

# Estudio y desarrollo de un sistema de captación de energía RF en redes WSN

David Calvo Zavala

Estudiante de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

## Resumen

El proyecto consiste en el estudio y desarrollo de un sistema de recolección de energía de radiofrecuencia de la banda de los 868MHz, siendo capaz de rectificar esta energía eléctrica a corriente continua para poderla almacenar o utilizarla para alimentar un dispositivo en concreto. El sistema está pensado para energizar dispositivos de muy bajo consumo como las redes de sensores inalámbricos (WSN). Una problemática de esta red es su autosostenibilidad debido a la vida limitada de la batería. La estructura del sistema de captación de radiofrecuencia está formada por la antena, el circuito de acoplamiento o adaptación de impedancias, el circuito multiplicador-rectificador y por último el circuito filtrador. En el proyecto, se explican los diferentes tipos o variaciones de los circuitos nombrados.

## 1. Introducción

En los últimos años, dado los avances en las tecnologías modernas, ha aumentado la demanda del uso de dispositivos de aplicaciones inalámbricas. Uno de estos, conocidos como redes de sensores inalámbricos (WSN), es una red distribuida donde una gran cantidad de componentes computacionales, también conocidos como nodos de sensores o simplemente nodos, se implementan en un entorno físico. Cada componente recopila datos y ofrece servicios a su entorno para dar a conocer información, como atención médica, monitoreo de procesos industriales, monitoreo ambiental y monitoreo de salud estructural, a tiempo real y de forma inmediata desde lugares aislados.

Por lo general, se requiere que los WSN funcionen desatendidos durante períodos de tiempo muy largos, a menudo varios años. Por esta razón, estos dispositivos tienen una principal problemática en su alimentación: las baterías.

El uso de las baterías, que normalmente es idóneo para alimentar dispositivos electrónicos pequeños o en la aplicación donde no es necesario la utilización de ellas continuamente como el monitoreo ambiental, se han reconocido como un factor limitante para amplio despliegue de redes de sensores inalámbricos (WSN), especialmente en la visión de habilitar el Internet de las cosas (IoT) por su limitada capacidad de almacenamiento de energía y ciclos de carga. El reemplazo regular de baterías en el aumento del número de dispositivos es una tarea costosa y que requiere mucho tiempo. Además, el trabajo de recambio de la batería es aún más dificultoso si los dispositivos están

integrados en áreas de difícil acceso, como túneles subterráneos de carreteras y edificios.

El concepto de recolección de energía, conocida en inglés como “energy-harvesting”, se caracteriza por estar relacionada con el uso, almacenamiento y gestión de la energía del ambiente que se convierte, principalmente, en energía eléctrica para alimentar dispositivos electrónicos pequeños y autónomos.

Por lo tanto, la capacidad de obtener energía renovable del medio ambiente como la solar, el calor, la radiofrecuencia (RF) y la vibración de los entornos ambientales hacia la energía eléctrica, se ha identificado como una de las soluciones para el funcionamiento a largo plazo de los dispositivos sin las limitaciones de baterías mencionadas anteriormente.

Aunque los avances en este tipo de tecnología, “energy-harvesting”, hacen pensar que es una solución perfecta para estos tipos de dispositivos, hay que destacar las densidades de potencia que se consiguen de los recolectores de energía, incluidas las antenas rectificadoras de RF, los generadores electromagnéticos, los generadores termoeléctricos, los recolectores de energía piezoeléctrica, y las células fotovoltaicas, que generalmente tienen una clasificación baja o menor en sus entornos operativos típicos. Esto, principalmente, se produce porque la potencia de salida del recolector de energía puede ser variable tanto en cantidad como a su vez irregular, dependiendo de las condiciones ambientales del entorno. [1]

Este proyecto se centra en el estudio de la captación de RF, para comprender y poder diseñar el sistema se sigue una estructura. Primero, se buscan las diferentes partes que conforman el sistema y se realiza una comparación de los diversos tipos de cada una de las partes para poder seleccionar el modelo más adecuado para el diseño. Segundo, se investiga diferentes conceptos teóricos que tiene efecto sobre el sistema de cosecha RF. Finalmente, se realizan simulaciones y un análisis experimental del circuito impreso (PCB) diseñado, donde se conectan los diferentes circuitos seleccionados, el cual está pensado para la cosecha de radiofrecuencia de la banda de los 868MHz. Mediante estos procesos, se consigue demostrar el funcionamiento del sistema además de sus ventajas y limitaciones.

## 2. Arquitectura general: Cosecha RF

El sistema de Harvesting RF se define como el proceso de capturar y convertir la energía electromagnética de una fuente externa, en voltaje de corriente continua (CC) utilizable nuevamente.

Normalmente, el sistema de cosecha de energía RF está constituido por cuatro etapas:

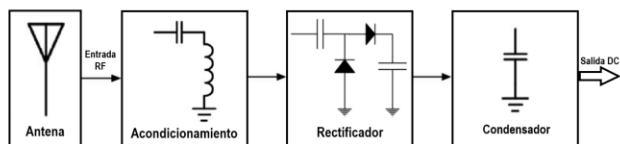


Fig. 1. Estructura: Cosecha de Radiofrecuencia

- **Antena**

El IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) define una antena como aquella parte de un sistema receptor o transmisor construida específicamente para recibir o emitir ondas electromagnéticas.

La antena en el ámbito de recolección de energía de radiofrecuencia, es la estructura encargada de recolectar la radiofrecuencia y de transmitirla al circuito encargado de rectificarla. Hay diferentes tipos de antenas, mayoritariamente diferenciadas por su banda de frecuencia.

- **Circuito de acoplamiento**

El circuito de acoplamiento de impedancias, también conocido en inglés como matching network, es un circuito resonante que opera en la frecuencia diseñada para maximizar la transferencia de potencia entre la antena y el circuito rectificador.

En los circuitos electrónicos de alta frecuencia es muy importante que las pérdidas de transferencia de energía sean muy bajas. Dicho de otro modo, que la energía de radiofrecuencia captada se transmita la máxima posible en cada una de las etapas del sistema hasta la unidad de almacenamiento.

Por esta razón, una de las tareas más importantes del circuito de acoplamiento es reducir la pérdida de transición de la antena al circuito rectificador. Para este fin, el circuito de acoplamiento generalmente se hace con componentes reactivos como bobinas y condensadores, es decir, componentes que almacenan energía en lugar de disiparla. El procedimiento conocido como adaptación de impedancias, es la transferencia máxima de potencia que se realiza cuando la impedancia en la salida de la antena y la impedancia de entrada de la carga son idénticas. [2]

Actualmente hay numerosos tipos de circuitos de acoplamiento, este proyecto se centra en la red LC y circuito  $\pi$ .

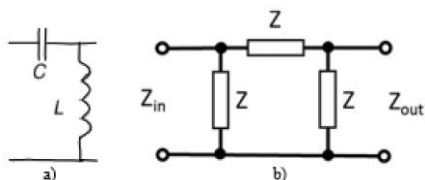


Fig. 2. a) Red LC, b) circuito  $\pi$

- **Circuito multiplicador-rectificador**

El circuito multiplicador-rectificador es la estructura siguiente del circuito de acoplamiento. Este circuito se encarga de rectificar y aumentar el voltaje, siendo estas sus funciones principales. La eficiencia de la conversión de potencia de este circuito puede ser conocida mediante la

relación entre la potencia suministrada a la carga y la potencia de entrada.

La función de un rectificador es convertir las señales de entrada de radiofrecuencia, corriente alterna, captadas por una antena en corriente continua, CC. En el momento de diseñar un rectificador, hay que tener en cuenta que se ha de generar un voltaje similar a una batería mediante una potencia de RF de entrada muy baja. El circuito multiplicador-rectificador más utilizado en este tipo de proyectos es el duplicador de voltaje, también existe la combinación de diodo y antena (rectenna) y el punto de diodos.

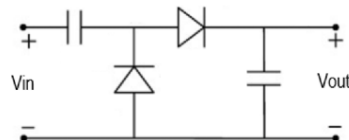


Fig. 3. Duplicador de voltaje

La ventaja del rectificador doblador de voltaje es que se puede incluir más etapas para obtener una tensión de salida más elevada. Existen tres tipos de multiplicador de voltaje: Villard, Dickson y Greinacher.

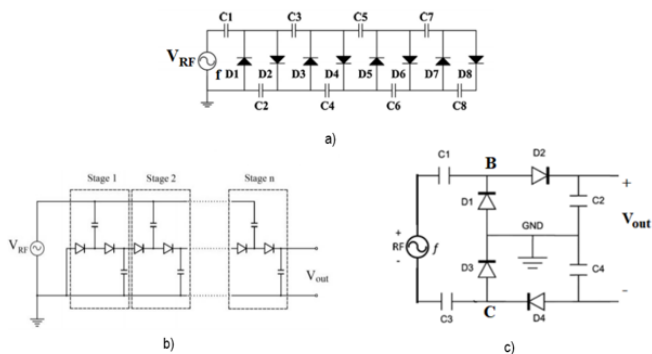


Fig. 4. a) Villard, b) Dickson, c) Greinacher. [3]

En [3] realiza un estudio comparativo de los tres multiplicadores de voltajes. Utiliza diodos Schottky HSMS-2852, condensadores de 90pF y el programa ADS para realizar las simulaciones. Mediante estas simulaciones concluye que el circuito Villard es el más perjudicado en frecuencias bajas, pero a partir de los 500MHz los tres circuitos tiene valores similares. Por esta razón, debido a que la frecuencia con la que se trabaja es de 868MHz, en el diseño de este proyecto se ha decidido utilizar el circuito Villard o también denominado Cockcroft-Walton.

- **Circuito filtrador**

Está compuesto de un condensador  $C_L$  una resistencia  $R_L$  a la salida del circuito multiplicador. Principalmente, el valor del condensador solo afecta a la respuesta del transitorio, es decir, cuanto mayor es el valor del condensador de salida, más lento será el tiempo de aumento de voltaje. Sin un condensador, la salida no es una buena señal estable, sino más bien una señal de CA compensada.

### 3. Conceptos teóricos

- **Diodo Schottky**

En el circuito de un rectificador, especialmente el diodo determina la eficiencia de conversión de RF a CC. Generalmente un diodo con un voltaje incorporado más

bajo puede lograr una mayor eficiencia de rectificación debido a que un voltaje mayor conlleva a señales significativamente más armónicas por las características no lineales del diodo, produciendo una disminución de la eficiencia de rectificación [2]. El diodo idóneo es el Schottky, un diodo semiconductor con bajas tensiones de umbral y con conmutaciones muy rápidas entre los estados de polarización directa e inversa, con lo que se consigue trabajar a frecuencias más elevadas. En particular, se utiliza el diodo HSMS-2850, fabricante Agilent (Hewlett-Packard), con tensión de activación de 250mV a 1mA.

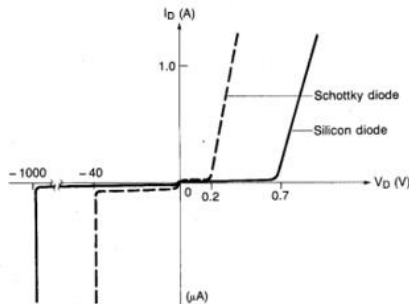


Fig. 5. Curva característica diodo Schottky

- **Pérdidas del circuito de cosecha RF**

Se remarcan las pérdidas que afectan en la eficiencia del circuito de captación de energía RF. [4]

**Tensión de umbral:** La tensión de activación es una característica que afecta a la eficiencia del circuito, sobretodo en potencia baja. Si la tensión que entra por el diodo no es mayor a la tensión de umbral, el diodo no conducirá, lo que conlleva a que el circuito rectificador no funcionará.

**Adaptación de impedancias:** si el circuito de recolección de energía no está correctamente adaptado con la antena, parte de la energía incidente en la antena se reflejará de nuevo al medio ambiente y no será posible su captación. Al no captar dicha potencia, la potencia disponible para el circuito rectificador disminuye.

**Componentes parásitos:** estos tipos de elementos también pueden causar una disminución de la eficiencia como la resistencia interna del diodo, ya que cuando la corriente pase a través de ella provocará la disipación de potencia. También la inductancia del diodo debe ser mínima para evitar pérdidas.

**Armónicos:** al trabajar con diodos, elementos no lineales, se producen frecuencias armónicas de la potencia incidente que reduce la cantidad de energía que se convierte en CC.

- **Modelos de propagación de energía RF**

En la recolección de energía de RF, la cantidad de energía que se puede recolectar depende de la potencia de transmisión, la longitud de onda de las señales de RF y la distancia entre la fuente de energía de RF y el nodo de recolección. La potencia de RF obtenida de un transmisor en el espacio libre se puede calcular basándose en la ecuación de Friis. [2]

$$P_R = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4 \pi d)^2 L}$$

Donde  $P_r$  es la potencia recibida,  $P_t$  es la potencia de transmisión,  $L$  es el factor de pérdida de trayectoria,  $G_t$  es la ganancia de la antena de transmisión,  $G_r$  es la ganancia de la antena de recepción,  $\lambda$  es la longitud de onda emitida y  $d$  es la distancia entre la antena de transmisión y la antena del receptor.

#### 4. Diseño sistema de captación de energía RF

A continuación, se realiza la elección y diseño de los circuitos que constituyen el sistema de captación RF que se implementará para la parte experimental. Además, se realizan simulaciones para demostrar el funcionamiento de los circuitos y adquirir valores necesarios para el diseño. Para las simulaciones de este proyecto se utiliza el programa ADS (Advanced Design System). [5]

- **Transmisor**

Se ha seleccionado un emisor para tener la señal de la frecuencia deseada y así poder realizar las diferentes mediciones experimentales lo más real posible centrándose en las redes de sensores. Es decir, la función del emisor es únicamente emitir radiofrecuencia a 868MHz.

En concreto se selecciona el módulo RF DIGI XBee 868LP [6], normalmente implementado para redes de sensores. Con potencia de transmisión de 14dBm (25mW).

- **Antena**

El mismo tipo de antena es utilizada tanto para emitir RF con el emisor como para recibirla en el sistema de captación. En concreto se utiliza la Eightwood EWAN513GE 868MHz omnidireccional, con impedancia de 50Ω y una ganancia de 2dBi.

- **Diseño del circuito multiplicador-rectificador**

En este proyecto se utiliza el duplicador de voltaje de media onda, el método de rectificación común en la recolección de energía RF. Este circuito no solo rectifica, sino que también el voltaje de salida es aproximadamente el doble que el voltaje aplicado a su entrada. La topología básica del circuito duplicador de voltaje se muestra en la fig.3, compuesta por dos condensadores y dos diodos

Esta configuración de rectificador tiene una característica interesante, la cual permite conectar varias etapas adicionales en serie para producir un voltaje de salida mayor. Este método se comporta de manera similar al principio de baterías en serie para obtener más voltaje en la salida. La salida de la primera etapa no es exactamente voltaje de CC, sino una señal de CA con un voltaje de offset de CC. Esto es equivalente a decir que la señal CC contiene ruido. Debido a esta característica, las etapas posteriores del circuito pueden recibir más voltaje que las etapas anteriores. Si se agrega una segunda etapa sobre el primer circuito multiplicador, la forma de onda que recibe esta nueva etapa, es el ruido de la primera etapa. Este ruido se duplica y se suma a la tensión CC de la primera etapa. Por lo tanto, cuantas más etapas se agreguen, en teoría, más voltaje se obtiene. [7]

El voltaje de salida  $V_{out}$  viene dado por:

$$V_{out} = \frac{nV_0}{nR_0 + R_L} R_L = V_0 \frac{1}{\frac{R_0}{R_L} + \frac{1}{n}}$$

Donde  $V_0$  es voltaje de salida de circuito abierto de una sola etapa, resistencia interna  $R_0$ , con resistencia de carga  $R_L$  y  $n$  número de circuitos o etapas que se sitúan en serie y se conectan a la carga  $R_L$ .

**Estructura del multiplicador-rectificador:**

- Diodo: se utiliza el diodo HSMS-2850.
- Condensadores: Por lo que corresponde al valor de los condensadores, en este tipo de sistemas de rectificación, se acostumbra a utilizar condensadores de un valor bajo. Todos los condensadores de las diferentes etapas tienen un valor de 30 pF. Mediante las simulaciones del siguiente apartado y las diferentes consultas realizadas, se considera que el valor de 30pF es el más óptimo.
- Número de etapas: el multiplicador – rectificador está compuesto por cinco etapas.

• **Diseño del circuito de acoplamiento**

Para poder diseñar el circuito de acoplamiento se necesita igualar el valor de impedancia de salida de la antena, en este caso  $50\Omega$ , con la impedancia de entrada del circuito multiplicador que se obtendrá mediante el programa de simulación ADS, siguiendo un procedimiento similar al utilizado en [3], [8] y [9]. Mencionar que la impedancia del circuito multiplicador varía dependiendo del número de etapas y de la frecuencia.

Se utiliza el circuito equivalente del diodo HSMS 2850 para conocer la impedancia del circuito multiplicador. Al trabajar con diodos, componentes electrónicos no lineales y con elementos parásitos, el fabricante Agilent (Hewlett-Packard) proporciona el circuito equivalente en el datasheet de su diodo Schottky, figura 32. Los parámetros que contiene el circuito son, ( $C_j$ ) capacidad de unión, ( $R_v$ ) resistencia de video, ( $R_s$ ) resistencia en serie y los elementos parásitos inductancia ( $L_p$ ) y capacidad ( $C_p$ ).

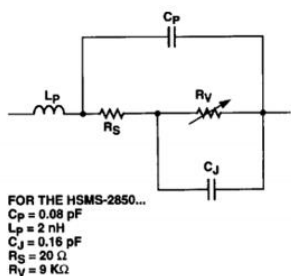


Fig. 6. Circuito equivalente diodo HSMS 2850, HP

Mediante el programa ADS se calcula el valor de impedancia del circuito y con el simulador de la carta Smith se obtiene los valores de la red LC para el circuito de 5 etapas, con condensadores de 30pF y  $C_L$  de 100pF y una resistencia  $R_L$  de 220k Ohm. Resultado: El valor de impedancia, ( $Z_{in} = 7,35 - j90,85$ )  $\Omega$  y los valores de L (19.8 nH) y C (8.8 pF).

• **Simulación ADS sistema de captación RF**

**Características:**

- Para simular la recepción de la antena se utiliza la fuente P\_1Tone, con  $Z=50 \Omega$  y configurada a 868MHz.

- Circuito multiplicador-rectificador Villard de cinco etapas, constituido por el diodo HSMS 2850 y con condensadores 30 pF.
- Salida  $C_L$  de 100pF y una resistencia  $R_L$  de 220k Ohm.
- Circuito de acoplamiento LC: L (19.8 nH) y C (8.8 pF).

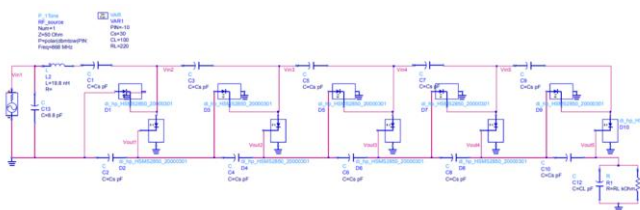


Fig. 7. Circuito de captación de energía RF, cinco etapas.

En la siguiente figura, se muestra las gráficas de  $V_{out}$  obtenidas para un rango de potencia de entrada (PIN) de -30 a 25 dBm. El circuito de acoplamiento es importante para conseguir un valor de tensión de salida mayor a potencias inferiores. Por el contrario, cuando la potencia de entrada es superior a 15 dBm se alcanza el valor máximo de  $V_{out}$  para el circuito multiplicador de cinco etapas, sin y con el circuito de adaptación de impedancias.

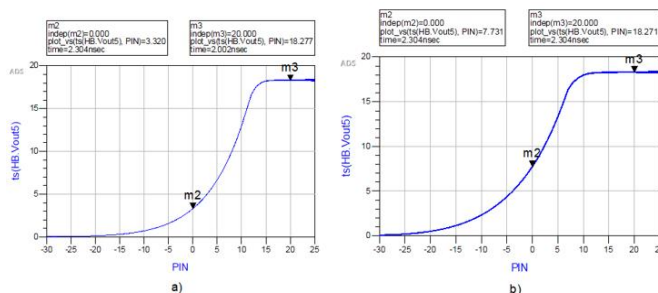


Fig. 8. Gráfica  $V_{out}$  (V) vs  $P_{in}$  (dBm). a) Sin circuito de acoplamiento, b) con circuito de acoplamiento.

A continuación, se observa el valor de voltaje de salida ( $V_{out}$ ) de cada una de las etapas del sistema respecto el valor de PIN (-30 a 25 dBm). Mediante esta simulación se demuestra el efecto multiplicador del sistema.

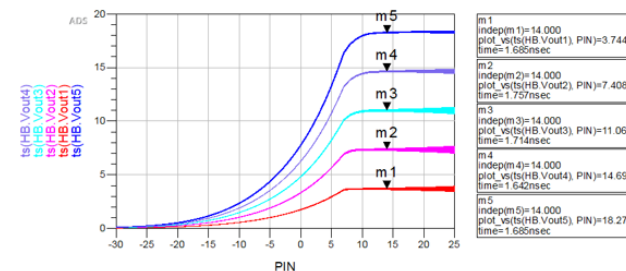


Fig. 9. Efecto multiplicador del sistema,  $V_{out}$  (V) vs  $P_{in}$  (dBm). Con circuito de acoplamiento

• **Diseño de la PCB**

Mediante el programa Autodesk Eagle [10], se realiza el esquema eléctrico y el diseño de la PCB. Finalmente, se envía a fabricar a NextPCB. [11]

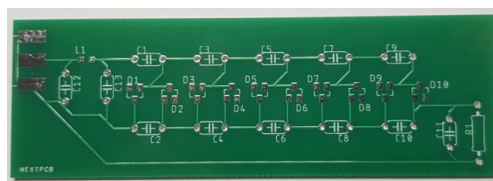


Fig. 10. PCB, fabricación por NextPCB

## 5. Resultados experimentales

### • Analizador de red vectorial

Mediante un analizador vectorial se comprueba el valor de impedancia de la PCB, se desconecta el circuito de acoplamiento LC y se conecta directamente el conector SMA al circuito rectificador. La impedancia que se obtiene con el analizador es de  $(10,50 - j80,3) \Omega$  la cual varía respecto al valor de impedancia de la simulación o teórico  $(7,35 - j90,85) \Omega$ . Principalmente esta variación de impedancia se debe a las líneas de conexiones de la PCB las cuales no se tiene en cuenta en la simulación y provocan un cambio en el valor de impedancia. Además, también existen otros elementos que afectan, como el conector SMA de la antena y el estaño de la soldadura.

Mediante el simulador de la carta Smith, se obtiene los valores del circuito de acoplamiento LC y además dos de las posibilidades del circuito  $\pi$ . Se conectan los circuitos de acoplamiento a la PCB y mediante el analizador vectorial se comprueba que la adaptación sea correcta. Para comprobar que sea correcta a la frecuencia de 868 MHz, las pérdidas de retorno S11 tienen que ser bajas y además en el gráfico Smith la impedancia tiene que ser lo más próxima a los  $(50 + j0) \Omega$  de la impedancia de la antena.

Los circuitos de acoplamiento no adaptan a la precisión y esto se debe a diferentes razones. Primero, los valores de los componentes no son exactos ya que se han utilizado los valores más próximos disponibles para implementar los circuitos, además, la soldadura del estaño también provoca variación en la adaptación y segundo, la longitud de las patas de los condensadores cerámicos también provoca variación. Por estas razones, partiendo de los valores del circuito de acoplamiento  $\pi$  (2) C (18,07 pF), L (8,2 nH) y C (2,98 pF), se ha ido variando los valores de los componentes hasta encontrar una combinación que adapta el circuito. Valores empíricos circuito  $\pi$ : C (1 pF), L (8.2 nH) y C (1 pF).



Fig. 11. PCB con los valores empíricos del acoplamiento  $\pi$  conectada al analizador vectorial.

A la frecuencia 870 MHz, el circuito tiene una S11 de -21,765 dB y una impedancia de  $(46,4 - j7,03) \Omega$ . Con estos resultados se considera que el circuito completo está adaptado.

### • Prueba 1: Potencia Antena vs Distancia Emisor

Se realiza una prueba con el objetivo de conocer la potencia captada por la antena a cierta distancia del transmisor XBee emitiendo a máxima potencia. Para conocer el valor de la potencia se utiliza el analizador de espectro TTI PSA2702.

En la siguiente figura, se muestran los datos de potencia respecto la distancia al emisor en campo abierto, es decir, sin obstáculos. Se observa que, con el emisor emitiendo a máxima potencia (14 dBm), la potencia a 2 cm es de 3,4 dBm y se reduce rápidamente hasta los -15 dBm a los

30cm. A partir de esta distancia la potencia disminuye, pero lentamente y de manera estable. Hay que destacar que las pruebas se han realizado en un ambiente, laboratorio, donde hay elementos reflectores que consecuentemente reflejan las ondas emitidas por el emisor. Por este motivo, a distancias como 80 cm y 140 cm se aprecian picos en la potencia captada debido mayoritariamente a estos reflejos.

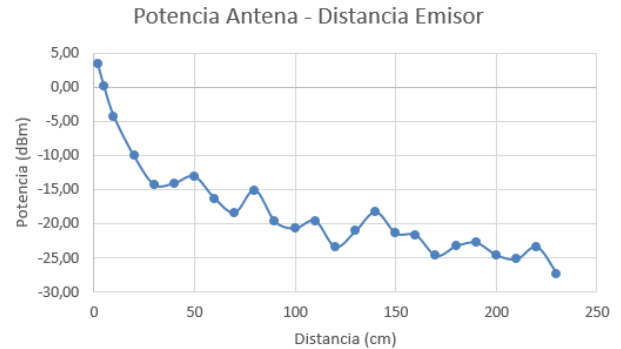


Fig. 12. Gráfico Potencia en la Antena vs Distancia al Emisor.

### • Prueba 2: Vout vs Distancia Emisor

Esta prueba tiene como finalidad obtener el valor de Vout (CC) del sistema de captación de radiofrecuencia según la distancia al emisor XBee. Para conseguir el valor de tensión se conecta el multímetro Keysight 34461A a la salida del sistema de cosecha. Características PCB:

- Antena Eightwood EWAN513GE.
- $\pi$ : C (1pF), L (8.2nH) y C (1pF).
- 5 etapas, diodos HSMS 2850 y C1-10 de 30pF.
- Salida:  $C_L$  (100pF) y  $R_L$  (220k  $\Omega$ ).

Se obtiene el Vout a las mismas distancias que la prueba de potencia captada en la antena. No se puede del todo relacionar el Vout con la potencia a la misma distancia por el efecto producido por los reflectores, por ejemplo, a las distancias de 40 y 50 cm con potencias de -14,10 y -13,10 dBm respectivamente, se obtiene una tensión de 0,53 V (40 cm) y una tensión de 0,91 V (50 cm). Igualmente, si se considera que el valor de potencia es aproximado a la Vout obtenida a la misma distancia, a 20 cm se obtiene una potencia de -10,1 dBm y una Vout de 1,58 V. En la simulación a -10 dBm se obtiene una Vout de 2,3 V, valor bastante aproximado al 1,58 V el cual es menor principalmente, a parte de la variación de la potencia, a las pérdidas que se producen en los componentes, líneas de la PCB, pérdidas en la antena, desadaptación, etc.

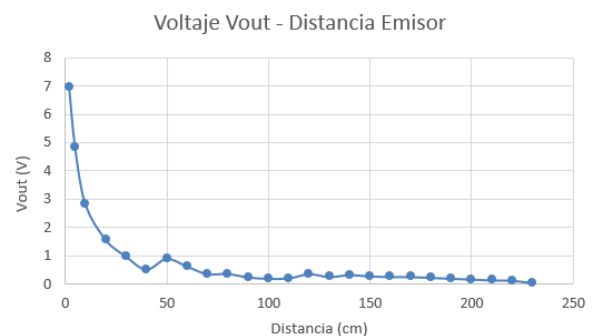


Fig. 13. Gráfico Vout vs Distancia al Emisor.

### • Prueba 3: Emisor XBee conectado a la PCB

En esta prueba se conecta el transmisor XBee directamente a la PCB mediante el conector U. FL – SMA para conseguir una potencia en la entrada más elevada y estable que las pruebas anteriores.

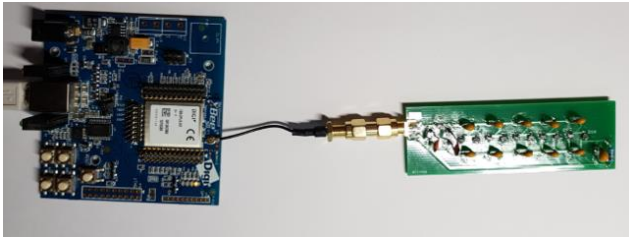


Fig. 14. XBee conectado al sistema de captación RF.

Con esta prueba se ha comprobado el efecto multiplicador del sistema como se puede ver en la tabla 1. Si se compara con los valores de  $V_{out}$  de las diferentes etapas a 14 dBm obtenidos en la simulación (figura 9), se puede decir que son valores bastante aproximados pero menores ya que hay que considerar las diferentes pérdidas no consideradas en la simulación al implementar el circuito en la práctica, como por ejemplo las pérdidas por estaño y líneas de la PCB ya comentadas. Además, aunque no se utiliza la antena, el transmisor también tiene una impedancia cercana a los  $50 \Omega$  medida con el analizador vectorial. Por lo tanto, el circuito de adaptación sigue siendo necesario y al no ser una adaptación perfecta como en la simulación, también existen estas pérdidas por desadaptación.

A pesar de la diferencia con la simulación, con los valores obtenidos en las diferentes salidas, se puede afirmar el efecto multiplicador del circuito de cosecha de RF.

Prueba 3	Tensión (V)
Vout1	2,91
Vout2	5,54
Vout3	8,37
Vout4	11,14
Vout5	14,25

Tabla 1. Valores de  $V_{out}$  a la salida de cada etapa.

## 6. Conclusiones

La finalidad principal de este proyecto era estudiar y diseñar un sistema de captación de radiofrecuencia para energizar dispositivos de muy bajo consumo, mediante los diferentes conocimientos adquiridos durante el curso y la búsqueda de información realizada en diversos medios informativos. El sistema de captación diseñado se ha puesto en práctica adquiriendo los componentes y fabricando la PCB. Poder fabricar el sistema y haberlo sometido a pruebas, las cuales han dado un resultado correcto, ha sido realmente importante para confirmar que las búsquedas de información y el estudio realizado ha sido exitoso. En conclusión, se puede decir que se ha alcanzado un gran punto de partida

## 7. Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi tutor Antonio Miguel López Martínez, por la ayuda constante sobre cualquier tipo de duda y las explicaciones de los diferentes conceptos

relacionados con el trabajo. También, me gustaría agradecer la ayuda de Adil Rachid relacionada con el transmisor XBee, dudas y dispositivos del laboratorio y finalmente, a mi familia por hacerse cargo de la parte económica del TFG.

## Referencias

- [1] Z. J. Chew, T. Ruan y M. Zhu, Power Management Circuit for Wireless Sensor Nodes Powered by Energy Harvesting: On the Synergy of Harvester and Load, vol. 34, IEEE, 2019, pp. 8671- 8681.
- [2] X. Lu, D. Niyato, D. I. Kim y Z. Han, Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey, IEEE, 2015.
- [3] S. Filiz y U. Yunus, A comparative study: Voltage multipliers for rf energy harvesting system, 2019, pp. 12-23.
- [4] V. Christopher R y D. Gregory D, Harvesting Wireless Power: Survey of Energy-Harvester Conversion Efficiency in Far-Field, Wireless Power Transfer Systems, IEEE, 2014.
- [5] Keysight EEs of EDA, «ADS: <https://www.keysight.com/es/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html>,» [En línea].
- [6] DIGI, «Digi XBee SX 868 RF Module, <https://www.digi.com/support/productdetail?pid=5508>,» [En línea].
- [7] D. W. Harrist, Wireless battery charging system using radio frequency energy harvesting, 2004.
- [8] J. Wang, Q. Gao, H. Wang y W. Sun, A Method to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Network, IEEE, 2009.
- [9] M. Mohammed AL-Azawy y F. Sari, Analysis of Dickson Voltage Multiplier for RF Energy Harvesting, Turkey: IEEE, 2019.
- [10] Autodesk Eagle, «<https://www.autodesk.com/products/eagle/overview?plc=F360&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1#internal-link-buy>,» [En línea].
- [11] NextPCB, «<https://www.nextpcb.com/>,» [En línea].