

EFICIENCIA DE UN RECOLECTOR PIEZOELÉCTRICO UTILIZANDO EXTRACCIÓN DE CARGA SINCRÓNICA

EFFICIENCY OF A PIEZOELECTRIC HARVESTER USING SYNCHRONOUS CHARGE EXTRACTION

Alejandro Oliva^a, Mariano Febbo^b y Sebastián Machado^c

^a*Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica (IIIE), CONICET and Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras. Universidad Nacional del Sur (UNS). San Andrés 800, 8000 Bahía Blanca, aoliva@uns.edu.ar, <https://www.uns.edu.ar>*

^b*Instituto de Física del Sur (IFISUR), CONICET, and Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur (UNS), Avda. Alem 1253, B8000CPB- Bahía Blanca, Argentina, mfebbo@uns.edu.ar, <https://www.uns.edu.ar>*

^c*Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca, 11 de abril 461, 8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, smachado@frbb.utn.edu.ar, <https://www.frbb.utn.edu.ar>*

Palabras clave: Recolector piezoeléctrico, Extracción de cargas sincrónica, Rectificador onda completa.

Resumen. En este trabajo se presenta un análisis de la eficiencia de carga sobre un capacitor de almacenamiento con cargas provenientes de un dispositivo recolector piezoeléctrico. Para ello, se considerarán dos casos, uno en donde al dispositivo recolector se le adiciona un rectificador de puente de diodos de onda completa y otro en donde, además del primero, se incluye un circuito de interfaz de extracción de carga eléctrica síncrona entre el dispositivo recolector y el rectificador. Para los dos casos se evaluarán varias figuras de mérito en términos de la capacidad de almacenamiento, como la eficiencia de carga y la energía recolectada. Se usará una entrada del tipo pulsos de onda cuadrada, de forma de determinar cuál es la mejor estrategia para la recolección de energía con este tipo de excitación.

Keywords: Piezoelectric energy harvester, Synchronous charge extraction, Full wave rectifier.

Abstract. This work presents an analysis of the charging efficiency on a storage capacitor with charges coming from a piezoelectric energy harvesting device. For this, two cases will be considered, one where a full-wave diode bridge rectifier is added to the harvesting device and another where, in addition to the first one, a synchronous electric charge extraction interface circuit is included between the harvesting device and the full-wave rectifier. For both cases, several figures of merit will be evaluated in terms of the storage capacitance, such as charging efficiency, and harvested energy. A square wave pulse input will be used, in order to determine which is the best strategy for energy harvesting with this type of excitation.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés) incluye dotar de cierto grado de inteligencia y capacidades de comunicación y acción a todo tipo de objetos. Se espera que en pocos años billones de nodos de IoT estén conectados a internet; sin embargo, muchos de ellos no tendrán conexión a la red eléctrica y dependerán de alguna otra fuente de energía y almacenamiento para funcionar. Debido a la gran cantidad de dispositivos no va a ser posible reemplazar las baterías de todos ellos y es por eso que se están desarrollando otras fuentes y almacenadores de energía. Las fuentes de energías de los nodos de bajo consumo pueden ser reemplazadas por cosechadores de energía, capaces de convertir alguna forma de energía presente en el ambiente en energía eléctrica. Otros dos mercados con similares requerimientos de energía son los de la electrónica vestible y la electrónica implantable, que están mostrando un rápido crecimiento. En estos casos, el consumo de la electrónica es reducido a la escala de mW o μW y es importante que la fuente de energía además tenga bajo peso y ocupe poco volumen. [Chatterjee et al. \(2023\)](#)

Los transductores piezoeléctricos (PZT, por sus siglas en inglés) son muy usados para convertir energía proveniente de vibraciones mecánicas en eléctrica, ya que son sencillos de construir y tienen una densidad de energía tal que permite lograr pesos y volúmenes razonables (la densidad de potencia máxima actualmente ronda los 10–30 W/cm³ [Uchino \(2018\)](#)). Sin embargo, los PZT generan en corriente alterna, por lo que es necesario rectificar la tensión para poder ser usados como fuente de alimentación de circuitos electrónicos.

Hay muchos trabajos que analizan la cosecha de energía con PZT en estado estacionario bajo excitación senoidal, como en [Sodano et al. \(2004\)](#), donde la cosecha de energía fue evaluada para diferentes frecuencias y se desarrolló un modelo analítico que permite estimar la potencia generada. En [Shu y Lien \(2006a\)](#) y [Shu y Lien \(2006b\)](#) se deriva una expresión analítica para la conversión de corriente alterna (ca) en corriente continua (cc) con rectificador de puente de diodos de onda completa, que permite calcular la potencia de salida y la eficiencia de conversión en estado estacionario en función de los parámetros electromecánicos del PZT y de la frecuencia y aceleración de la excitación.

La forma más sencilla de convertir ca en cc es por medio de un rectificador a diodos; pero éste no resulta el mejor método cuando el PZT es excitado con una **aceleración senoidal**. Las mejores eficiencias se consiguen cuando se sintoniza el PZT para que resuene mecánicamente a la misma frecuencia de excitación y el circuito de cosecha de energía presenta en su entrada una impedancia igual a la del PZT [Wu et al. \(2013\)](#). [Holguin et al. \(2022\)](#) presenta resultados de simulación de un sistema de cosecha completo (PZT + circuito cosechador) totalmente integrado usando tecnología de silicio en 180 nm, consiguiendo una potencia de 65.45 nW con una aceleración de 0.35m/s² y una frecuencia de 53.5 Hz. La tecnología usada permite reducir la capacidad parásita del PZT y obtener una mejor eficiencia en la cosecha de energía.

De acuerdo a [Uchino \(2018\)](#), como los movimientos humanos son lentos y en la mayoría de los casos aleatorios, los cosechadores basados en la resonancia mecánica del PZT no son adecuados. Una alternativa razonable es usar cosechadores de energía basados en impactos. Trabajos como [Deng et al. \(2019\)](#) han caracterizado la presión que genera sobre el calzado el humano al caminar, determinando su amplitud y forma de onda; la conclusión es que cada paso se puede modelar como un pulso cuadrado de amplitud dependiente de la dinámica del andar. [Riemer y Shapiro \(2011\)](#) presenta una nueva visión sobre la cosecha de energía del cuerpo humano y propone una forma para estimar el potencial de esta fuente. Cuando analiza la presión que genera el talón al caminar, concluye que una persona de 80 kg que da un paso por

segundo deja disponible una potencia máxima de 2 W para ser cosechada del taco del calzado. Sin embargo, la potencia aprovechable hasta el momento es mucho menor. Por ejemplo, en [Kymissis et al. \(1998\)](#) construyeron un cosechador de energía piezoeléctrico en el taco de una zapatilla, del cual pudieron extraer durante una caminata cerca de 2 mW de potencia media sobre una resistencia que permitía extraer la máxima potencia del PZT. En ese caso también se vio que la fuerza sobre el PZT puede ser modelada como un pulso cuadrado.

En este artículo se estudia el proceso de extracción de energía de un PZT cuando es excitado con una forma de onda cuadrada no periódica. Esta situación se puede aplicar a la cosecha de energía proveniente de impactos o de presiones como la que produce un golpe, la presión sobre el taco del calzado de una persona al caminar, etc.

1.1. Figura de mérito para el estado estacionario y excitación senoidal

En general, los cosechadores piezoeléctricos son evaluados en estado estacionario (en resonancia o por debajo de ella) con excitación senoidal. Dos criterios para evaluar el desempeño del proceso de cosecha de energía son la figura de mérito (FoM por sus siglas en inglés) y la eficiencia, η [Wang et al. \(2022\)](#). La FoM representa la mejora en desempeño del circuito bajo análisis comparada con el de un rectificador de onda completa, mientras que la eficiencia mide la habilidad del circuito para extraer energía. Estos parámetros se definen como:

$$FoM = P_{out}/P_{rec}, \quad (1)$$

$$\eta = P_{out}/P_x, \quad (2)$$

donde P_{out} es la potencia transmitida al capacitor de almacenamiento C_{store} ; P_{rec} y P_x son las potencias máximas obtenidas a la salida de un puente rectificador de onda completa y la del circuito x en evaluación, con $P_{rec} = fC_tV_{oc}^2$, donde f es la frecuencia de excitación, C_t es la capacidad interna del PZT y V_{oc} es la tensión sobre C_t . Note que la FoM puede ser mayor que 1, y que la eficiencia siempre es menor que 1. Por ejemplo, [Yang et al. \(2022\)](#) obtuvo valores de la FoM Ec. (1) comprendidos entre 2 y 3.68, mientras que la eficiencia alcanzó un máximo de 90.4 %.

1.2. Figura de mérito para transitorios con excitación de impacto

Cuando la excitación no es senoidal, la figura de mérito basada en la potencia no es la más apropiada, ya que no existe un estado estacionario, y es más conveniente usar una basada en energía o cargas por cada impacto. Es por eso que incluimos una eficiencia de cargas, que compara las cargas cosechadas con las generadas, E_{ffQ} , definida como

$$E_{ffQ} = \frac{Q_{cosechada}}{Q_{generada}} \quad (3)$$

donde $Q_{cosechada}$ es la carga cosechada y la $Q_{generada}$ es la carga total generada por el sistema.

Para evaluar la mejora del cosechador resonante en comparación con el puente rectificador de onda completa usamos la relación entre las cargas cosechadas por ambos circuitos.

2. ANÁLISIS DEL COSECHADOR DE ENERGÍA SEH CON IMPACTO

La Fig. 1a muestra un esquema eléctrico de un cosechador de energía basado en un puente rectificador de onda completa, también conocido como SEH (por sus siglas en inglés de *Standard Energy Harvesting*). Se usará este circuito como referencia para comparar el desempeño

del cosechador resonante. Nótese que como no hay resistencia de carga que consuma energía, entonces la energía cosechada del PZT (menos las pérdidas en el circuito) se almacena en C_{store} y se va integrando a lo largo del tiempo. Para un PZT con bajo acoplamiento electromecánico como el elegido en este estudio, se puede despreciar el amortiguamiento mecánico debido al circuito eléctrico Elvin (2014). El transductor es excitado con un impacto, cuya frecuencia de repetición está muy por debajo de la frecuencia de resonancia mecánica.

En este ejemplo, la forma de onda de la corriente generada por el impacto es trapezoidal (Fig. 1b), formada por un pulso positivo seguido de otro negativo de igual amplitud, que fueron modelados mediante las fuentes de corriente F1 y F2 con estos parámetros: $t_{rise} = 100 \mu s$, $t_{on} = 20 t_{rise}$, $t_{fall} = t_{rise}$, $I_t = 0,1 mA$, mientras que la capacidad interna del PZT es $C_t = 50 nF$ y la caída de tensión en cada diodo $V_d = 0,45V$.

La carga generada durante t_{rise} (o t_{fall}) es

$$Q_1 = \frac{t_{rise} I_t}{2}, \quad (4)$$

mientras que la carga generada durante t_{on} es

$$Q_{on} = t_{on} I_t. \quad (5)$$

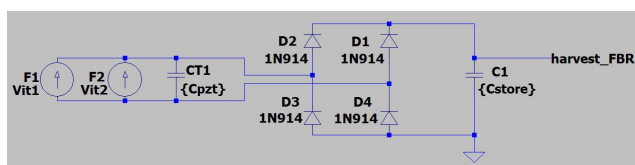
Por lo tanto, la carga total generada por pulso es

$$Q_{pulso} = 2 Q_1 + Q_{on}. \quad (6)$$

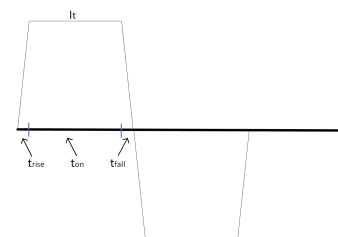
La tensión a la cual se cargaría el capacitor C_t en vacío con el primer pulso positivo es $V_{C_t} = Q_{pulso}/C_t$ que, con los valores mencionados tiene un valor aproximado de $V_{C_t} = 4V$. Si esta tensión es mayor que $2 V_d$, entonces los diodos se pueden polarizar en directa y cargar el C_{store} . Si es menor a $2 V_d$ nunca se carga el C_{store} .

2.1. Caso $C_{store} = C_t$

Una cuestión interesante a analizar es considerar diferentes valores para el C_{store} . En esta subsección analizamos el caso $C_{store} = C_t = 50 nF$ y más adelante comparamos resultados de simulación para distintos valores de C_{store} . Consideremos que ambos capacitores están descargados y se produce el primer pulso positivo de corriente. Inicialmente se carga sólo C_t , y cuando su tensión supera $2 V_d$, los diodos se polarizan en directa conectando a los capacitores en paralelo. A partir de ese instante, ambos capacitores comparten por igual el exceso de cargas generadas por el PZT, y sus corrientes son iguales.



(a) Esquema eléctrico del cosechador de energía SEH.



(b) Forma de onda de corriente.

Figura 1: Cosechador de energía básico y forma de onda de corriente generada.

Calculemos cuánto tiempo (t_d) tarda la tensión en C_t en alcanzar el valor suficiente para polarizar los diodos en directa, $2 V_d$, que en este ejemplo es una fracción de t_{on} . Al final de t_{rise} alcanzará una tensión

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_t} = 0,1 V, \quad (7)$$

entonces,

$$t_d = t_{rise} + \frac{(2 V_d - V_1)C_t}{I_t}. \quad (8)$$

La carga total acumulada en C_t hasta ese momento es

$$Q_d = Q_1 + (t_d - t_{rise})I_t. \quad (9)$$

A partir de ese momento la corriente se divide entre los dos capacitores y la tensión que alcanza C_{store} al final del pulso positivo (con $C_{store} = C_t$), es

$$V_{store} = \frac{Q_{on} - Q_d + 2 Q_1}{2 C_{store}} = 1,65 V, \quad (10)$$

y la carga almacenada en C_{store} es

$$Q_{store} = Q_1 + \frac{Q_{on}}{2} - \frac{Q_d}{2} \quad (11)$$

mientras que la tensión en C_t al final del pulso positivo es

$$V_{t+} = V_{store} + 2 V_d = 2,55V; \quad (12)$$

entonces la carga acumulada en C_t al final del pulso positivo es

$$Q_{t+} = Q_d + Q_{store}. \quad (13)$$

El pulso negativo va a cancelar estas cargas positivas y dejará cargas negativas en C_t ; veamos si son suficientes para polarizar los diodos en directa. Supongamos que los diodos no conducen y todo el intercambio de cargas se realiza entre el PZT y el C_t , entonces si la carga que se acumula en el pulso negativo es suficiente para elevar la tensión de C_t por encima de V_{t+} los diodos podrán conducir. Si no se acumulan suficientes cargas los diodos no volverán a conducir y la cosecha se acaba con el primer pulso. Entonces, las cargas acumuladas al final del pulso negativo serán las cargas generadas en el pulso negativo menos las cargas remanentes al final del pulso positivo, esto es

$$Q_{t-} = 2 Q_1 + Q_{on} - (Q_d + \frac{Q_{on}}{2} - \frac{Q_d}{2} + Q_1) \quad (14)$$

$$Q_{t-} = Q_1 + \frac{Q_{on}}{2} - \frac{Q_d}{2}. \quad (15)$$

Como $Q_{t-} < Q_{store} + Q_d$ entonces la tensión desarrollada en C_t no alcanzará para polarizar en directa a los diodos. Las cargas generadas en pulsos siguientes se recombinarán en C_t .¹

Por lo tanto, en los siguientes pasos ya no hay más transferencia de energía a la salida y la tensión V_{store} es la tensión de saturación para este caso. Habría que consumir energía para que caiga la tensión y volver a aprovechar cargas en los pasos siguientes.

Para el caso general en que los capacitores sean distintos, se deben repetir los cálculos considerando cómo se reparten las cargas en capacitores en paralelo.

¹En realidad los diodos conducirán una pequeña corriente cuando $V_{AK} > 0$, pero la transferencia de cargas no será significativa, como se ve en las simulaciones.

2.2. Figura de mérito para el circuito rectificador de onda completa

En este apartado calcularemos las figuras de mérito.

2.2.1. Energía almacenada

La energía almacenada en el capacitor C_{store} (con $C_{store} = C_t$) está dada por

$$E_{fbr} = 0,5 C_{store} V_{store}^2 \quad (16)$$

donde V_{store} es el voltaje cosechado en el capacitor C_{store} .

2.2.2. Eficiencia de cargas

La carga total generada en un pulso positivo es Q_{pulso} (Ec. 6) y la carga total cosechada es Q_{store} (Ec. 11). La eficiencia en la cosecha de cargas para un pulso es, entonces

$$E_{ffQ} = \frac{Q_{cosechada}}{Q_{generada}} = \frac{Q_{store}}{Q_{pulso}} = 0,20. \quad (17)$$

Este valor, para los valores numéricos considerados, da poco menos que 20 % para el primer pulso. Como este circuito no cosecha más cargas en los próximos pulsos, toda la energía se gasta en cargar y descargar C_t ; por lo que si se evalúa E_{ffQ} para varios pulsos va a dar un valor inversamente proporcional a la cantidad de pulsos.

3. ANÁLISIS DEL COSECHADOR SECE CON IMPACTO

3.1. Sistema bajo estudio

El modelo equivalente de LTspice™ está mostrado en la Fig. 2. Este circuito puede ser considerado un SECE (por sus siglas en inglés de *Synchronous Electric Charge Extraction*), pero a diferencia del presentado en Lefeuvre et al. (2005), este está basado en un convertidor *boost*. También se lo podría clasificar como un OSECE *boost* (por sus siglas en inglés de *Optimized SECE*), y resultaría similar al de Wu et al. (2013), donde se usó un convertidor *flyback*. El circuito consta de tres bloques principales, el PZT, el bloque resonante y el rectificador de salida. La caja con línea de puntos encierra dos fuentes de corriente, $IT1$ e $IT2$, que representan los pulsos positivo y negativo de corriente generados mediante el efecto piezoeléctrico, mientras que el capacitor C_t representa la capacidad de salida del PZT. Las fuentes de tensión de 0V están al solo fin de poder graficar las corrientes que circulan por ellas. El circuito del cosechador de energía está formado por un convertidor *boost* bidireccional (L_1, S_1, S_2), un puente rectificador de onda completa (D_1-D_4) y una llave bidireccional (S_3) para descargar C_t y el inductor L_1 . El circuito funciona de la siguiente forma:

1. el capacitor C_t está inicialmente descargado y todas las llaves abiertas,
2. se excita el circuito con el pulso de corriente y se espera a que V_{PZT} llegue al máximo,
3. si $V_{PZT} = (V_{PZT+} - V_{PZT-}) > 0$ se cierra S_1 y comienza la oscilación a través del circuito $C_t - L_1 - S_1$,
4. cuando el capacitor ha transferido toda su energía al inductor se cierra la llave S_3 y se abre la llave S_1 . En ese instante $V_{PZT} = 0$ y I_{L1} llegó a su máximo valor (I_{pico}),

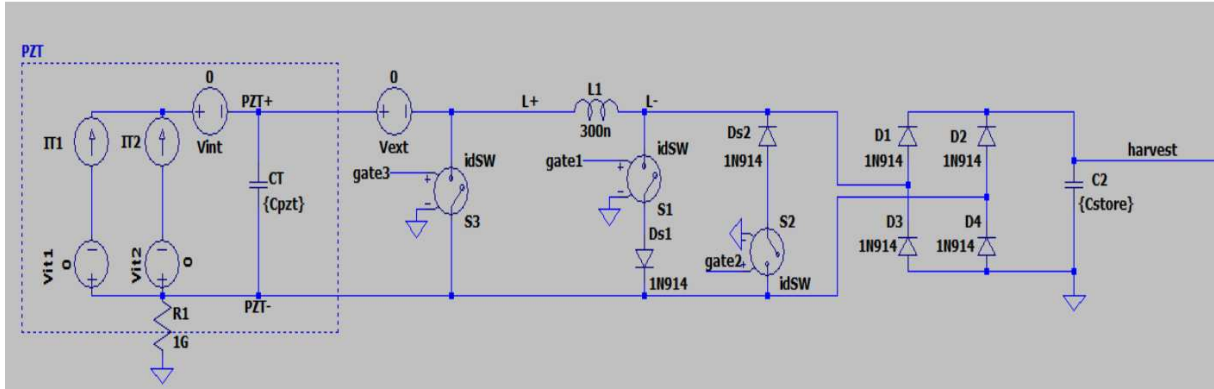


Figura 2: Modelo de LTspice del cosechador OSECE.

5. L_1 invierte su polaridad y fuerza a que la corriente siga circulando en el mismo sentido, ahora por el segundo camino resonante $L_1 - D_1 - C_2 - D_4 - S_3$ ($C_2 = C_{store}$). Cuando la corriente por L_1 se hace cero los diodos se apagan naturalmente y S_3 se abre.

Si no hay pérdidas en el circuito, todas las cargas que estaban inicialmente en C_t pasaron a C_2 , lo que da una eficiencia teórica para la cosecha de cargas del 100 %. Sin embargo, las pérdidas existen, y en este trabajo evaluaremos su impacto bajo diferentes condiciones de funcionamiento mediante simulaciones.

3.1.1. Cálculo del inductor

El inductor se calcula de modo tal que la frecuencia de resonancia de $L_1 - C_t$ sea mucho mayor que la frecuencia de resonancia mecánica del PZT, evitando la interacción mecánica con el transductor y pérdidas mecánicas [Brenes et al. \(2019\)](#). En este caso se eligió el tiempo de transferencia de energía de C_t a L_1 , p_w , como $p_w = t_{on}/1000$. Este tiempo p_w equivale a 1/4 del período de la oscilación, T_{osc} . Luego, $F_{osc} = 1/T_{osc}$. Por lo tanto, la inductancia se calcula como

$$L = \frac{1}{C_t} \frac{1}{(2\pi F_{osc})^2}. \tag{18}$$

Para este ejemplo resulta $F_{osc} = 1,25$ MHz, $T_{osc} = 80$ ns y $L_1 = 324$ nH. Si no hay pérdidas, todas las cargas generadas por el pulso positivo, Q_{pulso} , serán almacenadas en C_t , el que desarrollará una tensión de 4,2V. Cuando toda la energía almacenada en C_t sea transferida a L_1 su corriente será

$$I_{pico} = \sqrt{2 \frac{E_c}{L_1}} = \sqrt{\frac{Q_{pulso}^2}{L_1 C_t}} = 1,65 \text{ A}. \tag{19}$$

Hay un compromiso en la selección de L_1 , ya que debe ser suficientemente chica como para ocupar poco volumen y que el periodo de oscilación sea despreciable con respecto a t_{on} , pero además debe ser suficientemente grande para limitar la corriente a valores manejables por los semiconductores.

En realidad el circuito resonante $C_t - L_1 - S_1$ tiene pérdidas y es necesario que $V_{C_t} > V_d$ para que comience la oscilación. Además, la corriente en L_1 llegará a su máximo cuando $V_{C_t} = V_d$, dejando un remanente de energía en C_t .

4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se comparan los resultados obtenidos para el cosechador resonante SECE y para el sistema puente rectificador, SEH. Las simulaciones se realizaron en base a los circuitos representados esquemáticamente en la Figs. 1a (SEH) y 2 (SECE), empleando el programa LTspice™ y sus resultados se resumen en la Tabla 1. Se analiza el comportamiento para un solo impacto con la capacidad de almacenamiento igual a la capacidad interna del PZT, y luego para varios impactos variando la capacidad de almacenamiento. Se eligió una tensión final ligeramente mayor a 11 V por ser un valor razonable para alimentar circuitos electrónicos a través de un regulador de tensión. Se varió la capacidad de almacenamiento en múltiplos de C_t para considerar distintos escenarios de almacenamiento de energía con la misma tensión. V_{store} representa la tensión desarrollada en el C_{store} al final del tiempo de simulación. La eficiencia de cargas fue calculada de acuerdo a la Ec. (17). V_{cruce} y T_{cruce} indican la tensión y el tiempo necesario para que el cosechador SECE supere en tensión al cosechador SEH. El tiempo de simulación (coincide con el tiempo necesario para alcanzar la tensión deseada) es variable, siendo en este ejemplo un múltiplo del período de un impacto y se muestra en la columna 9 de la Tabla 1. La diferencia entre los valores estimados en las secciones 2 y 3 y los simulados en mayor parte se deben al uso de un valor constante en la caída de tensión en los diodos. La figura de mérito fue calculada de la siguiente forma:

$$FoM = \frac{Q_{SECE}}{Q_{SEH}}. \quad (20)$$

FoM es más grande a medida que la tensión de C_{store} aumenta.

En la Figs. 3 (a) y (b) se puede observar el voltaje acumulado en C_{store} para el caso en que $C_{store} = 50$ nF (1x) y 500 nF (10x), respectivamente. También se puede ver el voltaje de cruce de ambas curvas V_{cruce} y el tiempo de cruce T_{cruce} .

5. CONCLUSIONES

El SEH cosecha solamente en el primer pulso si $C_{store} = C_t$, mientras que el SECE sigue cosechando en los pulsos sucesivos. Si $C_{store} > C_t$ el SEH cosecha mas energía que el SECE hasta la tensión de cruce y luego es superado por el SECE. La FoM indica que el SECE acumula 6.42 veces más cargas que el SEH para la tensión elegida. El SEH no es capaz de alcanzar la tensión elegida en las condiciones consideradas en este trabajo.

Los resultados de simulación presentados en la Fig. 3 y en la Tabla 1 pueden servir de guía para seleccionar el método de cosecha y dimensionar el conjunto pzt-cosechador para una determinada aplicación. Una vez establecida la tensión a la cual se debe cargar el capacitor de almacenamiento y la energía necesaria para que funcione el circuito a alimentar con el cosechador, hay que determinar cuantos impactos se puede esperar hasta llegar a la tensión deseada.

Impactos	C_{store}	V_{store}		E_{ffQ}		V_{cruce}	T_{cruce}	T_{sim}	FoM
		SECE	SEH	SECE	SEH				
1 ×	1 ×	2.38	1.71	0.28	0.20	1.71	4.4 ms	160 ms	1.4
10 ×	10 ×	11.17	1.71	0.13	0.02	1.23	68 ms	1.6 s	6.5
100 ×	100 ×	11.17	1.74	0.13	0.002	1.21	719 ms	16 s	6.5
1000 ×	1000 ×	11.17	1.74	0.13	0.0002	1.21	7.1 s	160 s	6.5
10000 ×	10000 ×	11.17	1.74	0.13	0.00002	1.21	70 s	1600 s	6.5

Tabla 1: Comparación del desempeño entre los cosechadores SECE y SEH.

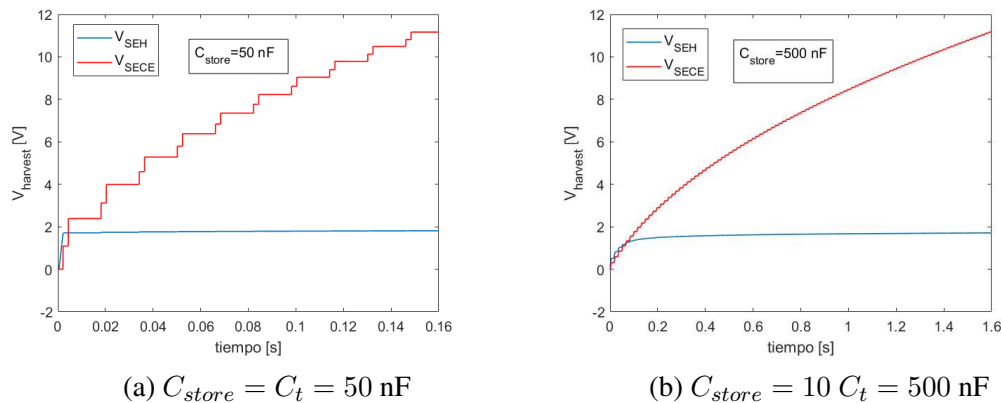


Figura 3: Carga del capacitor C_{store} con SEH y SECE.

En la tabla se ve que cuanto mayor es la energía a almacenar, mayor es la cantidad de impactos a esperar, y el tiempo necesario depende directamente de la relación entre el capacitor interno del PZT y la capacidad de almacenamiento. Si se desea disminuir el tiempo de cosecha se debe incrementar la capacidad del PZT (mayor área) y/o mejorar la conversión piezoeléctrica para incrementar la cantidad de cargas generadas con el mismo impacto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico de CONICET a través del proyecto PIP N 112202101 00051, la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNS a través del proyecto PGI 24/F077, la UTN, y la CIC.

REFERENCIAS

- Brenes A., Lefeuvre E., Badel A., Seok S., y Yoo C.S. Shunt-diode rectifier: A new scheme for efficient piezoelectric energy harvesting. *Smart Materials and Structures*, 28(1), 2019. ISSN 1361665X. doi:10.1088/1361-665X/aaefc5.
- Chatterjee A., Lobato C.N., Zhang H., Bergne A., Esposito V., Yun S., Insinga A.R., Christensen D.V., Imbaquingo C., Bjørk R., Ahmed H., Ahmad M., Ho C.Y., Madsen M., Chen J., Norby P., Chiabrera F.M., Gunkel F., Ouyang Z., y Pryds N. Powering internet-of-things from ambient energy: a review. *JPhys Energy*, 5(2), 2023. ISSN 25157655. doi: 10.1088/2515-7655/acb5e6.
- Deng F., Cai Y., Fan X., Gui P., y Chen J. Pressure-type generator for harvesting mechanical energy from human gait. *Energy*, 171:785–794, 2019. ISSN 03605442. doi:10.1016/j.energy.2019.01.039.
- Elvin N.G. Equivalent electrical circuits for advanced energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(14):1715–1726, 2014. ISSN 15308138. doi:10.1177/1045389X14521878.
- Holguin E., Procel L.M., Brenes A., Vladimirescu A., y Trojman L. Analysis and Design of a Self-Powered VEH System Based on ULP Comparator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 112:10–21, 2022. ISSN 10961216. doi:10.1016/j.ymsp.2018.04.016.
- Kymissis J., Kendall C., Paradiso J., y Gershenfeld N. Parasitic power harvesting in shoes. *International Symposium on Wearable Computers, Digest of Papers*, 1998-October(August

- 2014):132–139, 1998. doi:10.1109/ISWC.1998.729539.
- Lefevre E., Badel A., Richard C., y Guyomar D. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10):865–876, 2005. ISSN 1045389X. doi:10.1177/1045389X05056859.
- Riemer R. y Shapiro A. Biomechanical energy harvesting from human motion: Theory, state of the art, design guidelines, and future directions. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 8(1):1–13, 2011. ISSN 17430003. doi:10.1186/1743-0003-8-22.
- Shu Y.C. y Lien I.C. Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures*, 15(6):1499–1512, 2006a. ISSN 09641726. doi:10.1088/0964-1726/15/6/001.
- Shu Y.C. y Lien I.C. Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16(11):2429–2438, 2006b. ISSN 09601317. doi:10.1088/0960-1317/16/11/026.
- Sodano H.A., Park G., y Inman D.J. Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting. *Strain*, 40(2):49–58, 2004. ISSN 00392103. doi:10.1111/J.1475-1305.2004.00120.X.
- Uchino K. Piezoelectric Energy Harvesting Systems—Essentials to Successful Developments. *Energy Technology*, 6(5):829–848, 2018. ISSN 21944296. doi:10.1002/ente.201700785.
- Wang J., Xia Y., Shen J., y Wang X. Efficient self-powered piezoelectric energy harvesting interface circuit with wide rectified voltage. *Microelectronics Journal*, 126(March):105474, 2022. ISSN 00262692. doi:10.1016/j.mejo.2022.105474.
- Wu Y., Badel A., Formosa F., Liu W., y Agbossou A.E. Piezoelectric vibration energy harvesting by optimized synchronous electric charge extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(12):1445–1458, 2013. ISSN 1045389X. doi:10.1177/1045389X12470307.
- Yang L., Wei T., y Chen N. High-Efficiency Energy Management Circuit Combining Synchronized Switch Harvesting on Inductor Rectifier and Impedance Matching for Impact-Type Piezoelectric Energy Harvester. *Energy Technology*, 10(11):1–11, 2022. ISSN 21944296. doi:10.1002/ente.202200434.