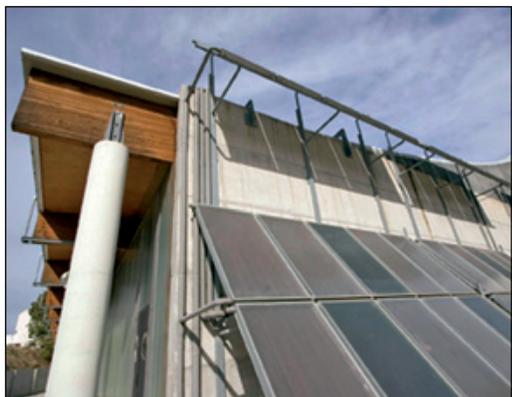


Recolector de micro energía térmica de baja temperatura



Carlos Alberto Ugalde-Caballero
Juan Anzúrez-Marín

Master en Ciencia de los materiales
Doctor en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. Facultad de Ingeniería Eléctrica.
Ciudad Universitaria, Edificio Ω1 - Michoacán (MÉXICO). Tel: +52 443 3279728.
ccugalde@hotmail.com

Recibido: 28/03/2012 • Aceptado: 09/07/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5006>

LOW TEMPERATURE THERMAL MICRO ENERGY HARVESTER

ABSTRACT

- The implementation of a micro energy harvester capable of powering commercial ultra low power electronics devices from small temperature gradients is described in this work. Commercial thermoelectric generators are suitable for high temperatures and gradients, therefore they are not adequate for extracting power from low temperature gradient sources like solar radiation or the human body heat. There is wide interest in generating power from these sources, but the low generated power levels make it difficult to couple them to commercial standard devices. In this work, Peltier effect modules are proposed as thermoelectric generators, coupled to a commercial low power conditioning circuit in order to extract as much energy as possible and couple its output to the operating voltage of commercial devices. Three Peltier modules were characterized, obtaining their internal resistance, generated power and Seebeck coefficient values, related to the power generation from temperature gradients. These values were used as guidelines for selecting the most appropriate module; also components for the power conditioning circuit were chosen by simulation and experimentally for interfacing the output of the module for boosting the low voltage generated in modules to standard regulated voltages, achieving conversion efficiencies of 18 to 30% with delivered power from 5 to 8 mW with gradients of 10 to 25 °C, generating 6 to 9 times more power than the required for a wireless network node.
- **Keywords:** energy harvesting, thermoelectric, low temperature, Peltier effect, Seebeck effect.

RESUMEN

Este trabajo describe la implementación de un recolector de micro energía térmica capaz de alimentar dispositivos electrónicos comerciales de ultra bajo consumo a partir de gradientes de temperatura pequeños.

Aunque existan generadores termoeléctricos comerciales, éstos se construyen para temperaturas y gradientes de temperatura altos y no son adecuados para fuentes de baja temperatura como la radiación solar o el calor del cuerpo humano. Hay un interés en la generación de energía a partir de estas fuentes, pero los bajos niveles de potencia dificultan que su salida eléctrica pueda adaptarse a los requerimientos de dispositivos comerciales. Se propone en el presente trabajo el uso de transductores de *efecto Peltier* funcionando como generadores termoeléctricos, acoplados a un acondicionador de ultra baja potencia comercial de tecnología reciente, con el fin de extraer la mayor cantidad de energía posible y acoplar la salida a los niveles de voltaje de dispositivos electrónicos comerciales.

Se presenta la caracterización de tres diferentes módulos Peltier, los valores de su resistencia interna, potencia generada y la capacidad de generación de energía en función de un gradiente de temperatura. A partir de estos datos se hacen inferencias acerca de la selección del módulo más adecuado y se simulan y determinan experimentalmente los componentes adecuados para el acondicionador de potencia, que eleva el mili voltaje del

módulo a niveles de voltaje estándar regulados, logrando eficiencias en la conversión térmica a eléctrica de 18 a 30 % con potencias generadas en el rango de 5 a 8 mW para gradientes desde 10°C hasta 25°C, generando de 6 a 9 veces mayor cantidad de potencia de la requerida para un nodo de red inalámbrica estándar.

Palabras clave: recolección de energía, termoelectrico, baja temperatura, efecto Peltier, efecto Seebeck.

1. INTRODUCCIÓN

La micro recolección de energía (*energy harvesting*) implica convertir energía de muy bajo nivel en electricidad para alimentar dispositivos electrónicos de muy bajo consumo, tales como micro controladores, pequeños transceptores de radio, etc., siendo las redes inalámbricas de sensores la principal aplicación impulsora de su desarrollo [1, 2, 3]; sin embargo, existen muchas otras aplicaciones que pueden beneficiarse de sus ventajas, como los rastreadores de fauna silvestre e implantes médicos, entre otras. Estos equipos, al encontrarse muy dispersos geográficamente, en sitios de difícil acceso, lejos de la red eléctrica o por su naturaleza móvil, requieren alimentarse en forma autónoma.

Actualmente se utilizan baterías electroquímicas de alta energía para operar estos equipos el mayor tiempo posible, haciéndose más costosos, voluminosos y pesados. Por otro lado, una vez que las baterías se agotan, es necesario reemplazarlas de forma periódica, incrementando el costo de operación y mantenimiento, más aún cuando los equipos son muy numerosos o donde el reemplazo es complicado, como en el caso de algunos implantes médicos, donde puede ser necesaria una cirugía. A esta problemática debe agregarse que las baterías desechadas son una fuente de contaminación ambiental. Mediante la recolección de energía se pretende extraer ésta del medio alrededor del equipo, logrando un tiempo de vida útil prácticamente infinito y libre de mantenimiento, reduciendo o incluso eliminado el uso de baterías. Un sistema basado en este concepto debería contar con las siguientes partes:

1. Un equipo electrónico que la mayor parte del tiempo consuma muy baja potencia, en el orden de los μW o pW , con picos altos ocasionales de corta duración, que pueden alcanzar varios cientos de miliamperios, para después volver nuevamente al estado de bajo consumo.
2. Una fuente de energía presente en el medio alrededor del equipo.
3. Un transductor que convierta la energía de la fuente en potencia eléctrica útil con la mayor eficiencia posible, sin requerir un gran volumen, de bajo costo y resistente al medio del cual se extrae la energía.
4. Un sistema de acondicionamiento de potencia que acople eficientemente los niveles eléctricos generados por el transductor con los requerimientos del equipo descrito en el punto 1.

5. Un dispositivo de almacenamiento de energía, que entregue potencia a la carga cuando la fuente no produce un nivel suficiente o incluso no se encuentra disponible temporalmente.
6. Un sistema de supervisión que administre la potencia disponible y su consumo, al mismo tiempo que mantiene el nivel del almacén a un nivel apropiado y al equipo siempre funcionando.

Las fuentes para la micro recolección de energía son muy variadas: radiación solar, diferencias de presiones, diferencias de temperaturas, vibraciones, pequeños flujos de viento o agua, etc.; sin embargo, presentan varios inconvenientes, tales como: bajos niveles de energía, disponibilidad únicamente en ciertos periodos de tiempo, duración y magnitud aleatorias y un comportamiento impredecible y no controlado. La radiación solar es un ejemplo representativo, pues su disponibilidad se limita al horario diurno, con duración y amplitud dependientes de las condiciones meteorológicas y estacionales existentes. En cuanto a los transductores, éstos definen la capacidad de generación energética y las características del resto de los componentes, pues aún si la fuente produjese grandes cantidades de energía, la magnitud disponible estará limitada por la eficiencia (proporción de energía generada respecto a la energía de entrada) del transductor. Existe una gran variedad de transductores para estas aplicaciones: fotovoltaicos, termoelectricos, electromagnéticos, etc. El estado del arte de la tecnología actual permite obtener eficiencias muy reducidas, siendo del 10 al 12% el valor más elevado para los transductores fotovoltaicos [1]. A excepción de estos transductores, actualmente se reporta poco trabajo experimental susceptible de ser aplicado en componentes electrónicos estándar de bajo consumo. Aunque existen ya algunas aplicaciones y trabajos de investigación, comúnmente, una vez determinada la capacidad de generación del transductor y la fuente, se han desarrollado acondicionadores de potencia cuya salida se acopla una carga determinada [3, 4, 5]. Este es un punto muy importante, ya que aunque no existe aún un estándar definido para aplicaciones de recolección de energía [3], los niveles de voltaje para los dispositivos de ultra bajo consumo de potencia comerciales, que pueden consumir unos cuantos nA, tales como [16], se encuentran bien establecidos y por ello es fundamental desarrollar soluciones que se adapten ellos.

En este trabajo se utilizan transductores termoelectricos a fin de hacer una aportación original al tema. Adicionalmente, la energía térmica posee la ventaja de poderse almacenar en medios sólidos o fluidos, potencialmente reduciendo el tamaño del almacén eléctrico, por lo que es una fuente que tiene un gran potencial de aplicaciones. Los transductores termoelectricos generan corriente continua directamente, soportan muy bien el ambiente y no poseen partes móviles. Su operación se basa en el *efecto Seebeck*, donde dos materiales diferentes, sujetos a un gradiente de temperatura ó ΔT desarrollan un voltaje a circuito abierto (V_{oc}) entre

terminales proporcional a dicho gradiente; esta relación se expresa de acuerdo a (1):

$$V_{oc} = \alpha \Delta T \quad (1)$$

Donde α es el coeficiente Seebeck, en $V/^{\circ}K$ ó $V/^{\circ}C$ y su magnitud depende de la geometría y tipo de material. La tecnología actual, que utiliza pares de materiales semiconductores P y N, sólo permite generar algunos micro o mili Vatios y su eficiencia es muy baja, del orden de 0.1% a 3%. A pesar de ello, tienen el potencial para proporcionar suficiente energía para hacer funcionar equipo electrónico de muy bajo consumo.

Físicamente, estos transductores son muy simples. Consisten en dos caras cerámicas planas, una llamada lado caliente y la otra lado frío. Estas caras reciben el diferencial de temperatura aplicado. Eléctricamente, solo constan de un par de conexiones eléctricas externas para extraer la potencia generada. Para mantener el gradiente, es necesario retirar constante y eficientemente el calor en la cara o lado frío del dispositivo mediante algún tipo de ventilación forzada. Sin embargo, en el caso de la micro recolección de energía, esto no es posible, debido a que significaría consumir energía externa adicional y, por lo tanto, normalmente se producen diferenciales de temperatura pequeños. Aunque existen generadores termoelectricos comerciales, éstos se diseñan para gradientes de temperatura altos, generados por fuentes térmicas tales como hornos o gases de escape de combustión; sin embargo, también es de interés generar energía a partir de diferenciales pequeños y temperaturas bajas para aprovechar fuentes como la radiación solar de baja temperatura o el calor generado por el cuerpo humano. Una alternativa para aprovechar estas bajas temperaturas es generar energía a partir de módulos Peltier, que son dispositivos termoelectricos empleados para enfriar o calentar pequeñas superficies. Estos dispositivos también se basan en pares semiconductores P-N, pero operan bajo el efecto Peltier, donde una corriente que fluye a través de dos materiales diferentes desarrolla un gradiente de temperatura en la unión proporcional a la magnitud de dicha corriente. La relación se expresa mediante (2):

$$Q = \Pi \cdot I \quad (2)$$

Donde Q es el calor absorbido o generado en la unión, en vatios. Π es el coeficiente Peltier en voltios e I es la corriente en amperios.

Los efectos Seebeck y Peltier siempre ocurren simultáneamente; algunos trabajos realizados [4, 6, 7] demuestran que, esencialmente, un termo generador y un módulo Peltier no difieren en su construcción interna básica; las diferencias radican en que se fabrican de materiales diferentes: los primeros para operar a temperaturas superiores a los 200 $^{\circ}C$ y en los segundos los rangos de temperatura de operación no son mayores a 125 $^{\circ}C$, con valores de ΔT máximos de 60 a 70 $^{\circ}C$, por tanto, su diseño

está optimizado para transferir el calor al ambiente, lo que los hace apropiados para aplicaciones de baja temperatura [7]. Internamente, los módulos Peltier presentan mayor área superficial a fin de absorber o generar más calor, por ello su resistencia eléctrica interna es más pequeña que la de los termo generadores [4], en un orden de magnitud 10 a 1 aproximadamente. Un generador termoelectrico se modela como una fuente de voltaje ideal en serie con un resistor interno; es fundamental que este resistor sea lo más pequeño posible para disminuir las pérdidas por caída de tensión cuando se conecta una carga eléctrica, en especial si se considera que se producen sólo unos cuantos milivoltios. Su utilización práctica se dificulta debido a que, al ser diseñados para enfriamiento/calentamiento y no para generar potencia, no existe información técnica disponible para evaluar su desempeño en esta condición y por ello se deben determinar los parámetros de operación de manera experimental, lo cual se llevó a cabo en este trabajo.

Por otro lado, la generación de voltajes pequeños es uno de los grandes obstáculos para aprovechar la energía generada. Algunos trabajos llevados a cabo con bajos gradientes requieren un voltaje mínimo del generador para el arranque del acondicionador de potencia igual o superior a 1V [4, 6, 8]. Esto significa que deben alcanzarse gradientes relativamente altos para comenzar a generar energía útil, mayores a 30 $^{\circ}C$. Existen algunos trabajos muy recientes de convertidores que pueden operar desde 25 milivoltios [9, 10, 11], pero dado el bajo nivel de energía, en todos estos casos es necesario un impulso para iniciar la operación, lo que los hace poco prácticos, pues en algún momento la energía puede reducirse prácticamente a cero, lo que significa que el sistema no podría reiniciar por sí mismo, limitando su uso en una aplicación real. Se decidió experimentar con un micro convertidor comercial de muy reciente aparición, cuyas características indican que es capaz de operar a partir de un voltaje sumamente bajo, a partir de 20 mV [12] sin necesidad de arranque externo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Primeramente, se caracterizaron tres módulos Peltier simples, fabricados por la empresa *Marlow Industries*, cuyos pares termoelectricos están compuestos por aleaciones de Bismuto y Telurio, de acuerdo a la información técnica disponible, mientras que los lados frío y caliente se componen de placas cerámicas de óxido de aluminio (alúmina). Las características eléctricas reportadas por el fabricante se presentan en la Tabla 1.

Para su caracterización como generadores, es necesario establecer un gradiente de temperatura entre caras, con la menor variación de temperatura posible. Existen diferentes métodos para llevar esto a cabo como el reportado en [4]. Para este trabajo, los módulos se colocaron entre dos placas de aluminio huecas, aplicando presión mecánica mediante una prensa de tornillo y utilizando grasa térmica para mejorar la

	RC3-2.5	RC6-6	RC12-4
T máximo (°C)	73	73	74
Potencia máxima (W)	6	33	39
Voltaje máximo (DC)	4.1	9.2	16.4
Corriente máxima (A DC)	2.5	5.6	3.7
Resistencia interna R_i (Ω AC)	1.2	1.2	3.2
Área superficial (mm ²)	328	1020	1020

Tabla 1: Parámetros de los módulos caracterizados, como bombas de calor (módulos Peltier)

transferencia de calor entre las placas y las caras del módulo de acuerdo a las recomendaciones en [15]. A través de una de las placas se hizo circular agua a una temperatura constante y cercana a la del medio ambiente (agua fría); esta temperatura permaneció controlada y sin variaciones a lo largo del experimento y se aplicó al lado frío de los módulos. En la otra placa, en contacto con la cara caliente, se aplicó agua a diferentes temperaturas (agua caliente) superiores a las del lado frío, creando así un gradiente a partir de una temperatura de referencia, tal como muestra la Fig. 1. La temperatura del agua en cada placa se mantuvo de forma independiente mediante controladores PID con una precisión de $\pm 0.1^\circ\text{C}$. El gradiente aplicado se midió directamente en las caras cerámicas de los módulos Peltier mediante termopares tipo K, ya que debido a la transferencia de calor existen pequeñas diferencias de temperatura entre la superficie de las placas y las caras del módulo; de esta forma se mide directamente el gradiente aplicado al módulo o caracterizado. La salida de voltaje se relaciona con el parámetro α como se ha mencionado anteriormente, por lo que esta prueba permite determinar el valor del coeficiente Seebeck de los módulos y su resistencia eléctrica interna, entre otros parámetros.

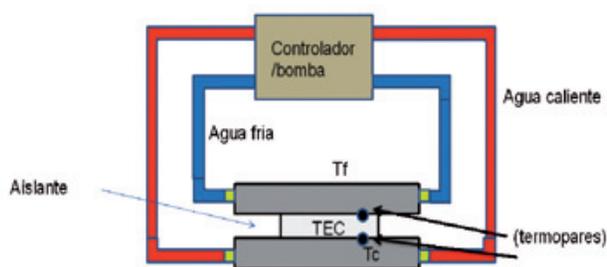


Fig. 1: Arreglo experimental para caracterizar los módulos (izquierda) y aspecto de las placas utilizadas (derecha).

Una vez estabilizado el gradiente aplicado, es necesario determinar la resistencia interna del módulo, con el fin de determinar la máxima potencia que el transductor puede entregar, de acuerdo al teorema de máxima transferencia de potencia utilizado en circuitos eléctricos [17], considerando que se modela como una fuente de voltaje ideal con un resistor interno en serie. Para ello, se tomaron lecturas de voltaje a circuito abierto (V_{oc}) del módulo y posteriormente, se conectaron a la salida eléctrica resistores variables de carga (R_L), al 1% de precisión, ajustando su valor manualmente hasta obtener un voltaje igual a $\frac{1}{2} V_{oc}$. La razón es que cuando esto ocurre, significa que el valor del resistor R_L es igual al valor del resistor interno R_i del generador, en este punto se transfiere la mayor cantidad de potencia, dividiendo el valor de V_{oc} a la mitad, como puede verse en la Fig. 2. A partir de este valor se pudo determinar el coeficiente Seebeck y la potencia generada, que son los principales parámetros de interés de un generador termoeléctrico. Las señales se adquirieron y almacenaron en un ordenador mediante una tarjeta de colección de datos, a una tasa de 1 muestra cada 10 segundos, aplicando compensación de temperatura incluida en la tarjeta para los termopares tipo K. Debido a los niveles de voltaje tan reducidos, tanto en los módulos como en los termopares, se aplicaron también técnicas de reducción de ruido recomendadas por el fabricante de la tarjeta y se tomaron lecturas en modo diferencial para rechazar señales indeseadas. Se caracterizó en un rango de gradientes de temperatura desde 1 hasta 55°C .

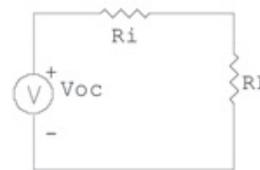


Fig. 2: Equivalente eléctrico de la salida de un generador termoeléctrico

A partir de los datos obtenidos en el experimento anterior y conociendo ya la cantidad de potencia que se puede suministrar a determinado gradiente de temperatura, se llevó a cabo el diseño y selección de componentes periféricos del micro convertidor de energía a partir de su hoja de datos [12]. Este diseño se llevó a cabo mediante simulación, haciendo uso de un modelo en SPICE y el software LTSPICE IV, ambos disponibles del fabricante. Al ser un dispositivo de reciente tecnología, no existen aún guías de diseño ni aplicaciones ya desarrolladas, por ello se partió de los datos técnicos e iterativamente se probaron diferentes configuraciones a fin de lograr la mayor eficiencia posible y una operación continua y confiable. Tras varias simulaciones, se pudo comprobar que el modelo SPICE del fabricante se encuentra optimizado únicamente para un voltaje de salida de 3.3 V, encontrándose algunas inconsistencias al seleccionar otros voltajes de salida, por

ello fue necesario sustituir físicamente algunos componentes en forma iterativa. Una vez determinados los componentes que produjeron el mejor desempeño, se construyó el circuito impreso, en el cual se puso especial cuidado para reducir cualquier pérdida por capacitancia y/o resistencias parásitas, que pueden disminuir grandemente la eficiencia, ya que se opera a niveles de voltaje muy reducidos. La operación física del convertidor se comprobó solamente con el módulo que produjo la mayor cantidad de potencia, conectando como carga eléctrica para el convertidor, resistores variables al 1%, que se ajustaron experimentalmente hasta obtener la potencia máxima generada a voltajes de salida regulados estándar de 2.3, 3.3, 4.1 y 5 voltios, nuevamente aplicando el teorema de máxima transferencia de potencia. Esta prueba se llevó a cabo en un rango de gradientes de 10 a 25 °C, que coincide con los resultados obtenidos en [3, 4, 5, 9, 10, 11], para fines de comparación. Todas las lecturas se adquirieron y almacenaron en el ordenador para su posterior análisis.

3. RESULTADOS

Los valores de *coeficientes Seebeck* y resistencia interna promedio para cada módulo, en un rango de ΔT de 5 a 50 °C se muestran en las Tablas 2 y 3 respectivamente:

RC 3-2.5	RC6-6	RC 12-4
12.5 mV/°C	19.4 mV/°C	24.1 mV/°C

Tabla 2: Coeficientes Seebeck promedio obtenidos experimentalmente para cada módulo

RC 3-2.5	RC6-6	RC 12-4
1.40 Ohms	1.77 Ohms	4.76 Ohms

Tabla 3: Resistencia eléctrica interna de los módulos operando como generadores

En cuanto a la generación de potencia, en la Fig. 3 se muestran las diferencias entre cada uno de los tres módulos para el mismo rango de gradientes. Por otro lado, respecto al acondicionador de potencia, utilizando el módulo que

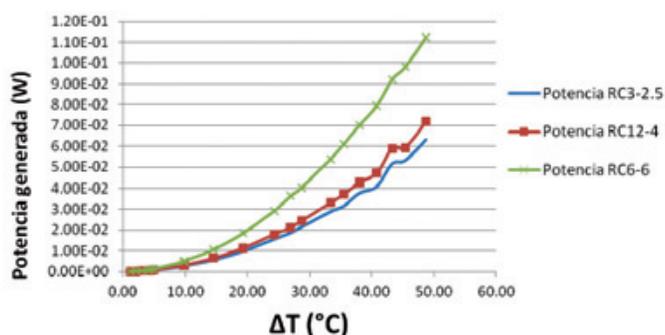


Fig. 3: Potencia generada por cada uno de los módulos

produjo la mayor potencia (RC6-6), se obtuvo la eficiencia y potencia de salida con diferenciales desde 10 hasta 25 °C para fines de comparación y para cada una de las cuatro posibles salidas de voltaje regulado, según se muestra en la Fig. 4.

4. DISCUSIÓN

La caracterización de los módulos muestra que los parámetros disponibles del fabricante como módulos Peltier no son indicativos de los niveles de voltaje y corriente que pueden generar. De igual modo, es claro que los efectos no son reversibles, es decir que si se selecciona un módulo Peltier para el cual, al aplicar un voltaje se produce un gradiente de temperatura determinado, al operar como generador y aplicar este mismo gradiente, se obtendrán corrientes y voltajes mucho menores. Se pudo observar que el valor de resistencia interna como bomba de calor es diferente de la resistencia como generador, como puede verse al comparar las Tablas 1 y 3. Algunos modelos propuestos [13, 14] muestran que el parámetro α es la variable que relaciona tanto los efectos térmicos como los eléctricos y por ello es determinante en la selección de un módulo. Para un módulo Peltier, el voltaje de trabajo (V), de acuerdo a [15], está dado por:

$$V = R_i I + \alpha \Delta T \quad (3)$$

Donde I es la corriente aplicada en Amperios y R_i es la resistencia eléctrica interna del módulo, la cual a su vez, está determinada por:

$$R_i = 2N \left(\frac{\rho}{G} \right) \quad (4)$$

Donde N es el número de pares p-n conectados en serie en el módulo, ρ la resistividad eléctrica en $\Omega\text{-cm}$ y G la relación área/longitud. Para dispositivos cuyos pares se fabrican con el mismo material y geometría, el valor del voltaje de operación es determinado exclusivamente por el valor de N [4]. Efectivamente, puede verse que, en los módulos evaluados, a mayor voltaje de operación nominal, la resistencia interna es mayor y es diferente a la resistencia interna indicada por el fabricante operando bajo el principio Peltier. Puesto que el valor total de α está dado por la suma del valor individual de cada par P-N, nuevamente, mientras más alto sea N, el voltaje de salida será mayor. El valor de α se obtuvo experimentalmente pues no se cuenta con esta información del fabricante ni del valor de N. Por otro lado, se puede apreciar que la potencia generada por el módulo RC6-6 en la Fig.3 fue la mayor de todas aún cuando el módulo RC12-4 presenta el mayor coeficiente Seebeck. La razón es que su valor de R_i es el más alto de los tres módulos caracterizados. Para un generador termoelectrico, la corriente de salida está dada por:

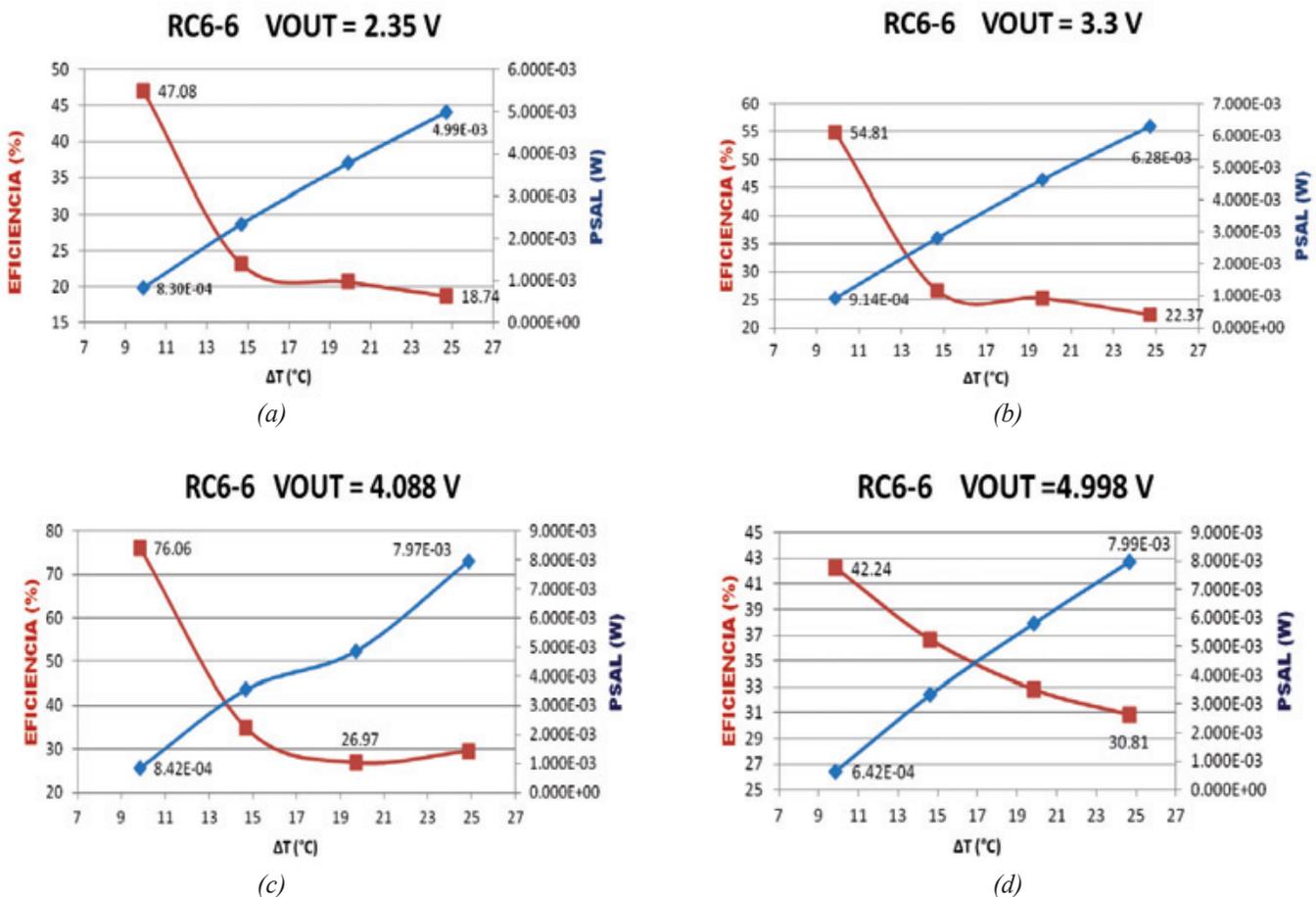


Fig. 4: Eficiencias y potencias generadas por el acondicionador de potencia con el módulo RC6-6 como entrada, para voltajes de salida de: 2.35 V (a), 3.3 V (b), 4.088 V (c) y 4.99 V (d)

$$I_{sal} = \frac{V_{oc}}{R_i + R_L} \quad (5)$$

Es decir que, para un valor de R_L dado, el valor de la corriente es determinado por el valor de R_i . Mientras más pequeño sea su valor, circulará una corriente más alta. La potencia entregada a la carga está dada por:

$$P_{RL} = I_{sal}^2 R_L \quad (6)$$

Por lo tanto, mientras menor sea el valor de R_i , el valor de I_{sal} será mayor y, por lo tanto, se puede entregar mayor potencia a la carga, en proporción al cuadrado de la corriente, esta es la razón por la cual la curva del módulo RC6-6 en la Figura 3 crece rápidamente respecto a la de los otros dos módulos. Ahora bien, aunque el valor de R_i para el módulo RC 3-2.5 es el menor de todos, también lo es su valor de V_{oc} , que a su vez se debe a un valor de α menor. A partir de estas observaciones, se desprende que el módulo que puede generar la mayor potencia a partir de diferenciales de temperatura bajos será aquel que presente la resistencia eléctrica interna más baja y el voltaje de trabajo más alto. El área del módulo tampoco es determinante, pues a pesar de que los módulos RC12-4 y RC6-6 poseen la misma

superficie para la transferencia de calor, el segundo presentó claramente un mejor desempeño.

Respecto al desempeño del acondicionador de potencia, la Fig. 4 muestran que la eficiencia se reduce a medida que el voltaje de salida del módulo crece, debido a la relación $V_{oc} = \alpha \Delta T$, esto se debe a que la resistencia interna del convertidor disminuye en forma no lineal [12], consumiendo mayor cantidad de corriente. En contraste, a medida que se incrementa el voltaje de salida del convertidor, la eficiencia tiende a disminuir para los voltajes de salida más bajos, mientras que se estabiliza para voltajes de salida de 4.1 y 5 Volts nominales para un ΔT dado, alcanzando un 30.81% para la salida de 5 Volts con un gradiente de sólo 25°C. En los trabajos de referencia [4, 6, 8, 9 y 10], el principal objetivo es proporcionar al menos un nivel de potencia de 100 μW , que se considera un consumo promedio para un nodo de una red de sensores inalámbrica [3, 6, 8]. En este trabajo, con un diferencial de solamente 10°C, fue posible generar de 6 a 9 veces esta cantidad de potencia, dependiendo del voltaje de salida, con voltajes generados en el módulo de solamente 194 mV. en [6], fue necesario un gradiente de 22°C para alcanzar este nivel de 100 μW . Pudo verificarse que el convertidor comenzó a operar a partir de voltajes tan pequeños como 30 mV; sin embargo, por debajo de un gradiente de 10 °C, como

puede apreciarse en la Fig. 3, no existe gran diferencia en la potencia generada por cada uno de los tres módulos, pues sus salidas son muy semejantes.

5. CONCLUSIONES

En la realización de este trabajo se demostró la factibilidad práctica de utilizar módulos de efecto Peltier como generadores termoeléctricos, con la ventaja de que presentan resistencias internas menores a las de los termogeneradores comerciales, permitiendo así una mayor producción de corriente y mayor potencia disponible. A pesar de que los parámetros como el coeficiente Seebeck deben ser determinados experimentalmente, al seleccionar un módulo como generador de energía, deberá elegirse aquel que presente el mayor voltaje de trabajo operando como bomba de calor, combinado con una resistencia interna pequeña. A partir de estos parámetros, puede seleccionarse un módulo con la menor área posible, ya que este no es un factor determinante para la generación de potencia según muestran los resultados experimentales. Por otro lado, se pudo verificar que el convertidor utilizado es capaz de proporcionar energía por encima de lo requerido para operar nodos comerciales con un consumo representativo de 100 μ W, a través de un diseño iterativo de los componentes externos necesarios, el cual requiere un gran esfuerzo, pues la energía disponible es extremadamente baja, al igual que las eficiencias de conversión; sin embargo, se obtuvieron mayores cantidades de potencia de salida que en trabajos semejantes previamente reportados y mencionados a lo largo de este artículo. En [4], los autores reportan un diferencial de temperatura mínimo de operación 34 °C para que el termogenerador pueda producir 900 mV, necesarios para hacer funcionar al acondicionador de potencia y generar un voltaje regulado de 3 V, en contraste, en el presente trabajo se pudo operar desde niveles de voltaje de más pequeños, de sólo 30 mV. De igual forma, los autores en [6] reportan una potencia de salida de 100 μ W con un diferencial de 22 °C, mientras que el diseño que se reporta aquí puede generar esta potencia con un gradiente por debajo de los 10 °C, de acuerdo a la Fig. 4. El trabajo reportado en [10] es semejante en cuanto al voltaje mínimo de arranque (20 mV) con un gradiente de solo 4 °C; sin embargo, requiere un impulso externo para comenzar a funcionar y la salida de su convertidor es de solamente 1 voltio, que no es un voltaje suficiente para operar dispositivos comerciales. En contraste, en el diseño obtenido fue posible generar 4 voltajes diferentes de salida con valores comerciales estandarizados.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por el apoyo otorgado para llevar a cabo este trabajo de investigación.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Harb A. "Energy harvesting: state of the art". *Renewable Energy*. 2011. Vol. 36 p.2641–2654.
- [2] Morais R, Matos S, Fernandes M et al. "Sun, Wind and water flow as energy supply for small stationary data acquisition platforms". *Computers and electronics in agriculture*. 2008. Vol. 64 p.120–132.
- [3] Kompis C, Aiwell S (editors). Rep. "Energy harvesting technologies to enable remote and wireless sensing". *Sensors and instrumentation KTN Report*. June 2008. Disponible en web: <http://www.microgensystems.com/wp-content/uploads/2011/08/EH_Tech_June2008.pdf>
- [4] Dalola S, Ferrari M, Ferrari V et al. "Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors". *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. January 2009. Vol. 58-1 p.99–107.
- [5] Meehan A, Gao H, Lewandowski Z. "Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system". *IEEE transactions on power electronics*. January 2011 Vol. 26-1 p.176–181.
- [6] Leonov V, Torfs T, Van Hoof C. "thermoelectric converters of human warmth for self-powered wireless sensor nodes". *IEEE sensors journal*. May 2007. Vol. 7 p.650–657.
- [7] Buist R J, Lau P G. "Thermoelectric Power Generator Design and Selection from TE Cooling Module Specifications". Disponible en web: <<http://www.tetech.com/publications/pubs/ICT97RJB.pdf>>
- [8] Lu X, Yang S-H. "Thermal energy harvesting for WSNs". *2010 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, Istanbul. October 10 to 13 2010.p. 3045–3052. DOI: 10.1109/ICSMC.2010.5641673
- [9] Ramadass Y, Chandrakasan A. "A battery-less thermoelectric energy harvesting interface circuit with 35 mV startup voltage". *IEEE Journal of solid-state circuits*. January 2011. Vol. 46-1 p.333–341.
- [10] Carlson E J, Strunz K, Otis P O. "A 20 mV input boost converter with efficient digital control for thermoelectric energy harvesting". *IEEE Journal of solid-state circuits*. April 2010. Vol. 45-4 p.741–750.
- [11] Vullers R, van Schaijk, Doms I et al. "Micropower energy harvesting". *Solid-State Electronics*. 2009. No. 53 p 684–693.
- [12] Linear technology. "Ultralow Voltage 20mV Step-Up Converter & Power Manager for Energy Harvesting Applications". Disponible en web: <<http://cds.linear.com/docs/Press%20Release/LTC3108.pdf>>
- [13] Lineykin S, Yaakov S. "modelling and analysis of thermoelectric modules". *IEEE Applied power electronics conference and exposition 2005*. p 2019–2023. DOI:10.1109/APEC.2005.1453336.
- [14] Lineykin S Been- Yakov S. "PSPICE- compatible equivalent circuit of thermoelectric coolers". *IEEE convention of electrical an electronics engineers in Israel, 2004*. p. 608 – 612. DOI:10.1109/EEL.2004.1361162.
- [15] Laird technologies. "The thermoelectric handbook". 2010. THR-BRO-THERMOELECTRIC-HNDBK0110. Disponible en web: www.lairdtech.com
- [16] Microchip Technology Inc. "NanoWatt XLP extreme Low Power PIC® MCUs". Diponible en web en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39941d.pdf>.
- [17] Hayt William "Análisis de circuitos en ingeniería". Séptima Edición. México. Mc Graw Hill 2007. 660 p. ISBN: 9701061071