INVESTIGACIÓN

Estudio de las políticas de optimización de energía para la transmisión de información en sistemas recolectores de energía de Radio Frecuencia

Study of optimal transmission policies in Radio Frequency energy harvesting systems

Ing. David Alejandro Urquiza Villalonga[1*], Dr.Sc.Jorge Torres Gómez[2]

Recibido: 11/2017 | Aceptado: 02/2018

PALABRAS CLAVE
Recolección de energía
Comunicaciones Verdes
Políticas de asignación de potencia
Técnicas de optimización

RESUMEN

La recolección de energía (EH) emerge como una tecnología prometedora para el desarrollo de las comunicaciones digitales relacionadas con el paradigma de las Comunicaciones Verdes. En este escenario, la característica más relevante es el uso de energía renovable para energizar dispositivos electrónicos de forma inalámbrica. Entre las principales ventajas de esta tecnología destaca el desarrollo de sistemas auto-recargables que aumentan el tiempo de vida de las baterías. Las principales aplicaciones se reportan en el campo de las redes de sensores inalámbricos, en la quinta generación de redes celulares (5G), en sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) y en el paradigma de del Radio Cognitivo (CR). El uso de las bandas de radiofrecuencia (RF) como fuentes de energía se presenta como una solución atractiva, pues provee un suplemento de energía relativamente predecible. En este sentido, en el presente artículo se describen los componentes de un nodo de recolección de energía de RF y se analizan las principales bandas de recolección. Además, se modela de forma teórica este nodo de recolección y se analizan sus limitaciones para transmitir información por un canal de comunicaciones. Luego, se describen las principales soluciones reportadas para optimizar la eficiencia con la cual se utiliza la energía recolectada en la transmisión de información.

KEYWORDS
Energy harvesting
Green Communications
Power allocation policies
Optimization techniques

ABSTRACT

Energy harvesting (EH) emerges as a promising technology for the development of digital communications regarding to Green Communications paradigm. In this scenario, the most relevant characteristic is the use of renewable energy to power wirelessly electronics devices. By means of this technology, several advantages are achieved in the field of wireless communications. Self-powered systems are developed to increase battery lifetime. The main applications are reported in the fields of

1* Centro de Estudios de Matemática para las Ciencias Técnicas (CEMAT), Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Cuba, daurquiza@cemat.cujae.edu.cu

2 Departamento de Telecomunicaciones y Telemática, Facultad de Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Cuba, jorge.tg@tele.cujae.edu.cu

wireless sensor networks, fifth-generation cellular networks (5G), Radio Frequency Identification (RFID) and Cognitive Radio (CR) paradigm. RF sources are presented as an attractive solution since it provides relatively predictable energy supply. In this sense, the current article is addressed to describe main components of a RF harvesting node. In addition, this harvesting node is modeled theoretically and main limitations to transmit information on communication channels are analyzed. Then, main solutions reported to optimize efficiency on information transmission are described.

Introducción

La recolección de energía —(EH), *Energy Harvesting*— emerge como una solución viable al elevado consumo eléctrico de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). Esta tecnología se inscribe dentro del paradigma de las Comunicaciones Verdes —*Green Communications*— y se emplea para recolectar energía del medio ambiente y utilizarla para energizar dispositivos electrónicos. De las diferentes fuentes existentes, la recolección de energía de las bandas de radiofrecuencia —(RF), *Radio Frequency*— ha sido la menos explotada, aunque ha comenzado a ganar bastante atención en los últimos años por las ventajas que brinda. Las señales de RF son utilizadas por diferentes servicios como la televisión, radio, telefonía celular (GSM, LTE), redes inalámbricas (WiFi, Bluetooth), lo que garantiza alta disponibilidad y fácil recolección. Con el desarrollo alcanzado en la radioelectrónica y en la construcción de antenas las señales de RF se convierten en la fuente más barata de implementar (S. Fernández, 2014). Además, permiten que diferentes nodos, tales como sensores inalámbricos que operan en una misma red, puedan colaborar entre ellos e intercambiar energía garantizando un funcionamiento energéticamente eficiente.

Estos sistemas brindan numerosas ventajas a las comunicaciones inalámbricas pues están orientados al incremento del uso de fuentes de energías renovables y al desarrollo de dispositivos auto-recargables y auto-sostenibles energéticamente. La EH se presenta como una solución prometedora para incrementar la durabilidad de la carga de la batería. Estos dispositivos muestran aplicabilidad en redes de sensores inalámbricos —(WSN) *Wireless Sensor Networks*—, pues son sistemas de bajo consumo energético donde las técnicas de recolección de energía garantizan que un masivo número de sensores operen de forma ininterrumpida. Además, permiten el despliegue de las redes inalámbricas en zonas de difícil acceso, pues no es necesaria la intervención humana constante para realizar cambios de batería. Esto es muy útil en aplicaciones emergentes como Internet de las Cosas —(IoT) *Internet of Things*—, redes celulares de quinta generación (5G) y Radio Cognitivo —(CR) *Cognitive Radio*— (Ku, Li, Chen, y Liu, 2016).

La EH posee grandes potencialidades lo que genera, tanto en el ámbito académico como en el industrial, un especial interés por su desarrollo. Los líderes en teléfonos inteligentes como Samsung y Apple están introduciendo en sus productos capacidades para ser cargados de forma inalámbrica. Diferentes empresas como Nikola Labs, Powercast y Energous desarrollan soluciones comerciales dedicadas a la conversión eficiente de señales de RF a corriente directa (Nikola Labs, s. f.) (“Product Overview – Energous”, s. f.) (“Wireless Technology Services”, s. f.) .

Varios diseños de esquemas hardware para la recolección de energía inalámbrica se han obtenido en el Departamento de Telecomunicaciones y Telemática de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE. Entre los principales logros alcanzados se encuentra el diseño e implementación de una antena multibanda con tecnología coplanar que opera en las bandas de GSM (900 MHz) y WIFI (2.4 GHz) y un rectificador empleando cascadas de dobladores de voltaje con la configuración Villard (Farray Rodríguez y Campoamor Soto, 2015). La figura 1 muestra el empleo de esta rectena para recolectar energía de una llamada telefónica y alimentar un teléfono móvil. En la figura se muestra como la energía recolectada es suficiente para obtener un voltaje de alimentación de 5V. En este diseño la corriente obtenida es muy baja respecto a los valores nominales necesarios para la

carga de la batería de un teléfono móvil, por lo que solo permite extender la vida de la batería. No obstante, se comprueba la factibilidad del diseño teniendo en cuenta dispositivos de bajo consumo de energía.

A pesar de las notables ventajas que aporta la EH hay que tener en cuenta los nuevos desafíos que imponen a las comunicaciones inalámbricas. El comportamiento aleatorio de las fuentes de energía y la escasa cantidad que se logra recolectar son los aspectos fundamentales que limitan el desempeño de estos sistemas. Esto implica que el funcionamiento del nodo de comunicación puede ser interrumpido por falta de energía si el sistema no está bien diseñado. En este escenario, en la literatura científica se desarrollan dos grandes líneas de investigación para obtener nodos de comunicación que aprovechen al máximo la energía disponible en el medio. La primera línea de investigación se relaciona con el diseño de dispositivos capaces de recolectar la mayor cantidad de energía posible (Farray Rodríguez y Campoamor Soto, 2015; S. Fernández, 2014; González Chuy y Santana Gil, 2016; Pérez-Corona Madruga, 2016) y la segunda a la implementación de algoritmos y estrategias que permitan el uso eficiente de la energía recolectada. Relacionados con la segunda línea, existen diferentes estudios orientados hacia la conformación de formas de onda, esquemas de modulación y de codificación energéticamente eficientes y a la transmisión de energía e información simultánea por un mismo canal de comunicación —(WPT) *Wireless Power Transmission*— (Varshney, 2008; Zhang, Maunder, y Hanzo, 2015; Zhou, Zhang, y Ho, 2013). Además, se destaca el desarrollo de algoritmos de planificación para regular el comportamiento de un nodo de comunicación y hacer eficiente su consumo energético. Dentro de este marco se estudian técnicas de optimización de energía orientadas a la transmisión de datos. Estas se basan en variar dinámicamente la potencia instantánea de transmisión en función de la energía que se logra recolectar para transmitir largas secuencias de bits libre de errores (Arafa, Baknina, y Ulukus, 2016; Arafa y Ulukus, 2015; Devillers y Gündüz, 2012; Orhan, Gündüz, y Erkip, 2012; Ozel, Tutuncuoglu, Yang, Ulukus, y Yener, 2011; Ozel, Ulukus, y Grover, 2016; Ozel et al., 2016; Ozel, Yang, y Ulukus, 2011; Tutuncuoglu y Yener, 2012a, 2012b, Yang y Ulukus, 2012b, 2012a). En este sentido, en el presente artículo se describen los componentes de un nodo de recolección de energía de RF. Además, mediante un modelo teórico del nodo se analizan sus principales limitaciones para transmitir datos por un canal de comunicaciones. Luego, se estudian las técnicas reportadas para optimizar la eficiencia con la cual se utiliza la energía recolectada en la transmisión.

Materiales y métodos

En este artículo se empleó el método histórico lógico para la localización, evaluación y selección de las fuentes bibliográficas sobre los diversos contenidos que abarcan los sistemas recolectores de energía y las técnicas de optimización de energía en la transmisión de información por un canal de comunicaciones. Además, se empleó el método de análisis y síntesis, lo que permitió entender e interpretar el contenido estudiado en la bibliografía seleccionada. Las consultas bibliográficas se realizaron en revistas especializadas de primer nivel, principalmente en revistas de la IEEE —*Institute of Electrical and Electronics Engineers*— utilizando el software Zotero para la gestión bibliográfica. Además, se consultaron

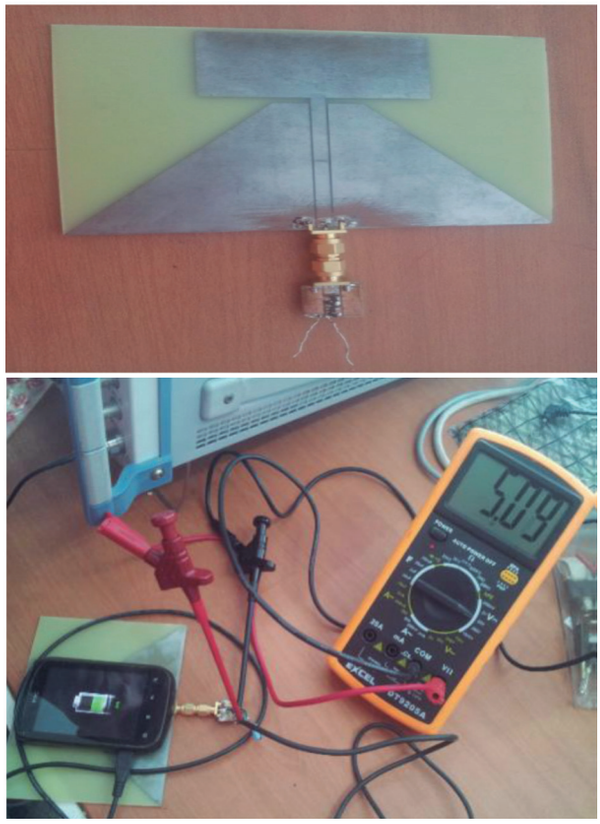

Figura 1. Sistema recolector de energía de RF para alimentar dispositivos móviles.

varias tesis del Departamento de Telecomunicaciones y Telemática de la Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE. La bibliografía consultada demuestra la novedad del tema y el interés que tiene la comunidad científica en continuar desarrollando las técnicas de recolección de energía.

Sistemas recolectores de energía de RF

La arquitectura de los dispositivos de comunicación con capacidades para recolectar energía de RF se divide principalmente en el transceptor de información y el módulo de recolección de energía como se muestra en la figura 2. Este módulo conocido como *rectena* se compone por la antena, un circuito acoplador de impedancia para garantizar máxima transferencia de potencia y un rectificador. Usualmente, se le añade un sistema *booster* al diseño para elevar el voltaje a la salida del rectificador. Dada la amplia distribución espectral de las señales de RF se requiere que la antena utilizada posea altos niveles de ganancia y directividad para un gran ancho de banda. También es común emplear una antena multibanda que recolecte energía en las diferentes bandas de interés (Masotti, Costanzo, Del Prete, y Rizzoli, 2013). Por otra parte, diversas soluciones se orientan al desarrollo de sistemas de antenas inteligentes que ajustan adaptativamente el lóbulo principal del patrón de radiación con el objetivo de recuperar la máxima cantidad de energía del ambiente.

La cantidad de energía que se puede recolectar depende de la potencia de transmisión, las características de las antenas transmisoras y receptoras y los efectos que tienen sobre el canal de comunicaciones los fenómenos de ruido, desvanecimiento, multitrayecto, entre otros. La tabla 1 resume los valores reportados, según varios estudios, sobre la potencia transmitida y recibida por diferentes servicios. La potencia recibida también es usual medirla como densidad de potencia, lo cual da un valor independiente de la antena que se utilice.

A partir de los datos reflejados en la tabla 1 se identifican que los servicios que aportan mayor cantidad de energía son las redes inalámbricas y la telefonía móvil en las bandas GSM de enlace de subida, pero a distancias cercanas al móvil que está transmitiendo. La telefonía tiene la ventaja de poseer una extensa cobertura y por tanto brinda un suministro de energía en prácticamente cualquier localización. Se aprecia que en todos los casos la potencia recibida es bastante pobre, dada en el orden de los micro watts. Por tanto, la EH es útil en aplicaciones de bajo consumo energético como las redes de sensores inalámbricos que tienen un requerimiento de potencia en un rango próximo de los 100 μW.

Modelo teórico para la descripción energética de los procesos de recolección y transmisión

El modelo teórico para la descripción de los procesos de recolección y transmisión tiene su base en el esquema mostrado en la figura 3. Este esquema representa a dos usuarios: un transmisor y un receptor que se comunican a través de un canal de comunicaciones, donde se considera: canal con ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN, *Aditive White Gaussian Noise*);$\boldsymbol{Y}$ representa el mensaje a enviar y $\boldsymbol{X}$ es el mensaje codificado que se puede interpretar como un mapeo de cada símbolo de $\boldsymbol{Y}$ a $\boldsymbol{X}$ según un libro de código determinado; $\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{X} + \boldsymbol{N}$ es el mensaje recibido, donde $\boldsymbol{N}$ es el ruido introducido por el canal y se representa como una variable aleatoria que se distribuye de forma normal con media μ_ω y varianza σ^2_ω ; $\boldsymbol{N}$ es independiente de $\boldsymbol{X}$.

Se considera que el transmisor tiene las capacidades de recolectar energía de RF y que el proceso de transmisión se realiza con la energía recolectada. Se asume

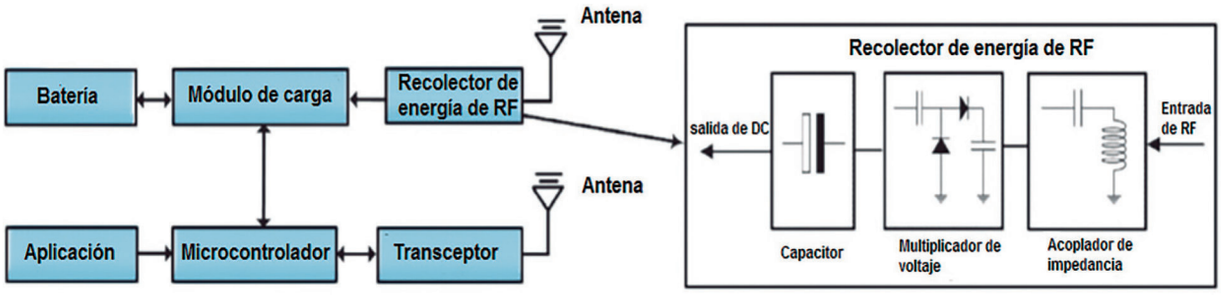

Figura 2. Arquitectura general de un dispositivo recolector de energía.

Servicios	Banda	Potencia transmitida	Potencia recibida	Distancia
TV (Mikeka, Arai, Georgiadis, y Collado, 2011)	470-770 MHz	10 kW (70 dBm)	-17 dBm (potencia promedio) -40 dBm (caso crítico)	6.6 km
FM (S. Fernández, 2014)	88-108 MHz	10 kW (70 dBm)	-55 dBm	———
AM	540-1600 KHz w	50 kW (77 dBm)	40 μW/m² (S. Fernández, 2014) -66 dBm (interiores) (J. V. Fernández & Piedrafita, 2006)	10 km
Banda ISM (Arms, Townsend, Churchill, Galbreath, y Mundell, 2005)	902-928 MHz	4 W (36 dBm)	-20 dBm	20 m
Radio base GSM	935-960 MHz (canal de bajada)	100 W (50 dBm)	800 μW/m² (S. Fernández, 2014) -20 dBm (J. V. Fernández y Piedrafita, 2006)	100 m
Transmisiones Móviles (GSM)	890-915 MHz (canal de subida)	100 mW-500 mW (24 dBm de potencia media)	0.4 mW/m²	10 m
AP WIFI (S. Fernández, 2014)	2.45-5.8 GHz	1 W (30 dBm)	0.8 mW/m²	10 m

Tabla 1. Potencia transmitida y recibida por diferentes servicios.

que la energía recolectada se almacena primero en una batería para luego usarse por el dispositivo. La batería se modela como una cola de energía donde la energía recolectada llega en instantes discretos de tiempo. Se asume una máxima eficiencia en el almacenamiento y se desprecian las pérdidas por fugas en la batería. La cantidad de energía que se recolecta se describe de forma estocástica según un proceso estacionario, ergódico, independiente e idénticamente distribuido (i.i.d.) denotado por E_i Se considera que el único gasto es el requerido para transmitir la información, o sea la energía consumida por el amplificador de potencia.

En este escenario, el canal de comunicaciones impone una restricción a la rapidez con que se puede transmitir información. Esto se describe a través del Teorema de Shannon donde se establece que la capacidad del canal es la máxima razón con que se pueden transmitir bits codificados para obtener en el receptor el mismo mensaje con baja probabilidad de bit erróneo. Por tanto si $R = \alpha C$, donde $0 < \alpha \leq 1$, R representa la razón de bit y C la capacidad del canal de comunicaciones, entonces en el receptor $Y' = Y$, lo cual implica que se pueden recuperar los símbolos transmitidos.

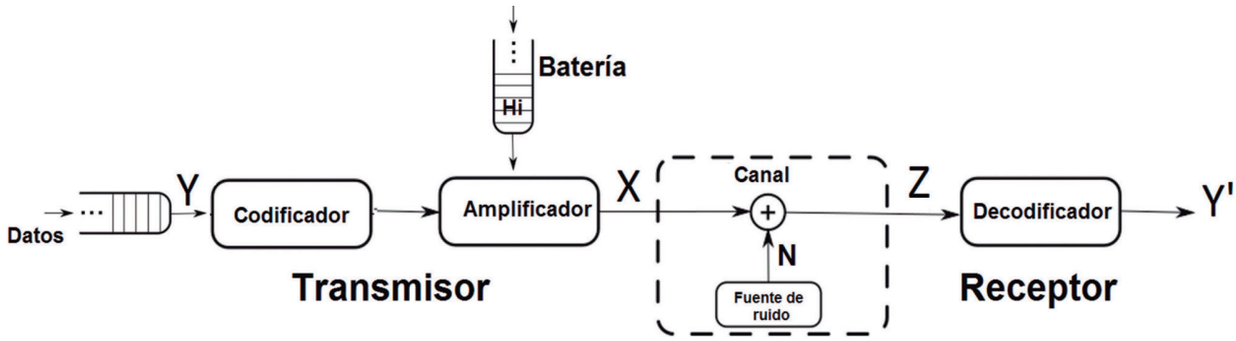

Figura 3. Modelo de transmisión incorporando un sistema recolector de energía de RF al transmisor.

Si se considera un sistema limitado en potencia con $N \sim \mathcal{N}(0,1)$, la capacidad del canal se puede calcular a través de la ecuación de Shannon como sigue:

$$C = \tfrac{1}{2} \log_2(1+P) \text{ [bits/transmisión]} \quad (1)$$

donde P es la potencia de transmisión. Luego, si se asume un aprovechamiento máximo de la capacidad del canal, entonces $\alpha = 1$ y $C = R$. Esto establece una relación entre la razón de bit y la potencia de transmisión $R = g(P)$ dada por la ecuación de Shannon (1). Esta es una función monótona creciente y cóncava en P.

Se considera que el transmisor tiene la capacidad de variar de forma dinámica la razón de bit a través de un ajuste en la potencia del amplificador de salida, lo cual se expresa mediante la función $R = g(P)$. Con esta descripción, para que la transmisión se pueda realizar, cada palabra de código tiene que satisfacer las condiciones de causalidad energética impuestas por (Ulukus et al., 2015):

$$\sum_{i=1}^{k} X_i^2 \leq \sum X_i \quad k = 1,2,3,...n \quad (2)$$

Donde X_i^2 es la energía asociada a la transmisión de los símbolos X_i y E_i es la energía recolectada de las bandas de RF. Esto implica que en cada uso del canal la energía consumida tiene que ser menor o igual a la energía recolectada.

En cada uso del canal la energía almacenada en la batería (estado de la batería) se define como un vector aleatorio H_i para los siguientes casos:

Batería de capacidad infinita de almacenamiento

$$(E_{max} = \infty): H_i = H_{i-1} - X_i^{2+} E_i \quad (3)$$

Batería de capacidad finita de almacenamiento

$$(E_{max} = cte): H_i = mín(H_{i-1} - X_i^2 + E_i, E_{max}) \quad (4)$$

Si no se considera batería entonces $H_i = 0$ y lo que existe es una restricción instantánea de amplitud tal que:

$$X_i^2 \leq E_i, \; i = 1,2, ..., n. \quad (5)$$

En los casos anteriores se evidencia que a pesar de ser E_i un proceso i.i.d, X_i^2 y H_i son vectores aleatorios altamente correlacionados en el tiempo. El gasto de energía en el uso del canal afecta la energía disponible en la batería, lo que condiciona a la energía que se puede gastar en el siguiente uso del canal para transmitir información.

Técnicas de optimización de energía orientadas a la transmisión

El desempeño de los sistemas de EH está determinado en gran medida por la eficiencia con que se utilice la energía recolectada. El término *eficiencia energética* en la transmisión implica que el nodo de comunicación pueda transmitir un mayor número de bits con la misma energía recolectada.

Este concepto se puede entender mejor a través de la figura 4 donde se analiza la eficiencia energética alcanzada por dos curvas diferentes de consumo de energía en la transmisión de información. El análisis se realiza para un intervalo de duración T donde se recolecta una cantidad de energía E_0. Por una parte, la energía puede consumirse con una potencia de transmisión variable, como ilustra la curva $D(t)$representada analíticamente por $E0=P1*l1+P2(T-L1)$ y la cual puede representar cualquier curva arbitraria diferenciable. Mientras que también puede consumirse con una potencia constante mediante la curva $L(t)$ dada por $E_0 = P'T$. Las técnicas de optimización tienen por objetivo encontrar con cuál curva se alcanza mayor eficiencia energética, para lo cual se calcula el valor óptimo de la potencia instantánea de transmisión. Esto se conoce como políticas de asignación de potencia o por su término en inglés como *power allocation policies*.

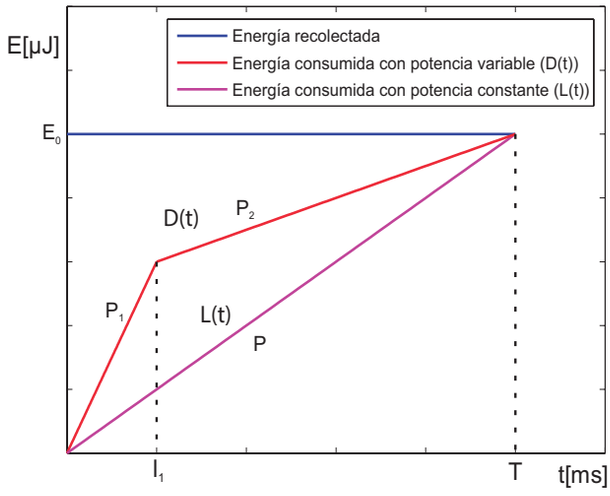

Figura 4. Curvas de consumo de energía en la transmisión de bits de información.

fono ISSN: 1813-5056, RNPS: 0514, Vol. 14, No. 2, julio-diciembre, 2018, pp. 23 - 34

Según (Zafer y Modiano, 2005) (Yang y Ulukus, 2010) transmitir a potencia y por tanto razón de bit constante, o sea mediante la curva ***L(t)***, garantiza la mayor eficiencia energética. La demostración se encuentra en (Urquiza Villalonga y Torres, 2017) y parte de la relación cóncava y monótona creciente entre ***P*** y ***R*** como se muestra en la ecuación de Shannon (1) asumiendo $C = R$.

Luego, la solución óptima es transmitir a potencia constante $P' = E_0 / T$, siendo E_0 la energía recolectada y T el tiempo que demora la transmisión. Sin embargo, si la energía se recolecta en diferentes instantes de tiempo y la transmisión se realiza según se recolecta la energía, entonces transmitir a potencia constante no siempre es posible, pues se puede violar la restricción de causalidad energética.

En la figura 5 se muestra la curva de consumo de energía con potencia de transmisión constante en un escenario con múltiples instantes de recolección. La energía recolectada se representa de forma acumulativa. Se puede notar que si se transmite a potencia constante, en el segundo intervalo de recolección la energía consumida es mayor que la energía recolectada hasta ese momento, lo cual no es posible. Por tanto, los algoritmos de asignación de potencia lo que buscan es planificar la transmisión de forma que la energía se consuma con la mayor eficiencia posible, pero garantizando que siempre se cumpla la restricción de causalidad energética.

En este escenario, en la literatura científica se estudian fundamentalmente dos tipos de problemas de optimización. El primero se conoce como: "Minimización del tiempo de transmisión completa", donde se analiza la manera óptima de transmitir una cierta cantidad de bits en el menor tiempo

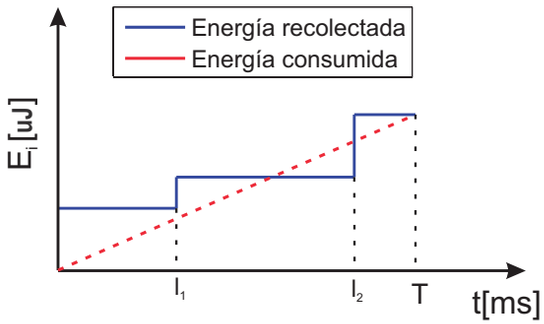

Figura 5. Consumo de energía en la transmisión de bits de información para múltiples intervalos de recolección de energía.

posible. El segundo problema se basa en maximizar la cantidad de bits a transmitir libre de errores en un tiempo límite T . En (Tutuncuoglu y Yener, 2012a) se demuestra que estos dos problemas conducen a la misma solución.

Según el conocimiento que se tenga a priori del proceso de recolección, el estado de la batería y el estado del canal, estos algoritmos se pueden clasificar en *offline* y *online*. Si se asume un conocimiento a priori del estado del canal (ganancia instantánea del canal) y del estado de la batería (cantidad de energía disponible en la batería) durante todo el tiempo de transmisión se dice que es un proceso *offline* y sirve para establecer los límites de desempeño del sistema. Mientras que si se considera un conocimiento causal, donde se conoce el estado del canal y de la batería en el instante actual y en los instantes anteriores pero no en el futuro, se dice que es un proceso *online*. Su solución se basa en establecer funciones de densidad de probabilidad que caractericen al proceso de recolección de energía.

Los algoritmos *offline* son útiles pues normalmente llegan a una solución óptima y establecen el límite de comparación de las soluciones subóptimas de los algoritmos *online* para analizar su desempeño. Estos últimos tienen un peso mucho más práctico en la caracterización de escenarios reales, pero presentan una complejidad mucho mayor, por lo que en este artículo solo se analizan los algoritmos *offline*.

Algoritmo de optimización *offline*

Los problemas de optimización son formulados a través de una función objetivo que necesita ser optimizada (maximizada o minimizada) considerando diferentes restricciones que limitan los posibles valores que puede tomar la variable de optimización. Los problemas que serán analizados forman parte de la familia de problemas de optimización convexos pues la función objetivo (asociada a la ecuación de Shannon (1)) y las restricciones son convexas (cóncavas), atendiendo que la convexidad (concavidad) incluye a la linealidad. La variable de optimización es la potencia de transmisión y las restricciones dependen del escenario que se analice, así como de las consideraciones que haga cada autor, aunque la restricción de causalidad energética siempre tiene que estar presente. Los principales escenarios que se

pueden analizar y que influyen en el valor práctico de cada solución están muy asociados a la capacidad de la batería y a los gastos energéticos que se consideren en la formulación del problema (Boyd y Vandenberghe, 2004).

Escenario con batería de capacidad infinita de almacenamiento de energía

En (Yang y Ulukus, 2012b) se estudia un método para minimizar el tiempo de transmisión completa en un escenario donde se considera que la batería tiene capacidad infinita de almacenamiento de energía. Además, se definen las principales características de la curva óptima de potencia de transmisión en relación con el vector de energía recolectada y por tanto sirve de base para futuros trabajos. Se asume que el transmisor tiene dos colas, una para almacenar energía y la otra para almacenar los datos, como se mostró en la figura 3. La cantidad de energía recolectada está dada por el vector E_i , cuyo valor se considera conocido así como las instancias de recolección s_i . Los vectores E_i y s_i toman valores reales positivos. Se supone que en el instante inicial t_0 se cuenta con una cantidad de energía almacenada E_0 y que la cantidad de bits a transmitir están disponibles en la cola del transmisor. Además, se asume que toda la energía consumida es únicamente para transmitir los datos. El problema se formula de la siguiente forma: dado una cantidad de bits E_0 y un vector de energía recolectada E_i el objetivo es lograr transmitir todos los datos en el menor tiempo posible. La principal restricción que complejiza la solución del problema es la causalidad energética dada por:

$$E(t) \leq \sum_{i\,:s_i<t} E_i \quad 0 < t < T \qquad (6)$$

donde $E(t)$ representa la energía consumida hasta el instante t y T es el tiempo que demora la transmisión. Esta restricción impone que la energía consumida hasta el instante t tiene que ser menor o igual al total de energía recolectada hasta un instante de recolección anterior. Esto implica un compromiso entre aumentar la potencia para transmitir más rápido atendiendo a la ecuación (1), pero teniendo en cuenta que las restricciones de causalidad energética se tienen que satisfacer. El principal objetivo es cambiar adaptativamente la razón de bit y la potencia de transmisión del sistema en dependencia de la energía disponible en la batería para minimizar el tiempo de transmisión T. Sean p_i y l_i los vectores potencia de transmisión y tiempo de transmisión respectivamente, entonces el problema de optimización queda planteado de la siguiente manera:

$$\min_{p,l} T$$

$$s.t\ E(t) \leq \sum_{i\,:s_i<t} E_i \quad 0 < t < T \qquad (7)$$

$$B(T) = B_0$$

donde $B(T)$ es la cantidad de bits transmitidos durante el intervalo de transmisión T. Dado este problema y basándose en la inecuación de Jensen (Boyd y Vandenberghe, 2004) para una función cóncava se definen tres lemas que describen la estructura del vector p_i óptimo:

- La potencia de transmisión aumenta monótonamente, es decir $p_1 \leq p_2 \leq \ldots \leq p_N$.
- La potencia de transmisión permanece constante entre los instantes en que se recolecta la energía, es decir la potencia de transmisión solo puede cambiar cuando lleguen nuevos paquetes de energía.
- Cada vez que la potencia de transmisión cambia, la energía consumida hasta ese instante tiene que ser igual a la energía recolectada hasta ese instante.

La estructura óptima del vector p_i según estos lemas se ilustra a través de la línea continua roja en la figura 6. Aquí se muestra cómo la pendiente de la curva de energía consumida, que representa la potencia de transmisión, solo puede variar en los instantes donde intercepta a la curva de energía recolectada. Si la pendiente varía, entonces solo puede ser para aumentar su valor. En la figura 6 además se muestra que es posible transmitir con una potencia mayor que p_1 hasta s_1 , pero esto implicaría que para satisfacer el segundo lema y las restricciones de causalidad energética, luego de este instante la pendiente tendría que disminuir violando el primer lema. Este comportamiento se representa con las líneas discontinuas. Se demuestra que es energéticamente más eficiente transmitir con una potencia menor pero que satisfaga todos los lemas antes impuestos.

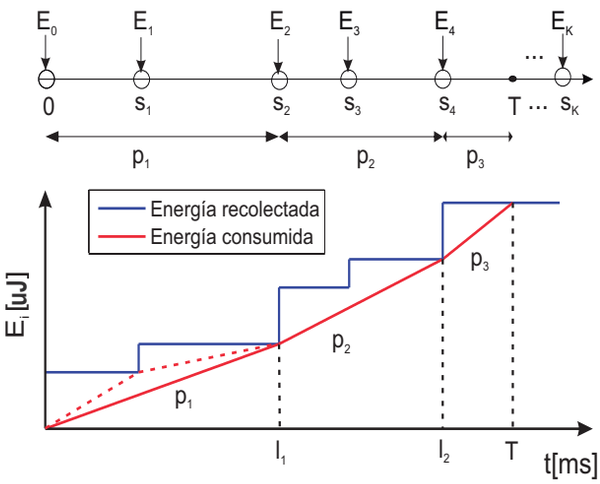

Figura 6. Curva de energía recolectada y consumida para una batería con capacidad infinita de almacenamiento de energía.

En un segundo momento en (Yang y Ulukus, 2012b) se asume que todos los bits no se encuentran disponibles en la cola del transmisor antes de que comience la transmisión. Se considera que en t_0 se encuentran disponibles una cantidad de bits B_0 y que en los instantes de tiempo dados por el vector t_i llegan una cantidad de bits B_i. Se asume que t_i y B_i se conocen de forma determinista. De esta manera el problema de optimización se define según la ecuación:

$$\min_{p,l} T$$

$$s.t\ E(t) \leq \sum_{i:s_i<t} E_i \quad 0 < t < T \qquad (8)$$

$$B(T) \leq \sum_{i:s_i<t} B_i$$

donde $B(T)$ representa los bits transmitidos hasta el instante t y Σ Bi son los bits que hay en el transmisor un instante anterior. En este caso la formulación del problema varía ligeramente respecto a (7) producto de esta nueva restricción conocida como causalidad de datos, o sea los bits de información no pueden transmitirse antes de haber llegado al transmisor. Además, el problema está sujeto a las mismas restricciones de causalidad energética discutidas en (6). La manera de resolver el problema es similar e impone unos lemas para la construcción de la curva de energía consumida muy parecidas a las mencionadas previamente.

La principal limitante de (Yang y Ulukus, 2012b) es que realiza el estudio únicamente desde el punto de vista del transmisor y se asumen condiciones bastante ideales como batería con capacidad infinita de almacenamiento de energía. Además, solo se considera como gasto energético el costo de transmitir la información sin tener en cuenta el costo de procesamiento. A pesar de las limitantes, el método propuesto en (Yang y Ulukus, 2012b) tiene gran relevancia, pues encuentra las características de la curva de potencia óptima y brinda un algoritmo con la vía de solución para alcanzarla, por lo que sirve de cimiento para el desarrollo del tema. Los trabajos posteriores estudian diferentes escenarios de comunicación basados en los principios demostrados en este artículo. Cada escenario estudiado posteriormente requiere que se incorporen nuevas restricciones a la política de transmisión óptima. Esto se puede interpretar como una reducción en el dominio de la variable de optimización p, lo cual implica que la solución sea cada vez más compleja. Entre los escenarios más estudiados destacan aquellos que consideran: batería con capacidad finita de almacenamiento de energía (Tutuncuoglu y Yener, 2012a), canal de comunicaciones con desvanecimiento (Ozel, Tutuncuoglu, et al., 2011), costo energético de otros componentes del circuito del transmisor (Orhan et al., 2012), capacidad del transmisor y receptor para recolectar energía (Arafa y Ulukus, 2015), canal de comunicaciones de múltiple acceso (Yang y Ulukus, 2012a), canal dúplex (Arafa et al., 2016), canal broadcast (Ozel, Yang, et al., 2011), canal con interferencia (Tutuncuoglu y Yener, 2012b), imperfecciones en la batería (Devillers y Gündüz, 2012), operación de sensores con restricciones de temperatura (Ozel et al., 2016), entre otros.

Escenario con batería de capacidad finita de almacenamiento de energía

Uno de los escenarios más discutidos en la literatura científica es aquel que estudia la recolección de energía considerando que la batería tiene una capacidad finita para almacenar energía (Tutuncuoglu y

Yener, 2012a). Esto le confiere al problema de optimización un carácter más práctico que lo analizado en (Yang y Ulukus, 2012b). En este caso la mayor cantidad de energía que se puede almacenar es E_{max}. Si ΣE_i es la energía recolectada acumulativa y $E(t)$ es la energía consumida hasta el instante t, entonces se tiene que cumplir:

$$\sum_i E_i - E(t) \leq E_{max} \qquad (9)$$

Si no se cumple la relación que plantea la ecuación (9) implica que una parte de la energía disponible se desperdicia, lo cual se conoce como desbordamiento de energía. Por tanto, la expresión (9) impone una nueva restricción conocida como restricción de *no desbordamiento*.

En la figura 7 la función escalón superior muestra la energía recolectada de forma acumulativa, la cual se asocia a la restricción de causalidad energética, mientras que la función escalón inferior construida según la ecuación (9) se relaciona con la restricción de *no desbordamiento*. La curva de energía consumida tiene que caer en el medio de estas dos funciones y es lo que se conoce como túnel permisible de energía. De lo contrario, si la curva de energía consumida se encuentra por debajo de la función escalón inferior implicaría que la energía se consume a una razón mucho menor de lo que se recolecta y algunos paquetes de energía no se podrán almacenar en la batería. Por otra parte, si la curva de energía consumida se encuentra por encima de la función escalón superior significa que el dispositivo se quedó sin energía. Por tanto, el objetivo de estos diseños es maximizar el número de bits transmitidos libre de errores durante el intervalo $[0,T]$, pero garantizando que la energía consumida esté dentro del túnel descrito y la energía en la batería se mantenga en el intervalo $[0,E_{max}]$.

El problema de optimización, al igual que en el caso anterior tiene solo una solución óptima, la cual se describe en la figura 7 y se caracteriza por:

- El valor de la potencia de transmisión tiene que permanecer constante entre los intervalos de recolección.
- En el instante donde la batería está completamente cargada (la curva de energía consumida intercepta la función escalón inferior), el valor de la potencia tiene que disminuir. Así como cuando la batería está completamente descargada (la curva de energía consumida intercepta la función escalón superior), la potencia tiene que aumentar.
- La solución óptima tiene que garantizar que en el instante T toda la energía recolectada se haya consumido.

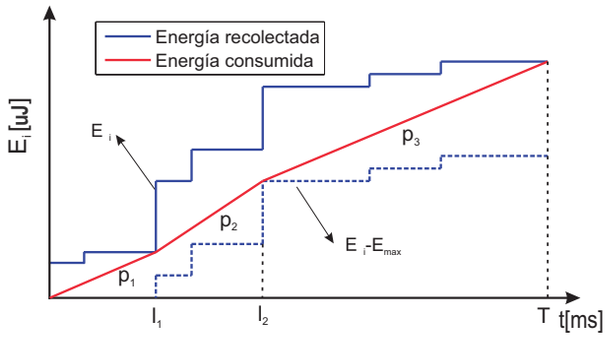

Figura 7. Curva de energía recolectada y consumida para una batería con capacidad finita de almacenamiento de energía.

En los escenarios analizados anteriormente se estudia cómo optimizar el consumo energético en la transmisión. La limitante radica en que no analizan el costo de procesamiento del sistema cuando se realizan diferentes operaciones de cómputo. Este costo solo se tiene en cuenta en (Orhan et al., 2012) como la energía consumida por el circuito del transmisor (conversor A/D, mezcladores, procesador y otros componentes) y se modela como un gasto constante por unidad tiempo siempre que se esté transmitiendo.

Conclusiones

Los sistemas recolectores de energía se consideran como un componente clave para el desarrollo de las Comunicaciones Verdes. Se implementan con el objetivo de recolectar la energía disponible en el ambiente y utilizarla para alimentar a los dispositivos electrónicos. Son una solución prometedora al lento crecimiento de la densidad de las baterías que afectan a los equipos móviles actuales. De las diferentes fuentes existentes, la recolección de energía de RF ha sido la menos explotada, aunque ha comenzado a ganar bastante atención en los últimos años por las ventajas que brinda. Las señales de RF son utilizadas por diferentes servicios lo que garantiza alta disponibilidad y fácil recolección. Otra ventaja de utilizar la energía proveniente de las bandas de RF es que permite realizar cooperaciones energéticas entre

varios nodos de una red. Las principales aplicaciones se reportan en el campo de las comunicaciones inalámbricas, fundamentalmente en dispositivos de bajo consumo como redes de sensores inalámbricos. Por tanto, los sistemas recolectores de energía tienen gran impacto en el desarrollo de aplicaciones emergentes como Internet de las Cosas y el Radio Cognitivo. Sin embargo, presenta algunos desafíos, pues la cantidad de energía que se puede recolectar es muy escasa, del orden de los micro Joule y además tiene un comportamiento aleatorio. Por tanto, no aporta un flujo constante como es usual en las redes eléctricas convencionales. Esto implica que el dispositivo puede detener su funcionamiento por falta de energía si el sistema no está bien diseñado.

Para resolver estas problemáticas en la literatura científica se destaca como una línea de investigación de elevada importancia el desarrollo de algoritmos de planificación que regulan el comportamiento de un nodo de comunicación para hacer más eficiente su consumo energético. Diferentes artículos estudian técnicas de optimización de energía orientadas a la transmisión de datos. Se basan en variar adaptativamente la potencia instantánea de transmisión en función de la energía recolectada para transmitir largas secuencias de bits libre de errores. Se demuestra que entre la potencia de transmisión y la razón de bit existe una relación cóncava y monótona creciente. Por tanto, se comprueba que si se utiliza una potencia de transmisión constante, se logra transmitir la mayor cantidad de bits libre de errores con la misma energía recolectada. Sin embargo, producto de la restricción de causalidad energética esto no siempre es posible. Las políticas de asignación de potencia planifican la transmisión de forma que la energía se consuma con la mayor eficiencia posible, pero garantizando que siempre se cumpla la restricción de causalidad energética. La estrategia de transmisión óptima sugiere variar la potencia de transmisión siempre en forma monótona creciente. La limitante de estos estudios radica en que no analizan el costo de procesamiento del sistema cuando se realizan diferentes operaciones de cómputo.

Referencias

Arafa, A., Baknina, A., y Ulukus, S. (2016). Energy Harvesting Two-Way Channels with Decoding and Processing Costs. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, *PP*(99), 1-1. https://doi.org/10.1109/TGCN.2016.2603588

Arafa, A., y Ulukus, S. (2015). Optimal Policies for Wireless Networks with Energy Harvesting Transmitters and Receivers: Effects of Decoding Costs. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, *33*(12), 2611-2625. https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2481200

Arms, S. W., Townsend, C. P., Churchill, J. H., Galbreath, y Mundell, S. W. (2005). Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensors. En *Proceedings SPIE Int'l Symposium on Smart Structures and Smart Materials,* San Diego, CA.

Boyd, y Vandenberghe. (2004). *Convex Optimization Hardback*. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press.

Devillers, B., y Gündüz, D. (2012). A general framework for the optimization of energy harvesting communication systems with battery imperfections. *Journal of Communications and Networks*, *14*(2), 130-139. https://doi.org/10.1109/JCN.2012.6253061

Farray Rodríguez, J. E., y Campoamor Soto, R. (2015). *Diseño de un sistema recolector de energía de RF para alimentar dispositivos móviles.* (Trabajo de diploma). Cujae, La Habana, Cuba.

Fernández, J. V., y Piedrafita, Ó. C. (2006). *Estudio de un sistema de transmisión de energía per RF*.

Fernández, S. (2014). *Diseño de circuito rectificador para rectenas en aplicaciones de recolección de energía de RF* (Trabajo de diploma). Cujae, La Habana, Cuba.

González Chuy, D., y Santana Gil, S. A. (2016). *Diseño de un sistema de recolección de energía de radiofrecuencia* (Trabajo de diploma). Cujae, La Habana, Cuba.

Ku, M. L., Li, W., Chen, Y., y Liu, K. J. R. (2016). Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, *18*(2), 1384-1412. https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2497324

Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D. I., y Han, Z. (2015). Wireless Networks y RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, *17*(2), 757-789. https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2368999

Masotti, D., Costanzo, A., Del Prete, M., y Rizzoli, V. (2013). Genetic-based design of a tetra-band high-efficiency radio-frequency energy harvesting system. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, *7*(15), 1254-1263. https://doi.org/10.1049/iet-map.2013.0056

Mikeka, C., Arai, H., Georgiadis, A., y Collado, A. (2011). DTV band micropower RF energy-harvesting circuit architecture and performance analysis. En *2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)* (pp. 561-567). https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2011.6068601

Orhan, O., Gündüz, D., y Erkip, E. (2012). Throughput maximization for an energy harvesting communication system with processing cost. En *2012 IEEE Information Theory Workshop (ITW)* (pp. 84-88). https://doi.org/10.1109/ITW.2012.6404770

Ozel, O., Tutuncuoglu, K., Yang, J., Ulukus, S., y Yener, A. (2011). Transmission with Energy Harvesting Nodes in Fading Wireless Channels: Optimal Policies. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, *29*(8), 1732-1743. https://doi.org/10.1109/JSAC.2011.110921

Ozel, O., Ulukus, S., y Grover, P. (2016). Energy Harvesting Transmitters That Heat Up: Throughput Maximization Under Temperature Constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, *15*(8), 5440-5452. https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2558509

Ozel, O., Yang, J., y Ulukus, S. (2011). Broadcasting with a battery limited energy harvesting rechargeable transmitter. En *2011 International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)* (pp. 205-212). https://doi.org/10.1109/WIOPT.2011.5930017

Pérez-Corona Madruga, C. de la C. (2016). *Diseño e implementación de una rectena utilizada en aplicaciones de recolección de energía de RF.* (Trabajo de diploma). Cujae, La Habana, Cuba.

Product Overview – Energous. (s. f.). Recuperado 16 de enero de 2017, a partir de http://energous.com/technology/product-overview/

Solutions. (s. f.). Recuperado 16 de enero de 2017, a partir de http://www.nikola.tech/solutions/

Tutuncuoglu, K., y Yener, A. (2012a). Optimum Transmission Policies for Battery Limited Energy Harvesting Nodes. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, *11*(3), 1180-1189. https://doi.org/10.1109/TWC.2012.012412.110805

Tutuncuoglu, K., y Yener, A. (2012b). Sum-rate optimal power policies for energy harvesting transmitters in an interference channel. *Journal of Communications and Networks*, *14*(2), 151-161. https://doi.org/10.1109/JCN.2012.6253063

Ulukus, S., Yener, A., Erkip, E., Simeone, O., Zorzi, M., Grover, P., y Huang, K. (2015). Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, *33*(3), 360-381. https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2391531

Urquiza Villalonga, D. A., y Torres, J. (2017). *Diseño de la política óptima de sensado de espectro para sistemas de radio cognitivo con restricciones energéticas* (Trabajo de diploma). Cujae, La Habana, Cuba.

Varshney, L. R. (2008). Transporting information and energy simultaneously. En *IEEE International Symposium on Information Theory, 2008. ISIT 2008* (pp. 1612-1616). https://doi.org/10.1109/ISIT.2008.4595260

Wireless Technology Services. (s. f.). Recuperado 16 de enero de 2017, a partir de http://www.powercastco.com/