

Design and Implementation of a Thermoelectric Energy Harvester with MPPT Algorithms and Supercapacitor

Jean Vega and Jinmi Lezama

Abstract—Sensor nodes currently are principally powered by batteries, however batteries life are finite. Energy harvesting aims to increase the lifetime of sensor nodes. This system takes advantage of environmental conditions in order to use or store the energy harvested by transducers, such as thermoelectric generators. In this paper, a thermoelectric energy harvesting system based in a Boost converter with four different maximum power point tracking (MPPT) algorithms that store energy in a supercapacitor is implemented. Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (INC), Open Circuit Voltage (OCV) and Short Circuit Current (SCC) algorithms were tested to improve the designed circuit. Finally, OCV algorithm resulted being the fastest to charge the supercapacitor.

Index Terms—TEG, MPPT, Boost converter, supercapacitor.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos (del inglés Wireless Sensor Network - WSN) son implementados para aplicaciones de Internet de las cosas (Internet of Things - IoT) con la principal función de monitorear y la recopilar datos. Una WSN está compuesta por un Gateway y varios nodos sensores. Cada nodo sensor está compuesto por 4 subsistemas (sensado, procesamiento, comunicaciones y energía. A fin de garantizar una gran autonomía, los nodos sensores son alimentados con baterías de gran capacidad, incrementando sus dimensiones y peso, lo cual es desfavorable en algunas aplicaciones, además dichas baterías requieren ser cargadas y remplazadas de forma periódica.

Atendiendo a estas consideraciones, muchas investigaciones se enfocan en desarrollar sistemas que permitan incrementar el tiempo de vida de los nodos sensores. De este modo, una alternativa es la presentada por Del-Valle [1] donde presenta una evaluación de las distintas técnicas de enrutamiento de datos y su eficiencia energética en el transporte de datos dentro de una red de sensores. Por otro lado, algunos estudios están enfocados en proponer tecnologías alternativas al uso de baterías, estos sistemas son denominados sistemas de recolección de energía (o Energy Harvesting - EH). Un sistema EH cosecha energía a partir de fuentes ambientales (solar, eólica, radiofrecuencia, etc.) u otras fuentes de energía (térmica, mecánica, química, RF y etc) y las transforma en energía eléctrica aprovechable para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos.

Es en este marco que distintas investigaciones se enfocaron en presentar las diferentes fuentes de energía ambientales y su densidad de potencia generada [2] y las distintas aplicaciones para IoT. Un ejemplo de eso son las aplicaciones para el monitoreo de la salud [3] y en [4] para aplicaciones industriales, donde se evaluó los nodos con sistemas EH y otros con baterías, demostrando una reducción en los costos de operación para los nodos con sistemas EH. Igualmente, se proponen arquitecturas en [5] para el funcionamiento del sistema de recolección como; Harvest and Use, donde la energía cosechada es usada inmediatamente, y Harvest-Store-Use, donde la energía primero es almacenada y luego utilizada. Todas estas propuestas se basan en el uso de componentes electrónicos, presentados en Spies [6], que permiten el diseño e implementación de sistemas de recolección de energía con el fin de obtener una mejor eficiencia de los transductores de energía.

Una experiencia real es la presentada por Lee [7], donde implementan un dispositivo flotante como nodo sensor inalámbrico para el monitoreo de calidad de agua, la energía de este dispositivo es cosechada a partir de un generador fotovoltaico y termoeléctrico, este dispositivo puede cosechar 8.37Wh y 0.425Wh respectivamente, sus resultados han mostrado que la energía recolectada es suficiente para garantizar el funcionamiento del dispositivo durante un día.

Estas experiencias han mostrado la factibilidad del desarrollo de sistemas EH. De donde se puede observar que tanto la corriente y tensión recolectadas se encuentran en el orden de μA y mV respectivamente. Debido a esto, es necesario el uso de un convertidor DC-DC con el fin de obtener niveles de tensión adecuados para la alimentación de los dispositivos a partir de la energía cosechada. Otra alternativa para mejorar el rendimiento del convertidor DC-DC, es el uso de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) con el fin de obtener una energía máxima en la recolección. Adicionalmente, se suelen usar circuitos de arranque autónomos para poder iniciar con voltajes muy pequeños de entrada.

El estado del arte de los recolectores de energía termoeléctrica presenta sistemas de recolección que trabajan con diferencias muy altas de temperatura como en [8], [9], [10] y [11]. Es importante resaltar que Laird et al. [11] realizan una comparación entre los algoritmos MPPT de Perturbación y Observación (P&O), Conductancia Incremental (INC) y Corriente de Cortocircuito (SCC) en estado estable usando un convertidor Boost controlado por un procesador digitales de señales (DSP). Por otro lado hay recolectores de energía

J. Vega, Universidad Nacional de Ingeniería, INICTEL-UNI, Lima, Perú, e-mail: jean.vega@uni.pe

J. Lezama, Universidad Nacional de Ingeniería, INICTEL-UNI, Lima, Perú, e-mail: jlezama@inictel-uni.edu.pe

diseñados para operar con pequeñas niveles de tensión. Por ejemplo, Flores [12] presenta un circuito de arranque que permite operar con tensiones a partir de 140mV. También Cernaianu et al. [13] usan el circuito comercial LTC3105, el cual permite recolectar energía a partir de 250mV. Sin embargo estos trabajos solo usan un algoritmo MPPT en específico.

En condiciones reales, lograr altas diferencias de temperatura entre las dos caras del generador termoelectrico es muy complicado. Además, los nodos sensores no requieren mucha potencia eléctrica para su funcionamiento. Por lo que se vio necesario diseñar un sistema de recolección de energía termoelectrico que no trabaje con una cantidad muy alta de diferencia de temperatura y también para poder comparar los algoritmos MPPT más sencillos de implementar.

En este trabajo se realiza la comparación de los algoritmos de P&O, INC, SCC y el algoritmo de tensión de circuito abierto (OCV) con una diferencia de 10 grados entre las caras del generador termoelectrico. Además, se realiza una comparación entre sus estados estables y transitorios, su potencia de consumo, y qué tan rápido logran cargar un supercapacitor. Por otro lado, en este trabajo no se usan circuitos de arranque autónomo debido a que todas las pruebas se enfocan en analizar y comparar las características de los algoritmos MPPT.

El paper se organiza de la siguiente manera. La sección II describe los componentes necesarios para la recolección de energía termoelectrica. La sección III presenta la arquitectura y metodología del sistema así como el diseño de los componentes que se usarán en la implementación. La sección IV contiene el procedimiento para la toma de resultados y los resultados experimentales obtenidos, así como las discusiones sobre estas. Finalmente, las conclusiones son resumidas en la sección V.

II. RECOLECCIÓN DE ENERGÍA TERMOELÉCTRICA

A. Generador Termoelectrico

Un generador termoelectrico (del inglés Thermoelectric Generator - TEG) (ver Fig. 1) es un dispositivo que convierte la energía térmica directamente en energía eléctrica mediante el efecto Seebeck. Además, son confiables, escalables y silenciosos desde que no poseen partes móviles, haciéndolos ideales en aplicaciones de recolección de energía. TEG o también conocido como celda de Peltier tiene una estructura tipo emparedado y está conformado por múltiples uniones de termocuplas que están compuestas de materiales semiconductores (tipo P y tipo N), las termocuplas están unidas en serie por material de cobre y este a su vez esta unido a un material principalmente de alúmina la cual recibe el gradiente de temperatura de la fuente de calor [14]. Diferentes autores están trabajando en el diseño, caracterización [15] y desarrollo de dispositivos TEG.

B. Circuito Equivalente del TEG

Un TEG se puede modelar como una fuente de tensión en serie con una resistencia, como se muestra en Fig. 2 y su tensión de circuito abierto se puede determinar mediante la ecuación 1. [16]



Fig. 1. Generador termoelectrico, fuente: Fraunhofer IPM.

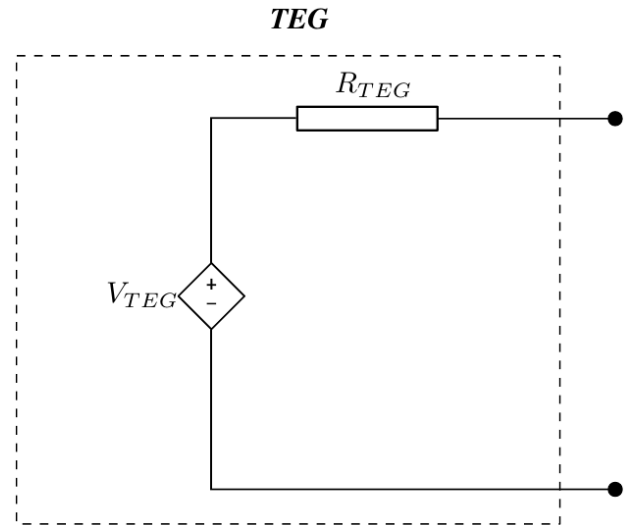


Fig. 2. Circuito equivalente del TEG.

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

Donde N es el número de pares de termopares, α es el coeficiente Seebeck del material termoelectrico y ΔT es la diferencia de temperatura aplicada a través del TEG. Además, R_{TEG} no depende de la temperatura, sino que principalmente depende de la resistencia eléctrica de los materiales termoelectricos y en [17] se concluye que la resistencia interna del TEG se mantiene casi constante ante diferentes gradientes de temperatura.

C. Convertidor DC-DC

Desde que comúnmente la tensión de salida del TEG es menor a 1 voltio, en este trabajo, el convertidor DC-DC elevador o convertidor Boost (ver Fig. 3) se utiliza para obtener una tensión continua más alta a partir de una baja tensión continua. El convertidor DC-DC elevador puede producir una tensión más alta al reducir la corriente, por lo que se puede mantener la potencia y se puede obtener la tensión deseada. [18]

D. Seguimiento del Punto de Máxima Potencia

Para aprovechar la potencia máxima entregada por el TEG, la impedancia de entrada del convertidor Boost debe ser igual

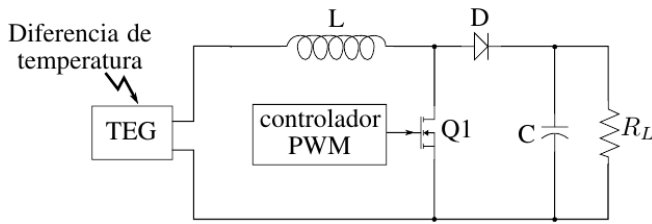


Fig. 3. Circuito de un convertor DC-DC elevador.

a la resistencia interna del TEG. Debido a que la resistencia de entrada equivalente del convertidor Boost está determinada en parte por el ciclo de trabajo, la adaptación de impedancia dinámica se puede lograr mediante el ajuste en tiempo real del ciclo de trabajo de la señal PWM. El seguimiento del punto de máxima potencia o MPPT fue desarrollado por primera vez para trabajar con aplicaciones fotovoltaicas, y puede realizarse en microcontroladores simples. Dado que el TEG y las celdas fotovoltaicas tienen similitudes en la relación tensión-corriente, el MPPT se introdujo en el campo TEG en los últimos años. [14]

En este trabajo se analizan cuatro algoritmos MPPT que muestran a continuación.

1) *Algoritmo de Perturbación y Observación*: El algoritmo de Perturbación y Observación (P&O) es uno de los métodos más utilizados y estudiados debido a su simplicidad e implementación práctica. Perturba el ciclo de trabajo, como su nombre lo indica, y compara la potencia del TEG actual con el valor anterior. El algoritmo decide rastrear el MPP en una dirección o en la dirección opuesta al comparar el cambio de tensión en la entrada del convertidor Boost y el cambio de potencia transferida por el transductor. En caso de que la potencia de salida aumente frente al cambio de tensión, el algoritmo sigue rastreando el MPP en la misma dirección. De lo contrario, cambia la dirección de seguimiento. [19]

2) *Algoritmo de Conductancia Incremental*: El algoritmo de conductancia incremental (INC) depende de la detección de la pendiente ocurrida en la curva de la potencia versus tensión del transductor (Ver Fig. 5). Cuando se alcanza el MPP de la curva, la pendiente es cero. La dirección del movimiento del punto de operación se detecta al rastrear el cambio ocurrido en la relación I/V en comparación con el punto MPP. El punto de operación aumenta la pendiente cuando se mueve hacia el MPP, mientras que se vuelve negativo en el lado derecho del MPP. [19]

3) *Algoritmo de Tensión de Circuito Abierto*: El algoritmo de tensión de circuito abierto (OCV) se basa en la suposición de que V_{MPP} está alrededor de un porcentaje fijo de la tensión de circuito abierto V_{OCV} . Este método define una tensión de referencia V_{Ref} de 50% para los TEGs [11]. Para determinar la tensión de referencia se requiere la medición de V_{OCV} . Esta medición se realiza abriendo el circuito, y se usa un interruptor en serie para llevar a cabo esta acción. Esta operación hace que la corriente del transductor se ponga a cero, lo que impide la generación de energía en esta etapa. En el siguiente paso, se compara la tensión medida con la tensión de referencia V_{Ref} para determinar el ciclo de trabajo exacto del convertidor DC-DC. [19]

4) *Algoritmo de Corriente de Cortocircuito*: Similarmente al método anterior, el algoritmo de Corriente de Cortocircuito (SCC) determina una corriente de funcionamiento óptima I_{Ref} . En condiciones ideales, la I_{Ref} es proporcional a la corriente de cortocircuito I_{SCC} por un coeficiente. Este coeficiente es de alrededor de 50% para el TEG [11]. Es obvio que este algoritmo se basa en la medición de corriente de cortocircuito del transductor y que se realiza mediante un interruptor paralelo similar al método anterior. El interruptor paralelo proporciona las condiciones de cortocircuito donde la tensión del conjunto es cero y se evita la generación de energía. [19]

Tabla I muestra las características generales de cuatro algoritmos MPPT que se utilizan en este trabajo.

TABLE I
CARACTERÍSTICAS DE LOS ALGORITMOS MPPT
IMPLEMENTADOS. [16]

Algoritmo	Tipo	Sensores requeridos
P&O	Directo	V, I
INC	Directo	V, I
OCV	Indirecto	V
SCC	Indirecto	I

E. Almacenamiento de Energía

En muchas aplicaciones no es posible alimentar una carga directamente con la pequeña cantidad de energía recolectada por el TEG; por lo tanto, se requiere de un elemento que almacene esta energía. En este trabajo se utiliza un supercapacitor, el cual a pesar de tener una densidad de energía más baja que una batería, tiene un ciclo de vida de aproximadamente 1 millón ciclos de carga y descarga, lo cual beneficia al tiempo de vida del sistema. [20].

III. ARQUITECTURA DEL SISTEMA E IMPLEMENTACIÓN

La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo refleja las etapas del esquema presentado en la Fig. 4, la cual muestra la arquitectura del sistema propuesto, que tiene como objetivo alimentar a un nodo sensor.

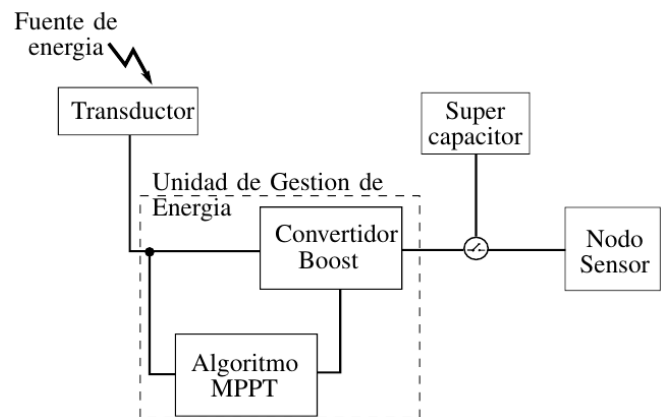


Fig. 4. Esquema de un sistema de recolección de energía con algoritmos MPPT.

La primera etapa consiste en evaluar y determinar las características eléctricas del transductor de energía utilizado para identificar su relación entre la gradiente de temperatura y la potencia generada. En la siguiente etapa se procede al diseño del convertidor Boost que tiene como entrada a la tensión y corriente generada por la celda TEG, En esta etapa se procede al diseño del circuito y definir los valores de sus componentes para obtener la máxima transferencia de energía. De igual forma se desarrolla la evaluación de los algoritmos MPPT, para lo cual se requiere de la inclusión de un sensor de corriente el circuito, el cual es diseñado con el fin de no perturbar en la respuesta del convertidor. El test y obtención de resultados se realiza con las pruebas de laboratorio para lo cual se implementan los diferentes algoritmos MPPT en un microcontrolador, con el fin de evaluar el tiempo de carga de un supercapacitor en función de las características de cada algoritmo en prueba.

A. Transductor

Usando el módulo TEG de código TG12-6L, se mantuvo una diferencia de temperatura de 10 grados y se conectó cargas variables, con lo que se procede a obtener la curva característica del TEG que se muestra en Fig. 5.

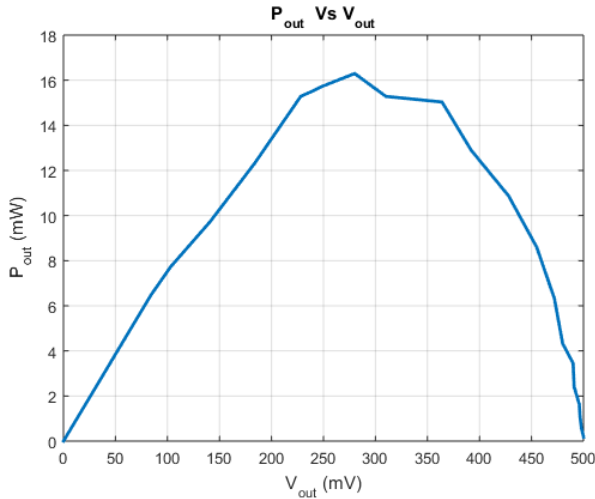


Fig. 5. Característica experimental de potencia versus tensión del TG12-6L para una diferencia de temperatura de 10 grados.

Las ecuaciones 2 y 3 representan el V_{TEG} y R_{TEG} del circuito equivalente del TEG y se hallan a partir de la Fig. 5. V_{TEG} se halla en el punto donde la potencia es cero y la tensión es el máximo posible y R_{TEG} se halla a partir del punto de máxima potencia.

$$V_{TEG} = 0.504mV \quad (2)$$

$$R_{TEG} = 3.5\Omega \quad (3)$$

B. Convertidor Boost

El convertidor debe ser capaz de elevar la tensión del TEG hasta 3.3 V.

Luego, la potencia de salida es igual a la potencia máxima que entrega el circuito Thevenin equivalente asumiendo que no existen pérdidas en el convertidor Boost.

$$P_{max,in} = P_{out} \quad (4)$$

Donde la potencia de salida está representada por la ecuación 5 y la potencia máxima por la ecuación 6.

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R_L} \quad (5)$$

$$P_{max,in} = \frac{V_{TEG}^2}{4R_{TEG}} \quad (6)$$

Considerando una tensión de salida en estado estable V_{out} de 3.3 voltios ,y al reemplazar las ecuaciones 2, 3, 5 y 6 en 4 se obtiene el valor de la resistencia en la carga R_L .

$$\frac{0.504^2}{4 \times 3.5} = \frac{3.3^2}{R_L} \quad (7)$$

$$R_L = 600.19\Omega \quad (8)$$

Para encontrar el valor de la inductancia se usa la siguiente ecuación del convertidor Boost.

$$\frac{\Delta I_L}{I_L} = \frac{(1-D)^2 D R_L}{f_s L} \quad (9)$$

Donde: ΔI_L , es la variación máxima de la corriente en el inductor.

I_L , es la corriente en el inductor.

f_s , es la frecuencia de trabajo de la señal PWM.

D , es el ciclo de trabajo de la señal PWM.

R_L , es la resistencia en la carga.

L , es la inductancia del convertidor Boost.

Para un buen control del sistema se recomienda usar una frecuencia para el PWM entre 25KHz y 100KHz. Para el inductor usado, se obtuvo una mejor respuesta a la frecuencia f_s de 50KHz. Adicionalmente, se eligió una relación entre la variación de la corriente y la corriente del inductor de 1 a 5 respectivamente ($\Delta I_L/I_L = 0.2$). Por otro lado, el ciclo de trabajo se obtiene de la relación de la ganancia de tensión del convertidor Boost representada en la ecuación 10.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (10)$$

Donde: V_{out} , es la tensión de salida del convertidor Boost

V_{in} , es la tensión de entrada del convertidor Boost.

D , es el ciclo de trabajo de la señal PWM.

La tensión de entrada al convertidor Boost en estado estable debe coincidir con la tensión del TEG en el MPP, el cual es 50% de la tensión de circuito abierto del TEG ($V_{in} = 0.257V$). Al reemplazar los valores de V_{in} y V_{out} se obtiene el ciclo de trabajo de la señal PWM.

$$\frac{3.3V}{(0.257V)} = \frac{1}{1-D} \quad (11)$$

$$D = 0.923 \quad (12)$$

Los valores encontrados se reemplazan en la ecuación 9, con lo que se obtiene el valor de la inductancia L del convertidor Boost.

$$0.2 = \frac{(1 - 0.923)^2(0.923)(600.19)}{50 \cdot 10^3 \cdot L} \quad (13)$$

$$L = 328.45 \mu H \quad (14)$$

Para encontrar el valor de la capacitancia C del convertidor Boost se usa la ecuación 15 del convertidor Boost.

$$\Delta V_c = \frac{P_{out}}{4V_{in}f_s C} \quad (15)$$

Donde: ΔV_c , es la variación máxima de la tensión en el capacitor.

P_{out} , es la potencia en la carga.

f_s , es la frecuencia de trabajo del PWM.

C , es la capacitancia del convertidor Boost .

V_{in} , es la tensión de entrada al convertidor Boost .

Para conseguir una tensión de salida sin muchas variaciones en la salida, se escoge una variación máxima ΔV_c de 0.05 voltios.

Al reemplazar los valores requeridos en la ecuación 15, se obtiene la capacitancia.

$$0.05 = \frac{0.0181}{4 \cdot 0.257 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot C} \quad (16)$$

$$C = 7.06 \mu F \quad (17)$$

C. Algoritmos MPPT

Para implementar los algoritmos P&O, INC, SCC y OCV se requiere de un microcontrolador, un sensor de tensión y un sensor de corriente para poder implementar todos estos algoritmos. En la Fig. 6 se muestra la conexión del sensor de corriente representado como I, el sensor de tensión representado como V y del microcontrolador que contiene los algoritmos MPPT junto al convertidor Boost. La salida de ambos sensores se conecta a dos pines de lectura analógica del microcontrolador, el MOSFET Q1 se conecta a una salida de señal PWM y los MOSFETs Q2 y Q3 se conectan a dos pines digitales para poner el TEG en circuito abierto o en cortocircuito de acuerdo a los algoritmos.

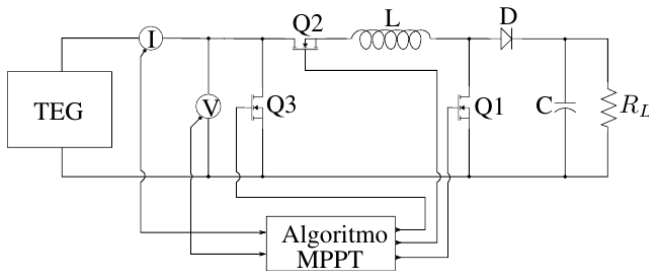


Fig. 6. Circuito de recolección de energía usando un convertidor Boost y algoritmos MPPT.

1) *Microcontrolador*: La característica del microcontrolador debe ser que trabaje a 3.3V y consumir muy baja potencia, también debe poseer un módulo ADC para convertir la lectura analógica de tensión y corriente al formato digital para usar en el algoritmo MPPT y un módulo PWM como salida para conmutar el MOSFET del convertidor Boost.

2) *Sensor de Tensión*: La tensión de entrada del convertidor Boost sera leído directamente por el modulo ADC el cual posee una alta impedancia de entrada.

3) *Sensor de Corriente*: Se requiere leer la corriente entregada por el transductor, por lo cual se usó el sensor de corriente INA180A3 en la implementación, el cual se conecta como se muestra en la Fig. 7 según su hoja de datos.

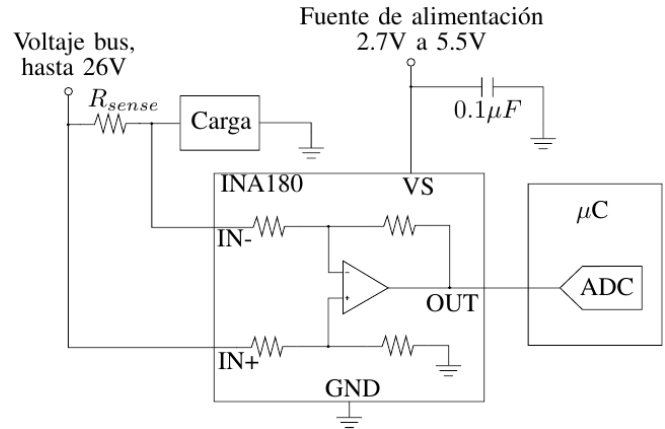


Fig. 7. Circuito de aplicación típica del INA180.

Debido a que la salida del sensor de corriente es conectada a la entrada del ADC, la tensión de salida no debe superar 3.3V que es la máxima lectura de tensión del ADC.

$$I_{In} \cdot R_{sense} \cdot Ganancia < 3.3V \quad (18)$$

La ganancia del INA180A3 es 100 y se diseña para una corriente máxima de 0.3A.

$$0.3 \cdot R_{sense} \cdot 100 < 3.3V \quad (19)$$

$$R_{sense} < 0.11\Omega \quad (20)$$

$$R_{sense} = 0.1\Omega \quad (21)$$

D. Prototipo

Un prototipo (ver Fig. 8) de todo el sistema fue diseñado en el software KiCad. Los valores usados en el convertidor Boost son dispositivos comerciales con valores cercanos a los hallados en el diseño previo y se muestran en la tabla II.

TABLE II
COMPONENTES COMERCIALES USADOS EN EL
CONVERTIDOR BOOST.

	Valores
L	300μH
C	13.6μF
RL	660Ω
fs	50KHz

Se eligió el diodo Schottky RSX501L-20, el cual presenta una caída de tensión de 0.2 voltios cuando hay una polarización directa y para los MOSFETs Q1, Q2 y Q3 se eligió el circuito integrado BSL205N el cual contiene dos MOSFETs de canal n.



Fig. 8. Prototipo del circuito diseñado

La implementación de los algoritmos MPPT fue realizada en el microcontrolador MSP430FR2311 de la empresa Texas Instruments. Para las etapas de prueba se definió que los ciclos de trabajo de los algoritmos comiencen en 0.8. Además, para los algoritmos OCV y SCC se definió un paso de ciclo de trabajo de 0.002. Por otro lado, con el fin de obtener la estabilidad en el cálculo numérico de los algoritmos P&O e INC, se determinó experimentalmente que el paso de ciclo de trabajo es de 0.01 y para obtener valores estables de las mediciones de corriente y tensión se requiere considerar el promedio de 10 lecturas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se diseñaron cuatro experimentos para probar el rendimiento de los algoritmos MPPT propuestos con el convertidor Boost diseñado. Los dos primeros experimentos se prueban con una carga constante R_L de 660Ω para analizar el seguimiento durante el estado transitorio y estable. En el tercer experimento se calcula la potencia consumida por el microcontrolador y el sensor de corriente que son necesarios para poder emplear los algoritmos MPPT. Para el cuarto experimento se reemplaza la carga R_L por un supercapacitor de 1F para calcular el tiempo en el que se cargará hasta 5 voltios con cada uno de los algoritmos. Finalmente, con esto se puede decir las ventajas y desventajas del uso de cada algoritmo para recolectar energía termoeléctrica.

A. Estado Transitorio

Al probar el sistema con una carga constante de 660Ω y diferentes ciclos de trabajo, se obtuvo como resultado que el MPP ocurre cuando el ciclo de trabajo es aproximadamente 0.9367.

En la Fig. 9 se muestra el comportamiento del sistema con la carga constante de 660Ω y con los algoritmos en estado transitorio desde que el sistema se reinicia. El ciclo de trabajo inicia con 0.8 cuando se reinicia y llega a su estado estable alrededor de 0.9367. En esta figura es evidente un claro retraso para rastrear el MPP de los algoritmos P&O e INC en comparación al OCV y SCC.

Tabla III muestra los tiempos que tardan los algoritmos en alcanzar el MPP. En la tabla solo se muestran los tiempos mínimos y máximos que demoran los algoritmos luego de

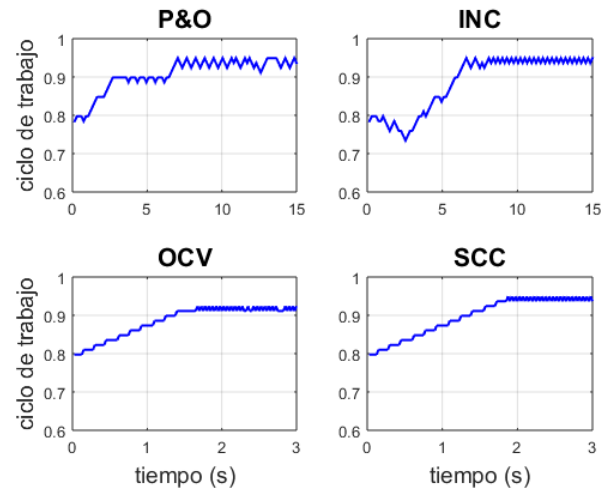


Fig. 9. Seguimiento del MPP para cada uno de los algoritmos MPPT implementados.

TABLE III
TIEMPO PARA ALCANZAR EL MPP.

Algoritmo	Tiempo (s)
P&O	3.15 - 7.35
INC	4.05 - 6.45
OCV	1.55 - 1.68
SCC	1.82 - 1.85

analizar 8 estados transitorios (Ver Fig. 9) seguidos para cada algoritmo. Para el caso de los algoritmos P&O e INC se observa que estos tiempos eran muy diferentes cada vez que se reiniciaba, mientras que para el OCV y SCC solo habían pequeñas variaciones.

B. Estado Estable

En la Tabla IV se muestra los promedios y la desviaciones estándar del comportamiento del sistema con la carga constante de 660Ω y con los algoritmos en estado estable. Estos resultados se obtuvieron a partir de 300 puntos de muestra para cada algoritmo. Se observa que el ciclo de trabajo promedio obtenido en el algoritmo P&O es el más cercano al MPP (0.9367), mientras que la del algoritmo SCC es el más alejado. Por otro lado, el algoritmo P&O es el que más oscilaciones presenta de acuerdo a su desviación estándar, mientras que el algoritmo OCV es el más estable.

TABLE IV
MEDIA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL CICLO DE TRABAJO EN ESTADO ESTABLE.

Algoritmo	Promedio	Desviación estándar
P&O	0.9366	0.009656
INC	0.94	0.008465
OCV	0.9416	0.006175
SCC	0.943	0.00634

C. Potencia Requerida para Implementar los Algoritmos

Con el sistema de recolección energía presentado, se requiere que el microcontrolador con los algoritmos y el sensor

de corriente estén funcionando; por ende, estos dispositivos consumen energía para poder recolectar energía. Tabla V muestra el consumo que se requiere para implementar cada uno de los algoritmos considerando que solo los algoritmos P&O, INC y SCC usan el sensor de corriente.

TABLE V

POTENCIA CONSUMIDA POR EL MICROCONTROLADOR Y EL SENSOR DE CORRIENTE.

Algoritmo	Potencia total consumida
P&O	2.937mW
INC	2.9865mW
OCV	2.112mW
SCC	2.904mW

D. Carga de un Supercapacitor

Para esta prueba se reemplaza la carga R_L por un supercapacitor de 1F. Tabla VI muestra el tiempo que tarda el sistema en cargar el supercapacitor de 0 a 5 voltios. Se probaron los cuatro algoritmos MPPT y varios ciclos de trabajo constante, pero solo se muestran los tiempos de los algoritmos MPPT y el mejor resultado de todos los ciclos de trabajo constante.

TABLE VI

TIEMPO DE CARGA DEL SUPERCAPACITOR HASTA 5V.

Algoritmo	Tiempo
PWM cte.	21min 36s
P&O	19min 58s
INC	20min 55s
OCV	19min 50s
SCC	20min 19s

V. CONCLUSIÓN

Los algoritmos P&O e INC obtuvieron resultados muy similares. Aunque el INC fue ligeramente más estable, ambos exhibieron muchas oscilaciones. Debido a esta característica, los tiempos de seguimiento del MPP son más lentos y esto se aprecia en la tabla III.

Los algoritmos OCV y SCC también obtuvieron resultados muy similares. Ambos fueron los más estables de acuerdo con la tabla IV. Además, los algoritmos OCV y SCC son muy simples de implementar en el microcontrolador y no requieren una gran capacidad computacional. Esto se ve en la velocidad con la que siguen el MPP.

El sistema con la carga constante de 660Ω llegó aproximadamente hasta 2.84V con cualquier algoritmo en estado estable, mas no a los 3.3V como se había diseñado inicialmente. Con esto se concluye que el sistema puede recolectar aproximadamente 12.2mW. Por otro lado, el algoritmo OCV es el que menos potencia consume de acuerdo con la tabla V.

Finalmente, el algoritmo OCV carga el supercapacitor más rápido que los otros algoritmos de acuerdo con la tabla VI y presenta un gran desempeño en cuanto a su rapidez de seguimiento, su estabilidad y bajo consumo de potencia ya que no usa un sensor de corriente. Además, cualquier algoritmo MPPT es más rápido que usar un ciclo de trabajo constante.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer al Instituto General de Investigación-UNI por financiar este trabajo y a INICTEL-UNI por permitirnos utilizar sus laboratorios.

REFERENCES

- [1] C. Del-Valle-Soto, G. Durán-Aguilar, F. Cortes-Chavez, and A. Rossa-Sierra, "Energy-efficient analysis in wireless sensor networks applied to routing techniques for internet of things," in *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Springer, 2019, pp. 312–321.
- [2] S. Sharma, V. Panwar, S. Yadav, *et al.*, "Different sources of energy harvesting: A survey," in *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, IEEE, 2017, pp. 1370–1373.
- [3] H. Wang, A. Jasim, and X. Chen, "Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications—a comprehensive review," *Applied energy*, vol. 212, pp. 1083–1094, 2018.
- [4] H. H. R. Sherazi, M. A. Imran, G. Boggia, and L. A. Grieco, "Energy harvesting in lorawan: A cost analysis for the industry 4.0," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 11, pp. 2358–2361, 2018.
- [5] N. Garg and R. Garg, "Energy harvesting in iot devices: A survey," in *2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, IEEE, 2017, pp. 127–131.
- [6] P. Spies, M. Pollak, and L. Mateu, *Handbook of energy harvesting power supplies and applications*. CRC Press, 2015.
- [7] W.-K. Lee, M. J. Schubert, B.-Y. Ooi, and S. J.-Q. Ho, "Multi-source energy harvesting and storage for floating wireless sensor network nodes with long range communication capability," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2606–2615, 2018.
- [8] Z. M. Dalala, "Energy harvesting using thermoelectric generators," in *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [9] A. Montecucco and A. R. Knox, "Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 828–839, 2014.
- [10] A. L. O. Maran, N. C. Henao, E. A. Silva, L. Schaeffer, and O. H. A. Junior, "Use of the seebeck effect for energy harvesting," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 9, pp. 4106–4114, 2016.
- [11] I. Laird, H. Lovatt, N. Savvides, D. Lu, and V. Agelidis, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms for thermoelectric generators," in *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, IEEE, 2008, pp. 1–6.
- [12] R. R. F. Quintero and G. E. Flores-Verdad, "A cmos startup circuit for thermoelectric energy harvesting systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 01, pp. 26–30, 2019.

- [13] M. O. Cernaianu, C. Cirstea, and A. Gontean, "Thermoelectrical energy harvesting system: Modelling, simulation and implementation," in *2012 10th International Symposium on Electronics and Telecommunications*, IEEE, 2012, pp. 67–70.
- [14] M. Li, S. Xu, Q. Chen, and L.-R. Zheng, "Thermoelectric-generator-based dc-dc conversion networks for automotive applications," *Journal of electronic materials*, vol. 40, no. 5, pp. 1136–1143, 2011.
- [15] C. H. A. Almeida, C. D. R. Souto, J. P. Veronese, and J. C. de Oliveira Custódio, "Characterization of thermoelectric cell for electric power generation," in *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, IEEE, 2015, pp. 1358–1362.
- [16] C. M. F. Carvalho and N. F. S. V. Paulino, *CMOS indoor light energy harvesting system for wireless sensing applications*. 2015.
- [17] A. Rof Ballús, "Estudio y parametrización de un generador termoeléctrico," B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [18] M. D. P. Emilio, *Microelectronic circuit design for energy harvesting systems*. Springer, 2017.
- [19] N. Bizon, N. M. Tabatabaei, F. Blaabjerg, and E. Kurt, "Energy harvesting and energy efficiency," *Lecture Notes in Energy*, vol. 37, 2017.
- [20] B. University. (2019). "Battery types," [Online]. Available: www.batteryuniversity.com.



Jean Vega Es bachiller en ciencias con mención en Ingeniería electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima-Perú. En la actualidad trabaja en el grupo de investigación "Sistemas Embebidos y Sensores en Internet de las Cosas" de la Dirección de Investigación y Desarrollo tecnológico del INICTEL-UNI. Realiza proyectos relacionados a la recolección de energía termoeléctrica y fotovoltaica para nodos sensores.



Jinmi Lezama Doctor en Sistemas Electrónicos por la Universidad de Lorraine - Francia, Master en Sistemas Electrónicos embebidos y microelectrónica por la Universidad Henri Poincaré - Francia. En la actualidad se desempeña como investigador y líder del grupo de investigación "Sistemas Embebidos y Sensores en Internet de las Cosas" en la dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico del INICTEL-UNI de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde trabaja en el desarrollo de redes de Sensores basados en IoT, priorizando la optimización en el consumo de energía, la adaptación, procesamiento, control, comunicaciones y la recolección de energía de diferentes fuentes (energy harvesting).