VII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica
V Congreso de Ingeniería Mecatrónica
V Congreso de Materiales Energía y Medio Ambiente
28 a 30 de abril de 2015

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE HARVESTING PIEZOELÉCTRICO USANDO UNA TOPOLOGÍA INTEGRADA

Andrés Felipe Gomez-Casseres E. (1), Juan Pablo Franco R. (1), Jesús David Martínez V. (2).

1. *Grupo IDECUN, Corporación Unificada Nacional de Educación Superior, Colombia*
2. *Estudiante, Corporación Unificada Nacional de Educación Superior, Colombia*

Núcleo Temático: Energía, Carbón y Medio Ambiente

Introducción

Los avances alcanzados en el desarrollo de dispositivos electrónicos de bajo y muy bajo consumo de energía han permitido el desarrollo de sistemas cada vez mas pequeños y complejos, gracias a la disminición de las restricciones en los requerimientos técnicos, como la ventilación del sistema para la extracción de calor, entre otros. El diseño, la fabricación y el uso de los sistemas mencionados ha permitido el desarrollo de técnicas y aplicaciones que en el pasado solo evidenciaban un avance teórico, como por ejemplo Internet of Things (IoT), el desarrollo de Smart-dust, la implementación de Wireless Sensor Networks (WSN), etc. Cada una de estas aplicaciones ofrece beneficios interesantes en diferentes áreas del conocimiento como la ingeniería de materiales, la bioingeniería, la medicina, las comunicaciones, entre muchas otras.

Una de las aplicaciones que ha despertado una gran atención es el desarrollo de sistemas de energy harvesting (EH) o energy scavenging. Gracias a que estos sistemas, mediante la extracción de energía presente en el ambiente en el cual se encuentran inmersos, tendrían la capacidad de proveer a su carga la energía que ésta necesita para operar durante cierto intervalo de tiempo. Por tal razon el sistema gana gran autonomía y a la vez reduce los costos relacionados con el mantenimiento requerido, en comparación al uso de elementos almacenadores de energía, como las baterías, que presentan una vida útil relativamente corta en comparación con la duración media del sistema en particular [Gungor, 2009].

Debido a que la potencia generada por los actuales sistemas de Energy Harvesting se encuentra en el rango de los µW a los mW y a que se identificaron los requerimientos de potencia como factores críticos en el diseño e implementación de una WSN, es necesario que el sistema de energy harvesting extraiga la mayor cantidad de potencia del ambiente, presentando una alta eficiencia [Sanchez, 2013]. Lo anterior con el fin de aprovechar toda la energía disponible y ponerla a disposición de la carga.

En este artículo se presenta una topología integrada denominada *Boost Integrated with Flyback Rectifier/Energy Storage/DC–DC Converter* (BIFRED) como alternativa a los circuitos regularmente usados en aplicaciones de energy harvesting [Willers, 1999]. Se presentará un modelo del funcionamiento del circuito tanto para DC como para bajas frecuencias. Posteriormente se realizará la verificación del modelo DC del sistema, se calcularán diferentes parámetros que miden el rendimiento del circuito, tales como la eficiencia y el factor de potencia, Al final se compararán los resultados obtenidos en este caso con resultados presentados en trabajos similares, publicados anteriormente.

Métodos

El circuito convertidor BIFRED propuesto por [Madigan, 1989], se muestra en la [Figura 1]. Este circuito surge de la integración de dos convertidores comúnmente usados en aplicaciones de procesamiento de potencia, los cuales son el convertidor Boost y el convertidor Flyback. En este circuito se usa un rectificador de dos etapas [Peters, 2011], en el cual la primera etapa es denominada *Negative Voltage Converter* (NVC) y la segunda es un diodo () que impide el flujo de corriente hacia la fuente.

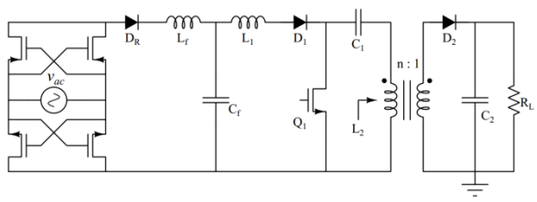

Figura 1: Circuito BIFRED

Madigan propone una operación diferenciada CCM-DCM, en la cual la bobina L1 opera en CCM (Modo de Conducción Continuo) mientras que la inductancia de magnetización del transformador opera en DCM (Modo de Conducción Discontinuo). En esta operación se presentan diferencias de potencial eléctrico excesivamente altas sobre el condensador cuando se presentan valores altos de resistencia como carga al circuito [Willers, 1999].

Una solución propuesta por Willers consiste en que ambas bobinas del circuito BIFRED operen en DCM, lo cual acopla directamente, en términos de potencia, las dos etapas gracias a la dependencia del modo DCM con respecto a la carga del circuito. Ésto repercute en la igualación de las potencias de entrada y de salida lo cual reduce el voltaje en la capacitancia de almacenamiento C1 para cambios en la resistencia de carga. Por tal razón se diseña el circuito para que ambas bobinas operen en DCM.

Una ventaja adicional que ofrece el DCM es la emulación de una resistencia en el puerto de entrada del circuito, lo que permite la modulación de la potencia de entrada. Ésto representa una función útil en aplicaciones relacionadas con energy harvesting debido a que permite tanto la extracción de potencia como el procesamiento de la misma [Szarka, 2012].

El análisis de este tipo de circuitos está basado en la técnica de modelado denominada Averge Modeling [Erickson, 2001], la cual permite caracterizar el comportamiento de los componentes de baja frecuencia en cada una de las señales del circuito. Mediante el uso de dicha técnica, y teniendo en cuenta que ambas bobinas operan en DCM, donde la corriente de L1 se vuelve nula antes que la corriente en L2, se contruye el modelo en variables de estado que caracteriza el funcionamiento del circuito. Dicho modelo se presenta en las ecuaciones 1 - 6 [Gomez-Casseres, 2014].

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

Con el fin de encontrar los puntos de equilibrio del sistema (o de forma equivalente las ganancias entre los voltajes DC presentes en el circuito y) es necesario igualar a cero las derivadas en las ecuaciones 1 a 6 y, definiendo y , se obtienen las ecuaciones 7 y 8, donde y . Estas ecuaciones modelan los voltajes DC presentes en el circuito BIFRED.

(7)

(8)

Con el fin de seleccionar los valores de los componentes del circuito que aseguren que el sistema opere en DCM, es necesario determinar el rango de operación en dicho modo. Ésto se logra mediante la comparación de las señales de corriente que fluyen a través de las inductancias del circuito, las cuales se muestran en la [Figura 2], donde Vg=Vcf. Cabe resaltar que para establecer la operación deseada es necesario que el tiempo en el cual decae la corriente debe ser menor al tiempo en el cual decae , además que la corriente debe llegar a cero antes de que el próximo ciclo comience. Ésto se evidencia en las ecuaciones 9 y 10, respectivamente. En la ecuación 11 se muestra la condición necesaria para que el circuito opere según las consideraciones antes mencionadas [Figura 2]. Dicha ecuación fué obtenida mediante la manipulación algebraica de la ecuación 9 y la sustitución de las definiciones de y .

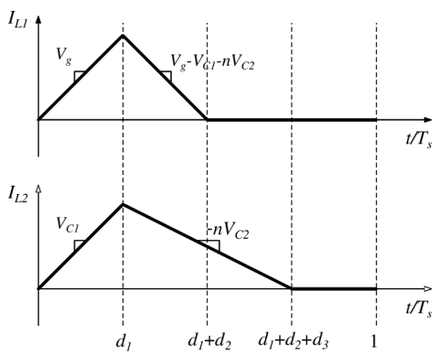

Figura 2: Corrientes a través de las bobinas del circuito.

(9)

(10)

(11)

Para diseñar un circuito BIFRED enfocado en las diferentes aplicaciones relacionadas con Energy Harvesting se eligieron los siguientes parámetros de diseño: V, V, s, y mA. Con estos valores se obtiene una mH, por lo cual se selecciona mH. En las [Figuras 3 y 4] se presentan las ganancias y con respecto al ciclo útil .

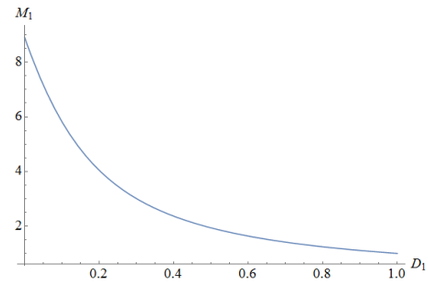

Figura 3: Ganancia para

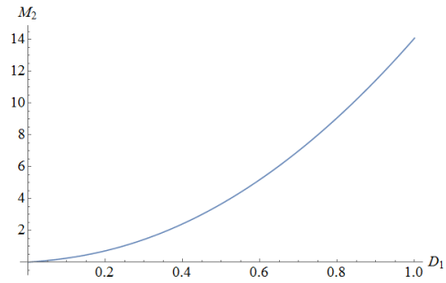

Figura 4: Ganancia para un .

Para que el circuito opere de la forma descrita es necesario seleccionar un valor apropiado de Ésto se logra observando que el valor mínimo de se encuentra cuando y, dado que se requiere un valor mínimo igual o mayor a 1 para una operación en DCM, se soluciona la ecuación 7 para , se reemplaza y se soluciona para . De este proceso se obtiene un valor para igual a , con el cual se determina H. Cabe señalar que los valores de los condensadores usados no tienen un impácto en la respuesta del circuito en estado estable pero influyen directamente en su tiempo de respuesta y demás parámetros dinámicos, por esta razón se eligieron valores de capacitancias pequeñas, por ejemplo F y F. Adicionalmente se usaron MOSFETs con m y m (m) para transistores canal n (canal p).

Resultados

Se realizaron dos simulaciones usando el circuito BIFRED: la primera buscó corroborar la respuesta en estado estable del circuito mediante la medición del voltaje de entrada y los voltajes en los diferentes condensadores del circuito, ésto para calcular las ganancias y . La segunda simulación busco medir el comportamiento del circuito como harvester piezoeléctrico mediante el reemplazo de la fuente de entrada por el circuito equivalente y simplificado de un elemento piezoeléctrico [Yang, 2009; Gomez-Casseres, 2012].

Debajo se presentan las ganancias y [Figuras 5 y 6], tanto calculadas como simuladas usando el entorno Simulink de Matlab, para el valor de calculado en la sección anterior.

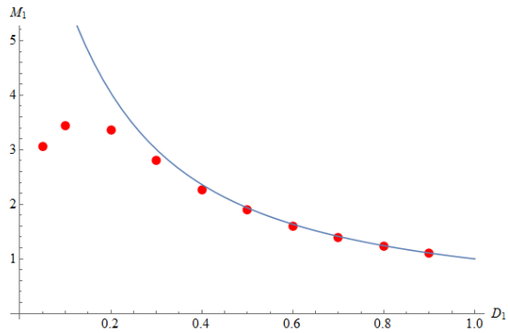

Figura 5: Ganancia calculada (azul) y simulada (rojo)

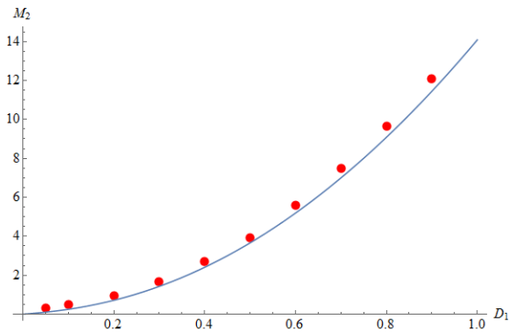

Figura 6: Ganancia calculada (azul) y simulada (rojo)

La simulación usando el circuito equivalente de un elemento piezoeléctrico se realizó usando el paquete de software LTspice IV de Linear Technology. Para esta simulación se consideró una fuente de corriente con una amplitud de 1 mA con una frecuencia de 20 Hz y un condensador de 168.9 nF. Adicionalmente se usaron transistores de tecnología TSMC - 0,18 µm de MOSIS. Posterioremente se muestran el voltaje y la corriente de entrada resultado de la simulación [Figura 7] y los voltajes sobre los condensadores C_1 y C_2 [Figura 8]. Finalmente se muestran algunos parámetros calculados con base en las señales mostradas en las figuras 7 y 8 [Tabla 1]. Es importante resalatar que los resultados presentados hacen referencia a los últimos 0.25 segundos de una simulación en una ventana de 10 segundos.

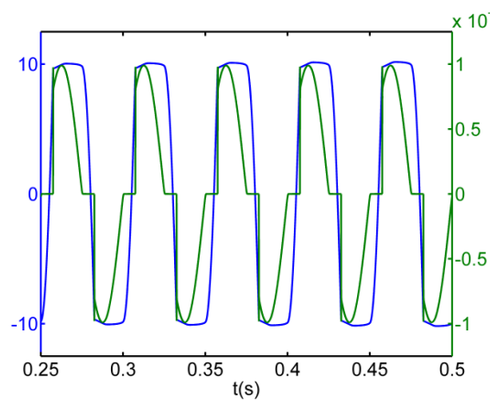

Figura 7: Voltaje (azul) y corriente (verde) de entrada del circuito BIFRED.

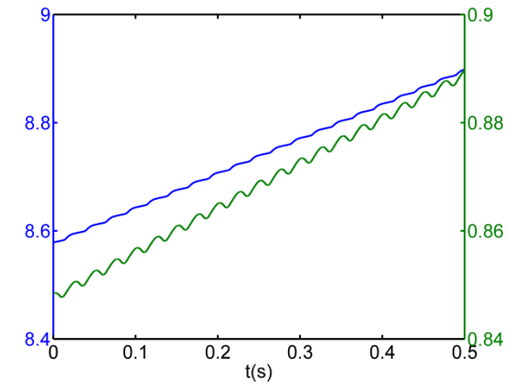

Figura 8: Voltajes sobre los condensadores (azul) y (verde).

Parámetro	Valor
Ciclo útil	0.011
Potencia de entrada	5 mW
Potencia de salida	791.388 µW
Potencia aparente	5.887 mW
Energía almacenada en	19.794 mW
Factor de Potencia	0.8503
Eficiencia	0.1582

Tabla 1: Parámetros de rendimiento calculados de los resultados de simulación.

Discusión

Diferentes topologias han sido usadas con el fin de implementar un sistema de procesamiento de potencia que permita maximizar la extracción de potencia de un elemento piezoeléctrico, entre dichas topologías se encuentran: el conversor Buck [Sankman, 2015; Ottman, 2002], Buck-Boost [Darmayuda, 2012; Weimer, 2006], Flyback [Kong, 2012], entre otros. Cada uno de estas topologías ofrece diferentes ventajas con respecto a la extracción de potencia del elemento piezoeléctrico y al procesamiento o adecuación de dicha potencia a los requerimientos de la carga. Por ejemplo, el uso de una topología Buck-Boost permite sustituir el diodo presente en la etapa de rectificación por el transistor de conmutación propio de la topologia, reduciendo así las pérdidas relacionadas con este elemento. En comparación, el circuito BIFRED permite, mediante la variación de , obtener la relación deseada entre energía almacenada y potencia de salida disponible, dando asi dos rangos de operación: uno de almacenamiento y otro de consumo de potencia en la carga. Dichos rangos vienen dados por las ganancias DC del circuito mostradas en secciones anteriores.

El uso del modo de operación DCM permite una extracción de potencia con un alto factor de potencia (PF) gracias a la emulación de una resistencia en el puerto de entrada del conversor, lo cual reduce las corrientes en el circuito y por consiguiente las pérdidas en el mismo [Gao, 2013]. Dicho modo de operación tambien permite una mayor eficiencia en la extracción de energía del elemento piezoeléctrico debido a que la potencia real aumenta con relación a la potencia aparente. Diferentes investigaciones muestran que la implementación de un sistema de control en lazo cerrado mejoran dicho factor de potencia, con la desventaja de requerir circuitos adicionales de control con un consumo de potencia fijo [Sankman, 2015; Ottman, 2002; Wu, 2015].

Una mejora sustancial, con relación a trabajos anteriores donde se estudia el circuito BIFRED [Gomez-Casseres, 2014], se da en la eficiencia presentada por el circuito gracias a la implementación de un rectificador NVC, el cual reduce los voltajes en

los terminales de los elementos de conmutación. Cabe señalar que el uso extensivo de diodos al interior del conversor reduce ampliamente dicha eficiencia.

En las ecuaciones 7 y 8 se evidencia que las ganancias de voltaje del circuito (y) dependen únicamente de los valores de las inducatancias y , del valor de la resistencia de carga y del periodo de conmutación del circuito , no de los valores de capacitancia de los condensadores del circuito, lo cual permite la selección de dichos valores teniendo en cuenta únicamente requerimientos relacionados con la capacidad de almacenamiento de energía deseada y la respuesta dinámica (tiempos de subida y estabilización) del circuito.

Con el fin de considerar un referente de las tendencias de investigación en Energy Harvesting se muestra el número de artículos publicados que reportan resultados de investigación en la plataforma de apoyo a los investigaores Web of Science [tabla 2]. Se reportaron un total de 776 artículos científicos en la categoría de ingeniería eléctrica y electrónica publicados en los últimos 3 años. Adicionalmente se presentan las contribuciones a dicho tema por país en el mismo periodo de tiempo [Tabla 3]. Como se puede observar, Brasil es el unico pais suramericano que aparece en el listado (Puesto 34). De tal manera, la investigacion y el desarrollo de esta tematica en Colombia evidencia un nicho investigativo diponible, el cual puede aportar con sus multiples aplicaciones al desarrollo estrategico, cientifico y tecnologico de las nesecidades del entorno.

Año	No. De artículos	% del total
2014	322	41.50%
2013	257	33.12%
2014	197	25.39%

Tabla 2: Publicaciones realacionadas con Energy Harvesting en los últimos 3 años.

Ranking	País	No. De artículos	% del total
1	USA	208	26.80%
2	Rep. Popular China	112	14.43%
3	Inglaterra	67	8.63%
4	Italia	58	7.47%
5	Corea del Sur	56	7.22%
6	Singapur	51	6.57%
7	Francia	40	5.16%
8	Canadá	39	5.03%
9	Alemania	38	4.90%
10	Japón	32	4.12%
11	España	32	4.12%
34	Brasil	5	0.64%

Tabla 3: Aporte por paises a las publicaciones relacionadas con Energy Harvesting en los últimos 3 años

Referencias

Darmayuda *et al*, IEEE Transactions on Circuits and Systems—II, 59: 578-582, 2012.

Erickson *et al*, Fundamentals of Power Electronics, 2001.

Gao *et al*, IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, 445-448, 2013.

Gomez-Casseres, Tesis de grado, 2014.

Gungor *et al*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56: 4258–4265, 2009.

Kong *et al*, IEEE Transactions on Power Electronics, 27: 2298-2308, 2012.

Madigan *et al*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 46: 749–758, 1999.

Ottman *et al*, IEEE Transactions on Power Electronics, 17: 669-676, 2002.

Peters *et al*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 58: 1542–1550, 2011.

Sanchez *et al*, Key Engineering Materials, 569: 775-782, 2013.

Sankman *et al*, IEEE Transactions on Power Electronics, 30: 632-643, 2015.

Szarka *et al*, IEEE Transactions on Power Electronics, 27: 803–815, 2012.

Weimer *et al*, Power Electronics Specialists Conference 2006, 18: 1-5, 2006.

Willers *et al*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 46: 724–733, 1999.

Wu *et al*, IEEE Transactions on Power Electronics, 30: 1956-1965, 2015.

Yang *et al*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 20: 2223–2235, 2009.