

Implementación de un terminal IoT que soporte el protocolo IETF PAWS

Autor

MARIO JOSÉ CASTAÑEDA VALDERRAMA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2019

Implementación de un terminal IoT que soporte el protocolo IETF PAWS

Autor
MARIO JOSÉ CASTAÑEDA VALDERRAMA

En cumplimiento de los requisitos para obtener el grado de **Ingeniero
Electrónico**

Director
Homero Ortega Boada
Ph.D. En Ingeniería

Co-Director
Luis Miguel Díaz Morales
Magister En Ingeniería de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme cumplir este logro.

A mi madre Maria Marlene Valderrama Cardozo por darme la vida y por su esfuerzo y apoyo incondicional siempre.

A mi hermana Maria Jimena Castañeda Valderrama por estar siempre presente en mis 23 años de vida y hacerme saber que puedo contar con ella.

A mi abuela Maria Hersilia Cardozo por ser una luchadora y por demostrarme que quien se esfuerza puede lograr muchas cosas.

A mi tío Augusto Castañeda por estar siempre pendiente y abrirme las puertas de su hogar cada vez que lo necesité; por sus enseñanzas y consejos a lo largo de mi vida.

A mi tía Claudia Alur porque a pesar de la distancia siempre ha estado dispuesta a escucharme y ayudarme en lo que necesite.

A mi mejor amigo Camilo Alfonso Álvarez León por enseñarme que a pesar de lo que ocurra, al final siempre surge algo bueno; que la vida es una batalla que hay que afrontar pero que es más fácil con buena compañía.

A Diego Andrés Sarmiento Campos y Juan Felipe Remolina García por brindarme su amistad en todos estos años.

A Ricardo Andrés Gómez Torres, Juan Pablo Navarro Rueda y Felipe Suárez Flechas por compartir sueños e ideas y por haber empezado a luchar por lo que queremos.

Al profesor Homero Ortega Boada y a Luis Miguel Díaz Morales por su colaboración durante el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander.

A todas las personas que se han ido sumado a mi vida aportando buenas e inolvidables experiencias.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	14
1.1. OBJETIVO GENERAL	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3. ALCANCES	14
2. MARCO CONCEPTUAL	15
2.1. EL INTERNET DE LAS COSAS (IoT)	15
2.2. RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR)	15
3. ESTADO DEL ARTE	17
4. PROTOCOLO PARA EL ACCESO A ESPACIOS BLANCOS EN LA TELEVISIÓN DIGITAL	19
4.1. SECUENCIA DEL PROTOCOLO PAWS	21
4.1.1. Inicialización	21
4.1.2. Registro	21
4.1.3. Consulta de canales disponibles	22
4.1.4. Validación de dispositivos esclavos	23
4.2. DISPOSITIVO DE ESPACIOS BLANCOS (WSD)	24
5. DISEÑO DE LA BASE DE DATOS PAWS	25
5.1. LLENADO DE LA BASE DE DATOS	26
5.1.1. Información de las reglas PAWS	26
5.1.2. Información del dispositivo	26
5.1.3. Información plan técnico de televisión	27
6. DISEÑO DEL MODELO DE COMUNICACIÓN	29
6.1. PROTOCOLO DE TRANSFERENCIA DE HIPERTEXTO (HTTP)	29
6.2. JAVA SCRIPT OBJECT NOTATION (JSON)	31
6.3. PROTOCOLO MQTT	31
6.4. SERVIDOR WEB CENTROTIC	32
6.5. TERMINAL IoT	32
6.5.1. Características de los Dispositivos SDR	32
7. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	34
7.1. COMUNICACIÓN CLIENTE-SERVIDOR WEB	34
7.1.1. Canales Ocupados por Regiones	34
7.1.2. Registro de Dispositivos	35
7.1.3. Consulta de Dispositivos Registrados	36
7.2. COMUNICACIÓN DISPOSITIVO MAESTRO-SERVIDOR WEB	36

7.2.1. Inicialización	36
7.2.2. Consulta de Canales Disponibles	37
7.2.3. Notificación del Canal Seleccionado	37
7.3. COMUNICACIÓN DISPOSITIVO ESCLAVO-DISPOSITIVO MAESTRO	38
8. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO	41
9. CONCLUSIONES	46
10. TRABAJO FUTURO	47
BIBLIOGRAFÍA	48

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1. Diagrama de secuencia del protocolo PAWS.	20
2. Diagrama de inicialización.	21
3. Diagrama de registro.	22
4. Diagrama de consulta de canales disponibles.	22
5. Diagrama de validación.	23
6. Diagrama del modelo de la base de datos.	25
7. Diagrama del modelo del subgrupo información de las reglas PAWS.	26
8. Diagrama del modelo del subgrupo información del dispositivo.	27
9. Diagrama del modelo del subgrupo información del plan técnico de televisión.	28
10. Diagrama del modelo de comunicación.	29
11. Servidor Web CENTROTIC.	32
12. Diagrama de comunicacion HTTP entre el cliente y el servidor web.	34
13. Interfaz de consulta de canales por regiones.	35
14. Interfaz de registro de dispositivos.	35
15. Interfaz de consulta de dispositivos registrados.	36
16. Diagrama de comunicacion HTTP entre el dispositivo maestro y el servidor web.	36
17. Diagrama de comunicacion MQTT entre el dispositivo esclavo y el dispositivo maestro.	38
18. Representación esquemática de la prueba de funcionamiento del sistema.	41
19. Flujograma GNU Radio para transmisión.	43
20. Diagrama de bloques de GNU Radio para la sintonización.	44
21. Ventana para establecer la frecuencia a sintonizar.	44
22. Comparación de la potencia recibida y el diagrama de constelación sintonizados antes de la transmisión y durante la transmisión.	45

LISTA DE TABLAS

pág.

1. Características generales del equipo SDR. 33

RESUMEN

Título: Implementación de un terminal IoT que soporte el protocolo IETF PAWS¹

Autor: Mario José Castañeda Valderrama²

Palabras clave: Protocolo PAWS, Espacios Blancos de la Televisión (TVWS), Dispositivos de Espacios Blancos (WSD), Broker MQTT, Radio Cognitiva (CR), Acceso Dinámico al Espectro, Terminal IoT, Radio Definida por Software (SDR).

El presente trabajo de investigación busca desarrollar una iniciativa del Grupo de Investigación RadioGIS de la Universidad Industrial de Santander para comenzar a tomar ventaja de las oportunidades que se abren con el uso de los Espacios Blancos (WS) que deja la banda asignada a la televisión digital en diversas zonas rurales de Colombia y aprovecharlos para brindar internet de banda ancha de igual o mejor calidad que en zonas urbanas. Este es el principio fundamental de lo que se conoce como Radio Cognitiva (CR) mediante el cual los dispositivos pueden cambiar sus parámetros de transmisión o recepción para ejecutar su cometido sin interferir con usuarios autorizados. El primer paso para abrir esta línea de investigación consiste en desarrollar un prototipo de dispositivo de Espacios Blancos (WSD) capaz de comunicarse, mediante el cumplimiento del protocolo IETF PAWS, con un sistema que almacena y administra la información del espectro y de los dispositivos conocido como base de datos de espacios blancos (WSDB). Al concluir con este trabajo se contará con un prototipo sencillo, limitado solo al proceso de comunicación, que no necesariamente es inalámbrico, entre el dispositivo y una base de datos remota que almacene y gestione los WSD y la información del plan técnico de televisión proporcionado por la Agencia Nacional del Espectro (ANE).

¹Trabajo de investigación

²Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander. Director, Homero Ortega Boada.

ABSTRACT

Title: Implementation of an IoT terminal that supports the IETF PAWS protocol³

Author: Mario José Castañeda Valderrama⁴

Key words: PAWS Protocol, Television White Spaces (TVWS), White Space Device (WSD), MQTT Broker, Cognitive Radio (CR), Dynamic Spectrum Access, IoT Terminal, Software Defined Radio (SDR).

This research project aims to develop an initiative from Industrial University of Santander RadioGIS Research Group in order to take advantage of the opportunities that open up with the use of White Spaces (WS) left by the digital television attributed band in various rural areas of Colombia in order to provide broadband internet of the same or better quality than urban areas. This is the fundamental principle of what is known as Cognitive Radio (CR) whereby devices can change their transmission or reception to execute its task without causing interference parameters with authorized users. The first step to begin reaserching in this field is by developing a White Spaces Device (WSD) prototype capable of communicating with a system that stores and manages spectrum and device information known as white spaces database (WSDB) through the fulfillment of the IETF PAWS protocol. A simple prototype has been developed during this project and it is limited only to the communication process, which is not necessarily wireless, between the device and a remote database that stores and manage the WSD and the television technical plan information provided by the National Spectrum Agency (ANE).

³Research work

⁴School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineerings, Industrial University of Santander. Director, Homero Ortega Boada.

INTRODUCCIÓN

El acelerado avance en el desarrollo de las tecnologías de la información y la comunicación han llevado a fijarlas como una de las principales vías al desarrollo económico y social de un país y su asequibilidad es un asunto ineludible en cualquier plan de gobierno. Desde poder enterarse de cualquier acontecimiento alrededor del mundo, poder aprender de cualquier tema en cualquier momento, comunicarse con los seres queridos estando a kilómetros de distancia hasta poder recibir una valoración médica sin tener que ir al consultorio, por la cantidad de posibilidades que ofrece, el internet se ha convertido quizá en la herramienta más poderosa de la cual se haya tenido acceso. El acceso a la banda ancha se convierte en el principal factor productivo de la economía moderna y el mayor dinamizador de oportunidades en una infinidad de campos.

La innovación digital está en vías de transformar casi todos los sectores de la economía introduciendo nuevos modelos comerciales, productos, servicios y, en última instancia, nuevas formas de crear valor y empleos. Aún así, gran parte de la población a nivel mundial no posee conectividad ni tiene acceso a lugares que sí la tengan. Desde hace varios años en Colombia se han intensificado los estudios para impulsar el uso eficiente del espectro. Un logro importante está relacionado con el aprovechamiento de los WS del espectro asignado a la televisión (TVWS). En Colombia, el servicio de TV tiene atribuidos 54 canales de 6 MHz de ancho de banda en las bandas que están entre 470 MHz y 806 MHz que corresponde a los canales de televisión del 14 al 69¹. Estos WS están distribuidos de diversas maneras por todo el territorio nacional e incluso pueden ir cambiando en el tiempo.

Eso es lo que nos obliga a hablar de espacio blancos del espectro y de la Radio Cognitiva (CR) o Radio Inteligente (IR), lo cual se refiere a la posibilidad de usar los últimos avances tecnológicos para que la tecnología pueda llegar a usar el espectro radioeléctrico (ERE) de una manera diferente: buscando espacios en el ERE que estén libres y acomodándose a ellos². Esto también se conoce como uso dinámico u oportunístico del ERE.

El problema general consiste en la necesidad de comunicación que tienen las zonas más alejadas de Colombia. Según el boletín técnico de indicadores básicos de tecnologías de la información y la comunicación en los hogares del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, para el 2017 sólo el 17% de los hogares rurales tenía conexión a internet. En el caso de las ondas electromagnéticas que hacen uso de las bandas de frecuencia previstas para TV, que comparadas con otras bandas usadas, por ejemplo en las comunicaciones móviles, garantizan la cobertura en estas zonas. Se trata entonces de poner al servicio del sector rural un recurso extremadamente valioso (los WS), que usualmente escasea en las ciudades,

¹Arteaga, Adriana y Navarro, Andres. «Availability of TV White Spaces Using Spectrum Occupancy Information and Coverage Maps». En: *IEEE Latin America Transactions* 14.6 (2016), págs. 2588-2591. ISSN: 15480992. DOI: 10.1109/TLA.2016.7555223.

²(Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación/Grupo del ESPECTRO). *Introducción al estado de la situación de los “TV White Spaces” y “LSA” propiciados por la Radio Cognitiva*. 2013, pág. 30.

pero que está disponible en vastas zonas rurales³. Lograr que las escuelas, hospitales y otras entidades muy alejadas tengan un servicio de Internet igual o mejor que en las ciudades es un sueño que puede volverse realidad si se aprovechan los TVWS pero que por cualquier razón no se usan completamente en gran parte del territorio nacional.

La oportunidad consiste en que la televisión digital funciona en unas bandas de frecuencias mucho más bajas que los servicios de comunicaciones móviles y que los demás servicios relacionados con el internet inalámbrico, lo cual es relevante, puees es bien sabido que entre más bajas sean las frecuencias de las ondas, más alcance tienen, lo cual se traduce en la cobertura de áreas más extensas. Adicionalmente los canales de televisión son bastante anchos, cada canal es de 6 MHz en el caso colombiano. La situación social por la cual está atravesando el país permite aún más el desarrollo de las zonas rurales en todos los aspectos, pero especialmente permite reducir la brecha tecnológica existente con las ciudades al poder llevar Internet de buena calidad a lugares donde antes no se podía, aumentando el número de usuarios del ERE y divulgando el conocimiento sobre su existencia y correcto uso.

Puede decirse que los WS han estado desde hace varios años en la mira de todos los actores de las comunicaciones para elevar la eficiencia espectral, pero ha llegado el momento más apropiado para implementar soluciones que faciliten desde ya su aprovechamiento. Varios avances se presentan en países como Estados Unidos o el Reino Unido, donde ya son comunes los WSD incluso móviles. Muchas empresas ven en este tema una gran oportunidad, por lo que han creado junto con varias otras la *Dynamic Spectrum Alliance* (DSA), encargada de abogar por leyes y regulaciones que lleven a un uso óptimo del ERE.

En medio de estas oportunidades, el presente proyecto le apuesta a la necesidad de diseñar e implementar una plataforma de gestión de WS y de WSD que permita impulsar y controlar el uso de los TVWS.

El presente documento consta de ocho capítulos: En el capítulo 1 se muestra un marco conceptual acerca de IoT y SDR; en el capítulo 2 se hace un estudio del estado del arte sobre el aprovechamiento de los TVWS; El capítulo 3 hace una explicación detallada del protocolo PAWS y comenta brevemente lo que es un WSD; En el capítulo 4 se describe la base de datos diseñada; el modelo de comunicación empleado para el desarrollo del proyecto se explica detalladamente en el capítulo 5; en el capítulo 6 se describe claramente el funcionamiento del sistema para poder evidenciar los resultados obtenidos en el capítulo 7; por último, el capítulo 8 presenta las conclusiones deducidas del trabajo de investigación.

³Daza, Carolina. *Espacios Blancos en Colombia*. URL: https://www.itu.int/en/ITU-R/seminars/rrs/RRS-17-Americas/Documents/Forum/4_ANE%20Carolina%20Daza%20TVWS.pdf.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar un prototipo de WSD que, mediante el protocolo IETF PAWS, pueda interactuar con una base de datos similar a las usadas en este tipo de tecnología para obtener información y permisos para usar TVWS.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el protocolo IETF PAWS y los requerimientos para la bases de datos.
- Implementar un Terminal IoT con las cualidades de comunicación necesarias para acceder a la base de datos.
- Programar una base de datos remota con información mínima para poder realizar las pruebas.
- Lograr la comunicación por internet entre una base de datos ubicada en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y el dispositivo de espacios blancos.
- Realizar las pruebas del dispositivo y la comunicación con la base de datos.
- Desarrollar material reproducible para transferir los conocimientos adquiridos a futuros candidatos que decidan continuar la investigación y el desarrollo en esta línea.

1.3. ALCANCES

El proyecto de investigación tiene los siguientes alcances de acuerdo con los objetivos específicos:

- El diseño se limita al uso de las metodologías de desarrollo del grupo Radiogis para la implementación de terminales y servicios IoT, pero solo en función de los propósitos de la investigación.
- El prototipo y los estudios se limitan a la banda de 470-698 MHz.
- La base de datos contiene información ofrecida por la ANE con respecto al Plan Técnico de Televisión en su versión más reciente.
- El proceso de comunicación se lleva a cabo empleando protocolos de comunicación para sistemas IoT.
- Los dispositivos SDR usados son USRPs E310 suministrados por el Grupo de Investigación RadioGIS.
- Se dispondrá de un repositorio en GitHub donde se almacenarán los códigos y la información empleada para el desarrollo del proyecto, así como también se contará con un video explicativo del funcionamiento del sistema.

2. MARCO CONCEPTUAL

Este capítulo presenta las tecnologías utilizadas para crear el sistema de acceso a una base de datos de WS mediante un prototipo que emplea el protocolo PAWS. El objetivo de este capítulo es mostrar al lector una visión general acerca de las técnicas relacionadas con IoT y SDR.

2.1. EL INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

La necesidad de facilitar diferentes aspectos de la vida de las personas y mejorar su calidad de vida convergen en el desarrollo de nuevos dispositivos y tecnologías que necesariamente deben estar interconectados. El crecimiento de Internet expone una notable carencia de infraestructura de red y de facilidades para la comunicación que padece una gran parte de la población mundial. Es por esto que esta herramienta se está convirtiendo en un medio de conexión para máquinas, vehículos, accesorios y sensores promoviendo las bases para nuevas aplicaciones.

El término IoT se refiere a la conexión de dispositivos, sensores, objetos, habitaciones, máquinas, vehículos, entre otros a través de redes fijas e inalámbricas. Esas cosas pueden interactuar con el entorno y enviar información a otros objetos a través de una comunicación máquina a máquina (M2M). El IoT tendrá una fuerte influencia en la vida del ser humano al proponer soluciones con tecnología a problemas de carácter social, ambiental y productivo. Necesidades de apoyo para la educación tanto a niños y adolescentes como adultos y adultos mayores, eficientar procesos de almacenamiento y distribución de la energía, del agua, de alimentos, soluciones para edificios inteligentes¹, la supervisión con aplicaciones en salud², tanto del cuerpo humano como de las variables de interés como niveles de contaminación por ozono o dióxido de carbono entre otros, son algunas de las actividades que cada vez más se transformarán para hacerse más eficientes. Esto se traduce a la necesidad de mayor ancho de banda, tiempos de respuesta más rápidos, consumo de energía mínimo y bajos costos.

2.2. RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR)

SDR es una de las tecnologías emergentes más importantes en el futuro de los servicios de radiocomunicación. Es un sistema de radio que no depende de manera exclusiva de dispositivos físicos, incorporando diversas etapas cuyas acciones son ejecutadas por un sistema de cómputo reemplazando algunos circuitos que hacen parte de la composición de un equipo de radio por software capaz de llevar a cabo las mismas funciones³. SDR usa una clase reprogramable y configurable de dispositivos

¹COMMUNITIES, COMMISSION OF THE EUROPEAN. *Communication on future networks and the internet*. Inf. téc. Bruselas, 2008.

²Dohr, A y col. «The Internet of Things for Ambient Assisted Living». En: *2010 Seventh International Conference on Information Technology: New Generations*. 2010, págs. 804-809. DOI: 10.1109/ITNG.2010.104.

³Arslan, Hüseyin y Ahmed, Sadia. *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*. 2007, págs. 110-120. ISBN: 978-1-4020-5541-6. DOI: 10.1007/978-1-4020-5542-3. URL: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-1-4020-5542-3>.

que permite que un mismo equipo pueda adaptarse, mediante actualizaciones de software, como solución a una amplia gama de sistemas de comunicación. Una gran parte del procesamiento de las señales se realiza en procesadores de propósito general, en lugar de utilizar un hardware de propósito específico. Esta configuración permite cambiar los protocolos y formas de onda simplemente cambiando el software.

SDR esta comprometido en posibilitar el desarrollo de sistemas de radio que son multiservicio, multi-estándar, multi-banda, reconfigurables y reprogramables a través de software⁴ posibilitando configurar o manipular parámetros de algunos elementos del hardware como por ejemplo la frecuencia central, el ancho de banda, la amplificación y la frecuencia de muestreo. SDR está presente en el laboratorio de radio comunicaciones de la UIS, donde un mismo equipo de hardware es usado para estudiar sistemas de comunicaciones analogicos como la radiodifusion AM, FM, pero también los más sofisticados sistemas de comunicaciones digitales, también se han usado para el seguimiento de satélites y se esta buscando su uso como un laboratorio de radioastronomía. A partir de este concepto se han definido varias iniciativas públicas de radio por software como GNU Radio que es una herramienta de desarrollo libre y abierta que provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas de radio definida por software. Las aplicaciones de GNU Radio se construyen mediante un entorno gráfico GNU Radio Companion o mediante lenguaje de programación Python.

⁴Venosa, Elettra; Harris, Fredric J. y Palmieri, Francesco A.N. *Software Radio, Sampling Rate Selection, Design and Synchronization*. Springer, 2012, págs. 1-5. ISBN: 9781461401124. DOI: 10.1007/978-1-4614-0113-1.

3. ESTADO DEL ARTE

Con el pasar de los años, los avances en la CR han ido expandiéndose debido al uso cada vez más intensivo que viene experimentando el ERE. Considerando esto, es necesario desarrollar métodos de asignación de espectro que sean dinámicos y que operen aprovechando las características de reconfigurabilidad e inteligencia ofrecidas por las nuevas tecnologías de radio. La IR es un modelo capaz de aprender automáticamente pudiendo adaptarse al cambio en su funcionamiento o del entorno para satisfacer las necesidades del usuario. Estos sistemas soportan el acceso dinámico al espectro seleccionando frecuencias en las cuales pueden operar en una determinada ubicación geográfica, para una determinada aplicación y por un determinado periodo de tiempo evitando interferencias con otros dispositivos o sistemas¹.

A nivel internacional se han desarrollado avances en las tecnologías de TVWS como por ejemplo en India la creación de la primera base de datos para los TVWS, la implementación del PAWS para la comunicación entre hardware existente y la base de datos creada y el desarrollo de un prototipo capaz de interactuar con la base de datos sin causar interferencia en las bandas de UHF de televisión preguntando la disponibilidad de WS².

En Sudáfrica se implementó el protocolo PAWS junto con *JavaScript Object Notation* (JSON) para establecer una comunicación entre una base de datos del espectro geolocalizada (GSDB) y dispositivos para los WS como decodificadores para que puedan tomar decisiones óptimas sobre los canales de televisión digital haciendo de estos no solo un centro de entretenimiento residencial con la única función de sintonizar y decodificar canales de audio y video sino que los convierte en un centro de computación inteligente capaz de desenvolver varias aplicaciones modernas y avanzadas tales como navegar en internet. El gobierno sudafricano accedió a subsidiar áreas rurales con decodificadores de televisión digital e implementar con estos el protocolo PAWS junto con el JSON para que puedan comunicarse con la GSDB³.

En países como Estados Unidos o el Reino Unido los WSD ya son comunes en los usuarios de internet y su regulación está muy avanzada. Empresas como Google y Microsoft han visto en el espectro electromagnético y en la CR una oportunidad de expansión comercial. Microsoft por ejemplo está trabajando en una base de datos de WS para diferentes países⁴, entre estos está Colombia, y junto con Google hacen parte de una alianza global estratégica con diferentes empresas proveedoras de equipos y servicios de internet, DSA, encargada de abogar por leyes y regulaciones que lleven a un uso más eficiente y efectivo del espectro.

En México el estudio de los espacios blancos se encuentra en desarrollo, en⁵ se

¹Cognitive Radio Working Group. *Cognitive radio definition and nomenclature*. September. 2008. URL: http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-P-0009-V1_0_0_CRWG_Defs.pdf.

²Ghosh, Soumik y col. «OpenPAWS: An open source PAWS and UHF TV White Space database implementation for India». En: *2015 21st National Conference on Communications, NCC 2015* (2015). DOI: 10.1109/NCC.2015.7084890.

³Ntuli, Elesia; Ngwira, Seleman y Zuva, Tranos. «Implementing Protocol to Access White-Space databases on smart set-Top box». En: *2015 International Conference on Computing, Communication and Security, ICCCS 2015* (2016), págs. 1-5. DOI: 10.1109/CCCS.2015.7374147.

⁴MICROSOFT. *White Spaces Database*. 2015. URL: whitespaces.microsoftspectrum.com/.

⁵Vargas, Cesar. *La Explotación de Espacios Blancos de Televisión en México*. 2016, págs. 1-29.

presenta una propuesta de sistema de radio cognitivo que puede ser utilizada para la explotación de los TVWS. Esto demuestra que los gobiernos están reestructurando sus recursos espectrales con el fin de ofrecer mejor servicio, incrementar e impulsar el desarrollo económico y social de sus países por lo cual han decidido implementar estrategias y políticas para la liberación de espectro que den solución al actual estado de saturación.

El uso de los WSD ya es un hecho en el país y es necesario tener un control sobre estos para que no haya un inadecuado uso de las frecuencias libres. Actualmente, Colombia ya cuenta con un posicionamiento internacional en el trabajo con la CR y específicamente en WS, ya que es el primer país en Latinoamérica en crear leyes y regulaciones que llevan a un uso más eficiente y efectivo de estos y por consiguiente del ERE. En los últimos años, la Agencia Nacional del Espectro ANE, ha intensificado sus estudios para impulsar el uso eficiente del espectro. En la resolución 461 del 1 de agosto del 2017⁶ la ANE propuso unas condiciones para el uso de los WSD en Colombia las cuales fueron bien acogidas y bienvenidas por parte de la DSA de acuerdo a un comunicado escrito el 29 de agosto del mismo año en el que señalan que el país es el primero en Latinoamérica en finalizar su regulación de TVWS⁷. Esta norma establece condiciones especiales para la operación de los WSD. De modo que estos dispositivos deben cumplir una serie de especificaciones técnicas y la necesidad de registrarse en una plataforma de software de la ANE.

⁶ANE, /Agencia Nacional del Espectro. *Resolución 461 de 2017*. 2017. URL: https://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Normatividad/Planeacion_del_espectro/Resolucion461de2017.pdf.

⁷Dynamic Spectrum Alliance. *Dynamic Spectrum Alliance welcomes final regulation on TV White Space from Colombia 's Agencia Nacional del Espectro (ANE)*. 2017. URL: <https://www.realwire.com/releases/Dynamic-Spectrum-Alliance-welcomes-final-regulation-on-TV-White-Space>.

4. PROTOCOLO PARA EL ACCESO A ESPACIOS BLANCOS EN LA TELEVISIÓN DIGITAL

Se denomina espacio blanco a aquella porción del ERE ya licenciado que está disponible para su uso sin el riesgo de producir alguna interferencia. La banda asignada a la televisión digital deja espacios entre sus áreas naturales de cobertura para evitar interferencias permitiendo el uso de estos espacios para otras funciones. Este es básicamente el principio sobre el que se soporta la CR para hacer uso eficiente del espectro. El ERE se está convirtiendo en un activo cada vez más importante en las redes inalámbricas de telecomunicación. La forma en la que el ERE puede usarse en diferentes tecnologías y servicios hace que este recurso se vea aún más congestionado. Una de estas aplicaciones es el uso de WSD por parte de usuarios secundarios.

Es por esto que se estableció un protocolo denominado Protocolo para acceder a los WS (PAWS)¹ mediante el cual los dispositivos obtienen permisos para la transmisión de internet de alta velocidad logrando la interoperabilidad con múltiples dispositivos y bases de datos.

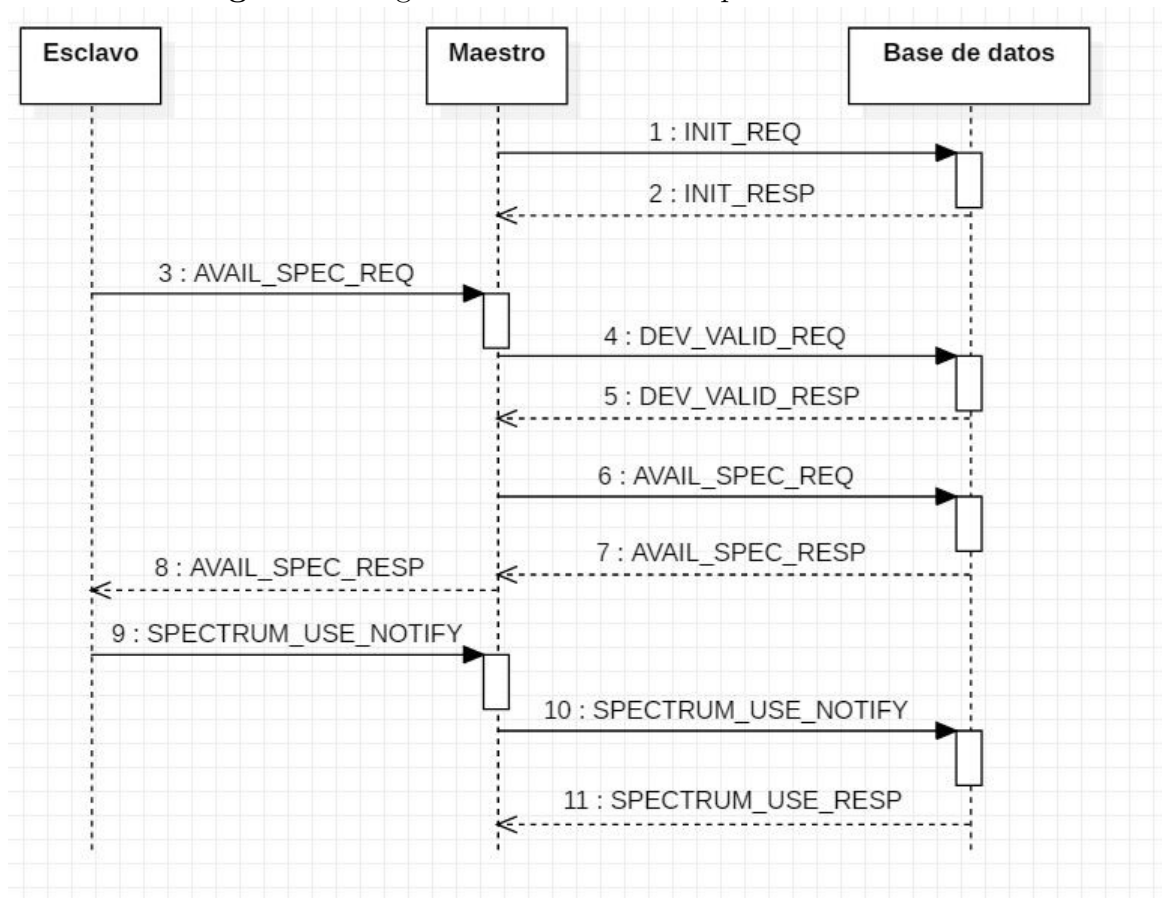
Este protocolo es una secuencia de pasos representados en la Figura 1 que deben realizarse para el correcto funcionamiento del sistema.

1. Durante el Bootstrapping o proceso de arranque, el dispositivo Maestro descubre el URL de la base de datos.
2. El dispositivo Maestro establece una sesión a través de HTTP con la base de datos.
3. El mensaje opcional de inicialización es enviado a la base de datos. `INIT_REQ`.
4. La base de datos responde al dispositivo Maestro con un mensaje de inicialización. `INIT_RESP`.
5. Los dispositivos que quieran hacer uso de los WS deben estar registrados en la base de datos, para ello se envía una solicitud de registro. `REGISTRATION_REQ`.
6. La base de datos registra el dispositivo y envía una respuesta. `REGISTRATION_RESP`.
7. Una vez el procedimiento de registro se ha completado, el dispositivo Esclavo solicita al Maestro una lista con los canales disponibles. `AVAIL_SPECTRUM_REQ`.
8. El dispositivo Maestro debe comprobar con la base de datos si el dispositivo Esclavo es válido para operar. Esto mediante la solicitud de validación. `DEV_VALID_REQ`.
9. Al comprobar que el dispositivo Esclavo está registrado y tiene los permisos para operar, la base de datos retorna al dispositivo Maestro un mensaje indicando que sí es un dispositivo válido. `DEV_VALID_RESP`.

¹Chen, V y col. *Protocol to Access White-Space (PAWS) Databases*. 2015. URL: <https://tools.ietf.org/pdf/rfc7545.pdf>.

10. El dispositivo Maestro procede a hacer la consulta de los canales disponibles en nombre del dispositivo Esclavo. `AVAIL_SPECTRUM_REQ`.
11. La base de datos envía una lista de canales disponibles al dispositivo Maestro. `AVAIL_SPECTRUM_RESP`.
12. El dispositivo Maestro envía el mensaje al esclavo con los canales disponibles. `AVAIL_SPECTRUM_RESP`.
13. Si se requiere usar un canal disponible el dispositivo Esclavo envía al Maestro una notificación con el canal seleccionado. `SPECTRUM_USE_NOTIFY`.
14. El dispositivo Maestro remite el mensaje a la base de datos para informar el canal que se va a usar. `SPECTRUM_USE_NOTIFY`.
15. La base de datos actualiza su estatus ocupando el canal seleccionado para uso del PAWS. Opcionalmente informa al dispositivo Maestro sobre esta modificación. `SPECTRUM_USE_RESP`.

Figura 1: Diagrama de secuencia del protocolo PAWS.



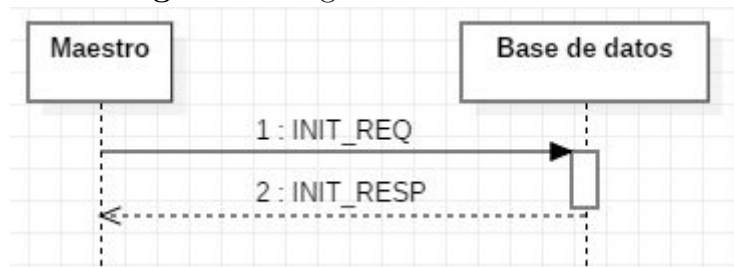
4.1. SECUENCIA DEL PROTOCOLO PAWS

Un protocolo es una serie de reglas o instrucciones que deben ser ejecutadas para lograr el correcto desarrollo de una actividad. En el caso del protocolo para el acceso a WS, estas instrucciones deben cumplirse para el correcto funcionamiento del sistema además de posibilitar la administración y el control de cada dispositivo para evitar un mal uso del espectro electromagnético.

Cada uno de estas instrucciones contiene información importante que es necesaria para el cumplimiento del protocolo. A continuación se explicarán cada uno de los requerimientos enviados por los WSD y las respectivas respuestas de la base de datos.

4.1.1. inicialización Un dispositivo maestro utiliza el procedimiento de inicialización presentado en la Figura 2 para iniciar el intercambio de información con la base de datos siempre que el dispositivo maestro encienda. La respuesta de inicialización informa al dispositivo maestro un conjunto de valores parametrizados específicos como las distancias a las que puede operar y los períodos de tiempo durante el cual los datos de espectro disponibles serán válidos.

Figura 2: Diagrama de inicialización.



Al establecer el enlace con la base de datos, el dispositivo maestro envía el requerimiento de inicialización `INIT_REQ` para así poder intercambiar información con la base de datos. Este mensaje contiene dos parámetros: descripción del dispositivo y su geolocalización. La descripción contiene parámetros que identifican a cada dispositivo específico. El número de serie, la identificación del fabricante, y cualquier otra característica única del dispositivo están contenidos en el device descriptor. La ubicación del dispositivo es indispensable debido a que la disponibilidad de WS cambia respecto a la localización.

Cuando la base de datos recibe un mensaje de inicialización, esta debe retornar una respuesta a este mensaje `INIT_RESP`. Esta respuesta contiene unos valores ya establecidos para el correcto funcionamiento del sistema como el tiempo en el que los datos de los canales disponibles son válidos ya que esta información puede cambiar con el tiempo, y la distancia a la cual puede transmitir para así evitar interferencias con otras aplicaciones.

4.1.2. registro Para poder hacer uso de los TVWS, los WSD deben estar previamente registrados en la plataforma encargada de su gestión y control. Esta acción

presentada en la Figura 3 es obligatoria y al realizarse se retorna un mensaje de respuesta indicando que el dispositivo ha sido registrado exitosamente.

Figura 3: Diagrama de registro.

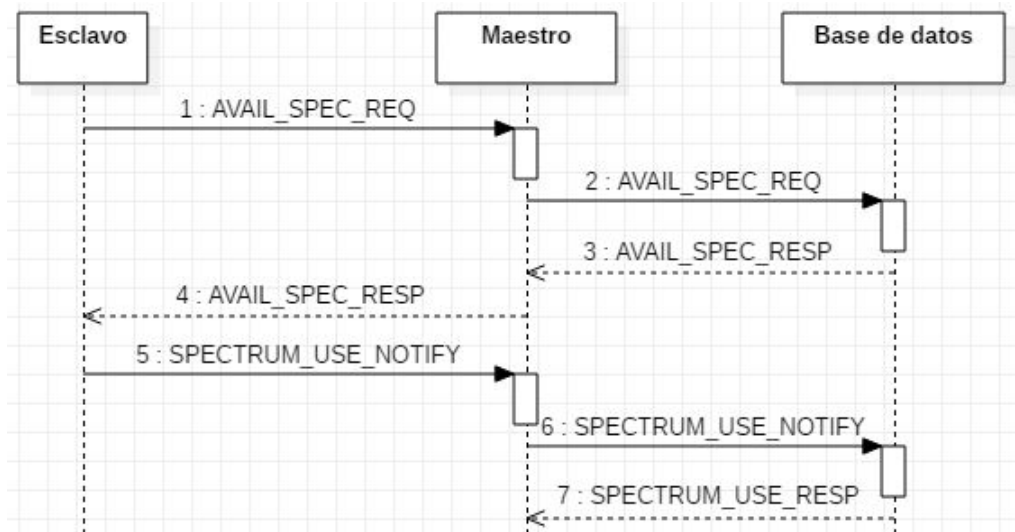


El requerimiento de registro `REGISTRATION_REQ` permite al servidor conocer la descripción del dispositivo pero además contiene información importante para tener seguimiento del uso y operación del mismo. Este mensaje además de contener los mismos parámetros que el requerimiento de inicialización `INIT_REQ`, incluye la información de la persona encargada del dispositivo bien sea el dueño o quien esta a cargo de su operación.

Al momento de haber realizado el registro del dispositivo en la base de datos, esta retorna un mensaje indicando que el procedimiento fue realizado exitosamente `REGISTRATION_RESP`.

4.1.3. consulta de canales disponibles La consulta de canales disponibles puede hacerla tanto un dispositivo maestro como un dispositivo esclavo, solo que este último debe hacerlo através del dispositivo maestro para obtener esa información. Este proceso se ilustra en la Figura 4.

Figura 4: Diagrama de consulta de canales disponibles.



El requerimiento de espectro disponible `AVAIL_SPECTRUM_REQ` es la solicitud realizada por un dispositivo maestro para conocer la disponibilidad de frecuencias, este requerimiento puede ser también en nombre de un dispositivo esclavo, es por esto que la geolocalización del dispositivo que hace la petición debe estar contenida dentro del

mensaje ya que la información de canales disponibles puede cambiar dependiendo de este parámetro.

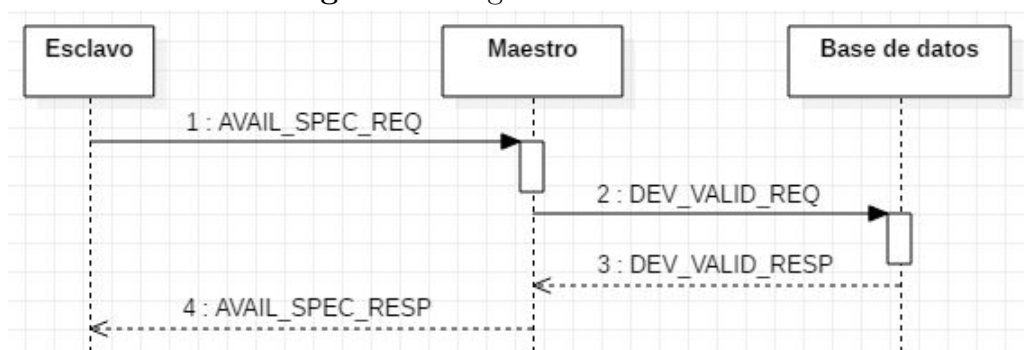
La información de frecuencias que no están siendo ocupadas en el espectro destinado a la televisión digital es enviada en el mensaje de respuesta `AVAIL_SPECTRUM_RESP`. Los parámetros contenidos en este mensaje son: una marca de tiempo en la cual se define el periodo en que el WSD va a operar, la descripción del dispositivo y la lista de las frecuencias disponibles, la especificación de ancho de banda de cada canal y la ventana de tiempo en la que la información de frecuencias libres estará vigente antes de volver a realizar un nuevo requerimiento de espectro disponible `AVAIL_SPECTRUM_REQ`.

Luego, la notificación del canal seleccionado `SPECTRUM_USE_NOTIFY` sirve para informar a la base de datos cuál canal será ocupado por el dispositivo durante la transmisión. Sus parámetros son: la descripción del dispositivo, su geolocalización y una lista con los canales que serán ocupados por el WSD. Esta lista puede contener uno o varios elementos.

El mensaje de respuesta `SPECTRUM_USE_RESP` lo envía la base de datos simplemente para informar que la lista de canales disponibles se ha actualizado ocupando el o los canales seleccionados por el WSD. Es un mensaje únicamente informativo por lo que es opcional.

4.1.4. validación de dispositivos esclavos Un dispositivo esclavo necesita de un dispositivo maestro para solicitar a la base de datos el espectro disponible. Dependiendo del conjunto de reglas, el dispositivo maestro consulta a la base de datos con el fin de conocer si el dispositivo esclavo puede operar. La Figura 5 ilustra la secuencia de validación.

Figura 5: Diagrama de validación.



El requerimiento de validación `DEV_VALID_REQ` enviado por el dispositivo maestro contiene una lista con las descripciones de cada uno de los dispositivos esclavos que quiera validar.

La base de datos retorna un mensaje de respuesta `DEV_VALID_RESP` con una lista que contiene las descripciones de cada dispositivo esclavo por el cual fue preguntada y una especificación de si es o no válido para operar.

4.2. DISPOSITIVO DE ESPACIOS BLANCOS (WSD)

Un dispositivo que utiliza los WS del ERE se denomina Dispositivo de Espacios Blancos (WSD)². Estos dispositivos están diseñados para operar en bandas de frecuencia subutilizadas del ERE en aplicaciones diferentes a las licenciadas conocidas también como servicios secundarios. Las ventajas ofrecidas por el uso de estos WS los hace muy atractivos para los servicios de comunicación. Este es el caso de los TVWS, que por sus condiciones de propagación son usados en la transmisión de internet de banda ancha.

Los WSD se dividen en dos categorías: dispositivo maestro y dispositivos esclavos. El dispositivo maestro es el que se comunica directamente con la base de datos encargada de gestionar los WS y los WSD solicitando los parámetros y las frecuencias disponibles para una determinada ubicación geográfica. El dispositivo esclavo debe apoyarse en el dispositivo maestro para obtener esta información. Un dispositivo maestro puede establecer comunicación e intercambiar mensajes con varios dispositivos esclavos.

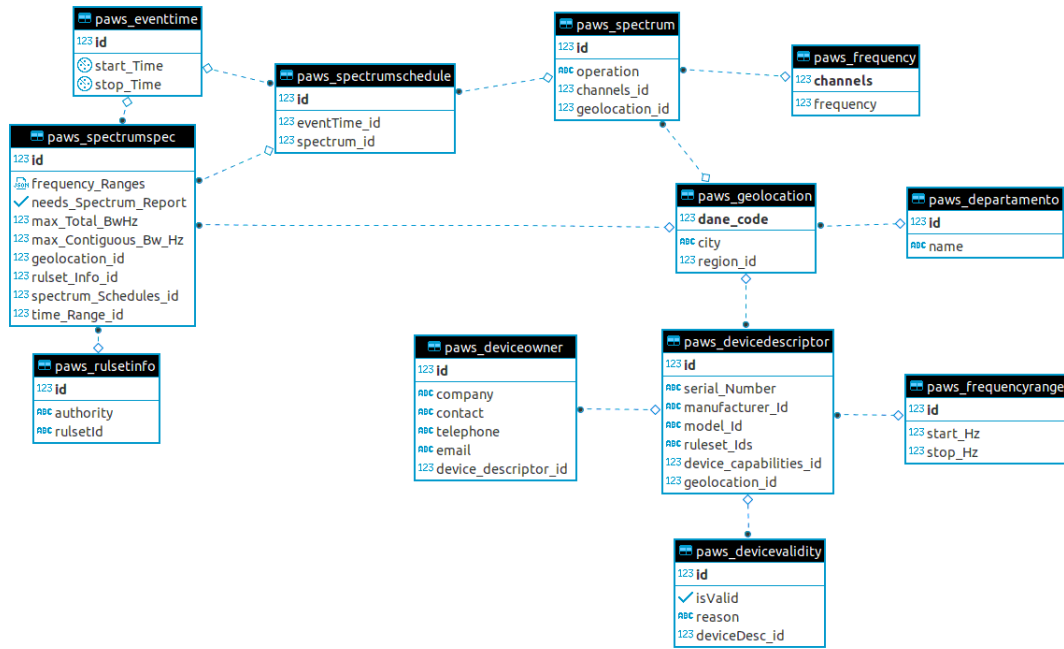
El prototipo de terminal IoT desarrollado en este proyecto es un WSD que opera en la banda de TV digital y que utiliza los TVWS para transmitir información que no necesariamente es internet. Este WSD se limita al proceso de comunicación empleando el protocolo PAWS con una base de datos desarrollada para almacenar y gerenciar la información mínima suficiente para el funcionamiento del sistema.

²Sachdev, Tanvi; Gandhi, Bani y Jadon, Jitendra Singh. «Interconnectivity of a Master and a Slave white space device under the control of a TVWSDB». En: *Proceedings of the 2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering, Confluence 2016* (2016), págs. 571-574. DOI: 10.1109/CONFLUENCE.2016.7508184.

5. DISEÑO DE LA BASE DE DATOS PAWS

Para el diseño de la base de datos además de tener en consideración la información que contiene cada mensaje del protocolo PAWS y las pautas especificadas para el adecuado uso de los WSD, también se tuvo en cuenta la información del plan técnico de televisión expuesto por la ANE en su versión más reciente en el que se describen qué canales de televisión digital están ocupados y en qué consiste el uso de los mismos en cada uno de los municipios del país identificados de acuerdo al DANE con un código único.

Figura 6: Diagrama del modelo de la base de datos.



Con el fin de que la información contenida en la base de datos estuviese lo más organizada posible y su acceso fuese lo más simple posible, fue necesaria la composición de tablas relacionadas entre sí por algún campo, por ejemplo, la tabla en la que se almacena la información y los datos de contacto del responsable de un WSD contiene la identificación del dispositivo cuya descripción se encuentra en otra tabla en la que se almacena el número de serie, el modelo, la información del fabricante, su ubicación, etc. A este modelo de bases de datos que se ilustra en la Figura 6 se les conoce como relacionales en la que cada fila de una tabla se le asigna un identificador único denominado clave principal y es este el que se encuentra en las demás tablas con información relacionada a ese campo.

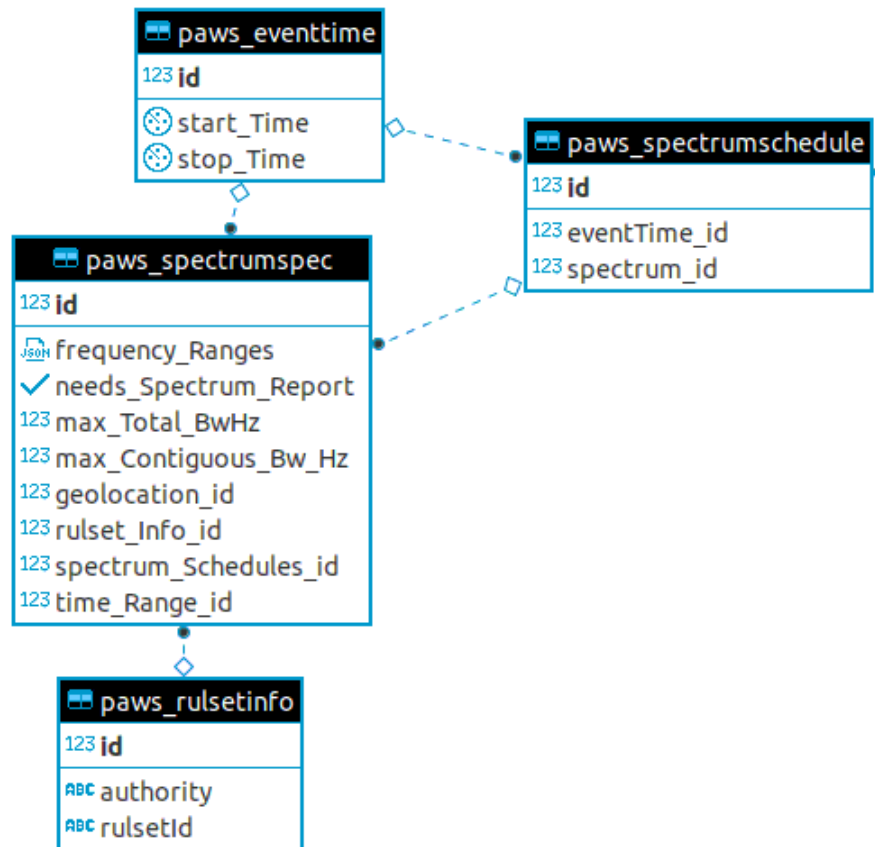
Para acceder a la información en las bases de datos es necesario utilizar un lenguaje de consulta o de manipulación de datos, con este se puede modificar, borrar, mostrar y agregar datos en una base de datos, también pueden utilizarse como origen de registro para formularios. El lenguaje de consulta a base de datos más utilizado es SQL. Para el desarrollo de la base de datos se empleó PostgreSQL que es un sistema de gestión de bases de datos orientadas a objetos y/o relacionales, este permite desarrollar bases de datos robustas y eficientes.

5.1. LLENADO DE LA BASE DE DATOS

El modelo de la base de datos se puede dividir en tres subgrupos: la información de las reglas PAWS, la información del dispositivo y la información del plan técnico de televisión de la ANE.

5.1.1. información de las reglas paws De acuerdo con el protocolo PAWS, existen una serie de parámetros que según las regulaciones adoptadas por cada país deben cumplirse. Por tal motivo en la resolución 461 del 2017 de la ANE¹ se determinan las condiciones técnicas y operativas para la utilización de los WSD. Algunos de estos parámetros son previamente configurados en la base de datos como por ejemplo el periodo de tiempo durante el cual la información de las frecuencias libres será válida o el máximo ancho de banda que un WSD puede utilizar, y los demás se van almacenando cada vez que un nuevo WSD se registre en la base de datos. Este subgrupo es representado por las tablas presentadas en la Figura 7.

Figura 7: Diagrama del modelo del subgrupo información de las reglas PAWS.

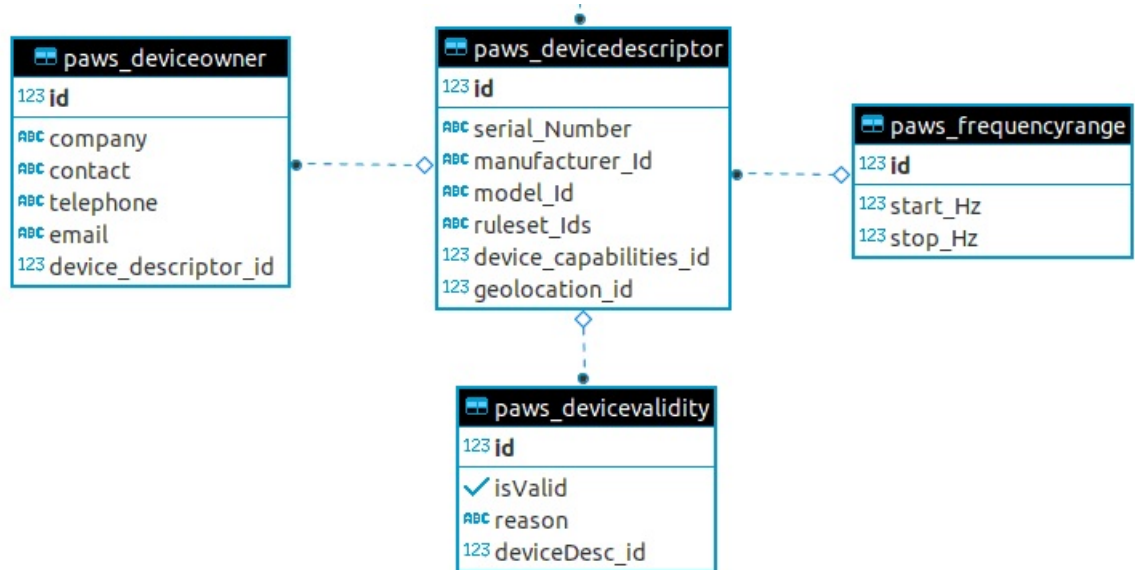


5.1.2. información del dispositivo Los campos de la información del dispositivo se van almacenando a medida que un nuevo WSD entre en operación.

¹ANE, *Resolución 461 de 2017*, óp.cit.

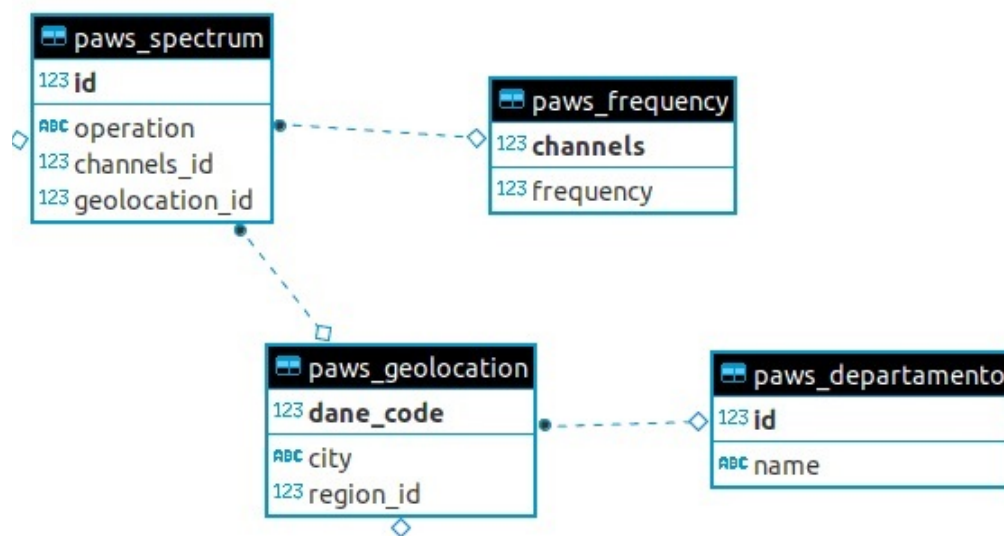
Las cabeceras principales de este subgrupo son las especificaciones técnicas del dispositivo y los datos de contacto del responsable de su operación. En este subgrupo ilustrado en la Figura 8 se incluyen los datos que describen al WSD como su número de serie, el modelo del dispositivo y la identificación del fabricante también se almacena la ubicación geográfica en donde el dispositivo estará en funcionamiento, sus capacidades técnicas como el rango de frecuencias en las que puede operar, además de los datos de contacto e identificación de la persona encargada del WSD, entre otros.

Figura 8: Diagrama del modelo del subgrupo información del dispositivo.



5.1.3. información plan técnico de televisión Para almacenar los datos correspondiente al plan técnico de televisión fue necesario separar la información en cuatro tablas relacionadas entre sí como se expone en la Figura 9. La primera corresponde a los departamentos. En ella se relaciona cada departamento de Colombia con un código de identificación. En la segunda tabla se almacenan los datos de geolocalización. En esta tabla se relacionan todos los municipios y su respectivo código DANE con el código asignado a cada departamento. La tercera tabla relaciona los canales que se transmiten en cada municipio con el respectivo código DANE que los identifica y en qué actividad es ocupado cada canal. Finalmente la última tabla relaciona cada uno de los canales con su frecuencia correspondiente en la banda de televisión.

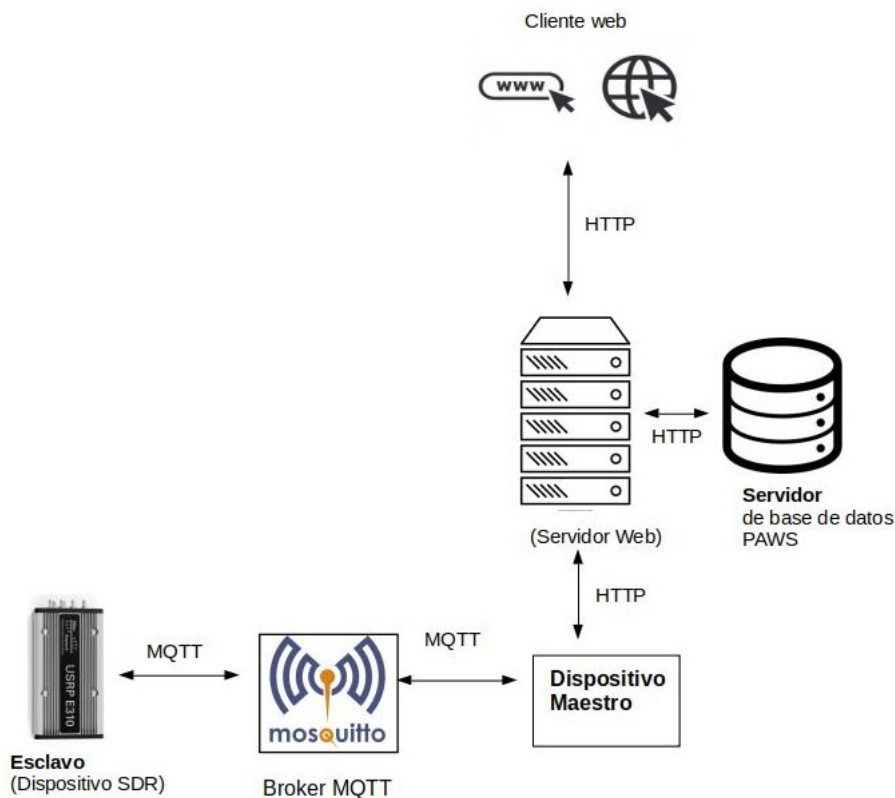
Figura 9: Diagrama del modelo del subgrupo información del plan técnico de televisión.



6. DISEÑO DEL MODELO DE COMUNICACIÓN

En el modelo que se observa en la Figura 10, se presenta el uso de dos protocolos de comunicación cuyo uso fue necesario para la correcta ejecución del proyecto. Estos son el Protocolo de Transferencia de Hipertexto HTTP y el protocolo MQTT¹². La función de estos protocolos será explicada detalladamente más adelante. La implementación PAWS tendrá dos componentes, uno será ejecutado en el dispositivo esclavo y el otro en la base de datos.

Figura 10: Diagrama del modelo de comunicación.



6.1. PROTOCOLO DE TRANSFERENCIA DE HIPERTEXTO (HTTP)

El protocolo de transferencia de hipertexto, HTTP³ del inglés Hypertext Transfer Protocol, sigue el esquema petición-respuesta entre un cliente y un servidor. El

¹Naik, Nitin. «Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP». En: *2017 IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2017 - Proceedings* (2017). DOI: 10.1109/SysEng.2017.8088251.

²Yokotani, Tetsuya y Sasaki, Yuya. «Comparison with HTTP and MQTT on required network resources for IoT». En: *ICCEREC 2016 - International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy, and Communications 2016, Conference Proceedings* (2017), págs. 1-6. DOI: 10.1109/ICCEREC.2016.7814989.

³Fielding, R y col. *Hypertext Transfer Protocol HTTP*. 1999. URL: <https://tools.ietf.org/rfc/rfc2611>.

cliente realiza una petición enviando un mensaje, con cierto formato al servidor y el servidor le envía un mensaje de respuesta.

Para realizar solicitudes a un servidor por medio del protocolo HTTP se usan una serie de métodos que vienen previamente definidos, los cuales le indican al servidor cual es la acción que se desea realizar, a estos métodos también se les conoce como verbos HTTP.

1. Método **GET**: Este método se utiliza cuando se necesita adquirir un archivo o recurso que se encuentra en un servidor web. Este método devuelve tanto las cabeceras que contienen los metadatos del recurso solicitado y el recurso en sí.
2. Método **HEAD**: Este método realiza una acción similar al método **GET** solo que a diferencia de este, **HEAD** solo solicita los metadatos de un recurso o archivo y no todo elemento como tal.
3. Método **POST**: Este método se usa cuando se necesita enviar información o un elemento al servidor y que lo enviado sea almacenado como un subelemento de un elemento o recurso ya existentes en el servidor. Este método se usa para enviar información a un recurso web del servidor mas no para cargar/crear un elemento nuevo como tal. Este tipo de método se usa principalmente en el envío de formularios que se encuentran en las páginas web.
4. Método **OPTIONS**: Sirve para averiguar qué métodos HTTP soporta el servidor web con respecto a un recurso en concreto.
5. Método **PUT**: Crea un nuevo recurso en el servidor, o en caso de que el objeto ya exista, reemplaza el recurso existente con el nuevo recurso.
6. Método **DELETE**: Este método le solicita al servidor web que se borre un recurso en específico.
7. Método **TRACE**: Este método permite monitorear los mensajes que hay entre el cliente y el servidor web. Principalmente se usa con propósitos de diagnósticos de fallas o para revisar si existen servidores intermediarios en la conexión.
8. Método **CONNECT**: Este método se utiliza para solicitar una conexión de tipo túnel TCP/IP. Principalmente se utiliza cuando se necesita utilizar un proxy para una conexión segura cifrada HTTPS o para comunicaciones vía Secure Sockets Layer, SSL.

El protocolo HTTP también describe una serie de códigos que especifican el estado de cada petición realizada. Estos códigos, también llamados códigos de respuesta, son usados para determinar si una petición ha podido desarrollarse exitosamente o si son necesarias más acciones para completar el proceso. El código de respuesta o retorno es un número que indica que ha pasado con la petición.

El primer dígito del código de estado especifica uno de los cinco tipos de respuesta que pueden ser respuestas informativas, respuestas satisfactorias, redirecciones, errores causados por los clientes y errores causados por los servidores.

1. **1xx**: Respuestas informativas. Indica que la petición ha sido recibida y se está procesando.
2. **2xx**: Respuestas correctas. Indica que la petición ha sido recibida correctamente, entendida y aceptada.
3. **3xx**: Respuestas de redirección. Indica que el cliente necesita realizar más acciones para finalizar la petición.
4. **4xx**: Errores causados por el cliente. Indica que ha habido un error en el procesamiento de la petición a causa de que la petición contiene una mala sintaxis o no puede ser completada.
5. **5xx**: Errores causados por el servidor. Indica que ha habido un error en el procesamiento de la petición a causa de un fallo en el servidor.

El código de respuesta de estado satisfactorio 200 OK que se aprecia en cada una de las peticiones realizadas en la prueba de funcionamiento indica que las solicitudes han tenido éxito.

6.2. JAVA SCRIPT OBJECT NOTATION (JSON)

En la actualidad, JSON es utilizado por la mayoría de los servicios web para el envío y recepción de datos debido a que es un formato de texto ligero desarrollado para ese fin. El formato JSON es similar a la sintaxis de Python conteniendo únicamente dos tipos de estructuras, los diccionarios, también conocidos como objetos y las listas, también conocidas como vectores, que no son más que un conjunto ordenado de objetos.

Los diccionarios se indican al contener los valores de una variable en llaves “{ }” y dentro de estos se pueden declarar cualquier número de propiedades mediante un emparejamiento de la forma “variable : valor” separados por comas.

6.3. PROTOCOLO MQTT

MQTT es un protocolo para conectividad IoT/M2M, este protocolo es ligero y basa su transporte de mensajes como publicador/suscriptor⁴. El dispositivo publicador envía el mensaje al broker a través de un tópico, el dispositivo o los dispositivos que deseen recibir el mensaje del publicador se suscriben al tópico utilizado por el publicador⁵. Los tópicos son identificadores en los que se suscriben los dispositivos para establecer comunicación M2M, o enviar un mensaje de difusión, los tópicos son strings que tienen una estructura jerárquica separada por /, por ejemplo: “UIS/PAWS”.

⁴Naik, «Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP», óp.cit.

⁵Nikolov, Neven. «Research of the Communication Protocols between the IoT Embedded System and the Cloud Structure». En: *2018 IEEE 27th International Scientific Conference Electronics, ET 2018 - Proceedings* (2018), págs. 1-4. DOI: 10.1109/ET.2018.8549604.

Esta comunicación se realiza a través de un *Broker* MQTT que es el núcleo de la comunicación entre terminales IoT y servidor web. Este mantiene la conexión constante credireccionando la comunicación entre los diferentes terminales junto y el servidor web.

6.4. SERVIDOR WEB CENTROTIC

Figura 11: Servidor Web CENTROTIC.



El servidor web llamado CENTROTIC donde se encuentra incluido este proyecto, Figura 11, cuyo URL es: <http://35.243.199.245/>, fue desarrollado utilizando el software Apache. Este software de código abierto permite establecer una conexión entre el servidor y los navegadores web (estructura cliente-servidor). El servidor y el cliente se comunican a través del protocolo HTTP y el software Apache se encarga de garantizar una comunicación fluida entre ambas partes.

Esta plataforma almacena y administra la información del espectro y de los dispositivos ya que contiene la base de datos creada para este fin y recibe las peticiones enviadas por el dispositivo maestro. Además tiene la ventaja de ser accesible por un usuario de WSD brindándole la posibilidad de conocer el estatus de su dispositivo, poder acceder a la lista de canales que están siendo usados en varias regiones de Colombia y, con unas credenciales, permitirse el registro de nuevos dispositivos.

6.5. TERMINAL IOT

Un terminal IoT hace referencia a un dispositivo que tienen todos los recursos necesarios para conectarse y ser reconocido por la capa de gestión de dispositivos. Los terminales IoT son representados usualmente por equipos SDR dotados conectividad WiFi y/o Ethernet y que ha sido complementado con software embebido para soportar el protocolo de comunicación de IoT (MQTT). Un terminal IoT está orientado hacia un problema particular de una aplicación IoT.

6.5.1. características de los dispositivos sdr Los dispositivos SDR usados en el presente trabajo pueden ser vistos como sensores y a la vez como actuadores sobre el ERE. Además cuentan con conectividad IP mediante Ethernet y WiFi, así como con la posibilidad de convertirse en un terminal IoT propiamente dicho.

El dispositivo Esclavo que se usará es el USRP E310⁶, cuyas características se resumen en la Tabla 1, tiene integrado OpenEmbedded Linux, que son imágenes creadas a partir del proyecto Yocto Linux⁷. Este sistema operativo provee herramientas de red, sistema de GPS, procesamiento de señales a partir de GNURadio, C++ y Python.

Tabla 1: Características generales del equipo SDR.

USRP E310	
Xilinx Zynq 7020 SoC	ARM Cortex A9 866 MHz con FPGA
Banco de filtros RF	Tx, Rx
UHD	V3.9.1
RFNoC	Si
Audio Jack	Si
2x2 MIMO transceiver	Si
Rango de frecuencias (Rx)	70 MHz - 6 GHz
Rango de frecuencias (Tx)	47 MHz - 6 GHz
Ancho de banda instantáneo (AD9631 RFIC)	56 MHz
SO	OpenEmbedded Linux, basado en el proyecto YOCTO Linux
Máxima potencia de entrada (Rx)	0 dBm
Máxima potencia de salida (Tx)	15 dBm

⁶Ettus Research. *USRP E310*. URL: <https://www.ettus.com/all-products/e310/>.

⁷Yocto Project. *Yocto Project The Ecosystem*. URL: <https://www.yoctoproject.org/ecosystem/>.

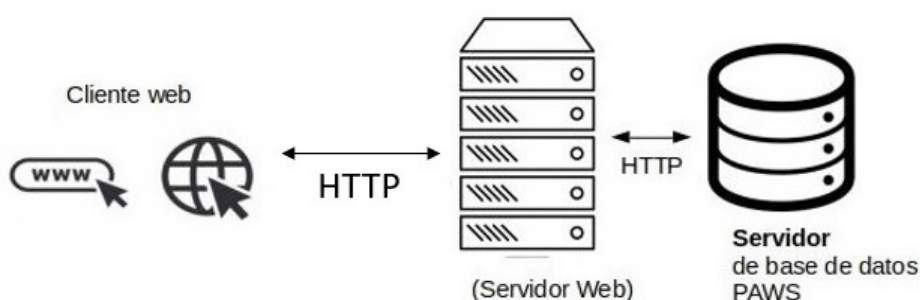
7. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El modelo descrito en la Figura 10 exhibe tres caminos por los que se efectúan intercambio de mensajes, la comunicación entre un usuario o cliente y el servidor, la comunicación entre el dispositivo maestro y el servidor y la comunicación entre el dispositivo esclavo y el dispositivo maestro. Estas interacciones serán explicadas detalladamente a continuación.

7.1. COMUNICACIÓN CLIENTE-SERVIDOR WEB

Esta interacción presentada en la Figura 12 consiste en los métodos GET y POST del protocolo HTTP para realizar las diferentes solicitudes al servidor.

Figura 12: Diagrama de comunicacion HTTP entre el cliente y el servidor web.



7.1.1. canales ocupados por regiones Cuando el usuario está interesado en conocer los canales pertenecientes a la banda de frecuencias asignada a la televisión digital que están siendo ocupados en un momento determinado debe acceder a la URL del servidor `http://35.243.199.245/paws/index` y allí a la opción “canales ocupados por regiones”. Este requerimiento usa el método GET y el servidor retorna una ventana en la que se debe seleccionar la ciudad de la que se quiere obtener información. Al momento de hacer click en el botón “Consultar”, se envía una solicitud con el método POST y el servidor retorna una tabla informativa de los canales que en ese momento están siendo ocupados. En la Figura 13 se observa la interfaz web para realizar esta consulta.

Figura 13: Interfaz de consulta de canales por regiones.

Canales ocupados en ()

Seleccione Región
Escoger la ciudad donde quiere ver los canales ocupados. Este proceso se realiza de manera ilustrativa para que un usuario pueda ver el cambio actual en la base de datos.

Geolocation

Consultar

Request URL: http://34.74.6.16/paws/canales-regiones
Request Method: GET
Status Code: 200 OK

Canales ocupados en Bucaramanga (Santander)

# Canal	Operación
25	Local con ánimo de lucro
17	Regional público
16	Nacional público
15	Nacional privado
14	Nacional privado
19	Nacional privado futuro

Request URL: http://34.74.6.16/paws/canales-regiones
Request Method: POST
Status Code: 200 OK

7.1.2. registro de dispositivos Para poder registrar WSD es necesario que el cliente ingrese un usuario y contraseña para que el servidor le habilite la opción “Registrar SDR esclavos”. Esto se realiza accediendo a la opción “INGRESAR” que envía una solicitud con el método GET y el servidor retorna la ventana de autenticación. Al momento de acceder al servidor, se envía una solicitud con el método POST con los datos de autenticación del usuario y el servidor retorna una ventana con todos los permisos disponibles para realizar el registro de dispositivos. Al hacer click en la opción “Registrar SDR esclavos” se envía una solicitud con el método GET y el servidor retorna un formulario de registro requiriendo información del dispositivo, datos de contacto de la persona que lo vaya a usar así como también la razón por la cuál se está registrando y en qué actividad se va a emplear determinando así la validez del dispositivo. Una vez completado el formulario de registro, al hacer click en el botón “Registrar Dispositivo” se hace uso del método POST enviando esta información a la base de datos del servidor para que sea almacenado y el servidor retorna una tabla informativa anunciando que el proceso de registro fue exitoso. Tanto el formulario como la información de que el registro fue exitoso se presentan en la Figura 14.

Figura 14: Interfaz de registro de dispositivos.

Registro de dispositivos esclavos
Recomendaciones para el registro de esclavos

Descripción del dispositivo
 Serial Number:
 Manufacturer Id:
 Model Id:
 Ruleset Ids:

Información del responsable
 Company:
 Contact:
 Telephone:
 Email:

Rango de frecuencias del dispositivo
 Start Hz:
 Stop Hz:
Registrar Dispositivo

Request URL: http://34.74.6.16/paws/register
Request Method: GET
Status Code: 200 OK

Request URL: http://34.74.6.16/paws/register
Request Method: POST
Status Code: 200 OK

Registro exitoso de dispositivo

REGISTRATION_RESP	Información
Número Serial	e310-f5ab-ao03
Modelo	E310
Reglas de operación	PAWS
Responsable	Mario
Teléfono	3168306450

7.1.3. consulta de dispositivos registrados El cliente también tiene la posibilidad de consultar los dispositivos esclavos que ya se encuentran registrados en la plataforma. Ingresando a la opción “Consulta dispositivos esclavos” se hace envío de una solicitud con el método GET y el servidor retorna un listado con los dispositivos registrados válidos para operar tal como se evidencia en la Figura 15.

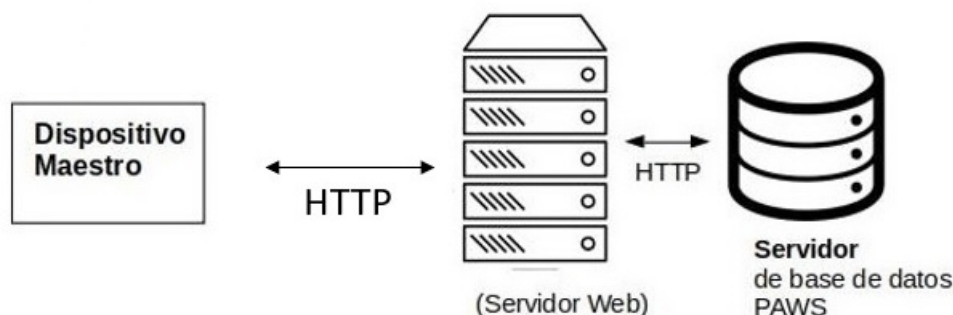
Figura 15: Interfaz de consulta de dispositivos registrados.



7.2. COMUNICACIÓN DISPOSITIVO MAESTRO-SERVIDOR WEB

Todas las peticiones realizadas por el dispositivo maestro al servidor web son hechas a través del protocolo HTTP. Esta interacción ilustrada en la Figura 16 consiste en los métodos POST y DELETE.

Figura 16: Diagrama de comunicacion HTTP entre el dispositivo maestro y el servidor web.



7.2.1. inicialización Durante la etapa de inicialización el dispositivo maestro envía sus características descriptivas las cuales son su número de serie, la identificación del fabricante y la descripción del modelo del dispositivo así como su ubicación

geográfica. Estos datos se envían comprendidos en forma de diccionario JSON. Esto se realiza mediante el método POST y el servidor retorna la respuesta de inicialización con el conjunto de reglas preestablecido para el correcto funcionamiento del sistema también en diccionario JSON. A continuación se muestra la estructura de inicialización.

```
URL = "http://35.243.199.245/paws/init-req"
INIT_REQ = {"serial_Number": serial_Number,
            "model_Id2": model_Id,
            "manufacturer_Id": manufacturer_Id,
            "dane_code": dane_code}
r = requests.post(URL, data=INIT_REQ)
if r.status code==200:
    INIT_RESP = {"ruleset_info": ruleset_info}
```

7.2.2. consulta de canales disponibles Para consultar la disponibilidad de canales, el dispositivo maestro envía un requerimiento al servidor con el método POST en el que se incluye las características descriptivas del dispositivo que realiza la petición, su ubicación geográfica y los datos de contacto del responsable del dispositivo debido a que el dispositivo maestro puede estar solicitando la disponibilidad de canales en nombre de un dispositivo esclavo. Al igual que el mensaje de inicialización, los datos contenidos en la consulta de canales disponibles se envían en forma de diccionario JSON y el servidor retorna de la misma forma la respuesta con los canales libres. La estructura de la consulta de canales disponibles se presenta a continuación.

```
URL = "http://35.243.199.245/paws/avail-spectrum"
AVAIL_SPECTRUM_REQ = {"serial_Number": serial_Number,
                      "ruleset_Ids": rulesets_Ids,
                      "model_Id2": model_Id,
                      "manufacturer_Id": manufacturer_Id,
                      "dane_code": dane_code,
                      "contact": contact,
                      "email": email}
r = requests.post(URL, data=AVAIL_SPECTRUM_REQ)
if r.status code==200:
    AVAIL_SPECTRUM_RESP = {"serial_Number": device.serial_Number,
                           "manufacturer_Id": device.manufacturer_Id,
                           "model_Id": device.model_Id,
                           "ruleset_info": device.ruleset_info,
                           "free_spectra": free_channels}
```

7.2.3. notificación del canal seleccionado Finalmente, el dispositivo maestro informa al servidor cuál canal fue seleccionado por el dispositivo esclavo para que la base de datos se actualice eliminándolo de la lista de canales disponibles por si un nuevo dispositivo esclavo requiere consultar. La respuesta que retorna el

servidor, aunque es meramente informativa, contiene la lista actualizada de canales disponibles, es decir que esta nueva lista no contiene el canal seleccionado por el dispositivo esclavo. Este mensaje utiliza el método **POST**.

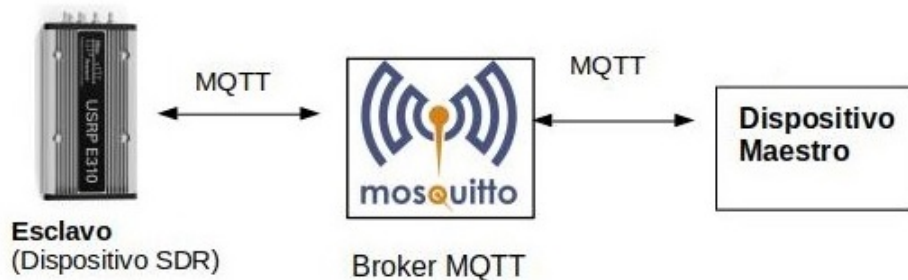
Cuando el dispositivo esclavo deja de transmitir por la frecuencia seleccionada, le envía un mensaje al maestro informando que a partir de ese momento el canal que usó quedará libre. El maestro en ese momento envía un mensaje utilizando el método **DELETE** a la base de datos para que dicho canal sea eliminado de la lista de canales ocupados. La estructura de la notificación del canal seleccionado es la siguiente:

```
URL = "http://35.243.199.245/paws/spectrum-use-resp"
SPECTRUM_USE_NOTIFY = {"serial_Number": serial_Number,
                        "ruleset_Ids": rulesets_Ids,
                        "model_Id2": model_Id,
                        "manufacturer_Id": manufacturer_Id,
                        "dane_code": dane_code,
                        "spectra_use": spectra,
                        "operation": operation}
r = requests.post(URL, data=SPECTRUM_USE_NOTIFY)
if r.status code==200:
    AVAIL_SPECTRUM_RESP = {"serial_Number": device.serial_Number,
                           "manufacturer_Id": device.manufacturer_Id,
                           "model_Id": device.model_Id,
                           "ruleset_info": device.ruleset_info,
                           "free_spectra": free_channels}
```

7.3. COMUNICACIÓN DISPOSITIVO ESCLAVO-DISPOSITIVO MAESTRO

La comunicación entre el dispositivo esclavo y el dispositivo maestro ilustrada en la Figura 17 es realizada a través de un *Broker online* utilizando el protocolo MQTT. Este protocolo define dos tipos de entidades en la red: un *Broker* que se encarga de gestionar los mensajes recibidos y redirigirlos y numerosos clientes.

Figura 17: Diagrama de comunicacion MQTT entre el dispositivo esclavo y el dispositivo maestro.



Para establecer conexión, el cliente envía un mensaje *CONNECT* que contiene información necesaria (nombre de usuario, contraseña, cliente-id, etc). El broker responde con un mensaje *CONNACK*, que contiene el resultado de la conexión (aceptada,

rechazada, etc). Para enviar los mensajes el cliente emplea mensajes *PUBLISH*, que contienen el topic y el payload. Para suscribirse o desuscribirse se emplean mensajes *SUBSCRIBE* y *UNSUBSCRIBE*, que el servidor responde con *SUBACK* y *UNSUBACK*. Finalmente, el cliente se desconecta enviando un mensaje de *DISCONNECT*¹.

estructura de suscripción al *broker* para el dispositivo esclavo

```
def suscriptor_MQTT():  "SUSCRIPTOR BROKER ESCLAVO"
    def on_connect(client, userdata, flags, rc):
        client.subscribe("UIS/PAWS")
        if rc == 0:
            print("conexion exitosa con el broker")

    topico = "UIS/PAWS"
    IP_broker = "35.243.199.245"
    usuario_broker = "username"
    password_broker = "password"

    AVAIL_SPECTRUM_REQ = {"serial_Number": serial_Number,
                          "ruleset_Ids": rulesets_Ids,
                          "model_Id2": model_Id,
                          "manufacturer_Id": manufacturer_Id,
                          "dane_code": dane_code,
                          "contact": contact,
                          "email": email}

    publish.single(topico, json.dumps(AVAIL_SPECTRUM_REQ), port=1883,
                  hostname=IP_broker,
                  auth={"username": usuario_broker,
                       "password": password_broker})

    return None
```

estructura de suscripción al *broker* para el dispositivo maestro

```
def suscriptor_MQTT_SPEC_RESP():  "SUSCRIPTOR BROKER MAESTRO"
    def on_connect(client, userdata, flags, rc):
        client.subscribe("UIS/PAWS")
        if rc == 0:
            print("conexion exitosa con el broker\n spectrum resp")

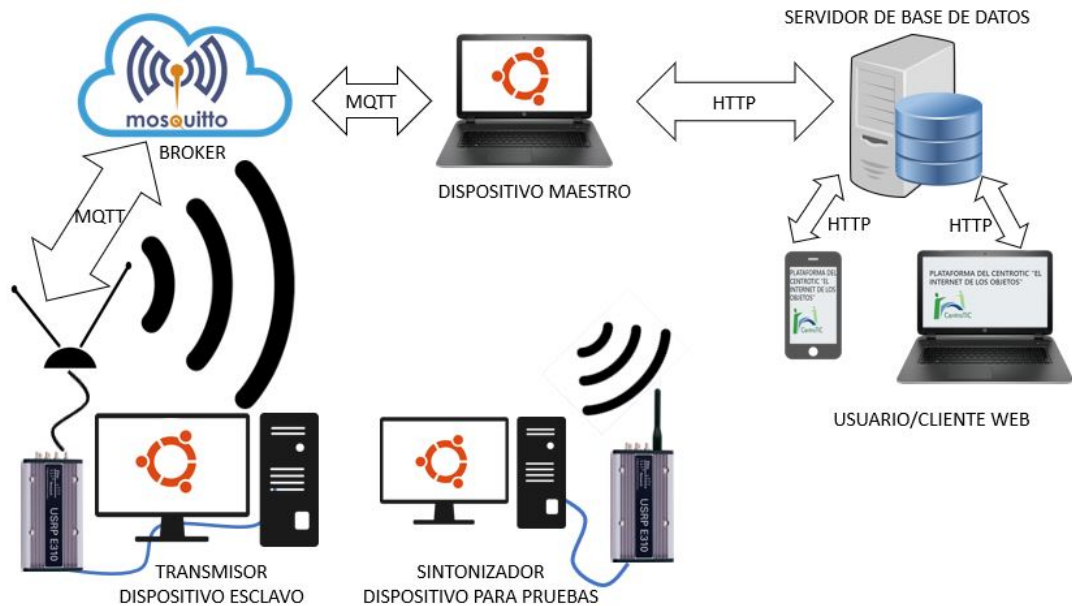
    if AVAIL_SPECTRUM_RESP is not None:
        print(AVAIL_SPECTRUM_RESP)
        publish.single("UIS/PAWS", AVAIL_SPECTRUM_RESP, port=1883,
```

¹Naik, «Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP», óp.cit.

```
        hostname=broker_address,  
        auth={"username": usuario_broker,  
              "password":password_broker})  
else:  
    print("Comunicacion fallida con el servidor")  
client.disconnect()
```

8. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

Figura 18: Representación esquemática de la prueba de funcionamiento del sistema.



Para la prueba de funcionamiento ilustrada en la Figura 18 se utilizaron dos USRP E310, uno como dispositivo esclavo y el otro como un sintonizador para evidenciar la ocupación del canal seleccionado durante el proceso de transmisión. Para el dispositivo maestro se usó un computador con sistema operativo Ubuntu y procesamiento de señales a partir de GNURadio y Python. El servidor web junto con la base de datos y el broker son servicios alojados en Google Cloud.

Se debe seguir un orden de ejecución para el desarrollo del proyecto. Primero se debe establecer la conexión con los dispositivos USRP. Esto se realiza ejecutando el siguiente comando desde la Terminal de Ubuntu:

```
sudo arp-scan -localnet
```

192.168.0.1	c0:4a:00:e4:4d:68	(Unknown)
192.168.0.102	f4:39:09:0a:e4:60	(Unknown)
192.168.0.110	00:80:2f:21:c8:5c	NATIONAL INSTRUMENTS CORP.
192.168.0.109	00:80:2f:22:c9:5d	NATIONAL INSTRUMENTS CORP.
.	.	.
.	.	.
.	.	.

Este comando expone las direcciones IP asociadas y se selecciona la correspondiente al dispositivo USRP ejecutando el siguiente comando desde la Terminal de Ubuntu:

```
ssh root@192.168.0.110
```

Si la conexión es exitosa, se refleja en la terminal la siguiente estructura:

```
root@ettus-e3xx-sg1:~#
```

Luego, en el dispositivo maestro, que debe tener conexión a internet, se ejecuta el *script* necesario para entablar conexión con el servidor y con el *Broker*.

```
marioc@marioc-VirtualBox:~/PAWS/$ python Master1.py
HTTP status ok. 200
prototipo PAWS
conexion exitosa con el broker
```

Seguidamente se ejecuta el *script* en el esclavo, que también debe tener conexión a internet, este se conecta al broker suscribiéndose al tópico UIS/PAWS y entabla comunicación con el maestro por protocolo MQTT.

```
root@ettus-e3xx-sg1:~\#/PAWS/$ python Slave.py
conexion exitosa con el broker
```

El esclavo, que previamente fue registrado para operar en la ciudad de Bucaramanga siguiendo las indicaciones expuestas en la sección 7.1.2, solicita al maestro la información de espectro disponible y este redirecciona el requerimiento, ahora por HTTP, al servidor web recibiendo la lista de frecuencias libres.

```
HTTP status ok. 200
{"serial_Number": "e310-f5ab-a002",
 "manufacturer_Id": "Ettus Research",
 "model_Id": "USRP E310", "ruleset_Ids": "prototipo PAWS",
 "free_spectra": [494.0, 506.0, 512.0, 518.0, 524.0, 530.0, 542.0,
 548.0, 554.0, 560.0, 566.0, 578.0, 584.0, 590.0, 596.0, 602.0,
 608.0, 614.0, 620.0, 626.0, 632.0, 638.0, 644.0, 650.0, 656.0,
 662.0, 668.0, 674.0, 680.0, 686.0, 692.0]}
```

El maestro envía la lista al esclavo quien selecciona aleatoriamente una frecuencia y notifica su uso al maestro.

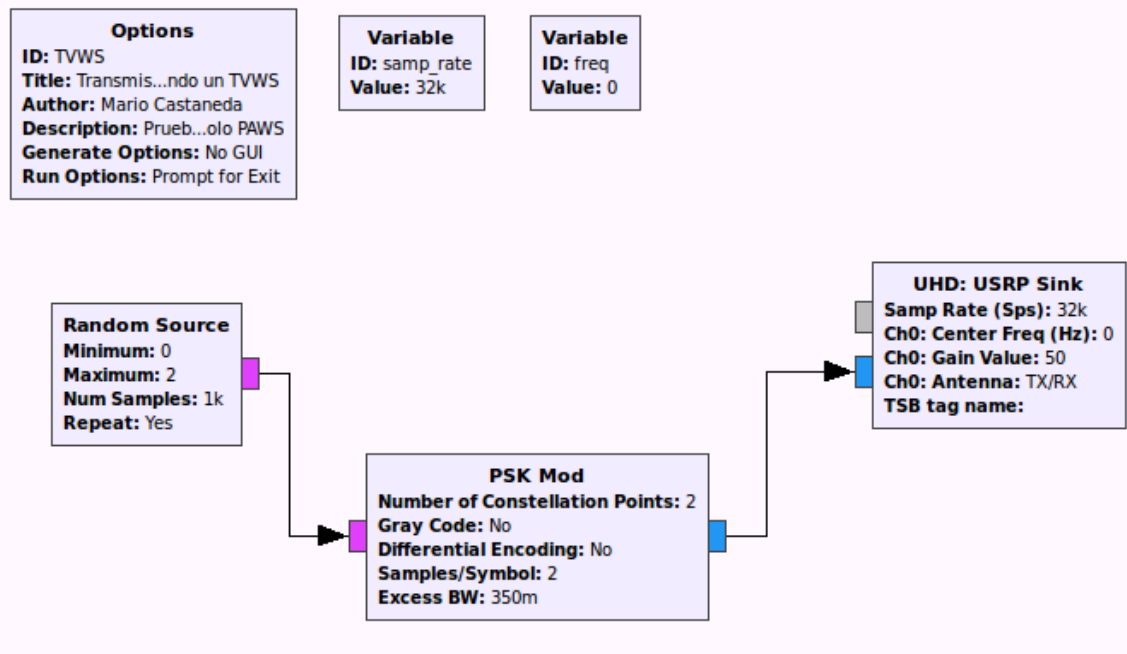
```
(578000000.0, 'frecuencia escogida para transmitir')
transmitiendo ....
```

El flujograma utilizado para el proceso de transmisión por parte del dispositivo esclavo se expone en la Figura 19.

El maestro traduce esa notificación a HTTP y se la envía al servidor para que la base de datos actualice la lista de canales disponibles retirando el canal seleccionado.

```
use notify
canal escogido 578.0
HTTP status ok. 200
{"info": "information ok"}
```

Figura 19: Flujograma GNU Radio para transmisión.



Cuando el esclavo termina la transmisión, envía una nueva notificación al maestro en la que expresa que el canal seleccionado nuevamente quedará libre para el uso, es entonces cuando el maestro avisa al servidor y se procede a la eliminación de este de la lista de canales ocupados.

```
delete notify
HTTP status ok. 200
{"delete": "delete ok"}
```

Para realizar la sintonización se debe tener presente que si el USRP utilizado para este fin se encuentra conectado a la misma red que el dispositivo esclavo, el sintonizador debe activarse en el momento en que el esclavo selecciona el canal y desactivarse al finalizar la transmisión para no ocasionar conflicto en los dispositivos. Esto se efectúa conectándose al USRP destinado a la sintonización localizando la dirección IP del dispositivo y ejecutando los siguientes comandos en la Terminal de Ubuntu:

```
sudo arp-scan -localnet
ssh root@192.168.0.109
usrp_e3x0_network_mode
```

Una vez el esclavo comienza a transmitir por un canal, la frecuencia escogida se carga en el diagrama de bloques de sintonización expuesto en la Figura 20 como se aprecia en la Figura 21 y al ejecutarse se aprecia el cambio en la potencia recibida y en el diagrama de constelación. Este cambio se expone en la Figura 22.

Figura 20: Diagrama de bloques de GNU Radio para la sintonización.

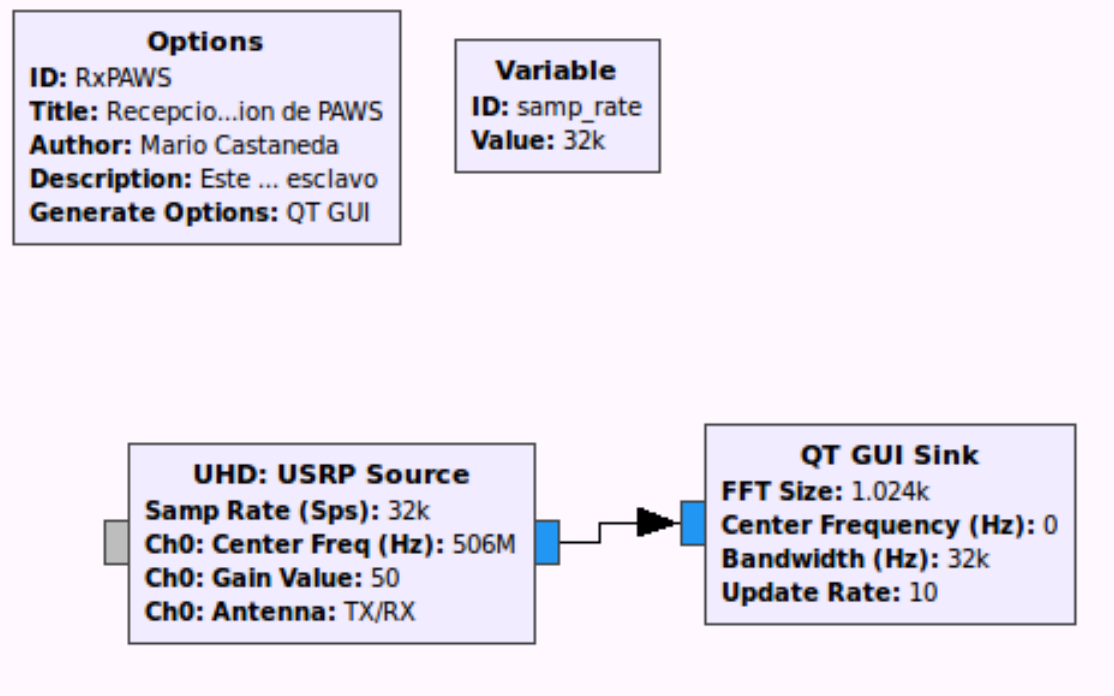


Figura 21: Ventana para establecer la frecuencia a sintonizar.

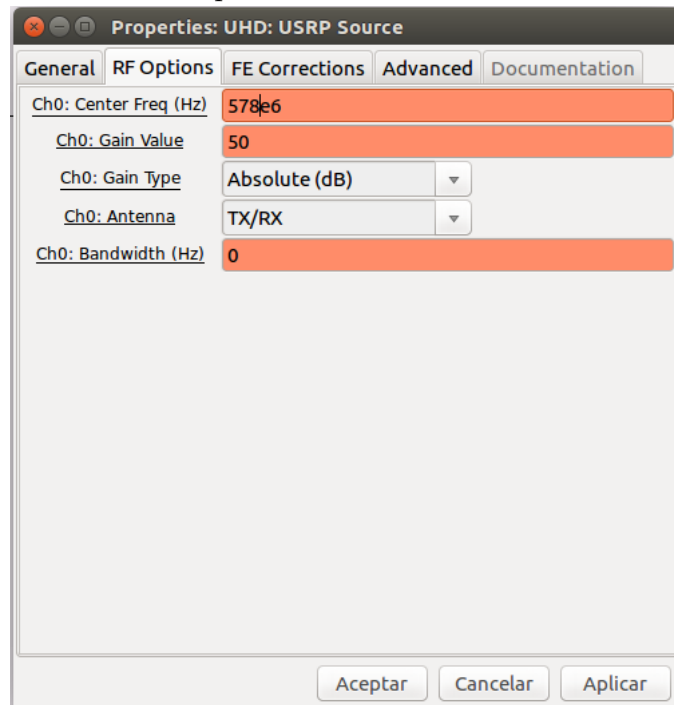
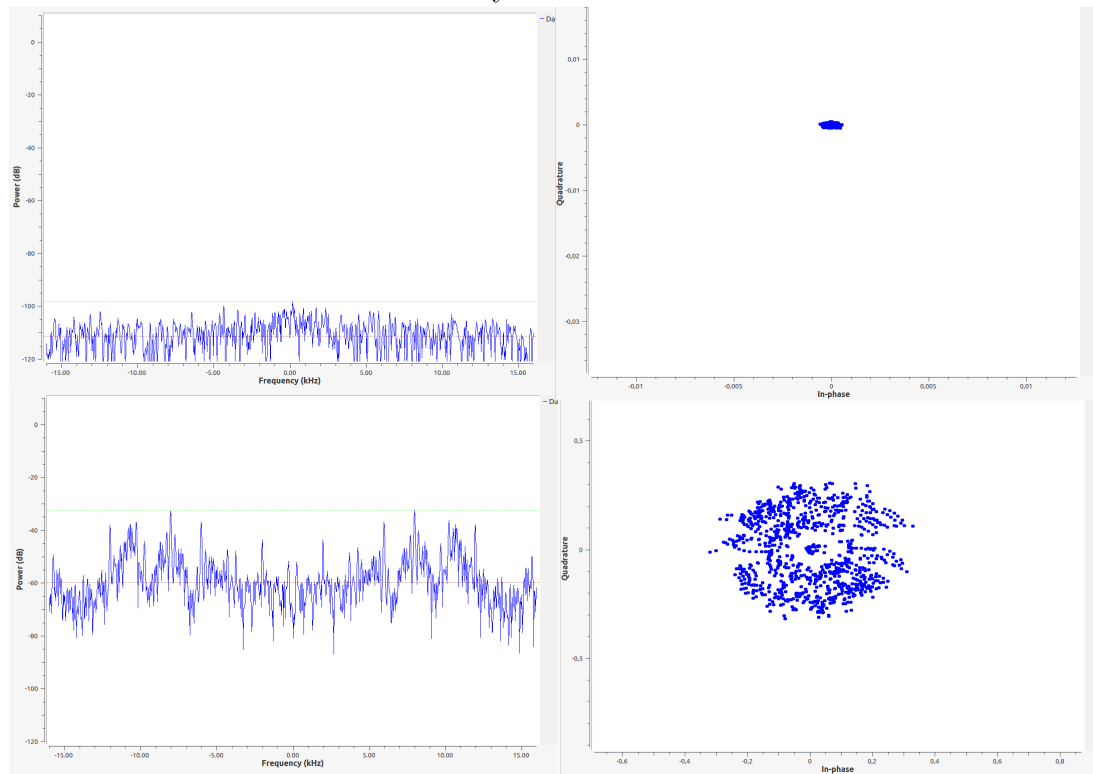


Figura 22: Comparación de la potencia recibida y el diagrama de constelación sintonizados antes de la transmisión y durante la transmisión.



9. CONCLUSIONES

- Se ha diseñado e implementado un prototipo de terminal IoT capaz de comunicarse con una base de datos siguiendo el Protocolo PAWS utilizando el protocolo MQTT para establecer comunicación entre el dispositivo maestro y el dispositivo SDR esclavo, y el protocolo HTTP para la comunicación del usuario y el dispositivo maestro con el servidor.
- El presente proyecto contribuyó al estudio del acceso dinámico al espectro, proveyendo herramientas mediante las cuales el grupo de investigación Radio-GIS puede llevar a cabo trabajos representativos para el área e investigaciones innovadoras, valiéndose de las ventajas que ofrecen el SDR y la CR como su capacidad de adaptación a diferentes requerimientos además de su fácil reconfigurabilidad y reprogramabilidad.
- Los TVWS permiten el acceso dinámico al espectro aprovechando en otros servicios las bandas de frecuencia subutilizadas generando competencia, calidad y eficiencia en beneficio de los usuarios.
- El uso de una plataforma que gestione el acceso de usuarios a los TVWS facilita las tareas de vigilancia y control haciendo un uso más eficiente del espectro.
- El protocolo PAWS establece las bases para la implementación de nuevas tecnologías que beneficiarán el desarrollo de la sociedad reduciendo la brecha digital existente.
- El uso de los TVWS ayudará a mejorar la calidad de vida de los habitantes de las zonas rurales dándoles la posibilidad de acceder a servicios digitales desde sus hogares.
- El uso del ERE en servicios secundarios favorece la adopción de nuevas tecnologías y fomenta la expansión de las ya existentes.

10. TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se pueden establecer las áreas de cobertura de las estaciones de transmisión de TV digital para las diferentes zonas de cada ciudad y el radio de propagación de los WSD, permitiendo que un mismo WS sea utilizado por diferentes WSD en un mismo municipio sin el riesgo de causar interferencias.

Además la información contenida en la base de datos correspondiente a WS puede ampliarse a más bandas de frecuencias debido a que no solo la banda de TV digital posee WS pudiendo convertir el sistema en un laboratorio de acceso dinámico al ERE para que los estudiantes realicen prácticas educativas mejorando sus conocimientos sobre el ERE e incentivando nuevas aplicaciones para un uso oportunístico del espectro.

BIBLIOGRAFÍA

ANE, /Agencia Nacional del Espectro. *Resolución 461 de 2017*. 2017. URL: https://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Normatividad/Planeacion_del_espectro/Resolucion461de2017.pdf.

ARSLAN, Hüseyin y AHMED, Sadia. *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*. 2007, págs. 110-120. ISBN: 978-1-4020-5541-6. DOI: 10.1007/978-1-4020-5542-3. URL: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-1-4020-5542-3>.

ARTEAGA, Adriana y NAVARRO, Andres. «Availability of TV White Spaces Using Spectrum Occupancy Information and Coverage Maps». En: *IEEE Latin America Transactions* 14.6 (2016), págs. 2588-2591. ISSN: 15480992. DOI: 10.1109/TLA.2016.7555223.

CHEN, V; DAS, S; ZHU, L; MALYAR, J y MCCANN, P. *Protocol to Access White-Space (PAWS) Databases*. 2015. URL: <https://tools.ietf.org/pdf/rfc7545.pdf>.

COGNITIVE RADIO WORKING GROUP. *Cognitive radio definition and nomenclature*. September. 2008. URL: http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-P-0009-V1_0_0_CRWG_Defs.pdf.

(COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN/GRUPO DEL ESPECTRO). *Introducción al estado de la situación de los “TV White Spaces” y “LSA” propiciados por la Radio Cognitiva*. 2013, pág. 30.

COMMUNITIES, COMMISSION OF THE EUROPEAN. *Communication on future networks and the internet*. Inf. téc. Brusseles, 2008.

DAZA, CAROLINA. *Espacios Blancos en Colombia*. URL: https://www.itu.int/en/ITU-R/seminars/rrs/RRS-17-Americas/Documents/Forum/4_ANE%20Carolina%20Daza%20TVWS.pdf.

DOHR, A; MODRE-OPSRIAN, R; DROBICS, M; HAYN, D y SCHREIER, G. «The Internet of Things for Ambient Assisted Living». En: *2010 Seventh International Conference on Information Technology: New Generations*. 2010, págs. 804-809. DOI: 10.1109/ITNG.2010.104.

DYNAMIC SPECTRUM ALLIANCE. *Dynamic Spectrum Alliance welcomes final regulation on TV White Space from Colombia ' s Agencia Nacional del Espectro (ANE)*. 2017. URL: <https://www.realwire.com/releases/Dynamic-Spectrum-Alliance-welcomes-final-regulation-on-TV-White-Space>.

ETTUS RESEARCH. *USRP E310*. URL: <https://www.ettus.com/all-products/e310/>.

FIELDING, R; GETTYS, J; MOGUL, J. C; FRYSTYK, H; MASINTER, L; LEACH, P y BERNERS-LEE, T. *Hypertext Transfer Protocol HTTP*. 1999. URL: <https://tools.ietf.org/rfc/rfc2611>.

GHOSH, Soumik; NAIK, Gaurang; KUMAR, Animesh y KARANDIKAR, Abhay. «OpenPAWS: An open source PAWS and UHF TV White Space database implementation for India». En: *2015 21st National Conference on Communications, NCC 2015* (2015). DOI: 10.1109/NCC.2015.7084890.

MICROSOFT. *White Spaces Database*. 2015. URL: whitespaces.microsoftspectrum.com/.

NAIK, Nitin. «Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP». En: *2017 IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2017 - Proceedings* (2017). DOI: 10.1109/SysEng.2017.8088251.

NIKOLOV, Neven. «Research of the Communication Protocols between the IoT Embedded System and the Cloud Structure». En: *2018 IEEE 27th International Scientific Conference Electronics, ET 2018 - Proceedings* (2018), págs. 1-4. DOI: 10.1109/ET.2018.8549604.

NTULI, Elesá; NGWIRA, Seleman y ZUVA, Tranos. «Implementing Protocol to Access White-Space databases on smart set-Top box». En: *2015 International Conference on Computing, Communication and Security, ICCCS 2015* (2016), págs. 1-5. DOI: 10.1109/CCCS.2015.7374147.

SACHDEV, Tanvi; GANDHI, Bani y JADON, Jitendra Singh. «Interconnectivity of a Master and a Slave white space device under the control of a TVWSDB». En: *Proceedings of the 2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data*

Engineering, Confluence 2016 (2016), págs. 571-574. DOI: 10.1109/CONFLUENCE.2016.7508184.

VARGAS, Cesar. *La Explotación de Espacios Blancos de Televisión en México*. 2016, págs. 1-29.

VENOSA, Elettra; HARRIS, Fredric J. y PALMIERI, Francesco A.N. *Software Radio, Sampling Rate Selection, Design and Synchronization*. Springer, 2012, págs. 1-5. ISBN: 9781461401124. DOI: 10.1007/978-1-4614-0113-1.

YOCTO PROJECT. *Yocto Project The Ecosystem*. URL: <https://www.yoctoproject.org/ecosystem/>.

YOKOTANI, Tetsuya y SASAKI, Yuya. «Comparison with HTTP and MQTT on required network resources for IoT». En: *ICCEREC 2016 - International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy, and Communications 2016, Conference Proceedings* (2017), págs. 1-6. DOI: 10.1109/ICCEREC.2016.7814989.