

Evaluación de desempeño de un sistema de radio cognitiva para una red LoRaWAN

Carlos Alberto Buitrago Rodil
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
c_buitrago@javeriana.edu.co

Manuel Ricardo Pérez Cerquera
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
manuel.perez@javeriana.edu.co

Resumen—Este artículo propone la inclusión de un sistema de radio cognitiva en una red LoRaWAN, realizando salto de sub-bandas y modificando la potencia de transmisión de un nodo LoRaWAN. El sistema implementado permite reducir el consumo energético del nodo mejorando así su autonomía, además de reducir la colisión de paquetes con otras tecnologías que funcionan en la banda ISM de 902-915MHz.

Palabras Clave—LoRaWAN, LPWAN, IoT, Radio cognitiva, ISM, SDR, RSSI, WSN, SQL.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de dispositivos IoT conectados ha aumentado en los últimos años, por lo que se prevé que para el 2020 será de 50 mil millones [1], este crecimiento genera nuevos retos en las tecnologías de comunicación utilizadas para IoT. LoRaWAN es una de las tecnologías utilizadas para este fin y es descrita en el RFC 8376 [2]. Entre sus principales aplicaciones se encuentran su uso en redes para agricultura de precisión, redes eléctricas inteligentes, ciudades inteligentes, monitoreo o control remoto de aplicaciones de salud.

LoRaWAN es tecnología LPWAN que funciona en las bandas ISM por lo que convive con otras tecnologías que funcionan en las mismas bandas entre las que se encuentran SigFox, Narrowband IoT y FAN. Por lo que resulta difícil prevenir interferencias generadas entre ellas y a pesar de las reglamentaciones en el ciclo de trabajo el cual establece un máximo de utilización de la banda ISM del 1% [3]. Una de las principales características que hace atractiva a esta tecnología es el consumo energético, y debido a las interferencias generadas por otras tecnologías que funcionan en la banda ISM de 915 se puede generar un aumento en la pérdida de paquetes, por lo que se necesitarán más retransmisiones para garantizar que el paquete llegue, generando así un mayor consumo energético, por lo que se ve la necesidad de buscar e implementar métodos para optimizar y mejorar el uso de este espectro.

El presente proyecto de investigación, plantea darle una capacidad cognitiva a una red LoRaWAN mediante un sensado por energía para evitar la colisión con otro tipo de tecnologías de conectividad que trabajen en las bandas ISM, para ello realiza un estudio del espectro radioeléctrico utilizando una SDR que le permite saber el porcentaje de ocupación de los canales disponibles a la red para la transmisión en el uplink, ya con esta información el sistema toma la decisión si debe

cambiar la sub-banda de transmisión de cada uno de los nodos. En paralelo el sistema hace un análisis del RSSI recibido en el gateway por cada nodo con el objetivo de modificar la potencia de transmisión, reduciendo así el consumo energético en el nodo, este ultimo proceso solo se realiza en aplicaciones donde el nodo no esta en movimiento.

Este artículo está organizado de la siguiente manera, en la sección II se presentan los principales conceptos y funcionamiento de LoRaWAN. En la sección III se presentan los principales conceptos del método de radio cognitiva llamado sensado del espectro por detección de energía. En la sección IV se presenta la descripción del sistema propuesto. En la sección V se muestran los resultados y su respectivo análisis. Finalmente en la Sección VI se presentan las principales conclusiones del trabajo realizado.

II. LORAWAN

LoRaWAN, es una red de comunicación inalámbrica, su desarrollo es promocionado por LoRa Alliance, pero fue desarrollada por Semtech en Norte América. La capa física o la modulación inalámbrica que utiliza es LoRa, la cual está basada en modulación CSS, que mantiene las mismas características de bajo consumo de la modulación FSK, pero tiene incremento en el rango de comunicación; LoRa, tiene tres clases de dispositivos los cuales son [4] [5]:

- Clase A: permite comunicación bidireccional, el acceso de uplink se hace mediante ALOHA. El nodo establece una transmisión uplink, y luego escucha durante dos ventanas de recepción. El slot de transmisión programado en un nodo se basa en sus necesidades de comunicación, dentro de las cuales se configura duración, tiempo de offset y tasa de transmisión. Este sistema, está diseñado para sistemas de bajo consumo de energía en aplicaciones que no tenga tráfico de downlink necesarios. La clase A, es la clase de dispositivos LoRaWAN con menor consumo de energía, esta clase es la única que debe estar implementada en todos los dispositivos.
- Clase B: permite una comunicación bidireccional, en adición a la clase A, estos dispositivos están sincronizados para tener un periodo para el enlace de downlink por lo que se genera un aumento de energía.
- Clase C: En esta clase los nodos siempre están escuchando excepto, cuando se encuentran transmitiendo.

LoRaWAN utiliza una topología estrella, para no agregar complejidad a la red con el objetivo de no disminuir la capacidad y tiempo de vida de la batería. El alcance medio de LoRaWAN es de 10 - 15 Km para ambientes rurales, en ambientes urbanos entre 3 - 5 Km. LoRaWAN utiliza diferentes canales de transmisión para downlink y uplink en la frecuencia de US 915, además cuenta con diferentes spreading factor (SF) y un ancho de banda variable (BW) que determina la tasa de transmisión.

III. SENSADO DEL ESPECTRO POR DETECCIÓN DE ENERGÍA

El sensado del espectro por detección de energía es un técnica de la radio cognitiva la cual calcula la energía promedio recibida en el espectro seleccionado[6], esta técnica es el método de radio cognitiva más usado debido a su baja exigencia computacional y fácil implementación, este método se basa en determinar cuando un canal esta ocupado y cuando no, mediante una hipótesis que se define en 1 [8].

$$x(t) = \begin{cases} n(t) & H_0, \\ h_s(t) + n(t) & H_1, \end{cases} \quad (1)$$

Donde $x(t)$ es la señal recibida, $s(t)$ es la señal transmitida por el otro usuario, n la ganancia de la señal y $n(t)$ es el ruido AWGN, H_0 es una hipótesis nula, que establece que no hay ocupación de la banda de espectro. Por otro lado, H_1 es una hipótesis alternativa, que indica que si existe alguna señal en la banda.

Para medir la energía de la señal recibida, se pasa la señal por un filtro pasa banda con ancho de banda W , después se eleva al cuadrado y se integra en el intervalo de observación T . Finalmente, la salida del integrador Y , se compara con un umbral k , para decidir si un usuario está presente o no. El valor de k , se halla realizando un estudio del ruido de piso cuando no hay ningún usuario en el canal; Por lo que el valor de la energía detectada queda expresado en la ecuación 2, el cual es la suma de las muestras en la banda deseada.

$$E = \sum_{t=1}^T |x(t)|^2 \quad (2)$$

También hay que tener en cuenta que visto que el canal inalámbrico es altamente variable, se modela de forma estocástica por lo que existe la probabilidad de falsa alarma entendiéndola como el riesgo de perder una oportunidad de uso. La probabilidad de falsa alarma se define como [8]:

$$P_f = P\{Y > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m)} \quad (3)$$

Donde $\Gamma(\cdot, \cdot)$ es la función gama, λ es el valor de SNR y m es el número de componentes de la transformada de Fourier [9]. Finalmente se puede definir la probabilidad de detección con la ecuación 4 donde $Q(\cdot)$ es la función de Marcum.

$$P_d = P\{Y > \lambda | H_1\} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (4)$$

Finalmente, se puede describir todo el método de sensado del espectro por detección de energía en la figura 1.

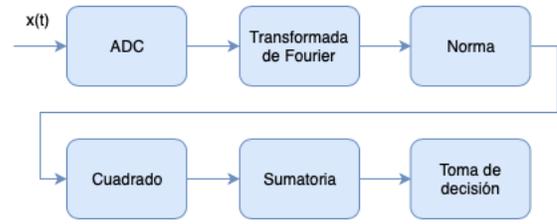


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de sensado por energía

Los procesos de radio cognitiva siguen un proceso llamado ciclo cognitivo el cual se puede observar en la figura 2, en que se puede apreciar que el ciclo cognitivo consta principalmente de tres etapas las cuales son:

- **Sensado del espectro:** Es el proceso principal del ciclo cognitivo, ya que permite capturar la información de las bandas de interés.
- **Análisis espectral:** Este proceso se encarga de determinar cuando un canal esta vacío.
- **Decisión espectral:** Es el proceso que toma la decisión de cual de las bandas libres se debe utilizar para la transmisión; además, de la tasa de transmisión y el ancho de banda.

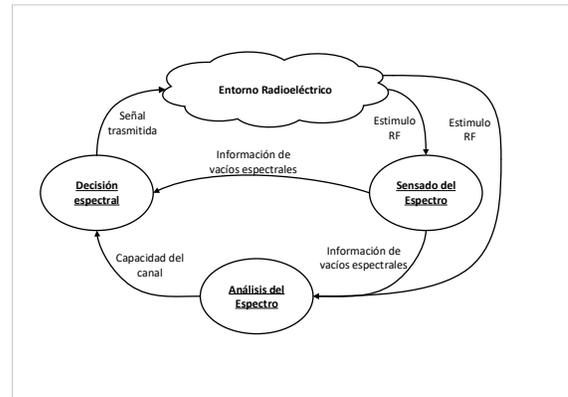


Figura 2. Ciclo cognitivo [8]

IV. SISTEMA DE CAMBIO DE CANAL

Se diseñó una arquitectura que se muestra en la figura 4, este sistema se divide en tres sub-sistemas, los cuales trabajan en paralelo y son independientes y la interacción se da mediante consultas a la base de datos. Estos sub-sistemas están compuestos por:

- Sensado para la cognición: SDR y base de datos.
- CORE: EL servidor y base de datos.
- Red LoRa: nodos y gateway LoRaWAN.

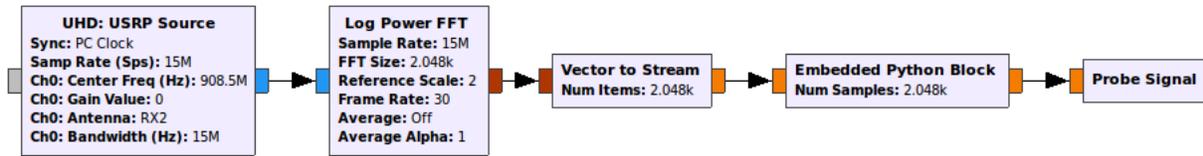


Figura 3. Diagrama de bloques del método de sensado por energía

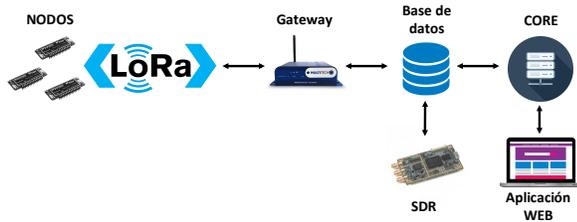


Figura 4. Arquitectura

IV-A. Sensado para la cognición

La inclusión de la SDR trae consigo la funcionalidad de sensado del espectro radio eléctrico, la cual permite conocer el estado de los canales. Este sub-sistema se utiliza en el cambio de sub-banda del sistema y cambio de potencia de los nodos.

Para el proceso de cambio de sub-banda se utiliza una USRP b200 mini a la cual se le configura el método descrito en la figura 1 utilizando un software libre llamado GNU Radio el cual provee bloques para el procesamiento de señales que se programan utilizando Python, en la figura 3 se muestra los bloques con los que se programo la SDR.

A continuación, se describen sus funciones y qué variables se configuran para su correcto funcionamiento:

1. UHD USRP Source: Este bloque se encarga de la interacción directa con el hardware de la USRP y tiene el objetivo de configurar los parámetros de adquisición para obtener la señal en banda base. Las variables que se configuran como parámetros de entrada son:
 - Ancho de banda de 15MHz.
 - Frecuencia central de 908,8MHz.
 - Frecuencia de muestreo de 15MHz.
 - Interfaz de entrada RX2.

Estos valores de configuración son debido a que la banda de interés para sensar es de 902 a 915, el sobre dimensionamiento de la banda se da ya que de manera experimental se observó que al realizar la transformada de Fourier las frecuencias bordes tienen una pequeña atenuación.

2. Log Power FFT: Este bloque realiza muchos de los procesos que se muestran en la figura 1 los cuales son:
 - Realiza la transformada de Fourier a la señal de entrada.
 - Luego de la transformada de Fourier le saca la norma.

- Después de sacar la norma la eleva al cuadrado.
- Por último realiza la función de ventaneo para la compensación de la señal adquirida.

Las variables que se configuran como parámetros de entrada son:

- Tamaño de la transformada de 2048.
- Frecuencia de muestreo de 15MHz.
- Frecuencia de ejecución de 30HZ.

Debido a que LoRaWAN tiene 8 sub-bandas y cada sub-banda tiene 8 canales se debe analizar los 64 canales, y cada canal tiene un ancho de banda de 125KHz se selecciona un tamaño de 2048 para obtener un muestreo de 200 muestras por cada canal, con pasos de 7,3KHz. Idealmente se podría aumentar el tamaño de la transformada de Fourier para obtener mas muestras por canal, pero esto generaría un mayor costo computacional.

3. Vector to Stream: Este bloque convierte un stream de vectores a un stream de datos para que el siguiente bloque pueda procesar la información.
4. Embedded Python Block: Este último bloque se encarga de definir la energía recibida en cada canal, es un bloque en blanco que permite programar cualquier función. Solo tiene una variable de entrada que es el tamaño del vector de entrada el cual es igual a la transformada de Fourier, el calculo de la energía esta dado por la sumatoria de 200 muestras por canal y se calcula un promedio. Este bloque también se encarga de guardar la energía de cada canal en una base de datos.
5. Probe Signal: Debido a que el bloque Embedded Python debe tener una salida se utiliza este bloque que en este caso no realiza ninguna función, ya que si no se agrega ninguna terminación la aplicación de GNU Radio no compila el código.

Con este subsistema se debe realizar una etapa de caracterización del ruido de piso con el objetivo de determinar si la energía recibida en la sub-banda es de un canal ocupado o no. Para este proceso no se tenía ningún tipo de dispositivo prendido que trabaje en esa banda, ese proceso, se realizó cada segundo durante tres semanas en cada canal.

Al realizar el experimento se utilizó una USRP 200mini con una antena monopolo, con una ganancia de 3dB y se obtuvieron 5'348.080 de datos por cada canal. Luego de obtener la varianza y la media del ruido de piso de cada canal se realiza un procedimiento probabilístico, que permite hallar un umbral para determinar si la energía recibida es ruido o

es un usuario utilizando ese canal. Para ese procedimiento se utiliza la ecuación 5, con un intervalo de confianza del 0,1 %, lo cual nos da un valor de $Z = 3,09$, y se obtiene los umbrales de todos los canales que se presenta en la tabla I los cuales permite determinar si el canal esta ocupado.

$$X = \sigma \cdot Z + \mu \quad (5)$$

Sub-banda 1							
CH1	CH2	CH3	SB14	SB15	SB16	SB17	SB18
-97,2	-97,2	-97,1	-97,2	-97,3	-97,1	-97,3	-97,3
Sub-banda 2							
CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-97,3	-96,8	-96,8	-96,6	-96,5	-97,0	-97,3	-97,5
Sub-banda 3							
CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-97,3	-97,6	-97,6	-97,4	-97,6	-97,6	-97,6	-97,6
Sub-banda 4							
CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-97,6	-97,6	-97,3	-97,4	-97,3	-96,9	-96,5	-87,6
Sub-banda 5							
CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-96,5	-96,9	-97,3	-97,4	-97,3	-97,5	-97,6	-97,6
Sub-banda 6							
CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-97,6	-97,6	-97,6	-97,4	-97,6	-97,5	-97,3	-97,4
Sub-banda 7							
CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-97,3	-97,0	-96,5	-96,6	-96,8	-96,8	-97,3	-97,3
Sub-banda 8							
CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-97,3	-97,1	-97,3	-97,2	-97,1	-97,2	-97,2	-97,1

Cuadro I
TABLA DE UMBRALES

IV-B. CORE

Este subsistema se encarga de las etapas de análisis espectral y decisión espectral del ciclo cognitivo. Para ellos el CORE utiliza la información que guardó el subsistema Sensado para la cognición, sabiendo que el sistema del ciclo de sensado se ejecuta continuamente y que a frecuencia de ejecución es de 30 Hz, se puede ejecutar un query, el cual traiga los últimos 9000 datos, por cuanto se va a ejecutar un análisis de los últimos 5 minutos, esto debido a que se quiere prevenir reconfiguración de los dispositivos por la interferencia momentánea de otros dispositivos ajenos a la red, ya que el proceso de reconfiguración trae consigo un tiempo en el que el sistema no opera. Una vez teniendo la información de la energía de cada uno de los canales, el sistema realiza una comparación con los valores de los umbrales que se obtuvieron en la tabla I,

Ya con esta información se pueden eliminar los mensajes de la misma red, tomando como referencia la frecuencia y el tiempo. Debido, a que la variación mínima de la marca de tiempo es de segundos, se tiene que eliminar toda la información relacionada con ese tiempo y canal, es decir, en ese tiempo y frecuencia el sistema entiende que la señal no supero el umbral. Por último, se genera una tabla de porcentajes de ocupación de cada canal, la cual se calcula con el promedio de las 9000 muestras por canal.

Ya con las probabilidades de ocupación de cada canal, se establece un umbral para determinar si se debe realizar un

cambio de sub-banda, por lo que si algún canal, que pertenece a la sub-banda en la que se encuentra la red LoRaWAN supera el umbral, se determina que se debe realizar un cambio en la sub-banda de transmisión. Para determinar la sub-banda a la cual se va a realizar el cambio, se selecciona la de menor promedio, si llega el caso de un empate, se crea una lista de las sub-bandas empatadas y aleatoriamente se selecciona una de ellas.

IV-C. Red LoRa

Este subsistema este compuesto por el gateway LoRaWAN y los nodos LoRaWAN. El gateway es encargado de transmitir las decisiones tomadas por el CORE a los nodos, mediante consultas a la base de datos, este dispositivo se programa utilizando Node-Red.

En la red LoRaWAN lo primero que se hace es establecer una comunicación LoRaWAN. En los nodos LoPy se pueden configurar dos métodos de activación de la comunicación los cuales son ABP (Activation by Personalization) y OTAA (Over-the-Air Activation). Para el caso de este proyecto se seleccionó OTAA debido a que es la forma mas segura de establecer la comunicación LoRa. La siguiente variable que se debe especificar en la comunicación loRaWAN es la sub-banda, para ello la LoPy lee un archivo que tiene guardado en el cual esta almacenada la sub-banda, si el dispositivo no tiene este archivo lo crea y coloca la sub-banda 1, esto se hace por seguridad, aunque no es necesario, ya que al configurar el dispositivo se carga dicho archivo. Luego el nodo trata de establecer comunicación, si el dispositivo no puede establecer comunicación con el gateway en 2 minutos, el nodo cambia el archivo donde se almacena la sub-banda por la siguiente y se reinicia, para el caso de la sub-banda 8 esta cambiaría a la sub-banda 1, este proceso la hace hasta que pueda establecer una comunicación LoRaWAN. Cabe recordar que la configuración de los dispositivos se realiza en clase C, para que se puedan enviar mensajes desde los nodos cuando sean necesarios.

Ya establecida la comunicación el dispositivo puede realizar cualquier configuración que el usuario final desee. En paralelo el dispositivo realiza una lectura del buffer de entrada cada 10 segundos. Si llega un mensaje con el payload con un mensaje de f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7 y f8 quiere decir que el Gateway le esta informando que debe realizar un cambio de sub-banda, f1 indica un cambio a la sub-banda 1, f2 a la sub-banda 2 y así sucesivamente hasta f8 que indica un cambio a la sub-banda 8. Conociendo la nueva sub-banda reescribe el archivo de configuración de la sub-banda, espera un intervalo de tiempo y reinicia el dispositivo.

V. SISTEMA DE CAMBIO DE POTENCIA

Para el proceso de cambio de potencia no se pudo utilizar la arquitectura propuesta 4, ya que para realizar cambio de potencia, la configuración LoRaWAN utilizada en el proceso de cambio de sub-banda no permite esta funcionalidad, por lo que se debe utilizar la configuración LoRa que permite establecer una red LoRa y a su vez permite configurar todas

las variables de la comunicación tales como potencia de transmisión, ancho de banda, codificación y spreading factor. Esta configuración no es compatible con el gateway LoRaWAN que tiene la Pontificia Universidad Javeriana, por lo que se optó por realizar este proceso con dos nodos LoPy, uno realizará la función de gateway y el otro de nodo. A continuación, se explicará el proceso de cambio de canal de los nodos.

El sistema comienza realizando una consulta a la base de datos del piso de ruido de los últimos dos minutos de la sub-banda en la que está funcionando, luego se calcula la potencia promedio recibida por el gateway del nodo (esta información debe tener al menos 100 mensajes para calcularlo), una vez se tenga la potencia promedio, si este valor está 10 dB por encima del piso de ruido de la sub-banda a la que está transmitiendo, se considera que se debe cambiar la potencia de transmisión y la variación de esta potencia se da dependiendo de la diferencia entre la media de los umbrales y el piso de ruido para cada sub-banda obtenidos en la sección 3.2.1.1. En promedio esta diferencia es de 7 dBm y para tener un margen de guarda se adicionaron 3dB. Así, si la potencia recibida en el gateway por un nodo, cuya potencia de transmisión es de 20 dBm, está 11 dB por encima del piso de ruido de la sub-banda, el sistema considera que la potencia de transmisión deberá ser de 19 dBm, es decir 1 dB por debajo con respecto a la potencia de transmisión anterior.

El gateway y el nodo se configuran utilizando un plugin Pmark, el cual permite programar los dispositivos utilizando Python como lenguaje de programación. Para establecer la comunicación LoRa se configura en los dispositivos el modo *LoRa.LORA* y no en *LoRa.LORAWAN* que fue el modo que se utilizó para el cambio de sub-banda, también se selecciona la región para determinar las frecuencias a las que va a transmitir, y por último se selecciona la potencia de transmisión del nodo, para ello se utiliza el siguiente comando **LoRa(mode=LoRa.LORA, region=LoRa.US915, tx_power=20)** ya establecida la comunicación, se pueden enviar y recibir mensajes entre el nodo y el nano-gateway.

VI. RESULTADOS

Para este artículo se realizaron tres pruebas diferentes, la primera donde se interfiere un canal en la sub-banda de transmisión, la segunda donde se realiza cambio de canal, y la tercera donde se realiza el cambio de potencia.

VI-A. Sistema con interferencia

En esta subsección se describe los resultados del protocolo de pruebas descrito en 3.4.1, para ello se realiza el recorrido que se muestra en la figura 5, además se realiza un recorrido en las instalaciones de la Pontificia Universidad Javeriana como se muestra en la figura 6.



Figura 5. Recorrido en bogotá



Figura 6. Recorrido en el campus de Pontificia Universidad Javeriana

Para realizar un análisis de esta prueba se realiza un programa en matlab que se encarga de calcular la tasa de paquetes perdidos para ello, se utilizan intervalos de distancia de cada 800m y se obtiene la gráfica que se observa en la figura 7.

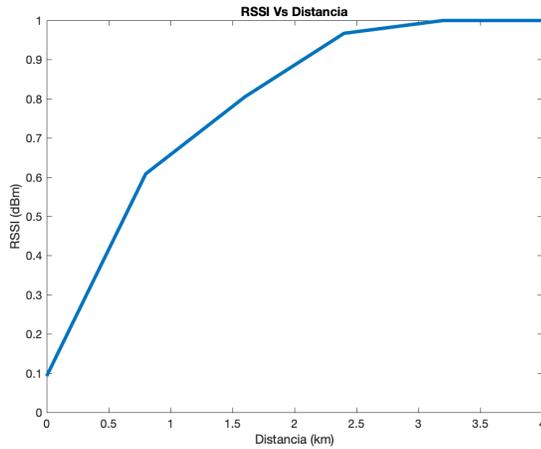


Figura 7. Distancia vs %de paquetes perdidos

VI-B. Sistema con cambio de canal

Esta subsección muestra los resultados obtenidos al probar el sistema de salto de canal propuesto en este proyecto, el cual sigue la arquitectura que se muestra en la figura 4. Para ello, se realiza el mismo recorrido que se realizó en la sección anterior y se detalla en las figuras 5 y 6. Al realizar esta prueba se obtiene la figura 8, donde se observar el sistema propuesto de color naranja el cual tiene un mejor desempeño que una red LoRaWAN con interferencia de un canal que se representa de color azul, ya que el porcentaje de paquetes perdidos es menor hasta la distancia de 3 km, que es el punto máximo en el que la red LoRaWAN puede transmitir. Utilizando el modelo para medir el consumo energético definido en [11], el cual establece el concepto de energía consiente que es medir el consumo energético a través de las variables de mayor consumo, que en una comunicación inalámbrica es el proceso de comunicación, por lo que se puede realizar mediante la comparación de paquetes perdidos respecto al número total de paquetes enviados, lo cual nos puede indicar la cantidad de paquetes necesarios para garantizar un paquetes.

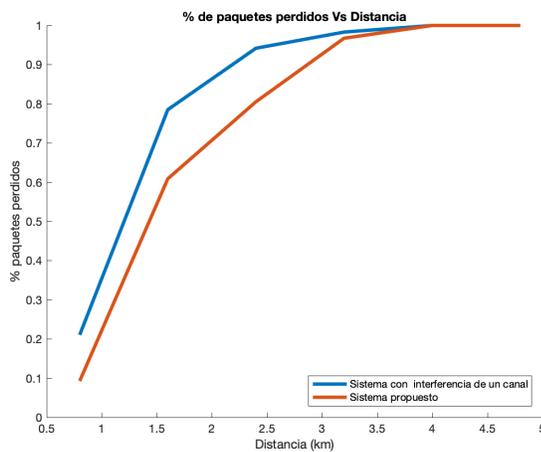


Figura 8. Distancia vs %de paquetes perdidos

VI-C. Sistema con cambio de potencia

El objetivo de esta prueba, es determinar si reducir la potencia disminuye el consumo energético del nodo, para ello, se medirá el número de paquetes perdidos por un nodo en una ubicación estática, variando la potencia de trasmisión. Para su análisis, se realizará una comparación de la potencia promedio que se necesitó para garantizar un paquete, para ello, se utiliza la ecuación 6 en la cual $\%_{\text{exito}}$ es el porcentaje de éxito de los paquetes enviados por el nodo y P_{tx} es la potencia de trasmisión del nodo.

$$P_{total} = \frac{P_{tx}}{\%_{\text{exito}}} \quad (6)$$

Para prueba se colocó a transmitir al nodo 1000 mensajes los cuales servirán como base de comparación con el ruido de piso y determinar cual deberá ser la potencia de trasmisión nueva del nodo, luego se configurará la nueva potencia de trasmisión y se volverán a transmitir 1000 mensajes a los cuales se calculará el porcentaje de éxito de cada mensaje.

A pesar de que se utilizó una antena monopolo y su patrón de radiación es esférico, la potencia no es igual en lugares que tengan el mismo radio, esto debido a los fenómenos de propagación de las ondas electromagnéticas Small-scalefading y Shadowing, por lo que se seleccionan diferentes locaciones cercanas de la Pontificia Universidad Javeriana y, para el proceso de análisis se dividen en grupos los cuales se conforman por la potencia promedio recibida en el gateway, en la tabla II se muestran estos grupos, donde P_{ruido} es el ruido de piso promedio en el momento de realizar el proceso de cambio de canal.

Grupo	Rango de potencia recibida	Nueva potencia de transmisión
1	$P < P_{ruido} + 10$	20 dBm
2	$P_{ruido} + 10 < P \leq P_{ruido} + 11$	19 dBm
3	$P_{ruido} + 11 < P \leq P_{ruido} + 12$	18 dBm
4	$P_{ruido} + 12 < P \leq P_{ruido} + 13$	17 dBm
5	$P_{ruido} + 13 < P \leq P_{ruido} + 14$	16 dBm
6	$P_{ruido} + 14 < P \leq P_{ruido} + 15$	15 dBm
7	$P_{ruido} + 15 < P \leq P_{ruido} + 16$	14 dBm
8	$P_{ruido} + 16 < P \leq P_{ruido} + 17$	13 dBm
9	$P_{ruido} + 17 < P \leq P_{ruido} + 18$	12 dBm
10	$P_{ruido} + 18 < P \leq P_{ruido} + 19$	11 dBm
11	$P_{ruido} + 19 < P \leq P_{ruido} + 20$	10 dBm
12	$P_{ruido} + 20 < P \leq P_{ruido} + 21$	9 dBm
13	$P_{ruido} + 21 < P \leq P_{ruido} + 22$	8 dBm
14	$P_{ruido} + 22 < P \leq P_{ruido} + 23$	7 dBm
15	$P_{ruido} + 23 < P \leq P_{ruido} + 24$	6 dBm
16	$P < P_{ruido} + 25$	5 dBm

Cuadro II
GRUPOS

El proceso de selección comienza mandando 1000 mensajes del nodo al nano-gateway y se calcula la potencia promedio de estos mensajes, también se calcula el porcentaje de éxito. Ya con la potencia promedio se revisa cual es el ruido de piso en ese instante y se utiliza la tabla para determinar a que potencia debe transmitir el nodo y el grupo al que pertenece, se reconfigura el nodo y se vuelven a transmitir 1000 mensajes

a los cuales se le calcula también el porcentaje éxito. Al realizar la comparativa la potencia se pasa a mW por lo que al disminuir 1 dBm se reduce 0,79432823 veces la potencia de transmisión. A continuación, se muestra una tabla del ahorro energético en cada uno de los grupos.

Grupo	Potencia	Ahorro
1	100 mW	0 %
2	79,433 mW	20,567 %
3	63,095 mW	36,904 %
4	50,118 mW	49,881 %
5	39,810 mW	60,189 %
6	31,622 mW	68,377 %
7	25,118 mW	74,881 %
8	19,952 mW	80,047 %
9	15,848 mW	84,151 %
10	12,589 mW	87,410 %
11	10 mW	90 %
12	7,943 mW	92,056 %
13	6,309 mW	93,690 %
14	5,011 mW	94,988 %
15	3,981 mW	96,018 %
16	3,162 mW	96,837 %

Cuadro III
AHORRO DE ENERGÍA

Una vez realizado el proceso de cambio de potencia se halla el porcentaje de éxito de cada uno de los grupos, este resultado se muestra en la figura 9, en donde se puede apreciar de color azul el sistema sin cambio de potencia y de color naranja el sistema de cambio de potencia. No se tiene en cuenta el grupo 1 a razón que al realizar las pruebas el porcentaje de pérdidas varia mucho porque no se limita por debajo.

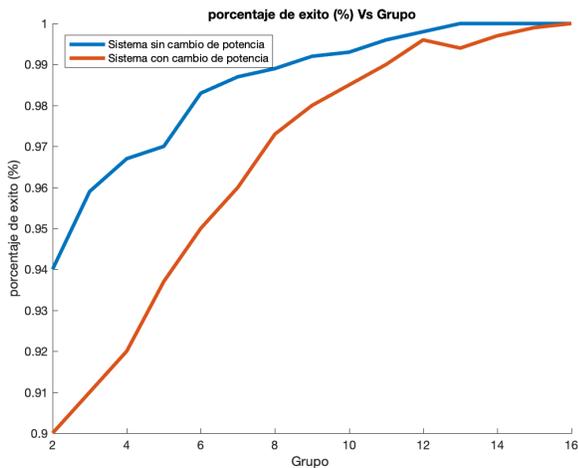


Figura 9. Grupos vs %de éxito de paquetes

En la gráfica 9 se puede analizar que al realizar el cambio de potencia se necesita enviar mas paquetes para garantizar que lleguen, pero este análisis es incompleto porque se esta variando la potencia de transmisión, por lo que se calcula la potencia necesaria para garantizar que un paquete llegue, para

ello se utiliza la ecuación 6 la cual arroja como resultado la figura 10.

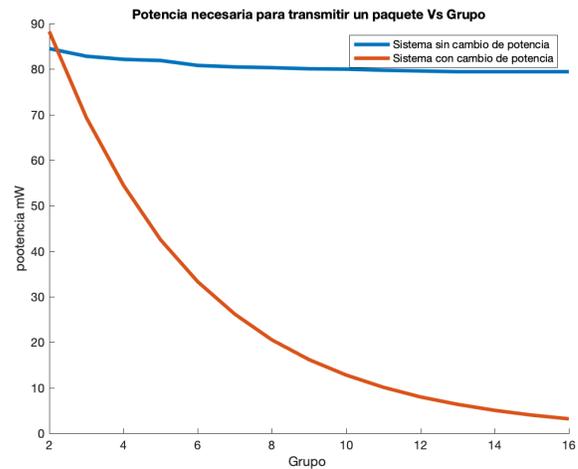


Figura 10. Grupos vs Potencia necesaria para transmitir un paquete

Como se puede observar en la figura 10, el grupo 2 no mejora con el sistema propuesto, esto debido a que solo se disminuye en 1 dBm la potencia de transmisión, y el porcentaje de éxito de que un paquete llegue disminuye en una mayor proporción, en los otros grupos si se ve una mejora.

Grupo	Potencia sin cambio de canal	potencia con cambio de canal	ahorro
16	79.432 mW	3.162 mW	96.018 %
15	79.432 mW	3.985 mW	94.983 %
14	79.432 mW	5.026 mW	93.671 %
13	79.432 mW	6.347 mW	92.008 %
12	79.592 mW	7.975 mW	89.979 %
11	79.751 mW	10.101 mW	87.334 %
10	79.992 mW	12.780 mW	84.022 %
9	80.0734 mW	16.172 mW	79.803 %
8	80.316 mW	20.506 mW	74.468 %
7	80.479 mW	26.165 mW	67.487 %
6	80.806 mW	33.287 mW	58.806 %
5	81.889 mW	42.487 mW	48.1167 %
4	82.143 mW	54.476 mW	33.680 %
3	82.828 mW	69.335 mW	16.29 %
2	84.503 mW	88.258 mW	-4.444 %

Cuadro IV
AHORRO DE ENERGIA

En la tabla IV se muestra el porcentaje de mejora por cada grupo, y se puede apreciar una mejora significativa en los grupos del 6 al 16 en donde el ahorro es mayor al 50%. además se observa en el grupo 2 un ahorro negativo lo que significa que este sistema representa un gasto de 4,4 % mayor con el sistema propuesto,

VII. CONCLUSIÓN

El sistema de cambio de sub-banda mejora el consumo energético de la red LoRaWAN ya que reduce la perdida

de paquetes, por lo tanto, disminuye la retransmisión de paquetes, aunque trae un tiempo en el que el sistema no puede realizar ninguna comunicación porque esta en el proceso de reconfiguración.

El sistema de cambio de potencia trae consigo un ahorro en la potencia necesaria para garantizar la llegada de un mensaje, en el grupo 2 no ve este efecto por lo que al implementar el sistema no se debería realizar cambio de potencia en este grupo, en los otros grupos se ve un ahorro significativo por lo que la implementación de este sistema trae muchas ventajas.

El sistema de cambio de potencia trae consigo un ahorro en la potencia necesaria para garantizar la llegada de un mensaje, en el grupo 2 no ve este efecto por lo que al implementar el sistema no se debería realizar cambio de potencia en este grupo, en los otros grupos se ve un ahorro significativo por lo que la implementación de este sistema trae muchas ventajas.

Los dos sistemas son independientes por lo que pueden convivir simultáneamente y una no afecta a la otra, ya que al realizar el cambio de canal la potencia se restablece al máximo y el sistema de cambio de potencia vuelve a realizar su proceso.

Los dispositivos LoRaWAN de clase C, son los que tienen un mayor consumo energético debido a que siempre están esperando una comunicación downlink, por lo que la implementación de estos sistemas traerá un aumento en la autonomía de estos dispositivos, mejorando su desempeño en aplicación IoT donde se envíen datos frecuentemente.

REFERENCIAS

- [1] Evans, D. (2011). The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything. CISCO White Paper, (April), 1–11. <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2007.373646>
- [2] Farrell, S(2018). RFC 8376. Farrell, S, 1–43. <https://tools.ietf.org/pdf/rfc8376.pdf>
- [3] Kaur, P. (2011). Cognitive Radio: Need, Capabilities, Standards, Applications and Research Challenges. International Journal of Computer Applications, 30(1), 31–38.
- [4] Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martínez, B., & Melia, J. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. IEEE Communications Magazine, (January), 8–12.
- [5] N. Sornin M. Luis T. Eirich T. Kramp O.Hersent. (2015). LoRaWANTM Specification V1.0.1 Draft 3 Date:2015 Oct, (2010), 97331.
- [6] Pedraza, L. F., Forero, F., & Páez, I. P. (2012). Detección de espectro para radio cognitiva. Spectrum Sensing for Cognitive Radio., 20(2), 197–210. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052012000200007>
- [7] Wipro Technologies. (2002). Software-Defined Radio. Wipro Technologies, Innovative Solutions, Quality Leadership, (August), 1–10.
- [8] Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. Computer Networks, 50(13), 2127–2159. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.05.001>
- [9] Digham, F. F., Alouini, M. S., & Simon, M. K. (2007). On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels. Communications, IEEE Transactions On, 55(1), 21–24. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2006.887483>
- [10] Johnson, J. B. (1928). Thermal Agitation of Electricity in Conductors American Physical Society, 97–109. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.32.97>
- [11] Stabellini, L. (2010). Toward Reliable Wireless Sensor Networks : Energy-Aware Distributed interference Management for Unlicensed Bands. PHD Dissertation, (1008), xiii, 221. Retrieved from <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:370783/FULLTEXT01>