aplicación, por supuesto que en el caso del diseño siempre lo que se quiere lograr es un dispositivo con la mejor eficiencia de conversión de la energía. En cuanto al uso de un rectificador pasivo o activo, se concluye que dependiendo de la aplicación y considerando lo antes analizado, puede ser usado uno u otro, o ambos en un sistema de Energy Harvesting. Entre mayores sean las eficiencias de conversión de energía (VCE y PCE), mayor será el aprovechamiento de la energía captada por el transductor, también el uso de tecnologías micrométricas brinda la posibilidad de disminuir el consumo de área de los circuitos en un sistema con lo cual mejoraría un dispositivo wearable al proporcionar mayor comodidad al usuario.

Gracias a que las investigaciones continúan en este ámbito de las energías renovables, podemos pensar que en un futuro no muy lejano los dispositivos electrónicos, no solo los portables si no todo lo que engloba ese término, podrían operar de manera autónoma al suministrar su propia energía sin necesidad de una batería, vislumbrando así un futuro usando los sistemas Energy Harvesting.

## 4. Agradecimientos

A la Maestría en Micro y Nanosistemas del Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología y al CONACyT a través del apoyo 717048.

## 5. Referencias

[1] A. Goldberg and J. W. K. Ho, “Hactive: a smartphone application for heart rate profiling,” Biophys. Rev., vol. 12, no. 4, pp. 777–779, Aug. 2020.

[2] A. S. Dahiya et al., “Energy autonomous wearable sensors for smart healthcare: A review,” arXiv, vol. 167, no. 3. arXiv, p. 037516, Dec. 05, 2019.

[3] S. B. Baker, W. Xiang, and I. Atkinson, “Internet of Things for Smart Healthcare: Technologies, Challenges, and Opportunities,” IEEE Access, vol. 5. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 26521–26544, Nov. 29, 2017.

[4] Christian Peters, Dirk Spreemann, Maurits Ortmanns and Yiannos Manoli, “A CMOS integrated voltage and power efficient AC/DC converter for energy harvesting applications”, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.18, no.10, 104005, 2008.

[5] R. Caliò, U. Bhaskar Rongala, et al., “Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. Sensors, vol.14, pp. 4755-4790, 2014.

[6] F.K. Shaikh and S. Zeadally, “Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.55, pp.1041-1054, 2016.

[7] Y.-M. Choi, M. G. Lee, and Y. Jeon, “Wearable Biomechanical Energy Harvesting Technologies,” Energies, vol. 10, no. 10, p. 1483, Sep. 2017.

[8] H. Pal, S. Ghosh, R. Chatterjee, R. Mahapatra and S. Chatterjee, "Piezoelectric energy harvesting devices for recharging cell-phone batteries," 2016 International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom), Durgapur, 2016, pp. 1-3.

[9] S. Lu and F. Boussaid, "A self-resetting piezoelectric energy harvesting rectifier," 2014 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials & Devices, Perth, WA, 2014, pp. 181-184.

[10] T. Oh, S.K Islam, M. Mahfouz, G. To. “A Low-Power CMOS Piezoelectric Transducer Based Energy Harvesting Circuit for Wearable Sensors for Medical Applications”. J. Low Power Electron. Appl. Vol. 33, No.7, 2017.

[11] Fredy Alexander Jiménez Rubio. Análisis del estado actual de la tecnología Energy Harvesting (Recolectores de energía) basados en piezoelectricidad. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. 2018.

[12] S. S. Dhayabarasivam and K. Jayanthi, “Energy Harvesting Circuit Utilizing MOSFET Based Bridge Rectifier,” IEEE Interna-tional Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCA), Nov. 2018.

[13] X. Li, E. S. Rogers, S. Nabavi, and L. Zhang, “Effect of Varying Threshold Voltage on Efficiency of CMOS Rectifiers for Piezoelectric Energy Harvesting Applications,” in Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Aug. 2020, vol. 2020-August.

[14] Y. Sun, I. Lee, C. Jeong, S. Han and S. Lee, "An comparator based active rectifier for vibration energy harvesting systems," 13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2011), Seoul, 2011, pp. 1404-1408.

[15] N. A. Wahab, M. K. M. Salleh, N. Othman, M. F. A. Khalid and N. M. Hidayat, "High efficiency CMOS rectifier for energy harvesting", *IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon),* Kota Kinabalu, pp. 123-127, 2016.

[16] Francesco Cottone, “Introduction to Vibration Energy Harvesting”, ESIEE Paris, 2011.

[17] A. Virattiya, B. Knobnob and M. Kumngern, "CMOS precision full-wave and half-wave rectifier", IEEE International Conference on Computer, 2011.

[18] Hermosa Donate, A. (1999). Principios de Electricidad y Electrónica II. Barcelona, España: Marcombo.

[19] M. A. Rosli, S.A.Z. Murad and M.N.M. Isa, “Review of AC-DC rectifier circuit based on complementary metal-oxide semiconductor for radio frequency energy harvesting system”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol.10, no.18, pp. 8326-8329, 2015.

[20] S. S. Hashemi, M. Sawan and Y. Savaria, "A High-Efficiency Low-Voltage CMOS Rectifier for Harvesting Energy in Implantable Devices," in IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 6, no. 4, pp. 326-335, Aug. 2012.

[21] H. Cha, W. Park and M. Je, "A CMOS Rectifier With a Cross-Coupled Latched Comparator for Wireless Power Transfer in Biomedical Applications," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 59, no. 7, pp. 409-413, 2012.

[22] G. D. Szarka, B. H. Stark and S. G. Burrow, "Review of Power Conditioning for Kinetic Energy Harvesting Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 2, pp. 803-815, Feb. 2012.

[23] K. Deware and M. Bhanwar, “A Review on Design and Implementation for Voltage Drop in CMOS”, International Journal of Technology Research and Management, vol.4, no.5, pp. 2348-9006, 2017.

[24] A. G. Martínez-López, E. Solís-Ávila, J. Martínez-Castillo, J. C. Tinoco Magaña, “Tecnología CMOS: Avances y

Perspectivas", QUID: Investigación, ciencia y tecnología, no.24, pp.43-58, 2015.

[25] Christian Peter Winter, Francisco Muñoz Contreras. "El Futuro de la Tecnología CMOS", Enginy, no.2, pp.25-28, 2010.

[26] K. H. Yeo, S. H. M. Ali, P. S. Menon, M. S. Islam and K. H. Yeo, "Comparison of CMOS rectifiers for micropower energy harvesters," 2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Johor Bahru, 2015, pp. 419-423.

[27] J. Colomer, J. Brufau, P. Miribel-Catala, A. Saiz-Vela, M. Puig-Vidal and J. Samitier, "Power conditioning circuitry for a self-powered mobile system based on an array of micro PZT generators in a 0.13μm technology," 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, 2007, pp. 2353-2357.

[28] S. Guo and H. Lee, "An Efficiency-Enhanced CMOS Rectifier with Unbalanced-Biased Comparators for Transcutaneous-Powered High-Current Implants," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 44, no. 6, pp. 1796-1804, 2009.

[29] X. Do, C. Jeong, H. Nguyen, S. Han and S. Lee, "A high efficiency piezoelectric energy harvesting system," 2011 International SoC Design Conference, Jeju, 2011, pp. 389-392.

[30] A. Costilla Reyes, A. Abuellil, J. J. Estrada-López, S. Carreon-Bautista and E. Sánchez-Sinencio, "Reconfigurable System for Electromagnetic Energy Harvesting With Inherent Activity Sensing Capabilities for Wearable Technology," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 66, no. 8, pp. 1302-1306, 2019.

[31] T. Oh, S. K. Islam, G. To, and M. Mahfouz, "Powering wearable sensors with a low-power CMOS piezoelectric energy harvesting circuit," in 2017 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2017 - Pro-ceedings, Jul. 2017, pp. 308–313.

[32] Wang, Jingmin & Yang, Zheng & Zhu, Zhangming & Yang, Yintang. "An ultra-low-voltage rectifier for PE energy harvesting applications", Journal of Semiconductors, Vol. 37, no.2, 025004, 2016.

[33] X. Do, H. Nguyen, S. Han, D. S. Ha and S. Lee, "A Self-Powered High-Efficiency Rectifier With Automatic Resetting of Transducer Capacitance in Piezoelectric Energy Harvesting Systems," in IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 23, no. 3, pp. 444-453, 2015.

[34] Robert Chen-Hao Chang, Wei-Chih Chen and Wen-Ching Hsiao. "A High-Performance AC–DC Rectifier with Fully Actively Controlled Switches for Vibration Energy Harvesting", 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Taipei, 2017, pp. 1-4.