

SISTEMA COGNITIVO DE PETICIÓN DE CANALES DISPONIBLES EN LA BANDA DE FRECUENCIA DE 470MHz A 698 MHz PARA EL DESPLIEGUE DE IOT

(Trabajo de Grado)

GINA MARCELA RONCANCIO QUINTANA

Director:

Ing. Mónica Espinosa Buitrago, M.Sc

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES Y REGULACION TIC
BOGOTÁ, 2017

*Dedico de manera muy especial esta tesis a mí hija
Juana Sofía Lozano R. y a Jose Francisco Lozano
Quienes son el motor de mi vida y
De cada uno de mis proyectos.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a Dios quien me dio la oportunidad de vivir esta experiencia gratificante no solo a nivel profesional y académico sino también de manera personal. A mis padres quienes con amor me han formado de la mejor manera y me han acompañado en cada uno de los logros de mi vida, a mis hermanos de quienes recibo su apoyo incondicional, a mi madrina Idisnalda y mi Tía Nubia Stella quienes con su ejemplo de vida son mi modelo a seguir, agradezco a cada uno de los miembros de mi familia.

Gracias a cada uno de mis compañeros y amigos que me acompañaron en el cumplimiento de este objetivo, al Centro de Excelencia y Apropiación en Internet de las cosas (CEA-IoT) y la Universidad Santo Tomas quienes me dieron la oportunidad de cursar esta maestría, así mismo, a los integrantes de CEA-IoT nodo USTA, la Doctora Tatiana Zona y el Ingeniero Felipe Díaz quienes me brindaron un apoyo durante todo este proceso, a los docentes de la maestría y por ultimo de manera muy especial quiero agradecer a mi directora de Tesis Mónica Espinosa que ha tenido un papel fundamental en mi desarrollo profesional y personal.

TABLA CONTENIDO

ACRÓNIMOS	V
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO	4
1.1 OBJETIVOS	4
1.2 ALCANCE	5
1.3 METODOLOGIA	5
2 CONCEPTUALIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA COGNITIVO DE PETICIÓN DE CANALES	7
2.1 GESTIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO	7
2.1.1 <i>Atribución de frecuencias del espectro radioeléctrico</i>	8
2.1.2 <i>Subdivisión del ER</i>	9
2.1.3 <i>División regulatoria del ER</i>	9
2.1.4 <i>Servicios de radiocomunicaciones</i>	10
2.1.5 <i>Gestión del ER en Colombia</i>	12
2.1.6 <i>Cuadro de atribución de bandas de frecuencia en Colombia</i>	14
2.1.7 <i>Tipos de licencia para el ER</i>	15
2.2 ASIGNACIÓN DE ER Y BANDAS DE FRECUENCIA PARA TELEVISIÓN	16
2.2.1 <i>Plan de cobertura para TDT en Colombia</i>	17
2.2.2 <i>Espacios en blanco de TV (TVWS)</i>	20
2.2.3 <i>Resolución 461 de 2017</i>	20
2.2.4 <i>Acuerdo No. 003 del 04 de junio de 2009</i>	21
2.2.5 <i>Acuerdo No.004 del 20 de diciembre de 2011</i>	21
2.2.6 <i>Acuerdo No. 002 del 04 de abril de 2012</i>	22
2.2.7 <i>Resolución 442 del 19 de Julio de 2017</i>	22
2.2.8 <i>Acuerdo en las zonas de frontera para la banda de VHF y UHF</i>	22

2.3	ESPECTRO RADIOELECTRICO PARA INTERNET DE LAS COSAS (IOT)	23
2.4	ACCESO DINÁMICO AL ESPECTRO Y RADIO COGNITIVA	28
2.4.1	<i>Radios definidos por software (SDR)</i>	31
2.4.2	<i>Aplicaciones de radio cognitiva en IoT</i>	34
2.4.2.1	Smart Grids	34
2.4.2.2	Redes vehiculares	35
2.4.2.3	Redes médicas	35
2.4.2.4	Redes de emergencia	36
2.4.2.5	Aplicaciones militares	37
2.4.2.6	Radio cognitiva en aeronaves	38
2.4.3	<i>Bases de datos</i>	38
3	SISTEMA DE PETICIÓN DE CANALES PARA RED DE TVWS	39
3.1	GENERAR LA RED MAESTRO ESCLAVO	43
3.1.1	<i>IMPLEMENTACIÓN SISTEMA MAESTRO – ESCLAVO</i>	45
3.1.2	<i>Mensajes JSON</i>	45
3.2	DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE DISPOSITIVOS MAESTRO DE LA RED CON LA APLICACIÓN WEB DE TVWS	46
3.2.1	<i>Especificaciones del protocolo</i>	46
3.2.1.1	PAWS (protocolo de acceso a la base de datos de espacios en blanco)	46
3.2.1.2	Secuencia de operaciones PAWS	47
3.2.1.3	Funcionalidades del protocolo PAWS	47
3.2.1.4	Mensajes de error	51
3.2.2	<i>Implementación</i>	52
3.2.3	<i>Pruebas y resultados obtenidos</i>	69
4	ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PETICIÓN DE CANALES PARA RED DE TVWS	70
4.1	METODOLOGÍA	70
4.1.1	<i>Procesos de Gestión del riesgo según PMBOK®</i>	70
4.2	EJECUCIÓN DE GESTIÓN DE RIESGOS EN EL SISTEMA DE PETICION DE CANALE PARA LA RED DE TVWS	71
4.2.1	<i>Identificación de Riesgos</i>	72
4.2.2	<i>Análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos</i>	74
5	CONCLUSIONES	80
	ANEXO A. INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE RED MAESTRO - ESCLAVO	82
	REFERENCIAS	86

LISTA DE FIGURAS	93
LISTA DE TABLAS	95

ACRÓNIMOS

AMI	Del Inglés, Advanced Metering Infrastructure, Infraestructura de medición avanzada exenta
ANE	Siglas de Agencia Nacional del espectro
ANTV	Siglas de Autoridad Nacional de Televisión
ATCS	Del Inglés, Advanced Television Systems Committee. Comité de Sistemas de Televisión Avanzada
BAN	Del Inglés, BodyArea Network, Red de área corporal
BDEB	Siglas de Bases de datos de espacios en blanco
CNTV	Siglas de Comisión nacional de televisión
CRC	Siglas de Comisión de Regulación de Comunicaciones
DEB	Siglas de Dispositivos de espacios en blanco
DVB-T	Del Inglés, Digital Video Broadcasting – Terrestrial . Difusión de Video Digital – Terrestre
DVB-T2	Del Inglés, Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2. Difusión de Video Digital - Terrestre de segunda generación
ERE	Siglas de Espectro Radioeléctrico
ETSI	Del Inglés, European Telecommunications Standards Institute. Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones
FCC	Del Inglés, Federal Communications Commission
IOT	Del Inglés, Internet of things, Internet de las cosas

ISDB-T	Del Inglés, Integrated Services Digital Broadcasting. Radiodifusión Digital de Servicios Integrados
ISM	Del Inglés, Industrial, Scientific and Medical
MIC	Siglas de Ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones
OFDM	Del Inglés, Orthogonal Frequency - Division Multiple Access. Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales
PIRE	Del Español, Potencia Isótropa Radiada Equivalente
PLP	Del Inglés, Physical Layer Pipe
RTVC	Siglas de Radio Televisión Nacional de Colombia
SWSPG	Siglas de Singapore White Spaces Pilot Group
TDT	Siglas de Televisión Digital Terrestre
TIC	Siglas de Tecnologías de la información y la comunicación
TVWS	Del Inglés, TV White Spaces. Espacios en blanco de televisión

RESUMEN

El espectro radioeléctrico (ER) es un recurso natural que permite las comunicaciones inalámbricas para los servicios de telecomunicaciones tales como televisión, radiodifusión sonora, radionavegación entre otros. El espectro es gestionado de acuerdo con las recomendaciones establecidas en la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y los entes reguladores de cada uno de los países. La gestión del ER por asignación fija para usuarios primarios y secundarios en el espectro radioeléctrico se encuentra en un proceso de cambio, puesto que el uso del espectro con esta asignación tiene bajos niveles de uso en algunas bandas de frecuencia. Por lo tanto, la asignación dinámica se observa como una solución al uso eficiente del espectro para los servicios de telecomunicaciones emergentes.

El aumento del uso del ER es consecuencia de servicios de telecomunicaciones emergentes como Internet of Things (IoT) puesto estos servicios pueden tener baja tasa de tráfico, pero gran número de dispositivos y también podrían tener tráfico multimedia. En estos servicios, las cosas pueden ser consideradas como objetos de la vida cotidiana como electrodomésticos, vestibles, medios de transporte, entre otros. Adicionalmente, la conexión de los dispositivos a Internet permite el desarrollo de nuevas oportunidades en ámbitos sociales, económicos, ambientales entre otros aportando tangiblemente a la comunidad por medio del control, la gestión y la monitorización de elementos físicos que componen un medio urbano dentro de una red.

La investigación se enmarca en bandas de frecuencia de asignación dinámica de televisión que permiten nuevas oportunidades para el despliegue de servicios emergentes como IoT. Por lo anterior, el trabajo de grado busca realizar una revisión del estado regulatorio actual de ER con respecto a la asignación dinámica en la banda de 470MHz a 698MHz, el uso de esta banda para los dispositivos IoT y el análisis del protocolo para la comunicación de los dispositivos IoT en una red de Huecos espectrales en Televisión (TVWS, por sus siglas en inglés).

Palabras clave: Internet de las cosas, identificación de radio frecuencia, acceso de espacios en blanco, Gestión de espectro

ABSTRACT

The radio spectrum is a natural resource that allows wireless communications for telecommunications services such as television, radio broadcasting, radionavigation, among others. The spectrum is managed in accordance with the recommendations established in the International Telecommunication Union (ITU) and the regulatory institutions of each country. The management of the frequencies allocation for primary and secondary users in the radio spectrum is a process of change, taking into account that the use of spectrum has low levels of use in some frequency bands. Therefore, dynamic allocation is seen as a solution to the efficient use of spectrum for emerging telecommunications services.

The increase in the use of spectrum is a consequence of emerging telecommunications services such as the Internet of Things (IoT), taking into account that these services may have a low data rate, but a massive number of devices or multimedia contents may also be available. In these services, things can be considered as objects of everyday life such as appliances, transportation, among others. In addition, the connection of the devices to the Internet allows the development of new opportunities in social, economic and environmental spheres, among others, contributing tangibly to the community through the control, management and monitoring of physical elements that composes an urban environment within a net.

The research is focus on frequency bands of dynamic television that allow new opportunities for the deployment of emerging services such as IoT. Therefore, this document of work seeks to review the current regulatory status of the radio spectrum with respect to the dynamic allocation in the 470MHz to 698MHz band, the use of this band for IoT devices and the protocol-level framework of the communication of the IoT devices in a network of spectral television white spaces TVWS.

Keywords: Internet of things, radio frequency identification, Access White-Space, Gestión de espectro, Spectrum management

INTRODUCCIÓN

El tráfico de datos mundial ha aumentado un 63% para el 2016 [1], según Cisco adicionalmente se estima que para el 2021, este tráfico de datos aumentará un 75% y existirán 11.6 mil millones de dispositivos conectados a la red. Una de las tecnologías que se encuentra en esta masificación de dispositivos es el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) [2]. Evaluando el crecimiento de tráfico de datos y los retos que se tendrá en los próximos años para realizar el despliegue de IoT surge la necesidad de crear mecanismos con los cuales se pueda satisfacer dicha demanda. Para ello una de las recomendaciones es hacer uso eficiente del espectro radioeléctrico, por medio del acceso dinámico al espectro (DSA, por sus siglas en inglés) que permite aprovechar los espacios espectrales que se identifiquen como oportunidades para mejorar la calidad de servicio (QoS) a los dispositivos IoT con uso de bandas de frecuencia como en las bandas de televisión de 470MHz a 698 MHz.

En Colombia dentro de su regulación se contempla el uso de TVWS para comunicaciones inalámbricas fijas, estas aplicaciones no deben causar interferencias a estaciones de un servicio primario (servicio licenciado al que se le garantiza no tener interferencias) que se encuentre asignados por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) para los diferentes municipios de Colombia, contemplados en la Resolución 461 de 2017.

Las políticas de asignación dinámicas desarrolladas por la Agencia Nacional de Espectro (ANE) establecen el uso de los TVWS con una base de datos de espacios en blanco (BDEB), que hace necesario un sistema de comunicaciones para la petición de canales disponibles. Por lo anterior, el siguiente documento abordará una revisión acerca de la gestión del espectro radioeléctrico en Colombia en la banda de TV, TVWS y aplicaciones IoT; mostrará el desarrollo del protocolo de comunicaciones para una red maestro esclavo de TVWS y finalmente se generará una matriz de riesgos para la implementación del sistema de petición de canales para una red de TVWS.

1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS

Desarrollar un sistema cognitivo de petición de canales disponibles en la banda de TV (TVWS) para el despliegue de IoT

- Realizar estado del arte acerca de la gestión del espectro radioeléctrico en Colombia en la banda de TV, espacios en blanco de TV (TVWS) y aplicaciones IoT.
- Generar una red maestro y esclavo de TVWS compatible con el protocolo de comunicación del sistema de petición de canales.
- Desarrollar el protocolo de comunicaciones del dispositivo maestro de la red con la aplicación web de TVWS de acuerdo con la regulación establecida por la ANE.
- Generar un análisis de riesgos para la implementación del sistema de petición de canales para una red de TVWS

1.2 ALCANCE

Este proyecto tiene como alcance la elaboración de un sistema cognitivo de petición de canales disponibles en la banda de TV para el despliegue de IoT, que consiste en la elaboración de la estructura evidenciada en la Figura 1.

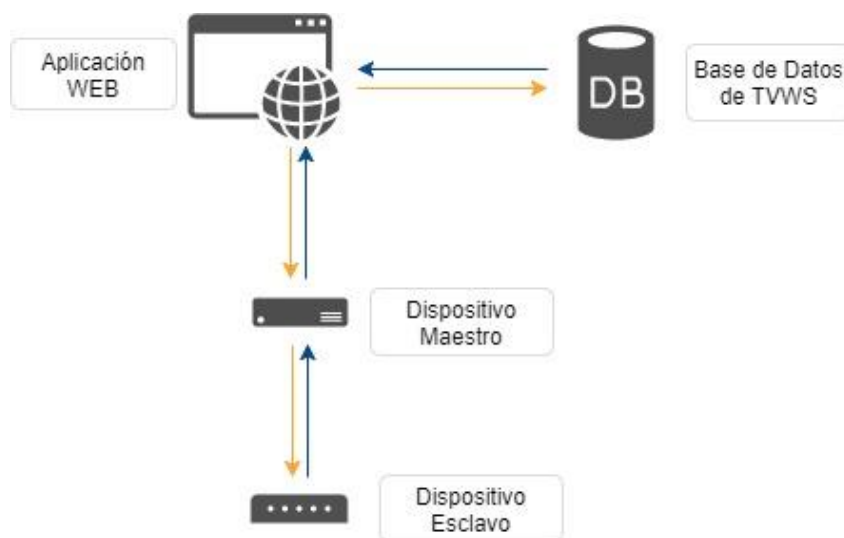


Figura 1 Estructura de petición de canales disponibles en la banda de TV

La cual consta de los siguientes componentes:

- Dispositivos maestro y esclavo que realicen la petición de frecuencia libre en la banda de TV enviando su ubicación geográfica y el tipo de servicio que desea utilizar el canal.
- Una aplicación Web que se encargará de validar dicha información con las normativas proporcionadas por la ANE y Autoridad Nacional de Televisión (ANTV) respecto al uso de espacios en blanco en la banda de TV.
- Base de Datos de TVWS que contiene la información de algunos municipios con sus respectivas frecuencias libres y ubicación.

1.3 METODOLOGIA

El desarrollo de este proyecto se ve evidenciado en el siguiente diagrama de la Figura 2.

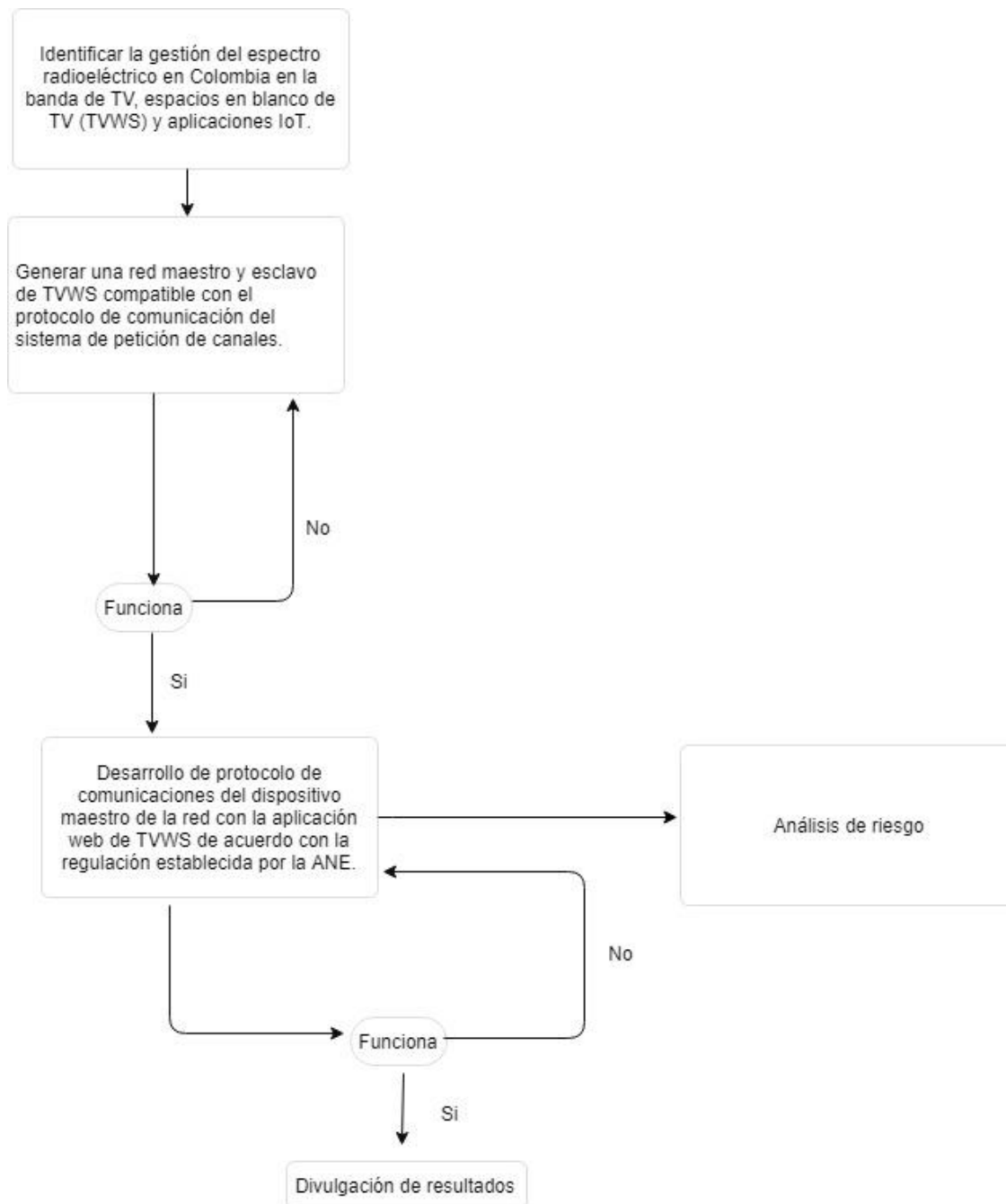


Figura 2 Diagrama de metodología

2 CONCEPTUALIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA COGNITIVO DE PETICIÓN DE CANALES

Para la elaboración de este trabajo se abordaron las siguientes temáticas que se desarrollaran a continuación: (i) Gestión del espectro radioeléctrico, (ii) Asignación del ER y bandas de frecuencia para televisión, (iii) Espectro Radioeléctrico Para Internet De Las Cosas (IoT), (iv) Acceso Dinámico al ER y Radio Cognitiva y (v) Arquitectura TVWS.

2.1 GESTIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

El espectro radioeléctrico (ER) es un conjunto de ondas electromagnéticas que se encuentran comprendidas en el rango de frecuencias de 3KHz - 300GHz y se emplea para aplicaciones y servicios de telecomunicaciones tales como servicios de difusión, servicios móviles, servicios fijos entre otros. Debido a la importancia que tiene el ER, su reglamentación se hace necesaria para que este recurso sea utilizado de manera racional, eficiente y eficazmente. Una de las entidades que hacen posible dicha reglamentación es la UIT (Unión Internacional de telecomunicaciones). La UIT incluye dentro de su reglamentación principios básicos de comercialización, precio, control técnico y gestión del espectro que se encuentran en el reglamento de radiocomunicación. Sin embargo, cada país gestiona la utilización del ER atribuyendo frecuencias a los diferentes servicios radioeléctricos y estableciendo las condiciones técnicas para que pueda ser posible el uso de cada banda de frecuencia para beneficio de la sociedad. [3][4][5]

Para el proceso de gestión del espectro radioeléctrico se han identificado tres modelos en el ámbito internacional:

- **Modelo de comando y control:** este modelo consiste en la planificación del uso de cada frecuencia por medio de la atribución, adjudicación y la asignación. El modelo garantiza el buen funcionamiento de los diferentes servicios que hacen uso del ER partiendo del hecho que el espectro es un recurso limitado por tanto es necesario la racionalización en su uso. Por lo anterior, es necesario definir las reglas específicas de su uso, la planificación de las bandas de frecuencia, los servicios y tecnología que pueden hacer uso de las bandas de frecuencias y la asignación que permite al administrador autorizar a los usuarios el uso de ER.

- Modelo orientado al mercado: este modelo tiene como objetivo alcanzar la eficiencia técnica, eficiencia económica y eficiencia social del uso del ER. El ER es sometido a al mecanismo del mercado (ley de oferta y demanda) dando como prioridad los servicios de interés general y las restricciones sobre su uso según las normas, reglamentos, acuerdos y tratados internacionales.
- Modelo de uso común: este modelo de gestión del ER se enfoca en la reducción o eliminación de restricciones sobre los servicios y tecnologías que se asocian a el derecho del uso del espectro, de esta forma se controla niveles de potencia de transmisión para la reducción de interferencias y la eficacia de los diferentes servicios de radiocomunicación [5]

2.1.1 Atribución de frecuencias del espectro radioeléctrico

Para la atribución de las bandas de frecuencia la UIT dividió el mundo en tres regiones: la región 1 conformada por Europa, Rusia, Japón y África, la región 2 constituida por América y por último la región 3 conformada por la zona del indico como se evidencia en la Figura 3, estas división se visualiza en el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) y se establece para evitar interferencias entre los servicios y uso del ER de cada país.

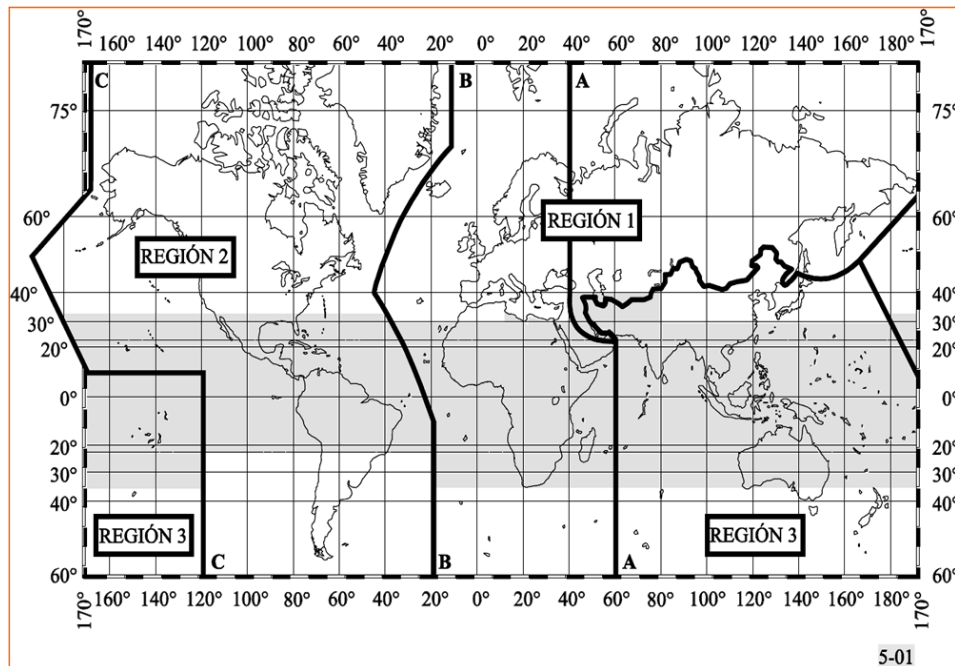


Figura 3 Regiones de atribución de frecuencias

Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia [6]

Cada país realiza la atribución de frecuencias del ER, definiendo previamente los servicios de radiocomunicaciones que operaran dentro de las bandas de frecuencias del ER, asegurando su operatividad y minimizando probabilidad de interferencias. [6]

2.1.2 Subdivisión del ER

El espectro radioeléctrico se encuentra subdividido por nueve bandas de frecuencias, estas bandas de frecuencia se organizan en orden creciente como se evidencia en la Tabla 1.

Tabla 1 Bandas de frecuencia del ER

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente
4	VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriamétricas
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3 000 kHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3 000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas
12		300 a 3 000 GHz	Ondas decimilimétricas
NOTA 1: La «banda N» (N = número de la banda) se extiende de $0,3 \times 10^N$ Hz a 3×10^N Hz. NOTA 2: Prefijos: k = kilo (10^3), M = mega (10^6), G = giga (10^9).			

Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia [6]

2.1.3 División regulatoria del ER

Desde la perspectiva regulatoria el ER se encuentra dividido en dos clases de bandas: las bandas con licencia y las bandas sin licencia. Las bandas de ER licenciadas son aquellas bandas que necesita de un permiso por el ente regulador para su uso. La eficiencia del ER a través de la gestión espectral que tiene en cuenta las características regulatorias y las tecnologías disponibles. Dentro de los servicios que se ofrecen en la banda de espectro licenciada se encuentra servicios básicos de telecomunicación, servicios de valor agregado y radiodifusión, entre otros. La banda de ER no licenciado, como su nombre lo indica no necesita de una licencia para su uso, lo que implica que no se garantiza la eficiencia de los servicios que hacen uso de esta banda, adicionalmente los

entes reguladores hacen control de los límites permitidos para no generar interferencia a otros sistemas. En la Figura 4 se puede observar la división regulatoria del espectro radioeléctrico. [5]

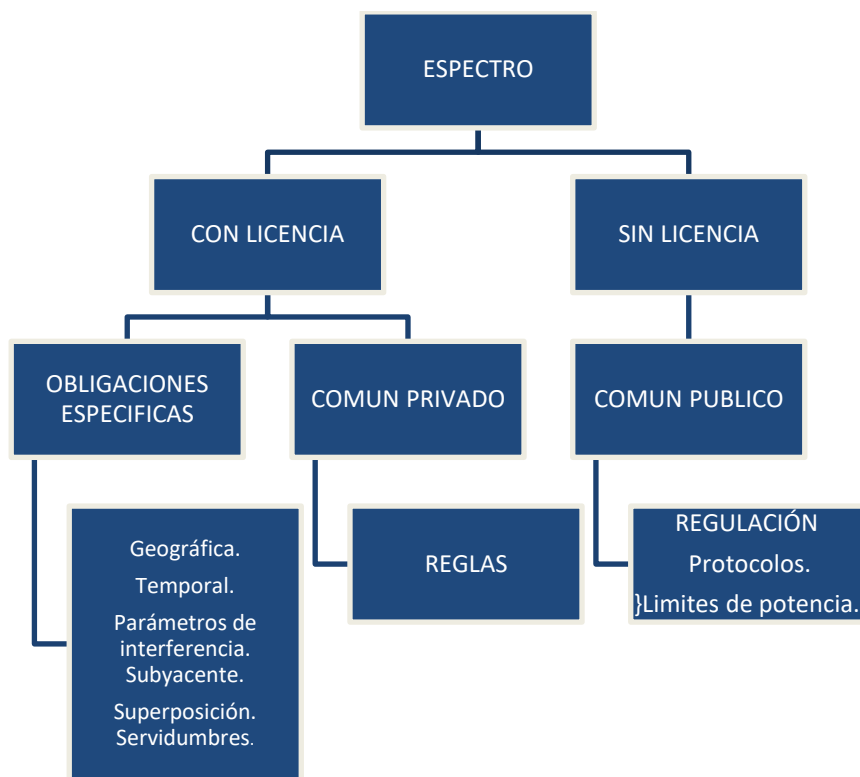


Figura 4 División regulatoria del ERE

Manual de gestión nacional del espectro radioeléctrico. Fundamentos de gestión nacional del espectro [5]

2.1.4 Servicios de radiocomunicaciones

Un servicio de radiocomunicación es un servicio en el cual se establece transmisión, emisión o recepción de ondas electromagnéticas [7] estos se realizan por medio de un circuito y una red de telecomunicaciones. En la Tabla 2 se evidencian los tipos de servicios existentes según la UIT-R (Radiocomunicaciones) agrupados de acuerdo con su naturaleza.

Tabla 2 Servicios de radiocomunicaciones

Naturaleza	Servicios
Servicio fijo	Fijo Fijo pos satélite
Servicio móvil terrestre	Móvil terrestre Móvil terrestre por satélite Radiobúsqueda
Servicios marítimos y aeronáuticos	Móvil marítimo Móvil marítimo por satélite Operaciones portuarias Movimientos de barcos Móvil aeronáutico Móvil aeronáutico (R) Móvil aeronáutico (OR) Móvil aeronáutico por satélite Móvil aeronáutico (R) por satélite Móvil aeronáutico (OR) por satélite
Servicios de radiodifusión	Radiodifusión Radiodifusión por satélite
Servicio de radio aficionados	Radioaficionados Radioaficionados por satélite
Servicios de posicionamiento y navegación	Radiodeterminación Radiodeterminación por satélite Radionavegación Radionavegación por satélite Radionavegación marítima Radionavegación marítima por satélite Radionavegación aeronáutica Radionavegación aeronáutica por satélite Radiolocalización Radiolocalización por satélite
Servicios científicos	Meteorología por satélite Ayudas a la meteorología Exploración de la tierra por satélite Investigación espacial

	Radioastronomía
Servicios operacionales	Entre satélites Operaciones espaciales
Servicios de apoyo	Frecuencia patrón y señales horarias Seguridad
Servicios especiales	Especial

Servicios de radiocomunicaciones, J. Luque Ordóñez [7]

2.1.5 Gestión del ER en Colombia

Teniendo en cuenta que cada país debe ejercer una gestión del espectro, Colombia incluye dentro de su ley la planeación, gestión y administración adecuada y eficiente del ER, esta tarea es uno de los objetivos principales del Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones (MinTIC), adicionalmente se establece a el organismo ANE (Agencia nacional del espectro) para dar soporte técnico para la gestión y planeación, vigilancia y control del espectro.

Dentro de las funciones básicas que se deben tener para la gestión nacional del espectro se encuentran:

- Planificación del espectro
- Administración de frecuencias
- Ingeniería del espectro
- Comprobación y control del espectro
- Funciones de apoyo (Económico)

En la Tabla 3 se encuentra una esquematización de las responsabilidades para cada función en la gestión del espectro según los lineamientos de la UIT. [8]

Tabla 3 Sistema de gestión Nacional del Espectro

SISTEMA DE GESTIÓN NACIONAL DEL ESPECTRO			
Funciones de gestión del espectro	Funciones de apoyo	Registros de la base de datos	Salidas del sistema
• Planificación y	• Administrativas	• Atribuciones	• Reglamento

- reglamentos • Financiamiento de la gestión • Atribuciones y adjudicaciones • Asignaciones de licencias • Consulta y coordinación nacional • Cooperación internacional • Normalización, especificación y autorización de equipos • Control • Fiscalización	• Jurídicas • Ingeniería del espectro • Automatización • Formación	• Asignaciones • Licencias • Normas • Direcciones e instrucciones • Contabilidad • Inspecciones • Mediciones • Resolución de interferencias • Denuncias y consultas • Interferencias	• Atribuciones • Licencias • Normas • Facturas • Utilización del espectro • Notificaciones • Resoluciones y recomendaciones • Planes del espectro • Acuerdos Internacionales • Mediciones
---	---	---	--

Manual De Gestión Nacional Del Espectro Radioeléctrico: Permisos para el uso del espectro radioeléctrico y procedimientos para la asignación de frecuencias [8]

El proceso de gestión y control del ER debe ser cíclico para así mantener actualizado el proceso en la toma de decisiones garantizando de esta manera una gestión nacional espectral de manera ordenada, puntual y transparente. En la Figura 5 se encuentra el proceso de la gestión y control del espectro radioeléctrico nacional.



Figura 5 Ciclo de la gestión y control del ER

Manual de gestión nacional del espectro radioeléctrico. Fundamentos de gestión nacional del espectro radioeléctrico. [5]

2.1.6 Cuadro de atribución de bandas de frecuencia en Colombia

Según la Constitución política de Colombia el ER es propiedad exclusiva del estado y se constituye como un bien de dominio público, inajenable e imprescriptible. Dentro de las facultades de la ANE se encuentra la gestión y administración del ER, por tanto corresponde a esta entidad la coordinación y establecimiento del cuadro de atribución de frecuencias (CNABF), este permite que los diferentes servicios de radiocomunicación del país, utilicen las bandas de frecuencias que se definen previamente para cada uno de estos. Adicionalmente se asegura su operatividad y se minimiza las probabilidades de interferencias, lo que conlleva a que exista coexistencia de servicios de telecomunicaciones dentro de una misma banda de frecuencia. [9][6]

El cuadro de atribución de frecuencias consta de cuatro columnas que se evidencian en la Figura 6, la primera presenta la unidad del rango de frecuencias (KHz, MHz o GHz), la segunda columna es la atribución para la región 2 (Región atribuida a Colombia) por la UIT, la tercera columna es la atribución determinada en Colombia y por último la cuarta columna contiene el listado de notas nacionales que afectan un determinado rango de frecuencia.

Unidad	REGIÓN 2	COLOMBIA	Notas nacionales
--------	----------	----------	------------------

Figura 6 Columnas del CNABF

Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia [6]

Dentro de la información que se establece en el CNABF se encuentra la banda de frecuencia que se refiere a cada atribución, el servicio primario que se le asigna a esa banda, notas internacionales del reglamento de Radiocomunicaciones y servicios con atribuciones como se evidencia en la Figura 7

432 – 438	Banda de frecuencia de cada atribución
RADIOLOCALIZACIÓN	servicio
AFICIONADOS	
Exploración de la Tierra por Satélite (activo) 5.279A	Notas internacionales del Reglamento de Radiocomunicaciones
5.278 5.282	Servicios con atribuciones

Figura 7 Información del CNABF

Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia [6]

2.1.7 Tipos de licencia para el ER

La gestión del espectro requiere de un proceso denominado asignación de frecuencias, en este proceso se toma decisiones en torno a la administración, atribución, planificación y asignación de espectro radioeléctrico. Los procedimientos para la asignación de frecuencias dependen de muchos factores tales como la naturaleza de las bandas de frecuencia, destinación o uso de la banda, disponibilidad, tiempo entre otros [8]. Por tal motivo se otorgan permisos o licencias según el servicio y la banda que este requiere. Existen dos tipos de bandas de frecuencias según el tipo de licencia:

- **Bandas de frecuencias licenciadas:** Estas bandas de frecuencia como su nombre lo indica requieren de un permiso para su uso. Adicionalmente cuentan con una planificación centralizada por parte del ente encargado de la gestión del espectro garantizando un servicio libre de interferencias. Para que a un servicio se le asigne una banda de frecuencia licenciada deberán cumplir con una serie de características y especificaciones técnicas según las recomendaciones dadas por la UIT.
- **Bandas de frecuencias no licenciadas:** también denominadas bandas de uso libre, estas bandas no requieren algún tipo de contraprestación o pago por su uso. Los servicios que

hacen uso de este tipo de bandas deberán cumplir con una serie de requisitos y parámetros técnicos, aplicaciones, límites generales y no deberán causar interferencia a los usuarios primarios o usuarios licenciados.

2.2 ASIGNACIÓN DE ER Y BANDAS DE FRECUENCIA PARA TELEVISIÓN

La Televisión digital terrestre (TDT, por sus siglas en inglés) consiste en la digitalización de la señal analógica de televisión lo que trae consigo beneficios en cuanto imagen y sonido de alta calidad, adicionalmente permite la transmisión de múltiple contenido simultáneamente por un mismo ancho de banda, por tanto, hace un uso eficiente del espectro liberando una porción de este para ser usado para más aplicaciones. [10]. Para la implementación de TDT en los diferentes países es necesario que cada uno adopte uno de los estándares digitales disponibles, dentro de los cuales se encuentra Advanced Television Systems Committee (ATSC), Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB-T), Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB), Digital Video Broadcasting Terrestrial (DVB-T) y DVB-T2.

Colombia en primera instancia selecciono DVB-T sin embargo después de un estudio técnico realizado por la ANTV y la ANE se consideró hacer uso del estándar DVB-T2.

- Estándar DVB-T

El sistema DVB-T es un sistema desarrollado para la TDT, este estándar se adopta en la norma técnica de ETSI EN 300 744 [11] donde se especifica codificación, modulación y estructura de la trama. [12][13] En Colombia se realizó la adopción de este estándar el 28 de agosto de 2008 mediante el ente regulador CTNV (Comisión Nacional de Televisión) en donde se definió un proceso de transición de 10 años de señales analógicas a digitales para canales públicos y privados.

- Estándar DVB-T2

El sistema DVB-T2 es la extensión del sistema DVB-T este sistema transmite audio, video y otros datos por medio de Physical Layer Pipes (PLP) utilizando la modulación OFDM, ofreciendo una mayor tasa de bits que DVB-T [14] La adopción de Colombia se consolido mediante el acuerdo CNTV 04 del 20 de diciembre de 2011 en el cual se actualiza el estándar de TDT de DVB-T a DVB-T2, sin embargo la publicación que da conocimiento del sector se realiza por la CRC en la Resolución CRC 4337 de 2013. [15]

2.2.1 Plan de cobertura para TDT en Colombia

En el 2010 se inició formalmente el proceso de transición a la TDT, para el 2013 la RTVC adjudicó a la empresa Rohde&Schwarz Colombia y Rohde&Schwarz para el desarrollo de la primera fase de la red de TDT para canales públicos nacionales y regionales. Con esto se desarrolló un plan de cobertura en el cual se establece el cubrimiento poblacional por año hasta el 2018, como se evidencia en la Tabla 4[16]

Tabla 4 plan de cobertura en tecnología Digital

AÑO	% Cubrimiento Poblacional Total Acumulado	% Acumulado
31 de diciembre de 2014	49.48%	49.48%
31 de mayo 2015	14.12%	63.60%
31 de diciembre 2015	10.15%	73.75%
31 de diciembre 2016	12.51%	86.26%
31 de diciembre 2017	3%	89.26%
31 de diciembre 2018	3%	92.26%
TOTAL	92.26%	92.26%

RESOLUCIÓN ANTV 1132 de 2013 [16]

En la Tabla 5 se evidencia el registro del porcentaje de cobertura para la televisión análoga y televisión digital por departamento que se tenía para el 2015,[17] Actualmente la señal de TDT tiene cobertura en 23 ciudades principales y sus áreas aledañas: Bogotá, Medellín, Cali, Armenia, Pereira, Manizales, Barranquilla, Cartagena, Santa Marta, Valledupar, Montería, Sincelejo, Riohacha, Bucaramanga, Cúcuta, Ibagué, Neiva, Florencia, Tunja, Pasto, Villavicencio, Leticia y San Andrés. [18]

Tabla 5 Porcentaje de cobertura para televisión análoga y digital [17]

DEPARTAMENTO	TELEVISIÓN ANALOGA	TELEVISIÓN DIGITAL
Amazonas	18.18%	0.00%

Antioquia	76.80%	1.52%
Arauca	42.86%	0.00%
Atlántico	100.00%	0.00%
Bogotá D.C	100.00%	60.00%
Bolívar	75.56%	0.00%
Boyacá	74.80%	1.63%
Caldas	81.48%	0.00%
Caquetá	93.75%	0.00%
Casanare	26.32%	0.00%
Cauca	80.49%	0.00%
Cesar	92.00%	0.00%
Chocó	61.29%	0.00%
Córdoba	67.86%	3.57%
Cundinamarca	68.97%	3.02%
Guainía	11.11%	0.00%
Guaviare	25.00%	0.00%
Huila	78.38%	0.00%
La Guajira	93.33%	0.00%
Magdalena	70.00%	0.00%
Meta	55.17%	0.00%

Nariño	75.00%	0.00%
Norte de Santander	80.00%	2.50%
Putumayo	84.62%	0.00%
Quindío	100.00%	0.00%
Risaralda	85.71%	0.00%
San Andrés	100%	0.00%
Santander	59.77%	0.00%
Sucre	61.54%	0.00%
Tolima	78.72%	0.00%
Valle del Cauca	95.24%	0.00%
Vaupés	16.67%	0.00%
Vichada	25.00%	0.00%

Análisis del proceso de transición de la televisión análoga a la televisión digital en Colombia [17]

La ANE junto con la ANTV se encargan de realizar la distribución de frecuencias, para la banda de televisión se estableció una banda primaria exclusiva para TDT comprendida entre los 470 a 512 MHz del canal 14 al 20, una banda secundaria en la cual conviven la TDT junto con la TV analógica comprendida entre 512 a 698 MHz del canal 21 al 51 como se muestra en la Figura 8[19]

posible es necesario que los dispositivos que harán uso de las bandas de TV cuenten con una serie de características para que no causen interferencia perjudiciales a los servicios ya asignados. Dentro de las principales características se encuentran:

- Frecuencia de operación. los dispositivos de espacios en blanco sólo podrán hacer uso de los segmentos que se encuentren disponibles de acuerdo con lo establecido por la ANE dentro de la banda 470MHz a 698MHz.
- Modo de operación. estos dispositivos deberán operar en ubicaciones fijas determinadas en las modalidades de punto a punto o punto multipunto, excluyendo dispositivos portátiles o móviles.
- Densidad espectral de potencia máxima. la potencia que el dispositivo entrega a la antena no deberá superar 12.6 dBm medidos en cualquier segmento de 100 kHz.
- Ganancia de antena máxima: la ganancia máxima de la antena que se conecta al dispositivo no deberá superar 14 dB referidos a un dipolo de media onda (dBd).
- Límite de emisiones no deseadas. Las emisiones no deseadas no deberán superar una potencia de -42.8 dBm medidos en cualquier segmento de 100kHz.
- Altura máxima de antena. la altura de la antena por encima del nivel de terreno de los dispositivos de espacios en blanco no podrá superar 50 m.
- Altura máxima por encima del promedio del terreno. los dispositivos de espacios en blanco solo podrán operar en puntos geográficos cuya altura por encima del promedio del terreno sea menor a 800 m.
- Sólo se permite el uso de dispositivos de espacios en blanco que tengan capacidad de geolocalización automática con un margen de error inferior a ± 50 m.

2.2.4 Acuerdo No. 003 del 04 de junio de 2009

En el acuerdo No. 003 del 2009 se establece un plan de utilización de frecuencias, en este se encuentra las condiciones que debe cumplir las estaciones de difusión de televisión para su instalación en áreas urbanas y rurales de los municipios, según el registro de frecuencias de televisión. Adicionalmente se encuentran las especificaciones técnicas que se deben tener en cuenta para prestar servicios de televisión radiodifundida en Colombia estas son de cumplimiento obligatorio para cada uno de los operadores que prestan el servicio y el registro de frecuencias con el plan de distribución de canales para el servicio de televisión radiodifundida [21].

2.2.5 Acuerdo No.004 del 20 de diciembre de 2011

En el cual se modificó el acuerdo 8 de 2010, en donde se adoptaba para Colombia el estándar de televisión Digital Terrestre DVB-T, con un plazo hasta el 31 de diciembre de 2019 para la transición

del sistema análogo al sistema digital. De tal manera, ante el desarrollo de la segunda generación del estándar para la televisión digital terrestre (DVB-T2), se consideró conveniente actualizar para Colombia el estándar de Televisión Digital Terrestre DVB-T a DVB-T2, con un plazo de transición del sistema análogo al digital hasta el 31 de diciembre de 2019 por medio del acuerdo No. 004 del 20 de diciembre de 2011[22][23].

2.2.6 Acuerdo No. 002 del 04 de abril de 2012

Este acuerdo establece y reglamenta la prestación del servicio público de televisión abierta radiodifundida digital terrestre – (TDT), de acuerdo con lo prescrito se establece que a partir del 1 de enero de 2015 no se asignaran frecuencias para radiodifusión de señales de televisión en tecnología analógica. Asimismo, se constituye el uso de un canal para la TDT del operador público nacional, para cada operador regional, un canal para cada operador nacional privado, un canal para cada operador local con ánimo de lucro y un canal compartido para los operadores locales sin ánimo de lucro. Luego, se establece las metas de cubrimiento para los operadores de TDT, en donde es obligatorio el despliegue de la red de TDT en el año 2018[24].

2.2.7 Resolución 442 del 19 de Julio de 2017

En la resolución 442 del 19 de julio de 2017, se establece el plan técnico de televisión, para la planeación de frecuencias atribuidas al servicio de radiodifusión de televisión digital, considerando nuevos desarrollos tecnológicos, necesidades del sector, coexistencia con la televisión analógica y digital mientras el periodo de transición de tecnologías y la escasez de frecuencias atribuidas al servicio de televisión.[25]

2.2.8 Acuerdo en las zonas de frontera para la banda de VHF y UHF

- **Convenio con el ministerio de Transporte y Comunicaciones de la República del Perú:** Este convenio se establece entre el ministerio de Transporte y Comunicaciones de la República del Perú y el Ministerio de la Información y las comunicaciones de la República de Colombia. En este, se evidencia las condiciones técnicas que deben cumplir las estaciones de radiodifusión en zonas fronterizas para la asignación y uso de frecuencias radioeléctricas en bandas VHF y UHF. Colombia tiene libertad de utilizar canales pares en la zona de coordinación siempre y cuando se respete la intensidad de campo mínima para la protección de los servicios de radiodifusión en Perú[26].
- **Convenio con ex Consejo Nacional de Radiodifusión y Televisión de la República del Ecuador – CONARTEL:** Este convenio se establece entre el ex Consejo Nacional de Radiodifusión y Televisión de la República del Ecuador – CONARTEL y el Ministerio de la

Información y las comunicaciones de la República de Colombia. En este, se evidencia las condiciones técnicas que deben cumplir las estaciones de radiodifusión en zonas fronterizas para la asignación y uso de frecuencias radioeléctricas en bandas VHF y UHF. Colombia tiene libertad de utilizar canales pares en la zona de coordinación siempre y cuando se respete la intensidad de campo mínima para la protección de los servicios de radiodifusión en Ecuador.

2.3 ESPECTRO RADIOELECTRICO PARA INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

En la última década, los grandes avances en áreas de la electrónica, las comunicaciones y la información han permitido la innovación de nuevas tecnologías de gran impacto en diferentes aspectos sociales, económicos y ambientales de la población mundial. Estas nuevas tecnologías han marcado paradigmas que cambiaron el comportamiento y la forma de pensar de las personas, así como las tendencias del mercado mundial. Algunos ejemplos de estas tecnologías son los sistemas de comunicación inalámbricos, los dispositivos móviles y los servicios de ubicuidad, que según la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT) enmarcan dos dimensiones de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), que son la comunicación del usuario en todo INSTANTE y en cualquier LUGAR. Sin embargo el rol que juegan hoy en día los dispositivos no se limita sólo al hecho de conectar a las personas a Internet, sino que trasciende a la interconexión del mundo físico con el mundo virtual [27], dando paso a los sistemas ciber-físicos (CPS) [28][29]. Aunque abstracto, este concepto representa para los diferentes autores en literatura [29] un punto en el tiempo de convergencia de varias tecnologías de las comunicaciones y la información que enmarcan un nuevo paradigma emergente de cambio y punto de inflexión en la historia como lo fue Internet es su momento [1]. Este punto en el tiempo ha sido llamado Internet de los Objetos (IoT), que se ha definido de muchas maneras desde dos perspectivas generales.

Las proyecciones de crecimiento de dispositivos IoT conectados para el 2020 será de 50 mil millones como se evidencia en la Figura 9, lo que a su vez posiciona a las tecnologías del IoT con un gran potencial en el mercado actual. Otros trabajos definen el Internet de cualquier cosa o el Internet Industrial, como un nuevo paradigma de la tecnología concebida como una red global de máquinas y dispositivos capaces de comunicarse e interactuar independientemente. Según [30], las tecnologías sobre la cual se basan las aplicaciones de IoT son: (i) Radio Frequency Identification (RFID), (ii) Wireless Sensor Networks (WSN), (iii) Middleware, (iv) Cloud Computing y (v) IoT application Software.

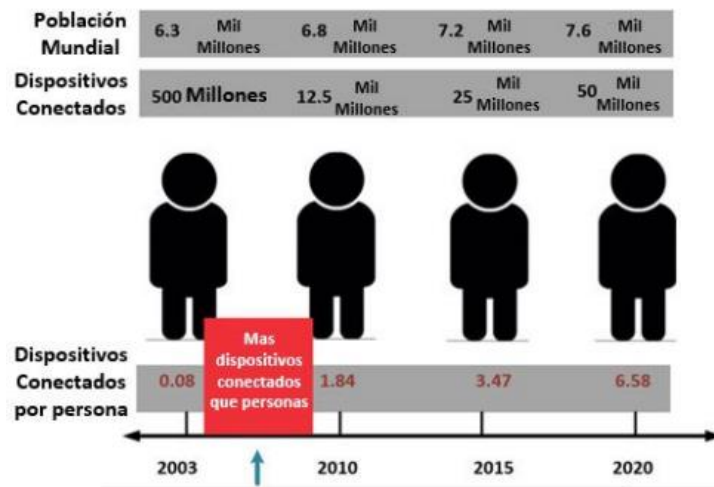


Figura 9 Dispositivos Conectados a IoT

The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises [30]

Con lo anterior se evidencia que las tendencias de penetración de las tecnologías habilitantes del IoT son prometedoras para varios procesos en diferentes sectores de la sociedad como se muestra en la Figura 10. IoT sin duda se presenta como el paradigma que permite la interacción de los objetos físicos con los virtuales en gran parte a través de redes inalámbricas y dispositivos móviles. El crecimiento exponencial de dispositivos y objetos conectados a través de Internet implica entonces grandes desafíos respecto a la escalabilidad, adaptabilidad, conectividad, accesibilidad y fiabilidad de las redes de acceso inalámbricas que permiten la conexión de estos dispositivos. Adicionalmente, en los dispositivos IoT existen retos en la duración de batería, complejidad reducida, cobertura extendida, almacenamiento de energía entre otros. Por todo lo anterior y los trabajos encontrados en la literatura [31][32][33][34] y en aplicaciones como smart grid [35], redes vehiculares [36][37], redes médicas [38], redes de emergencia [39], aplicaciones militares [36][40][41], aplicaciones para aeronaves [42][43][44], entre otras.

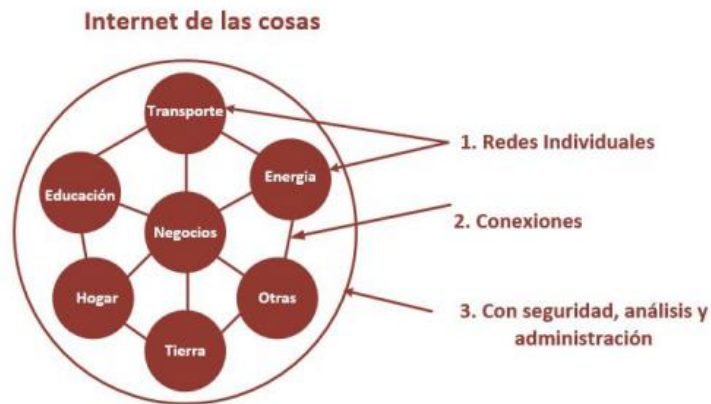


Figura 10 Sectores para IoT

The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything [1]

Se ha identificado las necesidades que tiene el espectro radioeléctrico con el despliegue de las redes inalámbricas del IoT [45], tales como:

- En el espectro de frecuencias más bajas la cobertura de área es más amplia y permite una mejor penetración en edificios.
- El espectro licenciado en comparación del espectro sin licencia asegura la entrega confiable de datos.
- Al requerirse de una autonomía energética alta para los dispositivos, debe ser necesario el uso de tecnologías hechas a la medida y altamente optimizadas que requieran de su propia asignación de espectro, de tal manera el uso del espectro sea eficiente.

Asimismo, los dispositivos IoT tienen requerimientos funcionales evidenciados en la Figura 11 y diferenciados en dos tipos comunicaciones masivas y comunicaciones críticas.

Comunicaciones Masivas	Comunicaciones Críticas
Casos de uso	
Recolección de información, edificios inteligentes, logística, seguimiento y gestión de flotas, medidores inteligentes y agricultura inteligente.	Control y monitorización, atención médica remota, seguridad y control del tráfico, aplicación industrial y control fabricación remota, infraestructuras críticas (automatización de fábrica, control de movimiento, control remoto, red inteligente, Internet táctil, automatización de procesos)
Requerimientos Operacionales	
Bajo costo de dispositivos, dispositivos económicos, bajo consumo de energía, pequeños volúmenes de datos. Puede tolerar la latencia de la señal.	Alta confiabilidad, alta disponibilidad, comunicaciones en tiempo real, latencia de señal muy baja y entrega a tiempo garantizada

Figura 11 Clasificación de requerimientos funcionales para el acceso de dispositivos IoT

Espectro radioeléctrico para el desarrollo de internet de las cosas [45]

Adicionalmente, la comisión Europea estableció una hoja de ruta para el uso del ER en IoT [46], evidenciada en la Figura 12 donde se identifican las principales características de IoT, tales como:

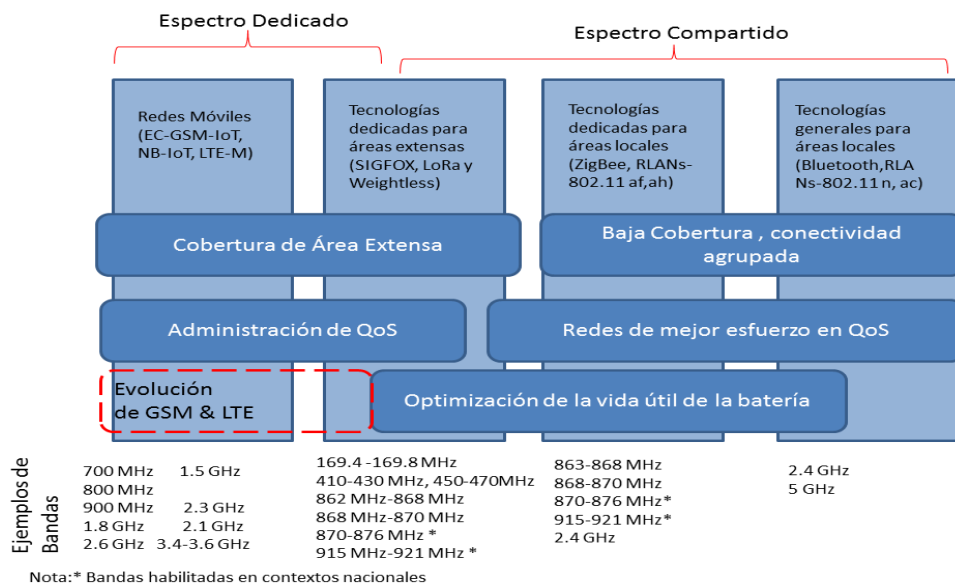


Figura 12 Hoja de ruta para el acceso de dispositivos IoT

Espectro radioeléctrico para el desarrollo de internet de las cosas [45]

- IoT es un servicio heterogéneo que comprende múltiples aplicaciones y requerimientos operacionales, a nivel de tasa de transmisión, confiabilidad, alcance y potencia de transmisión.
- La demanda de espectro radioeléctrico de IoT ha crecido exponencialmente a nivel de soluciones de acceso al ER, no obstante, es necesario debido a la masificación de dispositivos revisar posibilidades de espectro en bandas menores a 1GHz.
- La asignación de bandas de frecuencias para IoT no es necesario, el acceso de IoT puede realizarse con la armonización de un régimen de autorizaciones o en entidades estatales.
- Es de gran importancia para la economía global el desarrollo de tecnologías emergentes para dispositivos de corto alcance, redes de área extensa de bajo consumo energético y redes móviles de quinta generación.
- Las aplicaciones para redes privadas ultra-confiabiles tales como hospitales, fábricas inteligentes e industrias podrían desarrollar una serie de condiciones para la armonización del espectro. Por consiguiente, es necesario el desarrollo de soluciones innovadoras en el acceso de ER que utiliza estas aplicaciones.
- La colaboración de entidades estatales genera oportunidades para IoT tales como, redes satelitales o armonización de servicios de 800-900 MHz.
- Se requerirá un conjunto complementario de autorización general e individual para garantizar el acceso al espectro por parte de IoT. Debido a que no existe un marco único de autorización ni condiciones técnicas, que satisfagan todas las demandas posibles.
- IoT contiene un mayor conjunto de aplicaciones que los habilitados por las actuales redes celulares móviles. A pesar de esto, los nuevos casos de uso de IoT se encontrarán habilitados por 5G, debido a que algunas de las funcionalidades de IoT se diseñarán desde el inicio en 5G.

En Colombia las recomendaciones de uso del acceso del espectro radioeléctrico se han establecido por la ANE. Las recomendaciones de tipos de conectividad que podría utilizar IoT [45] se evidencian en la Tabla 6.

Tabla 6 Descripción de tipo de conectividad que podría utilizar IoT

Tipo de red por área de cubrimiento o alcance	Uso de Espectro	Espectro	Tipos de servicios comerciales	Que pueden ser usadas teniendo en cuenta la normatividad asociada
PAN Corto alcance	Libre exento o de licencia	Espectro compartido	Privado	Banda de uso según resolución colombiana 711 de 2016. TVWS resolución 461 de 2017
LAN Corto alcance				
LPWAN Área extendida, baja potencia	Libre exento o de licencia	Espectro compartido	Público/Privado	Bandas de frecuencia para Telecomunicaciones móviles internacionales IMT Colombia
	Requiere permiso IMT	Espectro dedicado	Público	
WAN Área extendida	Requiere permiso IMT	Espectro dedicado	Público	VHF en el rango de 30 MHz a 300 MHz UHF en el rango de 300 a 462.5 MHz Exceptuando el rango de 452.5 a 459.4 MHz
	Requiere permiso	Espectro dedicado	Privado	
GAN	Requiere permiso	Espectro de uso común, compartido y coordinado	Público	Bandas de frecuencia satelitales

Espectro radioeléctrico para el desarrollo de internet de las cosas [45]

2.4 ACCESO DINÁMICO AL ER Y RADIO COGNITIVA

Con el cambio tecnológico que ha tenido el mundo se ha generado iniciativas de asignación de espectro como se evidencia en el documento de la UIT [47]. El porcentaje de uso de bandas de espectro y la asignación fija de estas son una realidad según estudios de ocupación de espectro en

diferentes partes del mundo tales como Qatar [48], España [49], Bristol en Reino Unido [50], Alemania [49], China [51], Singapur [52], Francia [53], Bogotá en Colombia[54], Londres en el Reino Unido y París en Francia [55]. Como resultado, la radio cognitiva se ha enfocado en el estudio de huecos espectrales para mejorar el uso del espectro. La radio cognitiva es una tecnología que permite modificar parámetros de transmisión y recepción, su hardware es basado en radio definido por software (SDR) que es un sistema de comunicación que reemplaza los componentes de un sistema de comunicación tales como mezcladores, filtros y moduladores en hardware por radios reconfigurables implementado software por medio de dispositivos informáticos integrados.

Los SDR están compuestos por una matriz de compuertas programables (FPGA) e interfaz con conversor análogo – digital adaptado a un sistema de radiofrecuencias (RF) [56][57]. La radio cognitiva tiene la capacidad de capturar información de su entorno para su caracterización. A continuación se describen las fases de la capacidad cognitiva:

- **Detección espectral:** Captura la información espectral por medio del procesamiento de la señal de espectro.
- **Análisis espectral:** Caracteriza las oportunidades específicas teniendo en cuenta el sistema de detección espectral.
- **Decisión espectral:** Toma la decisión de las frecuencias que debe utilizar la radio según las mejores condiciones establecidas.

A continuación, se describe las oportunidades de espectro:

- **Frecuencia:** El ER está compuesto por bandas de frecuencia, que están asignadas para los diferentes servicios de telecomunicaciones que no se encuentran asignados en determinadas zonas geográficas.
- **Tiempo:** Oportunidades de espectro en el momento en que los usuarios primarios no hacen uso del espectro.
- **Geográfico:** Oportunidad de espectro respecto a la latitud, longitud, elevación y distancia de los usuarios primarios.
- **Ángulo:** oportunidad de espectro del conocimiento de la posición o dirección de los usuarios licenciados. Con respecto a las direcciones de los haces de radiación electromagnética y ubicación de estos usuarios.
- **Código:** Esta oportunidad busca detectar las secuencias de los códigos de espectro ensanchado, (saltos de tiempo (TH) y saltos en frecuencia (FH)) que utilizan los usuarios primarios. Adicionalmente se busca información de sincronización para

usuarios de radio cognitiva (CR) con el fin de coordinar sus transmisiones con respecto a los usuarios primarios.

Las redes cognitivas (CN) tienen la capacidad de ser auto-conscientes y realizar una auto-organización, basadas en la observación y caracterización de los elementos que la conforman. El intercambio de información entre los nodos no se limita a la arquitectura de protocolos de capas, por esta razón la toma de decisiones en estas redes se basa en el razonamiento y en el aprendizaje. Thomas en [58] definió para este tipo de redes un marco de tres capas, dándoles el nombre de capa de Requisitos, capa de Cognición y la capa de Red Adaptable por Software (SAN) con el fin de poner en práctica los objetivos de la CN como se ilustra en la Figura 13. El SAN como capa física se compone de elementos cognitivos tales como antenas inteligentes y radios cognitivas, que se pueden denominar elementos modificables dentro del sistema. La capa de Cognición se compone de un lenguaje cognitivo específico (CSL) por cada uno de los elementos modificables, esto permite establecer la comunicación de la CN con la interface de aplicaciones de usuario [59].

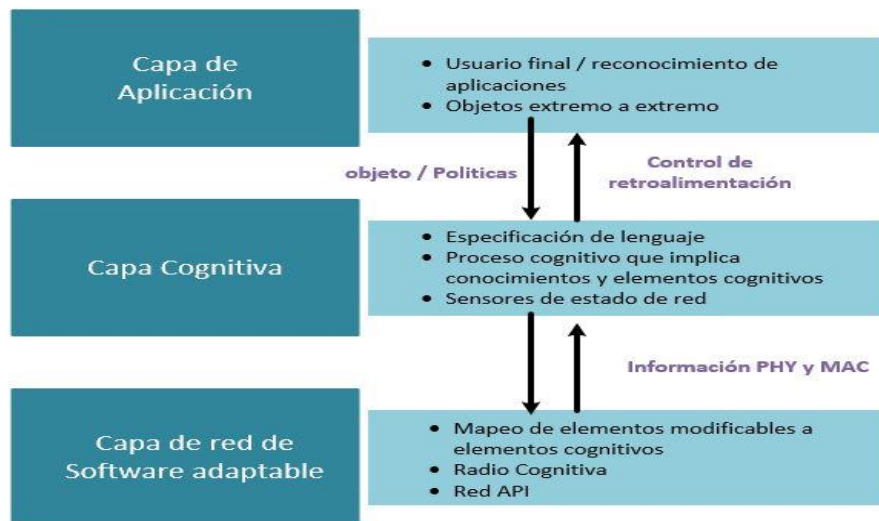


Figura 13 Modelo de Tres Capas para un Framework Cognitivo

Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives [58]

En la Figura 14 se observa la arquitectura de radios ágiles expuesta en [60]. La arquitectura se compone de los siguientes módulos que se denominan: identificador de oportunidades, interacción de políticas, gestor de oportunidades y capa flexible de PHY.

El identificador de oportunidades es responsable en identificar los huecos espectrales en las bandas de frecuencia y el tiempo por medio de la detección espectral. El módulo de interacción de políticas permite entender las políticas establecidas por el organismo regulador para la banda de frecuencia objetivo. El PHY flexible desempeña un papel crítico y es responsable de tomar las entradas del gestor de oportunidades y de conformar las señales para que cumplan con las políticas de transmisión establecidas por el organismo regulador para operar en la banda objetivo (esto podría realizarse utilizando la tecnología SDR). El gestor de oportunidades forma el núcleo de esta arquitectura. Controla el identificador de oportunidad solicitando mediciones en bandas objetivo, especificando la exactitud requerida de mediciones y / o tiempo de respuesta. El gestor de oportunidades también es responsable de recibir las entradas de los identificadores de oportunidad y los módulos de política y luego determinar si la banda en particular es una oportunidad o no. En caso de que sea una oportunidad, pasaría parámetros apropiados a la capa PHY flexible. Además, el gestor de oportunidades es responsable de mapear el tráfico MAC.

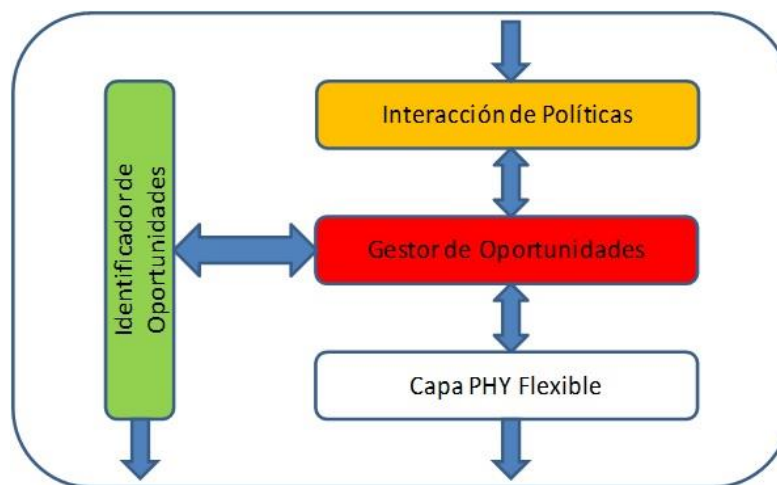


Figura 14 Arquitectura de radios

Ieee 802.22: an introduction to the first wireless standard based on cognitive radios [60]

2.4.1 Radios definidos por software (SDR)

El modelo funcional del SDR expuesto en [61], considera de acuerdo con la Figura 15 que los radios definidos por software soportan una capa física flexible por su capacidad de ser multibanda, establecer comunicación con diversidad de canales, acceder a un canal de radio frecuencia (RF), realizar el procesamiento de la señal en frecuencia intermedia (IF), modular/demodular y de realizar esquemas de seguridad en los datos. De esta forma al combinarlas, se obtiene lo que denomina Mitola [61] múltiples personalidades en los radios. El objetivo del modelo funcional del SDR es la compatibilidad y la predictibilidad. En lo que respecta a la compatibilidad el radio debe

ser compatible con el entorno radioeléctrico y con respecto a la predictibilidad consiste en preservar las propiedades que definen el servicio de radiocomunicaciones primario sin afectarlo al acceder a él con usuario secundario oportunístico. Adicionalmente siendo como objetivo de los SDR establecer servicios de telecomunicaciones, se considera un Framework a nivel de su arquitectura. Con el fin de cumplir estos objetivos, la arquitectura se basa en radios digitales programables (PDR) que se denominan también software defined radio (SDR) que se basan en interfaces RF, hardware (FPGA y DSP) y software [61].

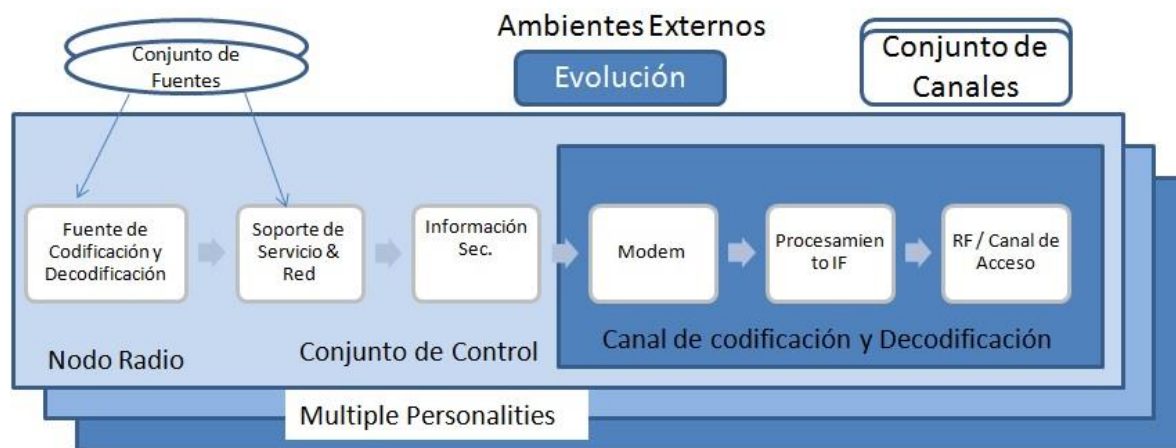


Figura 15 Modelo Funcional SDR

Implementación y configuración de un receptor de radio definido por software (SDR) para estudios de propagación [62]

El diagrama de bloques del SDR se define de acuerdo con la Figura 16 en la sección de RF, sección de IF y sección de banda [62]. La primera sección, la de RF o también llamada RF Front-End, es la encargada de recibir las señales a través de la antena para adecuarlas y convertirlas a frecuencia intermedia. En la siguiente sección, la de IF, se digitaliza la señal y se traslada de forma digital a banda base gracias al módulo Digital Down Converter (DDC). En la sección final, la de Banda Base, se lleva a cabo todo el procesamiento digital de la señal a través de software o programas específicos.

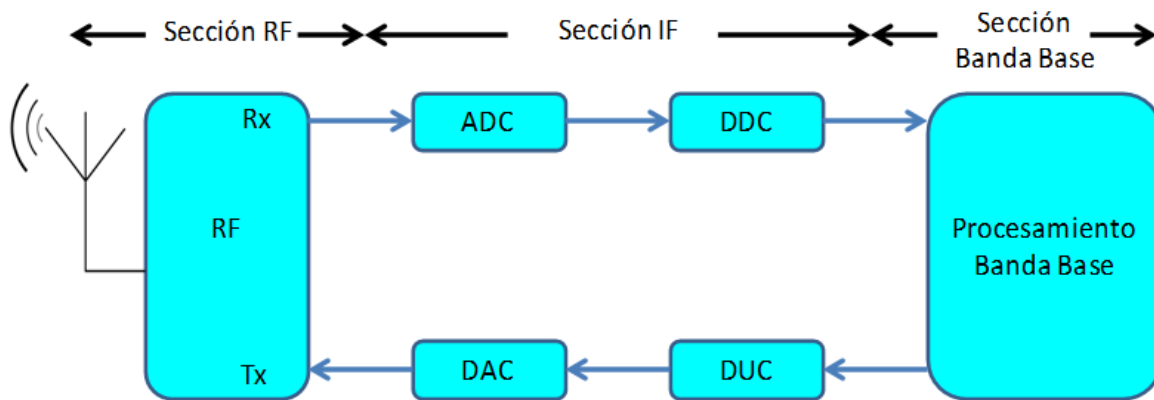


Figura 16 Diagrama de Bloques Rx y Tx SDR

Implementación y configuración de un receptor de radio definido por software (SDR) para estudios de propagación [62]

Desde otro punto de vista, la arquitectura de SDR se compone de dos partes esenciales un subsistema analógico y un subsistema digital como lo muestra en la Figura 17. El subsistema analógico cuenta la antena, filtros RF, amplificadores y generadores de frecuencias de referencia entre otros elementos. Por otra parte se encuentra el subsistema digital, que se adapta al hardware sobre el cual se encuentra implementado, dentro de sus componentes se encuentran los referentes a los equipos terminales y a los equipos de transmisión e interconexión tales como sistemas operativos, interfaces de programación de aplicaciones, etc [62].

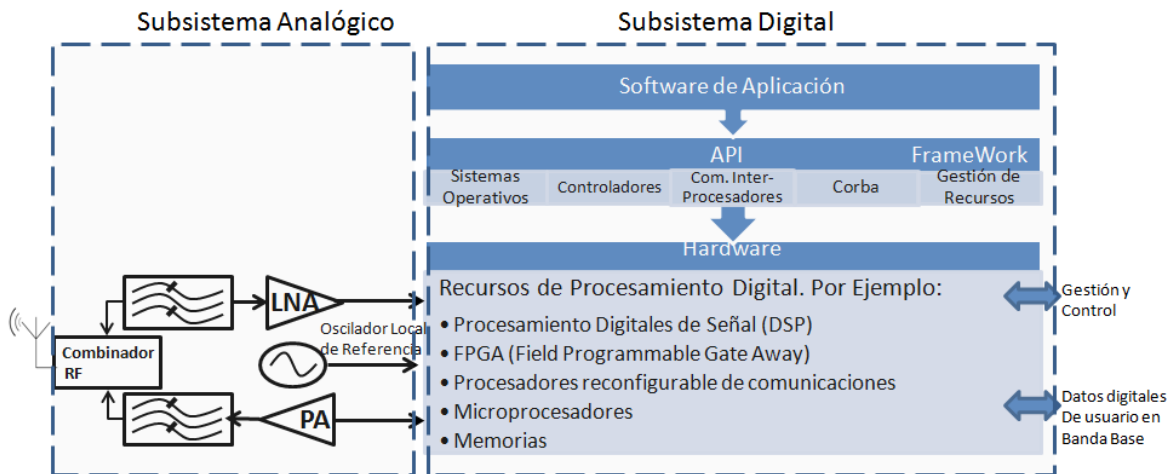


Figura 17 Arquitectura ideal del subsistema digital SDR

Implementación y configuración de un receptor de radio definido por software (SDR) para estudios de propagación [62]

2.4.2 Aplicaciones de radio cognitiva en IoT

El impacto de IoT en la industria TIC ha permitido el surgimiento de numerosas aplicaciones que generan retos a nivel del ERE. Esto, debido a que al utilizar las bandas ISM, se podrían generar interferencias con otras tecnologías ya desplegadas tales como Wi-Fi, ZigBee o Bluetooth, entre otras. Este hecho impone restricciones en el despliegue de las tecnologías que sustentan las nuevas aplicaciones del IoT, lo que convierte la gestión y utilización eficiente del ERE en un reto para IoT. Por esta razón, el uso de radio cognitiva resulta de mucho interés en el desarrollo de productos y servicios del IoT, debido que es una forma de volverlos adaptables a su entorno [36][63]. A continuación, se mostrará una revisión de los desarrollos de radio cognitiva para IoT y posteriormente una revisión de las aplicaciones más relevantes de IoT que usan la tecnología de radio cognitiva.

2.4.2.1 Smart Grids

Las redes eléctricas de distribución y generación deben tener una gestión de respuesta de la demanda (DRM), lo que implica que la aplicación debe funcionar en tiempo real. Esto genera múltiples retos dado que los precios de tarificación son dinámicos y se tiene una gran cantidad de usuarios. En la Figura 18 se puede observar la arquitectura de una red eléctrica inteligente residencial que hace uso de radio cognitiva. Esta red utiliza la banda ISM y por esta razón para evitar indisponibilidad en DRM se gestiona el ERE por medio de una base de datos que evita indisponibilidad de la red. Las redes eléctricas inteligentes para aplicaciones corporativas con acceso a servicios móviles como 2G, 3G y 4G hacen uso del espectro radioeléctrico licenciado. Con el uso del ERE licenciado (LFS) para redes corporativas y el uso del ERE sin licencia (ULFS) para redes residenciales, por medio de radio cognitiva se puede establecer, que la información de DRM se desplace del espectro no licenciado al espectro licenciado cuando los usuarios primarios no se encuentren utilizando el canal. Permitiendo que no se interrumpa la operación de los usuarios primarios y se maximice la eficiencia del uso del espectro.

Revisando un ejemplo de este tipo de redes, la infraestructura de medición avanzada (AMI) monitoriza el flujo de energía permitiendo la lectura en tiempo real [35].

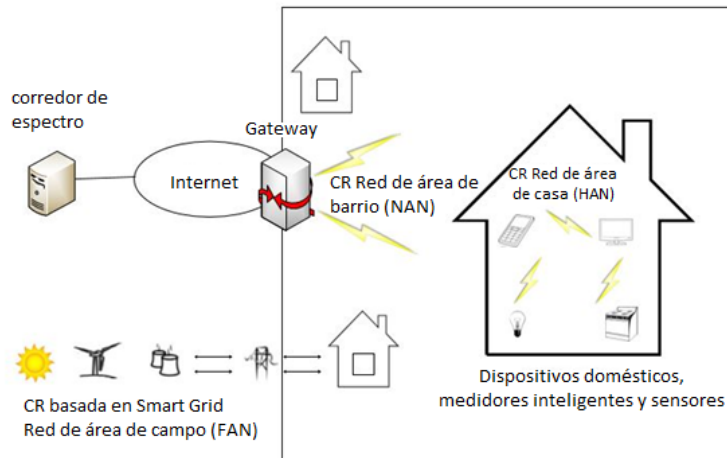


Figura 18 Arquitectura de red inteligente

Cognitive radio sensor networks: Smart communication for smart grids—A case study of Pakistan [35]

2.4.2.2 Redes vehiculares

En la actualidad el IoT ha jugado un papel muy importante para las redes vehiculares, proporcionando múltiples aplicaciones que permiten mejorar la seguridad de transporte, ayudar con la congestión vehicular, vigilancia en entornos urbanos y mejorar la experiencia de conducción [36].

Las aplicaciones multimedia en redes vehiculares han generado retos de QoS en el sistema de Telecomunicaciones lo que hace necesario el uso eficiente de ERE para estas redes. Por esto se pretende implementar el uso de detectores espectrales en vehículos [37], con el fin de identificar espacios espectrales determinando los canales vacíos en las bandas de ISM para realizar procesos de salto de frecuencia.

Según lo descrito en [64] existe una red vehicular denominada VANET que se caracteriza por equipar los vehículos con dispositivos inalámbricos, la cual permite la comunicación entre ellos, de esta forma, se puede enviar información acerca del tráfico, como por ejemplo nivel de congestión y alerta de accidentes. VANET utiliza dispositivos de radio cognitiva que permiten resolver la congestión de comunicación dentro de la red, por medio de la detección de espectro y el cambio dinámico de la disponibilidad de canales.

2.4.2.3 Redes médicas

En los sistemas de salud se hace uso de telemedicina, por medio de nodos de sensores corporales para los pacientes que permiten obtener diferentes datos para el control de salud. En el 2011 se aprobó el proyecto de sistema de atención medica asistida por medio de redes de área corporal (BAN) [65], este sistema contribuye al monitoreo remoto de condiciones de salud para

personas en zonas donde el número de especialistas médicos es bajo. Debido al manejo de la cantidad de datos médicos y a la QoS que las redes BAN requieren, es necesario el uso de sensores corporales inalámbricos (WBASN) con tecnología de radio cognitiva incorporada como se observa en la Figura 19. Los contextos cognitivos aplicados a los sensores proporcionan operatividad en el espectro, ayudando con los problemas de congestión y ancho de banda de la red.

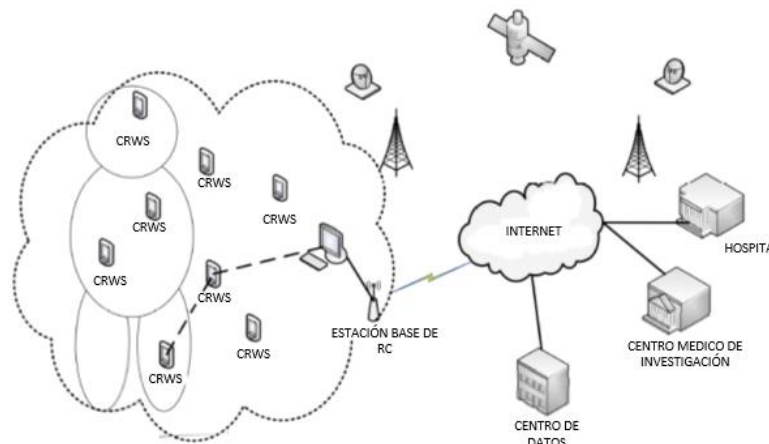


Figura 19 Modelo de la red BAN

Cognitive radio for M2M and Internet of Things: A survey [36]

2.4.2.4 Redes de emergencia

Los servicios de emergencia (policía, bomberos, servicios médicos de emergencia, entre otros) hoy en día hacen uso de las comunicaciones inalámbricas para su operatividad, de esta forma pueden responder a los diferentes incidentes de emergencia, para ello cuentan con herramientas tales como cámaras de vigilancia de video y sensores. Sin embargo, las frecuencias utilizadas para los servicios de emergencia tienden a congestionarse y existe problemas de interoperabilidad por el uso de múltiples frecuencias y equipos de radio incompatibles. Para solucionar estos inconvenientes, se propone el uso de radio cognitivo, que permite la utilización de espectro adicional para la operación diaria, además podrá hacer uso del espectro licenciado en la banda de 700 MHz, permitiendo el uso compartido de la banda con operadores comerciales. Por otra parte, radio cognitiva permite la mejora de la interoperabilidad de dispositivos y permite la adaptación a múltiples redes. En la Figura 20 [63] se muestra la arquitectura diseñada para un sistema de emergencia [63][35].

2.4.2.6 *Radio cognitiva en aeronaves*

Por medio de sistemas que implementan radio cognitiva, los sistemas de las aeronaves actuales tienen características mejoradas para la ubicación de otras aeronaves en vuelo, dentro de las que se encuentran sensibilidad aumentada, detección espectral de señales de baja potencia, entre otras. Adicionalmente la radio cognitiva permite implementar sistemas de geolocalización (GPS) más precisos que los comerciales gracias al uso de técnicas multispectrales que aprovechan la información temporal que tienen en su gran mayoría las diferentes señales de radio frecuencia [42], [66], [44]

2.4.3 *Bases de datos*

Una BDEB de televisión es una entidad que controla el uso del espectro de televisión por parte de dispositivos de espacios en blanco (DEB) en un área geográfica determinada. El control ejercido por la BDEB sobre los DEB consiste en permitirles acceder sin licencia a porciones del espectro, garantizando la no interferencia con los usuarios primarios. El espectro se considera disponible en función de factores técnicos y del marco regulatorio de cada país. Los DEB solicitan a la BDEB la lista de canales disponibles en ubicaciones específicas por medio del envío de coordenadas geográficas (latitud y longitud) o de una dirección. La BDEB responde con una lista de canales disponibles para esa ubicación geográfica. Dependiendo, de las necesidades de espectro y de la cantidad de canales disponibles, los DEB ocupan uno o más canales.

La lista de canales disponibles para una ubicación geográfica dada es calculada por la BDEB teniendo en cuenta parámetros del DEB como:

- Máxima Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE): cantidad de potencia que emitiría una antena isotrópica teórica.
- Densidad Espectral de Potencia (DEP): potencia media en el ancho de banda de referencia. [67]

La implementación y la administración de las BDEB varían de país a país. Por ejemplo, países como Estados Unidos y Canadá cuentan con BDEB administradas por terceros que cumplen con los requisitos regulatorios. Estas ofrecen múltiples modelos de negocio, que en su mayoría involucran el acceso a la información por cobro. En otros países, la BDEB es administrada por entidades gubernamentales.

- Estados Unidos: En Estados Unidos compañías como Google, Microsoft, Iconectiv, administran BDEB aprobadas por la Comisión Federal de comunicaciones (FCC, por sus siglas en inglés) [68]. La FCC determinó que las implementaciones de BDEB deben

proveer los canales de TV disponibles en cada ubicación dentro de un tiempo determinado. Adicionalmente los DEB deben acceder a la información de la base de datos con la información de geolocalización con el fin de obtener la lista de los canales disponibles para transmitir. Los DEB también deben detectar el canal que van a utilizar 30 segundos antes de la transmisión y mantener un análisis cada 60 segundos durante el funcionamiento [69] En caso de que se detecte un servicio con licencia los DEB abandonar en menos de 2 segundos el canal. De igual manera, la FCC certifica a los dispositivos inalámbricos que pueden conectarse a las BDEB.

- Singapur: Singapur es considerado como uno de los países del sudeste de Asia con mayores innovaciones de TVWS, varios proyectos pilotos se han llevado a cabo dentro de este país apoyados por el grupo piloto de espacio en blanco (SWSPG) [70], en zonas de TVWS denominadas zonas CRAVE (Cognitive Radio Venue). Las bandas de operación de TVWS en Singapur se encuentran en 230 MHz y 470-806 MHz [71], contando aproximadamente con 180 MHz de espectro para TVWS. Dentro de los requisitos técnicos que especifican para un dispositivo desee transmitir en esta banda, se encuentra la obligatoria conexión a una BDEB, esta base de datos debe administrar menos consultas por instancia de transacción y las consultas realizadas por los dispositivos deberán ser explícitamente realizadas.

3 SISTEMA DE PETICIÓN DE CANALES PARA RED DE TVWS

Para el sistema de petición de canales para el caso colombiano se han identificado, de acuerdo con la resolución 461 de 2017 de la ANE los siguientes componentes funcionales que se observan en la Figura 21.

1. Dispositivo Esclavo TVWS (470 MHz – 698 MHz): este dispositivo representa los usuarios que solicitan los recursos del espectro radioeléctrico en las bandas de TVWS.
2. Dispositivo Maestro TVWS: el dispositivo maestro genera el canal de comunicación entre el módulo de gestión del espectro y los dispositivos esclavos. Asimismo, realiza la petición de frecuencia libre en la banda TV para cada uno de los dispositivos esclavos conectados a este. En la comunicación envía hacia el módulo de gestión del espectro coordenadas y datos de contacto del dispositivo esclavo, y da respuesta con la confirmación de uso del canal y asignación de este.

3. Gestión de TVWS (Base de Datos): en este módulo se hace la verificación y validación de los requerimientos que deben cumplir los diferentes dispositivos que se harán uso de TVWS según el ente regulador.

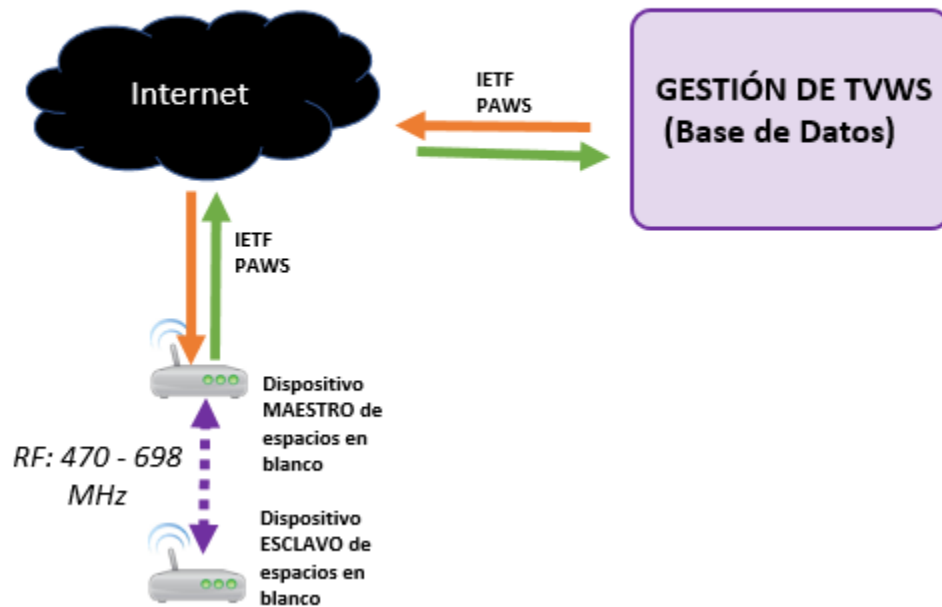


Figura 21 Arquitectura TVWS

En Colombia la ANE estableció las condiciones de operación de dispositivos que hagan uso de las bandas de TVWS que requieren una solicitud a una plataforma de software conocida como base de datos para espacios en blanco. En el año 2017 la ANE abrió una convocatoria para realización de dicha plataforma [72] dentro de la cual establecía como arquitectura de TVWS la evidenciada en la Figura 22 donde se definieron los siguientes módulos de operación:

- Módulo de interfaz gráfica del usuario: permite que cualquier usuario ingrese coordenadas de un punto para la verificación de disponibilidad del canal. Esta interfaz se accede desde cualquier explorador de internet.
- Módulo de comunicación: este módulo de comunicación establece el interfaz entre la plataforma y cualquier dispositivo, dentro de sus funciones se encuentra recibir y enviar

información decodificada entre dispositivos y otros módulos de la plataforma, para la realización de dicha comunicación utiliza el protocolo IETF PAWS recomendado por la ITU.

- Módulo de historial de comunicación: este módulo almacena el historial de todas las interacciones entre dispositivos y plataforma, para la consulta posterior por la ANE.
- Módulo de cálculo: calcula la lista de canales disponibles teniendo en cuenta la información de los dispositivos conectados a través del módulo de comunicación.
- Módulo de gestión de espectro: este módulo contiene toda la información de las asignaciones a los servicios atribuidos, la planeación de frecuencias, las áreas protegidas, un listado de números de identificación para dispositivos deshabilitados y los parámetros técnicos restringidos por la normativa de la ANE.

Cabe resaltar que la Universidad Santo Tomas ganó dicha convocatoria [73], y este proyecto participo en la propuesta ofrecida.

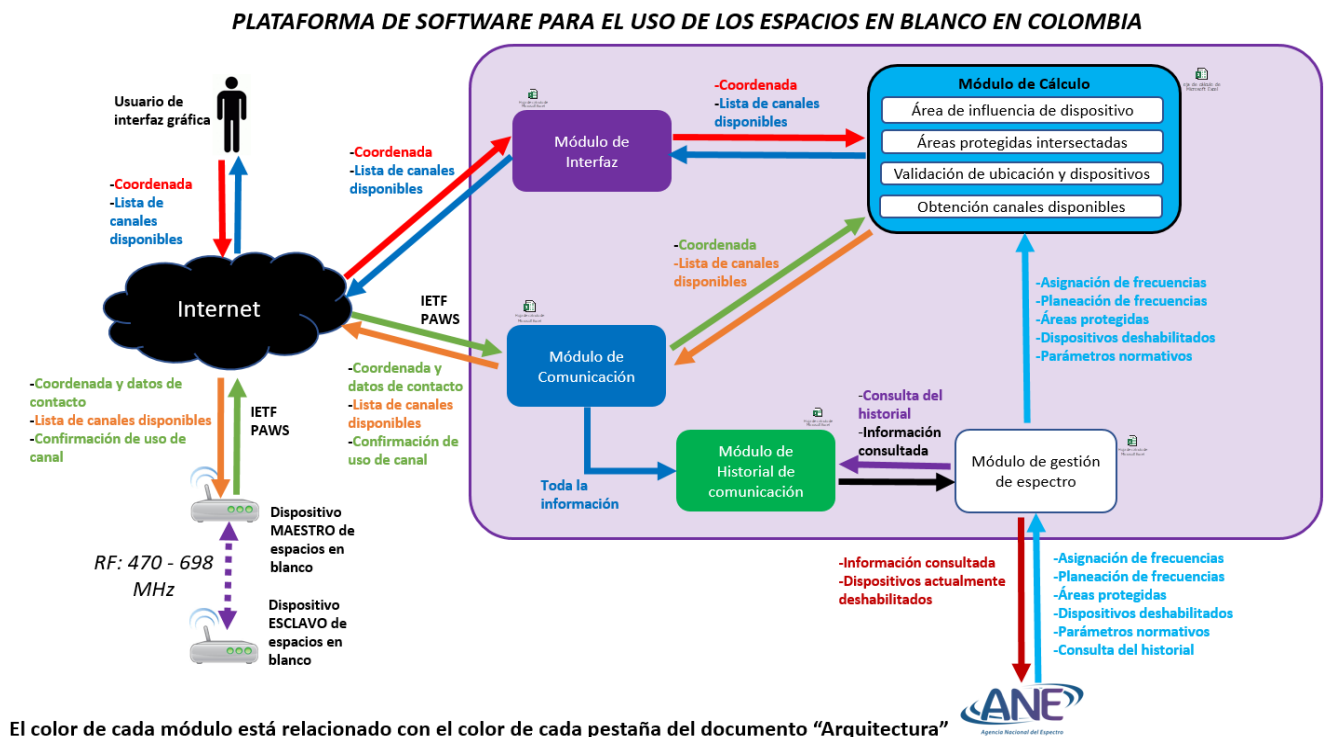


Figura 22 Arquitectura de TVWS establecida por la ANE

Plataforma de software para el uso de los espacios en blanco en Colombia [72]

Dado los componentes funcionales, el desarrollo de la investigación se dividió en dos fases que se denominan (i) generar la red maestro esclavo y (ii) el desarrollo del protocolo de dispositivos maestro de la red con la aplicación web de TVWS. Los equipos utilizados en el desarrollo de las dos fases se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 7 Características de equipos utilizados en el sistema de petición de canales para la red de TVWS

Equipo	Funcionamiento en el sistema	Características
Intel Edison 	La tarjeta Intel Edison permitió establecer una comunicación entre el dispositivo esclavo y el dispositivo maestro.	• Intel SoC que incluye una CPU Dual Core Intel Atom de 500MHz y 32 bits y un microcontrolador Intel Quark de 100MHz. • Memoria RAM de 1GB LPDDR3. • Almacenamiento en memoria flash de 4GB eMMC V4.51. • Voltaje de operación: 3.3V a 4.5V • Sistema operativo Linux
NooElec SDR 	Dispositivo SDR Esclavo, simula las características propicias para un dispositivo de espacios en blanco de TV según la resolución 461 de 2017.	• Dongle USB DVB-T (SDR) • Tienen una capacidad de frecuencia de aproximadamente 55MHz-2300MHz, con un espacio cerca de 1100-1200MHz. • Conector de antena MCX. • Compatibilidad con una gran variedad de paquetes de software, como MATLAB®, HDSDR, SDR

		Touch, GNU radio, entre otros.
PC	Dispositivo Maestro, Simula las características de un dispositivo maestro teniendo en cuenta el protocolo de comunicación con la base de datos de espacios en blanco de TV.	• Procesador Intel inside core i7. • Memoria RAM de 2 GB.
PC	Simula los mensajes de la aplicación web	• Procesador Intel inside core i7. • Memoria RAM de 2 GB.

3.1 GENERAR LA RED MAESTRO ESCLAVO

Teniendo en cuenta el diseño e implementación de una red maestro esclavo, se identificó los principales elementos dentro del sistema operativo Linux requeridos para la adaptación de equipos como se evidencia en la Tabla 8:

Tabla 8 Elementos de Linux

ELEMENTOS DE LINUX
Instalación de Intel Edison para Ubuntu
Conexión serial de placa de Intel Edison con los siguientes

comandos

- Sudo apt-get install screen
- Sudo screen /dev/ttyUSB0
115200

El sistema maestro – esclavo se realizó por medio del lenguaje de programación de Python, que permite el desarrollo de scripts y aplicaciones en la mayoría de las plataformas, adicionalmente es un lenguaje de uso libre y cuenta con estructuras de alto nivel. Para el sistema maestro – esclavo se desarrolló dos Script uno cliente y otro servidor, el script cliente se realizó en el dispositivo esclavo (Tarjeta Intel Edison) este extrajo las características requeridas de los equipos de espacios en blanco de televisión (NooElec SDR) y las almaceno en mensajes JSON adicionalmente envió dicha información por medio de un canal socket hacia el script servidor, el script servidor se desarrolló en el dispositivo maestro (Pc intel core i7) y se encargó de establecer el canal de comunicación socket y almacenar la información del dispositivo NooElec SDR para hacer la solicitud de espacios en blanco de televisión. Esta estructura se evidencia en la Figura 23.

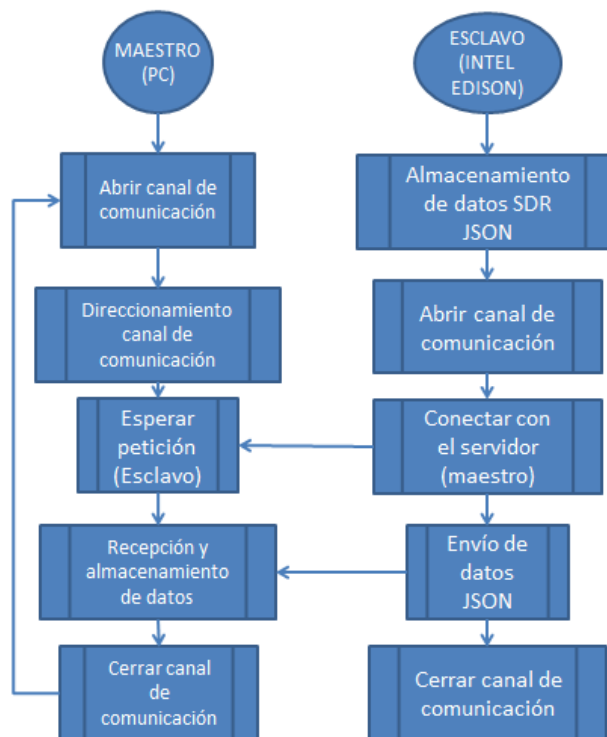


Figura 23 Estructura Maestro – Esclavo

3.1.1 IMPLEMENTACIÓN SISTEMA MAESTRO – ESCLAVO

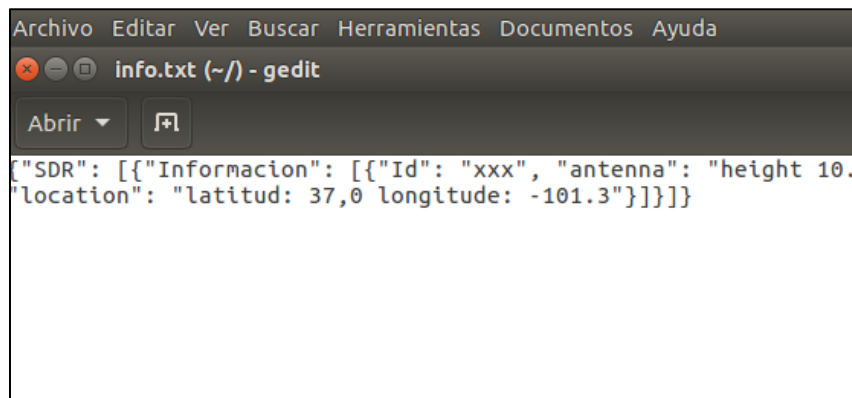
A continuación en la Figura 24 se evidencia la conexión entre maestro – esclavo correspondiente a la estructura de la Figura 23.



The image shows two terminal windows side-by-side. The left window has the prompt 'gina@gina-X450CA:~' and shows the command 'python esclavo.py' being executed. The right window also has the prompt 'gina@gina-X450CA:~' and shows the command 'python maestro.py' being executed. The output of the right window is 'Conectado' followed by a JSON object: '{"SDR": [{"Informacion": [{"Id": "xxx", "antenna": "height 10.3", "location": "latitud: 37,0 longitud: -101.3"}]}]}'.

Figura 24 Conexión maestro – esclavo

Adicionalmente, en la Figura 25 se puede observar el almacenamiento de información por parte del maestro en el archivo info.txt. La instalación y configuración de la red maestro – esclavo se puede evidenciar en el Anexo A.



The image shows a text editor window titled 'info.txt (~/) - gedit'. The menu bar includes 'Archivo', 'Editar', 'Ver', 'Buscar', 'Herramientas', 'Documentos', and 'Ayuda'. The text area contains the following JSON data: '{"SDR": [{"Informacion": [{"Id": "xxx", "antenna": "height 10.3", "location": "latitud: 37,0 longitud: -101.3"}]}]}'.

Figura 25 info.txt

3.1.2 Mensajes JSON

Los mensajes JSON son un formato ligero que se basa en texto plano, fue creado para el intercambio de datos basado en el lenguaje de JavaScript. JSON utiliza convenciones para el manejo de datos, comúnmente utilizadas en diferentes familias de lenguajes tales como: C, C++, Java, Perl, Python, entre otros, [74] lo que permite el intercambio de datos entre diferentes aplicaciones. Los mensajes JSON se constituyen por dos estructuras básicas: en primer lugar, una colección de parejas nombre – valor, conocidas en otros lenguajes como diccionarios, tablas, listas de claves, etc. En segundo lugar, se encuentra una lista ordenada de valores, que se encuentran ordenadas en arreglos, vectores, listas, etc.

3.2 DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE DISPOSITIVOS MAESTRO DE LA RED CON LA APLICACIÓN WEB DE TVWS

Este protocolo se implementa con el fin de regular las políticas del espectro de espacios en blanco proporcionando información disponible a los dispositivos que harán uso de este, de tal manera se genera una base de datos geoespacial en la cual se encuentra información necesaria que protege a los usuarios principales que hacen pago por el uso de este espectro, adicionalmente se encuentra la validación de parámetros que estos dispositivos tienen que cumplir establecidos por reguladores de espectro mencionados anteriormente en el Título 2.2.3 Resolución 461 de 2017 Estas especificaciones definen un protocolo extensible construido sobre la parte superior de protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP, por sus siglas inglés) y Seguridad en la Capa de Transporte (TLS, por sus siglas en inglés).

3.2.1 Especificaciones del protocolo

A continuación se evidencian las especificaciones que fueron necesarias para la elaboración del protocolo.

3.2.1.1 Paws (protocolo de acceso a la base de datos de espacios en blanco)

El protocolo de dispositivos maestro de la red con la aplicación web de TVWS, fue desarrollado de acuerdo con la RFC 7545 [75]. El Protocolo de PAWS es un protocolo estandarizado, definido e implementado para lograr la interoperabilidad entre múltiples dispositivos y una base de datos de TVWS, proporcionando a los usuarios secundarios oportunidades para la innovación y utilización del espectro [75]. Como se evidencia en el protocolo PAWS incluye:

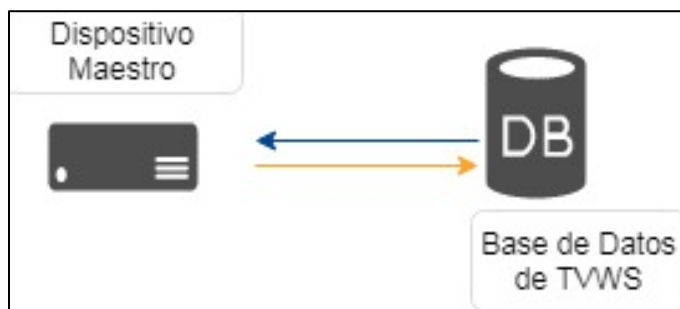


Figura 26 Arquitectura PAWS

Dispositivo Maestro: Es un dispositivo que realiza la consulta a la base de datos en su propio nombre y / o en nombre del dispositivo esclavo, para obtener información del espectro disponible.

Base de Datos de espectro: Es una entidad que contiene información actual sobre el espectro disponible en una ubicación determinada, así como otro tipo de información relacionada con disponibilidad y uso de espectro.

Por consiguiente, el dispositivo maestro utiliza el protocolo de PAWS para obtener información de espectro disponible para la ubicación de dispositivos esclavos. Dicha información contiene la seguridad necesaria para garantizar precisión, privacidad y confidencialidad de la ubicación del dispositivo encontrada en la base de datos de TVWS.

3.2.1.2 Secuencia de operaciones PAWS

La secuencia de operación establecida en el protocolo PAWS [75] es:

1. El dispositivo maestro obtiene (estática o dinámicamente) el Uri para una base de datos apropiada para su ubicación, a la cual enviar mensajes PAWS posteriores.
2. El dispositivo maestro establece una sesión HTTPS con la Base de datos.
3. El dispositivo maestro envía opcionalmente un mensaje de inicialización a la base de datos para intercambiar capacidades.
4. Si la base de datos recibe un mensaje de inicialización, responde con un mensaje de respuesta de inicialización en el cuerpo del HTTP respuesta.
5. La Base de Datos puede requerir que el Dispositivo Maestro sea registrado antes de brindar servicio.
6. El dispositivo maestro envía un mensaje de solicitud de espectro disponible a la base de datos. El mensaje puede estar en nombre de un dispositivo esclavo que hizo una solicitud al Dispositivo Maestro.
7. Si el Dispositivo Maestro está haciendo una solicitud en nombre de un Dispositivo Esclavo, el Dispositivo Maestro puede verificar con la Base de Datos que el dispositivo esclavo puede funcionar.
8. La base de datos responde con una respuesta de espectro disponible con cuerpo HTTP.
9. El dispositivo maestro puede enviar un mensaje de notificación de uso de espectro a la base de datos La notificación es solamente informativa.
10. Si la base de datos recibe un mensaje de notificación de uso del espectro, responde enviando al dispositivo maestro un mensaje que contiene el uso de espectro solamente notificando.

3.2.1.3 Funcionalidades del protocolo PAWS

- **Inicialización:** para dicho proceso se realiza el envío de un mensaje INIT_REQ, este mensaje tiene como finalidad la solicitud de inicialización para la conexión entre dispositivo

maestro y base de datos TVWS, dentro de sus parámetros se encuentra un descriptor del dispositivo maestro que contiene las características de este y su geolocalización. El mensaje de respuesta que da la base de datos TVWS se denominado INIT_RESPT en el momento que se establezca dicha conexión este mensaje contiene un conjunto de reglas aplicables a la ubicación del dispositivo, adicionalmente puede incluir un mensaje de notificación para hacer un cambio de URI de base datos en caso de necesitar base de datos alternativos. Este proceso se encuentra evidenciado en la Figura 27.

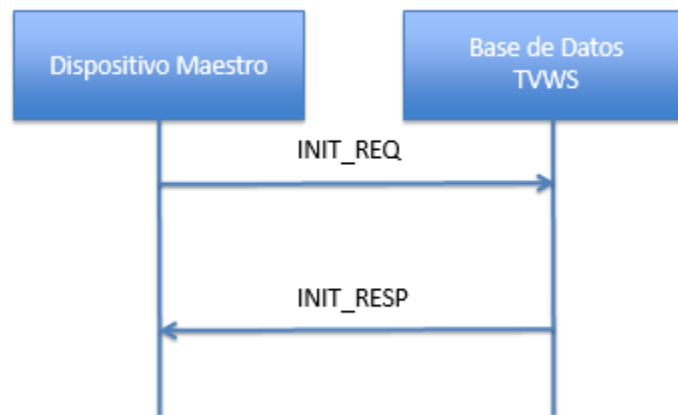


Figura 27 Proceso de Inicialización

Protocolo de acceso a la bases de datos de espacios en blanco [75]

- **Registro de dispositivo:** En este proceso el dispositivo maestro envía un mensaje denominado REGISTRATION_REQ que contiene la solicitud del registro en la base de datos, este mensaje contiene parámetros tales como el identificador del dispositivo, la geolocalización, información del propietario del dispositivo y características de la antena. Este mensaje es contestado por medio de un mensaje denominado REGISTRATION_RESP dado por la Base de Datos como se evidencia en la Figura 28 que contiene información de la reglamentación del espectro y notificación de la base de datos a la que se accede.

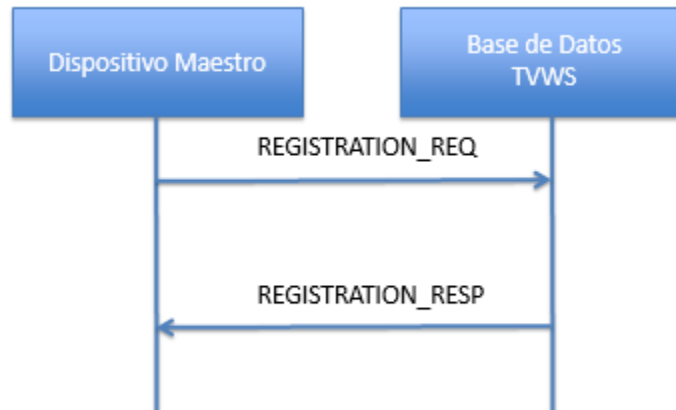


Figura 28 Registro del Dispositivo

Protocolo de acceso a la bases de datos de espacios en blanco [75]

- **Consulta de espectro disponible:** Para obtener el espectro disponible de la base de datos, el dispositivo esclavo envía datos de la solicitud del dispositivo esclavo como geo localización, características de este, entre otros por medio de un mensaje denominado AVAIL_SPECTRUM_REQ y la base de datos devuelve una respuesta que describe que frecuencias están disponibles y a que potencia de operación está permitido y un cronograma del tiempo de disponibilidad por medio del mensaje AVAIL_SPECTRUM_RESP. Adicionalmente si se quiere conocer el uso del espectro actual se envía un mensaje denominado SPECTRUM_USE_NOTIFY y la base de datos da respuesta del correspondiente listado por medio del mensaje SPECTRUM_USE_RESP. Estos mensajes se ven ilustrados en la Figura 29.

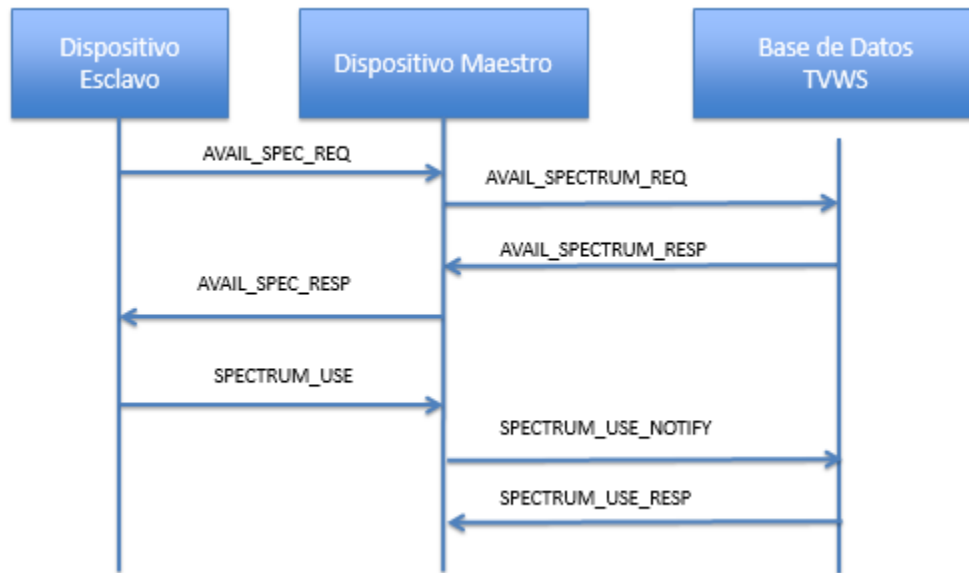


Figura 29 Consulta de espectro disponible

Protocolo de acceso a la bases de datos de espacios en blanco [75]

- **Validación del dispositivo:** En este proceso se efectúa la validación de los dispositivos esclavos conectados al dispositivo maestro, de tal manera que por medio de un mensaje denominado DEV_VALID_REQ se envía cada uno de los parámetros a evaluar por la base de datos para que estos puedan hacer uso del espectro que se encuentra de desuso. Una vez validada dicha información se envía según la respuesta obtenida un mensaje al dispositivo maestro en donde se evidencia que se pudo o no realizar la utilización de alguna frecuencia en el mensaje denominado DEV_VALID_RESP (Figura 30).

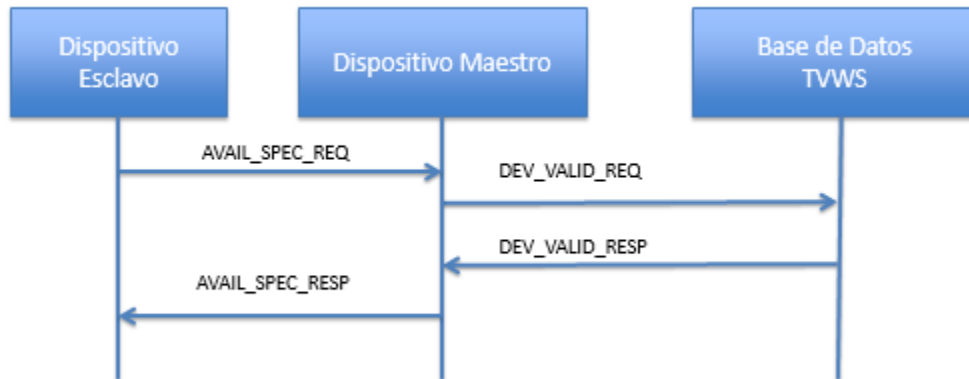


Figura 30 Validación del dispositivo

Protocolo de acceso a la bases de datos de espacios en blanco [75]

3.2.1.4 Mensajes de error

Cuando se presente algún error la base de datos deberá responder con mensaje que incluya elementos de error. Los parámetros que tiene dicho mensaje son:

- Código: Indica el tipo de error
- Mensaje: Contiene una descripción del error
- Datos: La base de datos puede incluir datos adicionales según el error.

Los errores se agrupan en las siguientes categorías:

- Mensajes 100s: Indican problemas de compatibilidad tales como, coincidencia de versión, funciones no compatibles o funciones no implementadas.
- Mensajes 200s: indica que la solicitud del dispositivo contiene un error el cual deberá ser modificado antes de hacer otra solicitud.
- Mensaje 300s: indica problemas relacionados con la validación y autorización.
- Del 32000 a 32768 se encuentra reservados para códigos de error JSON.

3.2.2 Implementación

En la implementación del protocolo se estableció la caracterización de cada uno de los mensajes para su implementación. La ANE estableció el protocolo PAWS como el protocolo para la comunicación entre la base de datos y los dispositivos maestros. Sin embargo, la base de datos se encuentra en desarrollo y a la fecha la ANE no ha definido el campo de *rulesetIds*, por esta razón en el desarrollo de este proyecto serán utilizadas las *rulesetIds* del ente regulador de la FCC. Se aclara que lo anterior no modificará el funcionamiento del protocolo y servirá de base para la propuesta para el cumplimiento del protocolo en la plataforma de huecos espectrales de la ANE.

Tabla 9 Mensaje INIT_REQ

	Parámetro	Descripción Parámetro	Contenido	Tipo
INIT_REQ	DeviceDescriptor	Contiene parámetros que identifican el dispositivo	serialnumber	string
			manufacturerId	string
			modelId	string
			rulesetIds	list
			Otros	any
	GeoLocation	Describe un punto o una región descrita por un polígono, es una ubicación	point	Ellipse
			region	Polygon
			confidence	int
	Ellipse	Forma para la representación de un punto considerando incertudumbre	center	Point
			semiMajorAxis	float
			semiMinorAxis	float
			orientation	float
	Point	Longitud y longitud del centro del parametro Ellipse	latitude	float
			longitude	float
	Polygon	Representación de una región	exterior	list

Elaboración de mensaje JSON INIT_REQ

```
{  
  
  "jsonrpc": "2.0",  
  
  "method": "spectrum.paws.init",  
  
  "params": {  
  
    "type": "INIT_REQ",  
  
    "version": "1.0",  
  
    "deviceDesc": {  
  
      "serialNumber": "XXX",  
  
      "fccId": "YYY",  
  
      "rulesetIds": ["ANE.TVWS"]  
  
    },  
  
    "location": {  
  
      "point": {  
  
        "center": {"latitude": 37.0, "longitude": -101.3}  
  
      }  
  
    }  
  
  },  
  
  "id": "xxxxxxx"  
  
}
```

Tabla 10 Mensaje INIT_RESP

	Parámetro	Descripción Parámetro	Contenido	Tipo
INIT_RESP	RuleSetInfo	Parámetros para el ruleset de un dominio regulatorio	authority	string
			rulesetId	string
			maxLocationChange	float
			maxPollingSecs	int
			other	any
	DbUpdateSpec	Cambio de URI de la base de datos	databases	list

Elaboración de mensaje JSON INIT_RESP

```
{
  "jsonrpc": "2.0",
  "result": {
    "type": "INIT_RESP",
    "version": "1.0",
    "rulesetInfos": [
      {
        "authority": "us",
        "rulesetId": " ANE.TVWS ",
        "maxLocationChange": 100,
        "maxPollingSecs": 86400
      }
    ]
  }
}
```

```

    }

    ]

    },

    "id": "xxxxxxx"

}

```

Tabla 11 Mensaje REGISTRATION_REQ

	Parámetro	Descripción Parámetro	Contenido	Tipo
REGISTRATION_REQ	RuleSetInfo	Parámetros para el ruleset de un dominio regulatorio	authority	string
	DatabaseSpec	Nombre y URI de una base de datos	name	string
			uri	string
	DeviceOwner	Información sobre los dueños del dispositivo dada en el registro	owner	vcard
			operator	vcard
	AntennaCharacteristics	Información adicional sobre la antena	height	float
			heightType	enum
			heightUncertainty	float
			characteristics	various

Elaboración de mensaje JSON REGISTRATION_REQ

```

{

    "jsonrpc": "2.0",

    "method": "spectrum.paws.register",

    "params": {

```

```

"type": "REGISTRATION_REQ",

"version": "1.0",

"deviceDesc": {

  "serialNumber": "XXX",

  "fccId": "YYY",

  "rulesetIds": ["ANE.TVWS "]

},

"location": {

  "point": {

    "center": {"latitude": 37.0, "longitude": -101.3}

  }

},

"deviceOwner": {

  "owner": [

    "vcard", [

      ["version", {}, "text", "4.0"],

      ["kind", {}, "text", "org"],

      ["fn", {}, "text", "Racafrax, Inc."]

    ]

  ],

```

```

    "operator": [
        "vcard", [
            ["version", {}, "text", "4.0"],
            ["fn", {}, "text", "John Frax"],
            ["adr", {}, "text",
                ["", "", "100 Main Street",
                    "Summersville", "CA", "90034", "USA"]
            ]
        ],
        ["tel", {}, "uri", "tel:+1-213-555-1212"],
        ["email", {}, "text", "j.frax@rackafrax.com"]
    ]
},
"antenna": {"height": 10.2, "heightType": "AGL"}
},
"id": "xxxxxxx"
}

```

Tabla 12 Mensaje REGISTRATION_RESP

	Parámetro	Descripción Parámetro	Contenido	Tipo
REGISTRATION_RESP	RuleSetInfo	Parámetros para el ruleset de un dominio regulatorio	authority	string
	RuleSetInfo	Parámetros para el ruleset de un dominio regulatorio	El mismo del mensaje INI_RESP	
	DbUpdateSpec	Nombre y URI de una base de datos	El mismo del mensaje INI_RESP	

Elaboración de mensaje JSON REGISTRATION_RESP

```
{
  "jsonrpc": "2.0",
  "result": {
    "type": "REGISTRATION_RESP",
    "version": "1.0",
    "rulesetInfos": [
      {
        "authority": "us",
        "rulesetId": " ANE.TVWS "
```

```

        "maxLocationChange": 100,

        "maxPollingSecs": 86400

    }

],

},

    "id": "xxxxxxx"

}

```

Tabla 13 Mensaje DEV_VALID_REQ

	Parámetro	Descripción Parámetro	Contenido	Tipo
DEV_VALID_REQ	RuleSetInfo	Parámetros para el ruleset de un dominio regulatorio	authority	string
	DeviceDescriptor	Contiene parámetros que identifican el dispositivo	El mismo del mensaje INI_REQ	
	MasterDeviceDesc: DeviceDescriptor	El dispositivo maestro puede proveer su propio descriptor		

Elaboración de mensaje JSON DEV_VALID_REQ

```

{

    "jsonrpc": "2.0",

    "method": "spectrum.paws.verifyDevice",

    "params": {

```

```
"type": "DEV_VALID_REQ",

"version": "1.0",

"deviceDesc": {

  "serialNumber": "XXX",

  "fccId": "YYY",

  "rulesetIds": ["ANE.TVWS "]

},

"MasterDeviceDesc": {

  "serialNumber": "XXX",

  "fccId": "YYY",

  "rulesetIds": ["FccTvBandWhiteSpace-2010"]

},

"id": "xxxxxxx"

}
```

Tabla 14 Mensaje DEV_VALID_RESP

	Parámetro	Descripción Parámetro	Contenido	Tipo
DEV_VALID_RESP	RuleSetInfo	Parámetros para el ruleset de un dominio regulatorio	authority	string
	DeviceDescriptor	Contiene parámetros que identifican el dispositivo	El mismo del mensaje INIT_REQ	
	isValid	Verifica la validez del dispositivo	Boolean	
	reason	Si no es válido podría especificar las razones	String	
	DbUpdateSpec	Nombre y URI de una base de datos	El mismo del mensaje INIT_RESP	

Elaboración de mensaje JSON DEV_VALID_RESP

```
{
  "jsonrpc": "2.0",
  "result": {
    "type": "DEV_VALID_RESP",
    "version": "1.0",
    "DeviceValidities": [
```

```
{  
  
  "deviceDesc": {  
  
    "serialNumber": "XXX",  
  
    "fccId": "YYY",  
  
    "rulesetIds": ["ANE.TVWS "]  
  
  },  
  
  "isValid": True,  
  
  "reason": "xsfgfrg",  
  
}  
  
]  
  
,  
  
"id": "xxxxxxx"  
  
}
```

Tabla 15 Mensaje AVAIL_SPECTRUM_REQ

	Parámetro	Descripción Parámetro	Contenido	Tipo
AVAIL_SPECTRUM_REQ	DeviceDescriptor	Contiene parámetros que identifican el dispositivo	El mismo del mensaje INIT_REQ	DeviceDescriptor
	Geolocation	Describe un punto o una región descrita por un polígono, es una ubicación	El mismo del mensaje INIT_REQ	
	DeviceOwner	Información sobre los dueños del dispositivo dada en el registro	El mismo mensaje de REGISTRATION_REQ	
	AntennaCharacteristics	Información adicional sobre la antena	El mismo mensaje de REGISTRATION_REQ	
	DeviceCapabilities	proporcionan información a la Base de datos	frequencyRanges	list

Elaboración de mensaje JSON AVAIL_SPECTRUM_REQ

```
{
  "jsonrpc": "2.0",
  "method": "spectrum.paws.getSpectrum",
  "params": {
    "type": "AVAIL_SPECTRUM_REQ",
```

```
"version": "1.0",

"deviceDesc": {

  "serialNumber": "XXX",

  "fccId": "YYY",

  "rulesetIds": ["FccTvBandWhiteSpace-2010"]

},

"location": {

  "point": {

    "center": {"latitude": 37.0, "longitude": -101.3}

  }

},

"antenna": {"height": 10.2, "heightType": "AGL"}

},

"id": "xxxxxxx"

}
```

Tabla 16 Mensaje AVAIL_SPECTRUM_RESP

	Parámetro	Descripción Parámetro	Contenido	Tipo
AVAIL_SPECTRUM_RESP	DeviceDescriptor	Contiene parámetros que identifican el dispositivo	El mismo del mensaje INIT_REQ	DeviceDescriptor
	Timestap	Expresa en UTC con el formato YYYY-MM-DDThh:mm:ssZ		String
	SpectrumSpecs	Encapsula el calendario de disponibilidad espectro para un conjunto de reglas.	Rulesetinfo	Rulesetinfo
			SpectrumSchedules	List
			TimeRange	Eventime
			FrequencyRange	List
			needsSpectrumReport	Boolean
			maxTotalBwHz	Float
			maxContiguousBwHz	Float

Elaboración de mensaje JSON AVAIL_SPECTRUM_RESP

```
{
  "jsonrpc": "2.0",
  "resultado": {
    "tipo": "AVAIL_SPECTRUM_RESP",
    "versión": "1.0",
    "marca de tiempo": "2013-03-02T14: 30: 21Z",
    "deviceDesc": {
      "serialNumber": "XXX",
      "fccId": "YYY",

```

```

    "rulesetIds": ["ANE.TVWS"]

    },

    "spectrumSpecs": [

        {

            "rulesetInfo": {

                "autoridad": "nosotros",

                "rulesetId": " ANE.TVWS"

            },

            "needsSpectrumReport": falso,

            "spectrumSchedules": [

                {

                    "hora del evento": {

                        "startTime": "2013-03-02T14: 30: 21Z",

                        "stopTime": "2013-03-02T20: 00: 00Z"

                    },

                    "espectros": [

                        {

                            "resoluciónBwHz": 6e6,

                            "perfiles": [

                                ...

                                [

                                    {"hz": 5.18e8, "dbm": 30.0},

```

```

        {"hz": 5.36e8, "dbm": 30.0},

        {"hz": 5.36e8, "dbm": 36.0},

        {"hz": 5.42e8, "dbm": 36.0}

    ],

    [

        {"hz": 6.20e8, "dbm": 30.0},

        {"hz": 6.26e8, "dbm": 30.0}

    ],

    ...

]

}

]

},

{

    "hora del evento": {

        "startTime": "2013-03-02T22: 00: 00Z",

        "stopTime": "2013-03-03T14: 30: 21Z"

    },

```

En la Figura 31 se evidencia el diagrama de secuencia de los mensajes correspondientes al protocolo PAWS.

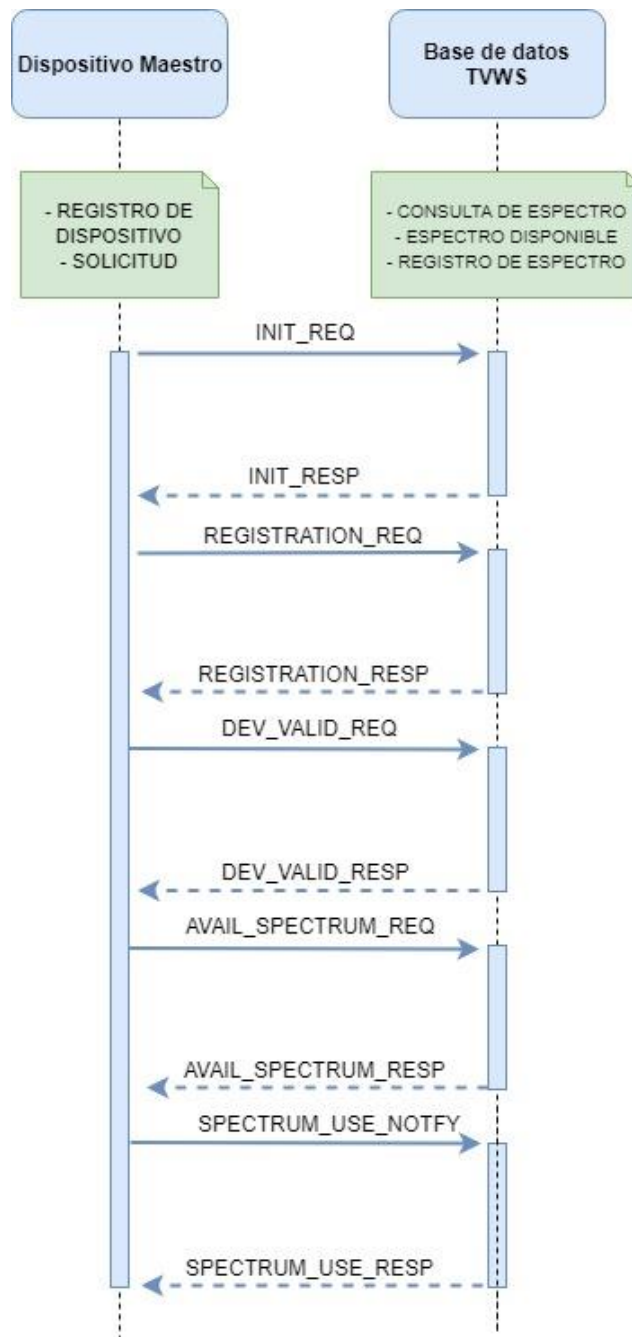
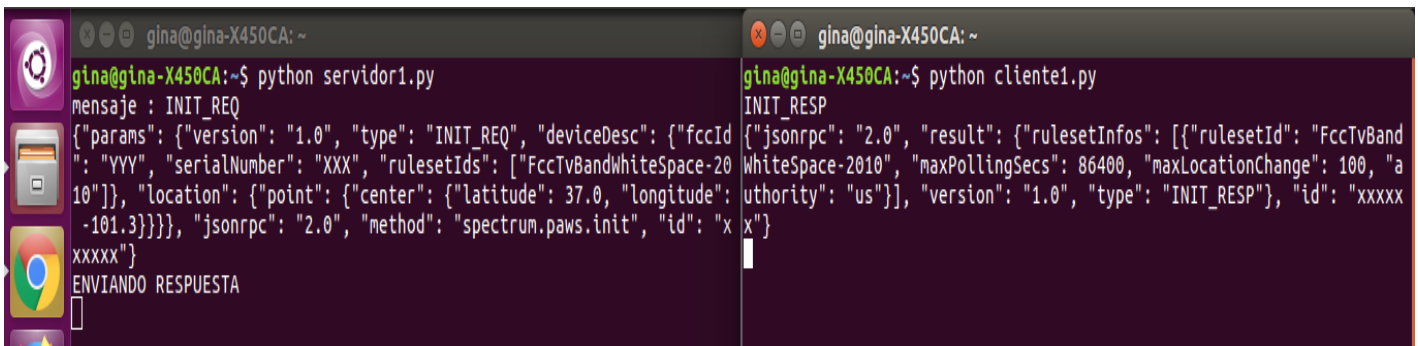


Figura 31 Diagrama de Secuencia PAWS

3.2.3 Pruebas y resultados obtenidos

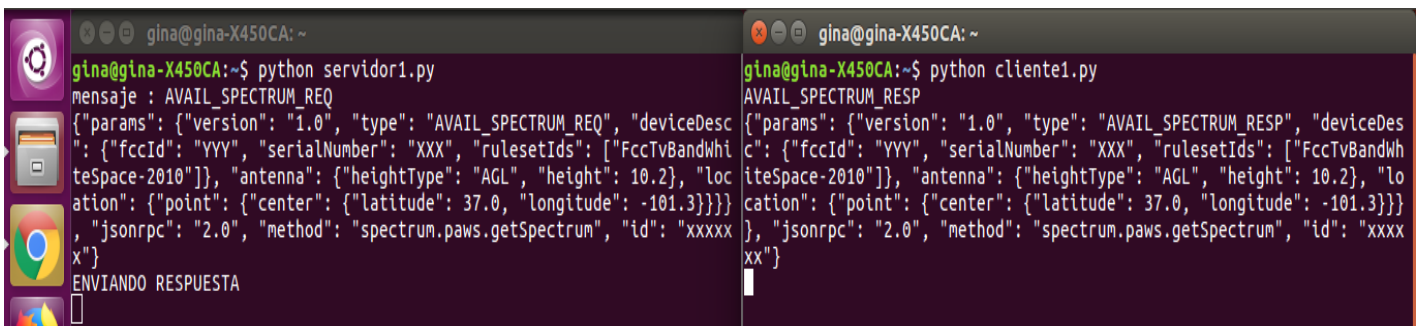
Los dispositivos utilizados en el desarrollo de las pruebas fueron los establecidos en la Tabla 7 y de acuerdo las especificaciones de la Tabla 8. Las pruebas de protocolo fueron establecidas de acuerdo con el diagrama de secuencia de la Figura 31.

Para la verificación del sistema se ejecutó el programa servidor1 escuchando en el puerto TCP 8080 con la dirección IP 192.168.0.19, quien estableció conexión con el programa cliente1 por medio de un socket. Para verificar la comunicación entre dispositivo maestro y base de datos TVWS se observa en la Figura 32, Figura 33 y Figura 34 los mensajes del protocolo PAWS.



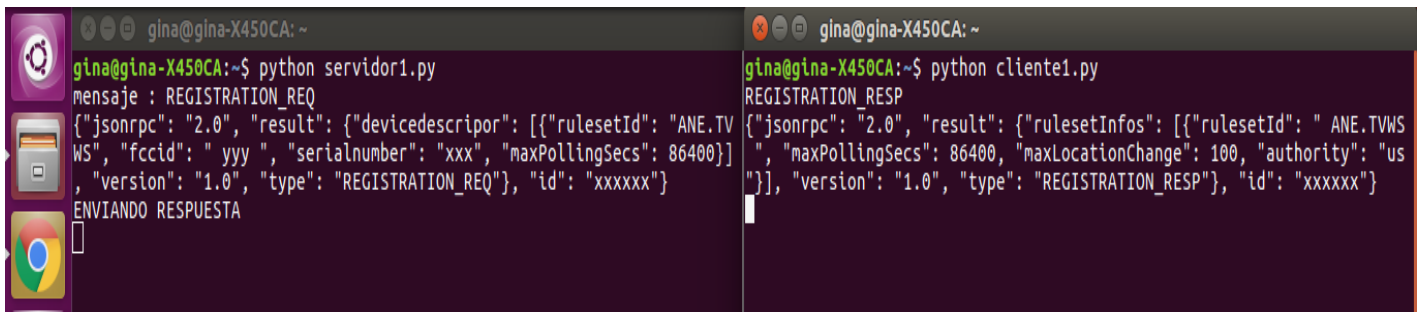
```
gina@gina-X450CA: ~  
gina@gina-X450CA:~$ python servidor1.py  
mensaje : INIT_REQ  
{  
  "params": {  
    "version": "1.0",  
    "type": "INIT_REQ",  
    "deviceDesc": {  
      "fccId": "YYY",  
      "serialNumber": "XXX",  
      "rulesetIds": ["FccTvBandWhiteSpace-2010"],  
      "location": {  
        "point": {  
          "center": {  
            "latitude": 37.0,  
            "longitude": -101.3  
          }  
        }  
      },  
      "jsonrpc": "2.0",  
      "method": "spectrum.paws.init",  
      "id": "xxxxx"  
    }  
  }  
}  
ENVIANDO RESPUESTA  
[ ]  
gina@gina-X450CA: ~  
gina@gina-X450CA:~$ python cliente1.py  
INIT_RESP  
{  
  "jsonrpc": "2.0",  
  "result": {  
    "rulesetInfos": [{  
      "rulesetId": "FccTvBandWhiteSpace-2010",  
      "maxPollingSecs": 86400,  
      "maxLocationChange": 100,  
      "authority": "us"  
    }  
  ],  
  "version": "1.0",  
  "type": "INIT_RESP",  
  "id": "xxxxx"  
}
```

Figura 32 Comunicación protocolo PAWS mensajes INIT_REQ – INIT_RESP



```
gina@gina-X450CA: ~  
gina@gina-X450CA:~$ python servidor1.py  
mensaje : AVAIL_SPECTRUM_REQ  
{  
  "params": {  
    "version": "1.0",  
    "type": "AVAIL_SPECTRUM_REQ",  
    "deviceDesc": {  
      "fccId": "YYY",  
      "serialNumber": "XXX",  
      "rulesetIds": ["FccTvBandWhiteSpace-2010"],  
      "antenna": {  
        "heightType": "AGL",  
        "height": 10.2,  
        "location": {  
          "point": {  
            "center": {  
              "latitude": 37.0,  
              "longitude": -101.3  
            }  
          }  
        }  
      },  
      "jsonrpc": "2.0",  
      "method": "spectrum.paws.getSpectrum",  
      "id": "xxxxx"  
    }  
  }  
}  
ENVIANDO RESPUESTA  
[ ]  
gina@gina-X450CA: ~  
gina@gina-X450CA:~$ python cliente1.py  
AVAIL_SPECTRUM_RESP  
{  
  "params": {  
    "version": "1.0",  
    "type": "AVAIL_SPECTRUM_RESP",  
    "deviceDesc": {  
      "fccId": "YYY",  
      "serialNumber": "XXX",  
      "rulesetIds": ["FccTvBandWhiteSpace-2010"],  
      "antenna": {  
        "heightType": "AGL",  
        "height": 10.2,  
        "location": {  
          "point": {  
            "center": {  
              "latitude": 37.0,  
              "longitude": -101.3  
            }  
          }  
        }  
      },  
      "jsonrpc": "2.0",  
      "method": "spectrum.paws.getSpectrum",  
      "id": "xxxxx"  
    }  
  }  
}
```

Figura 33 Comunicación protocolo PAWS mensajes AVAIL_SPECTRUM_REQ - AVAIL_SPECTRUM_RESP



```
gina@gina-X450CA: ~  
gina@gina-X450CA:~$ python servidor1.py  
mensaje : REGISTRATION_REQ  
{"jsonrpc": "2.0", "result": {"devicedescriptor": [{"rulesetId": "ANE.TVWS", "fccid": " yyy ", "serialnumber": "xxx", "maxPollingSecs": 86400}], "version": "1.0", "type": "REGISTRATION_REQ"}, "id": "xxxxxx"}  
ENVIANDO RESPUESTA  
█  
  
gina@gina-X450CA: ~  
gina@gina-X450CA:~$ python cliente1.py  
REGISTRATION_RESP  
{"jsonrpc": "2.0", "result": {"rulesetInfos": [{"rulesetId": " ANE.TVWS", "maxPollingSecs": 86400, "maxLocationChange": 100, "authority": "us"}]}, "version": "1.0", "type": "REGISTRATION_RESP"}, "id": "xxxxxx"}  
█
```

Figura 34 Comunicación protocolo PAWS mensajes REGISTRATION_REQ – REGISTRATION_RESP

En el desarrollo del protocolo PAWS entre los dispositivos maestros y la base de datos se lograron caracterizar los mensajes JSON y sus campos en la red propuesta. Se concluye, que el campo de *rulesetIds* debe ser establecido por la ANE. Adicionalmente, el protocolo PAWS fue desarrollado de acuerdo con las especificaciones de la RFC 7545.

4 ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PETICIÓN DE CANALES PARA RED DE TVWS

En este capítulo se analizó los riesgos técnicos que trae consigo la implementación del sistema de petición de canales para una red de TVWS, donde se contempla el desempeño, el rendimiento, y la complejidad del proyecto.

4.1 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del análisis de riesgo se utilizó el método de gestión de riesgo del PMI® (Project Management Institute) contemplados en la Guía de fundamentos de la dirección de proyectos (PMBOK®) [76]. Esta metodología integra ocho áreas del conocimiento en dirección de proyectos (gestión de la integración, gestión del alcance, gestión del tiempo, gestión del costo, de la calidad, de los recursos humanos, de las comunicaciones y del abastecimiento del proyecto)[77].

4.1.1 Procesos de Gestión del riesgo según PMBOK®

Según el PMBOK® los procesos de gestión del riesgo son:

- **Planificación de la gestión de riesgos:** En este proceso se decide cómo enfocar, planificar y ejecutar las actividades para la gestión de riesgos para el sistema.
- **Identificación de riesgos:** Se determina cuáles son los riesgos que pueden afectar el sistema y se documenta las características.
- **Análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos:** En este proceso se prioriza los riesgos, se evalúa la probabilidad de ocurrencia y su impacto. Adicionalmente, se analiza numéricamente el efecto que puede tener los riesgos.
- **Planificación de la respuesta a los riesgos:** Desarrolla acciones para par mejorar las oportunidades y reducir amenazas de riesgos.
- **Seguimiento y control de riesgos:** Se debe supervisar y llevar un seguimiento de los diferentes riesgos identificados, identificar nuevos riesgos y evaluar la efectividad del proyecto.

4.2 EJECUCIÓN DE GESTIÓN DE RIESGOS EN EL SISTEMA DE PETICION DE CANALE PARA LA RED DE TVWS

Para la identificación de riegos del sistema se evaluaron los incidentes negativos que podrían ocurrir en el sistema de petición de canales para la red de TVWS.

Definición de probabilidad: la probabilidad de ocurrencia se definió como: 1 (Muy baja), 2 (Baja), 3 (Media), 5 (Alta).

Tabla 17 Matriz de definición de impacto

IMPACTO	MUY BAJO 1	BAJO 2	MEDIO 3	ALTO 5
<i>Disponibilidad</i>	<10%	10% - 50%	51% - 80%	81% - 100%
<i>Integridad (Modificación de datos)</i>	<10%	10% - 50%	51% - 80%	81% - 100%
<i>Daños en el sistema</i>	<10%	10% - 50%	51% - 80%	81% - 100%
<i>Confidencialidad (frecuencia de acceso)</i>		Normal	Frecuente	Muy frecuente

<i>informático autorizado)</i>	Poco frecuente			
------------------------------------	----------------	--	--	--

4.2.1 Identificación de Riesgos

Tabla 18 Identificación de riesgos

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

N°	RIESGO
R1	Tamaño de mensaje de datos mayor al permitido por los dispositivos IoT.
R2	Conexión Invalida entre dispositivo esclavo y dispositivo maestro.
R3	Conexión invalida entre dispositivo maestro y base de datos.
R4	Registro de Dispositivo Maestro erróneo
R5	Registro de Dispositivo Esclavo erróneo

R6	Información de base de datos equivocada
R7	la base de dato no obliga que el dispositivo cliente utilice el espectro proporcionado
R8	El dispositivo maestro recibe información de disponibilidad del espectro incorrecta
R9	Entidad no autorizada intercepta datos de identificación para el dispositivo maestro o sus dispositivos esclavos.
R10	Acceso no autorizado a información
R11	El dispositivo maestro no se conecte a la base de datos adecuada
R12	Cálculo de espectro inadecuado
R13	Exposición de información privada por falta de encriptación
R14	Ataque de servidores externos
R15	Registro de dispositivos no autorizados
R16	Información errónea del dispositivo esclavo
R17	Problemas de compatibilidad de sistemas
R18	Problemas de autorización de uso de espectro
R19	La base de datos no es compatible con el dispositivo maestro según la versión del protocolo.
R20	La geo localización del dispositivo especificada está fuera de la cobertura designada.

R21	Cambio de URI de la base de datos
R22	Falta de parámetro requeridos
R23	Valor de parámetros inválidos
R24	Errores en los mensajes JSON

4.2.2 *Análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos*

Teniendo en cuenta PMBOK® se determinó el promedio del impacto para cada uno de los riesgos identificados. La probabilidad de ocurrencia se estableció proporcionando de acuerdo a cada riesgo evaluado valores entre muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Tabla 19 Matriz de Riesgo del Sistema de petición de canales de twws

Matriz de análisis de Riesgo																												
IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS		IMPACTO																	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA						ANÁLISIS PROBABILIDAD X IMPACTO	EFECTO DEL RIESGO	MITIGACIÓN	
		DISPONIBILIDAD				INTEGRIDAD				DAÑOS EN EL SISTEMA				CONFIDENCIALIDAD				PROMEDIO EVALUADO	MUY BAJA	BAJA	MODERAD A	ALTA	MUY ALTA	PROMEDIO EVALUADO				
Nº	RIESGO	1 MUY BAJO	2 BAJA	3 MEDIO	5 ALTO	1 MUY BAJO	2 BAJA	3 MEDIO	5 ALTO	1 MUY BAJO	2 BAJA	3 MEDIO	5 ALTO	1 MUY BAJO	2 BAJA	3 MEDIO	5 ALTO			1	2	3	4					5
R1	Tamaño de mensaje de datos mayor al permitido por los dispositivos IoT.				X 5		X 2			X 1				X 1				2.25				4		4	9	Si el tamaño de los mensajes establecidos por el sistema son mayores a los permitidos para dispositivos de IoT, dichos dispositivos no podrán utilizar el sistema para la asignación de frecuencias.	Constatar que el tamaño de los mensajes establecidos en el sistema sea propicios para el uso de dispositivos IoT	
R2	Conexión Invalida entre dispositivo esclavo y dispositivo maestro.				X 5				X 5	X 1				X 1				3				4		4	12	Al no generarse comunicación en la red maestro – esclavo, la solicitud de asignación de frecuencia no se puede realizar.	Verificar la comunicación con el dispositivo maestro, antes del despliegue del sistema, pruebas remotas de comunicación.	
R3	Conexión invalida entre dispositivo maestro y base de datos.				X 5				X 5	X 1				X 1				3				4		4	12	No se puede realizar la solicitud de asignación de frecuencia.	Establecer comunicación con la base de datos más cercana al dispositivo, pruebas remotas de comunicación.	
R4	Registro de Dispositivo Maestro erróneo				X 5				X 5	X 1				X 1				3					5	5	15	No se puede continuar con el proceso de asignación de frecuencias	Evidenciar que los campos requeridos por el sistema se encuentren en el registro, evidenciar la compatibilidad con el sistema.	
R5	Registro de Dispositivo Esclavo erróneo				X 5				X 5	X 1				X 1				3					5	5	15	No se puede continuar con el proceso de asignación de frecuencias	Evidenciar que los campos requeridos por el sistema se encuentren en el registro, evidenciar la compatibilidad con el sistema.	
R6	Información de base de datos equivocada			X 3					X 5			X 3			X 2			3.25		2				2	6.5	Puede causar interferencias entre servicios que hacen uso del espectro de TVWS debido a la asignación de	Establecer los parámetros de validación según las normativas dadas por el ente regulador, tener un	

																									frecuencias erróneas.	control periódico de la información proporcionada por la base de datos.	
R7	la base de dato no obliga que el dispositivo cliente utilice el espectro proporcionado	X 1				X 1							X 5	X 1				2					5	5	10	Puede causar interferencias a los servicios que hacen uso del espectro de TVWS	Establecer medidas de control para determinar a los usuarios que hacen uso del espectro de TVWS sin los permisos adecuados.
R8	El dispositivo maestro recibe información de disponibilidad del espectro incorrecta				X 5				X 5				X 5	X 1				4			3			3	12	Puede causar interferencias a los servicios que hacen uso del espectro de TVWS	Medidas de seguridad ante la integridad de la información establecida en la base de datos, tener un control periódico de la información proporcionada por la base de datos
R9	Entidad no autorizada intercepta datos de identificación para el dispositivo maestro o sus dispositivos esclavos.			X 3			X 2						X 5				X 5	3.75				4		4	15	Puede ocasionar mal intensión en el uso de la información interceptada.	Utilizar un modelo de encriptación de datos para la seguridad de dicha información
R10	Acceso no autorizado a información			X 3			X 2						X 5				X 5	3.75				4		4	15	Puede ocasionar mal intensión en el uso de la información interceptada.	Utilizar un modelo de encriptación de datos para la seguridad de dicha información
R11	El dispositivo maestro no se conecte a la base de datos adecuada				X 5	x 1				X 1				X 1				2			3			3	6	No se le puede otorgar alguna porción de espectro de TVWS.	Establecer comunicación con la base de datos más cercana según su geo localización.
R12	Cálculo de espectro inadecuado				X 5				X 5	X 1				X 1				3		2				2	6	Puede causar interferencias a los servicios que hacen uso del espectro de TVWS o no proporcionar asignación de TVWS.	, tener un control periódico de la información proporcionada por la base de datos, mantener actualizada las ecuaciones de validación para la asignación de frecuencias.
R13	Exposición de información privada por falta de encriptación			X 3		X 1							X 5				X 5	3.5				4		4	14	Puede ocasionar mal intensión en el uso de la información interceptada	Utilizar un modelo de encriptación de datos para la seguridad de dicha información
R14	Ataque de servidores externos			X					X				X			X		4				4		4	16	Daños al sistema	Tomar medidas de seguridad informática

				3					5				5			3											
R15	Registro de dispositivos no autorizados				X 5	X 1				X 1				X 1				2				4		4	8	Incumplimiento de las normas establecidas, interferencias a causa de parámetros inadecuados.	Establecer un sistema de validación robusto según la normativa.
R16	Información errónea del dispositivo esclavo				X 5		X 2				X 3		X 1					2.75				4		4	11	Incumplimiento de las normas establecidas por el ente regulador.	Sistema de verificación de dispositivos esclavos
R17	Problemas de compatibilidad de sistemas				X 5	X 1				X 1				X 1				2					5	5	10	la solicitud de asignación de frecuencia no se puede realizar	Verificar versión del sistema y compatibilidad de dispositivos.
R18	Problemas de autorización de uso de espectro				X 5	X 1				X 1				X 1				2			3			3	6	la solicitud de asignación de frecuencia no se puede realizar	Evidenciar que los campos requeridos por el sistema se encuentren, evidenciar la compatibilidad con el sistema.
R19	La base de datos no es compatible con el dispositivo maestro según la versión del protocolo.				X 5	X 1				X 1				X 1				2					5	5	10	la solicitud de asignación de frecuencia no se puede realizar	Verificar versión del protocolo.
R20	La geo localización del dispositivo especificada está fuera de la cobertura designada.				X 5	X 1				X 1				X 1				2					5	5	10	la asignación de frecuencia no se puede realizar	Para que se pueda generar la asignación se debe garantizar que está dentro de la cobertura estipulada por la normatividad.
R21	Cambio de URI de la base de datos				X 5		X 2				X 2			X 1				2.5			3			3	7.5	Desinformación a los dispositivos maestro que generan la comunicación con la base de datos.	Información del sistema cuando se genera este tipo de cambios.
R22	Falta de parámetro requeridos			X 3				X 3		X 1				X 1				2					5	5	10	la asignación de frecuencia no se puede realizar	Evidenciar que los campos requeridos por el sistema se encuentren
R23	Valor de parámetros inválidos			X 3				X 3		X 1				X 1				2					5	5	10	la asignación de frecuencia no se puede realizar	Evidenciar que los campos requeridos por el sistema cumplan con la normatividad establecida
R24	Errores en los mensajes JSON				X 5	X 1				X 1				X 1				2					5	5	10	La comunicación con el sistema no se puede establecer	Validar los mensajes JSON

Como se evidencia en la matriz de riesgo del sistema de petición de canales de twws (Tabla 19) se realizó un análisis de probabilidad por impacto (*promedio del impacto x probabilidad de ocurrencia*), de tal manera, los valores entre 0-7 tendrían un riesgo bajo, entre 8 – 10 un riesgo medio y +10 un riesgo alto, obteniendo como resultado la siguiente clasificación: Tabla 20

Tabla 20 Clasificación de riesgos

Riesgo Bajo 0-7		Riesgo Medio 8 - 10		Riesgo Alto + 10	
Información de base de datos equivocada	6.5	Tamaño de mensaje de datos mayor al permitido por los dispositivos IoT.	9	Conexión Invalida entre dispositivo esclavo y dispositivo maestro.	12
El dispositivo maestro no se conecte a la base de datos adecuada	6	la base de dato no obliga que el dispositivo cliente utilice el espectro proporcionado	10	Conexión invalida entre dispositivo maestro y base de datos.	12
Cálculo de espectro inadecuado	6	Registro de dispositivos no autorizados	8	Registro de Dispositivo Maestro erróneo	15
Problemas de autorización de uso de espectro	6	Problemas de compatibilidad de sistemas	10	Registro de Dispositivo Esclavo erróneo	15
Cambio de URI de la base de datos	7	La geo localización del dispositivo especificada está fuera de la cobertura designada.	10	El dispositivo maestro recibe información de disponibilidad del espectro incorrecta	12
		La base de datos no es compatible con el dispositivo maestro según la versión del protocolo.	10	Entidad no autorizada intercepta datos de identificación para el dispositivo maestro o sus dispositivos esclavos.	15
		La geo localización del dispositivo especificada está fuera de la cobertura designada.	10	Acceso no autorizado a información	15
		Falta de parámetro requeridos	10	Exposición de información privada por falta de encriptación	14
		Valor de parámetros inválidos	10	Ataque de servidores externos	16
		Errores en los mensajes	10	Información errónea del	11

		JSON		dispositivo esclavo	
--	--	------	--	---------------------	--

Según la clasificación de los riesgos de la Tabla 20, se puede evidenciar que el riesgo más alto lo tiene el ataque de servidores externos, adicionalmente a esto se evidencia un mayor incremento para los riesgos medios y altos lo que indica que se debe desarrollar un plan de mitigación para el funcionamiento adecuado del sistema de petición de canales de TVWS.

5 CONCLUSIONES

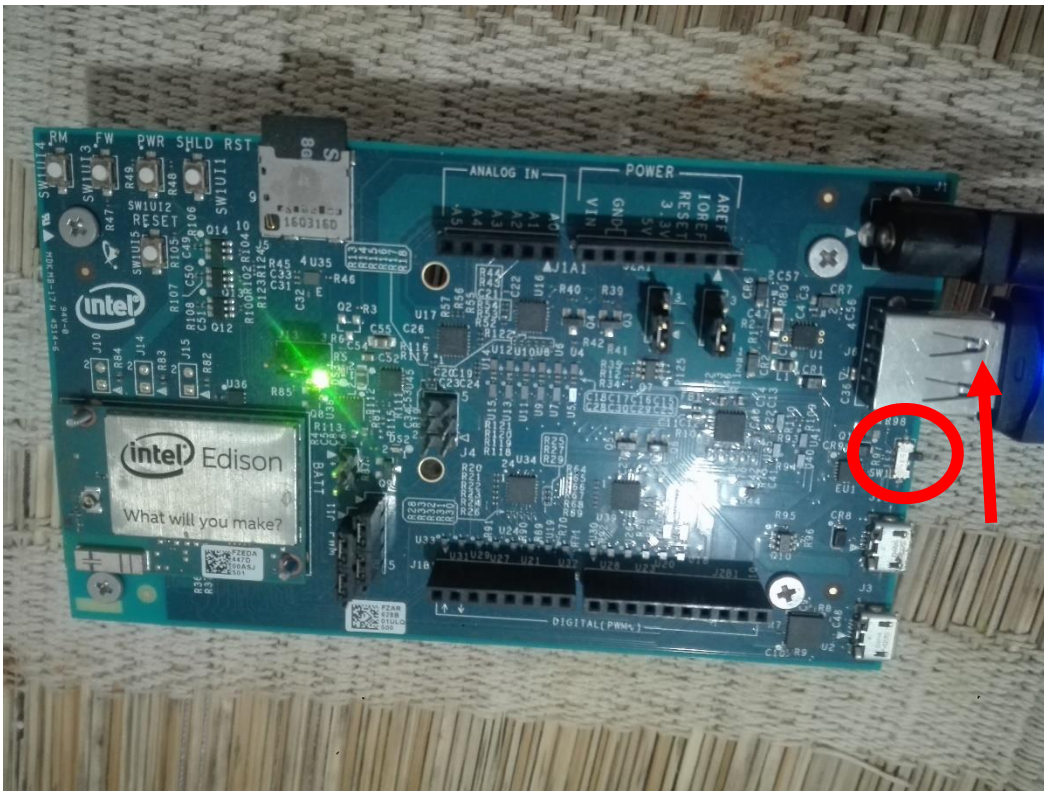
- EL internet de las cosas (IoT) es una tecnología que se evidencia como una oportunidad para todos los sectores organizacionales dentro de un país, teniendo en cuenta la masificación de dispositivos de IoT y evaluando los crecimientos de tráfico se crean mecanismos para satisfacer dicha demanda. El acceso oportunísimo al espectro radioeléctrico es uno de los mecanismos que permite dar solución a la necesidad que se establece con el despliegue de IoT. Debido, a que hace uso de los espacios espectrales que se identifiquen como oportunidad tales como el uso de bandas exentas de licencia de 470MHz a 698 MHz.
- En Colombia se cuenta con bases jurídicas y regulatorias para el uso de bandas exentas de licencia de 470MHz a 698 MHz lo que permite la implementación y despliegue de la tecnología de IoT sin embargo, se generan desafíos frente a su gestión y regulación, tales como el mecanismo de control y verificación de los diferentes dispositivos de las bandas de TVWS.
- Se desarrolló un sistema maestro – esclavo por medio de radios configurables SDR, los SDR permitieron la configuración de características adaptadas a dispositivos IoT. Adicionalmente, se utilizó el lenguaje de programación de Python, debido a que permite el desarrollo de scripts y aplicaciones en la mayoría de plataforma mitigando problemas de compatibilidad.
- Para la red maestro – esclavo se desarrollaron dos Script uno cliente y otro servidor, el script cliente se realizó en el dispositivo esclavo (Tarjeta Intel Edison) este extrajo las características requeridas de los equipos de espacios en blanco de televisión (NooElec SDR) y las almaceno en mensajes JSON adicionalmente envió dicha información por medio de un canal socket hacia el script servidor, el script servidor se desarrolló en el dispositivo maestro (Pc intel core i7) y se encargó de establecer el canal de comunicación socket y almacenar la información del dispositivo NooElec SDR para hacer la solicitud de espacios en blanco de TV.
- Teniendo en cuenta el manejo de espacios en blanco de televisión en el mundo y la recomendación establecida por la ITU se desarrolló un estudio del protocolo de acceso a la bases de datos de espacios en blanco (PAWS). adicionalmente, se realizó un prototipo adaptándolo a la regulación de TVWS en Colombia por medio de un canal socket multi-hilo.
- Los riesgos que trae consigo la implementación de un sistema para petición de canales exigen que se tenga un plan de mitigación y un sistema robusto de seguridad, debido al

impacto que podrían generar en el uso del espectro radioeléctrico y la afectación a servicios primarios que hacen uso de las bandas de TV.

ANEXO A. INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE RED MAESTRO - ESCLAVO

1. Conexión SDR a Intel Edison:

Dado que el dispositivo SDR NooElec cuenta con una interfaz USB, se puede hacer conexión directamente con la tarjeta Edison. EL micro interruptor deberá encontrarse hacia el puerto USB como se muestra en la imagen, de este modo permitirá alimentar el dispositivo SDR conectado a la interfaz USB.

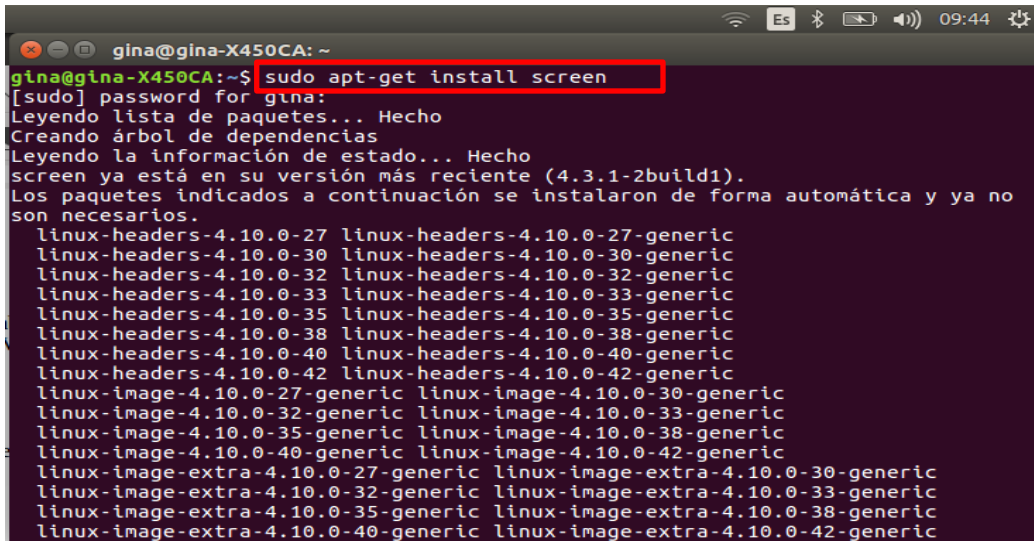


Conectar el cable USB entre pc y Edison al puerto micro USB más externo, para establecer la conexión en serie para la programación, adicionalmente la Edison requiere un adaptador de 12V para cumplir con los requisitos de potencia necesarios para el uso del SDR.

2. Configuración Intel Edison – SDR

Para establecer comunicación con la Intel Edison se requiere configurar una sesión de terminal por medio de los comandos:

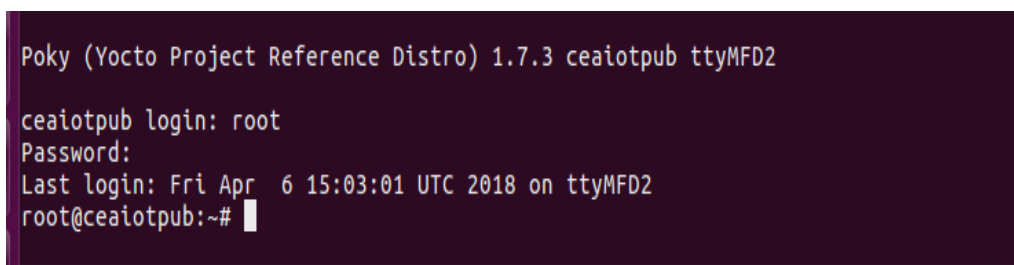
- `sudo apt-get install screen`
- `sudo screen /dev/ttyUSB0 115200`



A terminal window titled 'gina@gina-X450CA: ~' showing the command `sudo apt-get install screen` being executed. The output indicates that 'screen' is already installed at version 4.3.1-2build1. Below this, a list of packages to be upgraded is shown, including various Linux headers and images for different kernel versions (4.10.0-27 to 4.10.0-42).

```
gina@gina-X450CA:~$ sudo apt-get install screen
[sudo] password for gina:
Leyendo lista de paquetes... Hecho
Creando árbol de dependencias
Leyendo la información de estado... Hecho
screen ya está en su versión más reciente (4.3.1-2build1).
Los paquetes indicados a continuación se instalaron de forma automática y ya no
son necesarios.
linux-headers-4.10.0-27 linux-headers-4.10.0-27-generic
linux-headers-4.10.0-30 linux-headers-4.10.0-30-generic
linux-headers-4.10.0-32 linux-headers-4.10.0-32-generic
linux-headers-4.10.0-33 linux-headers-4.10.0-33-generic
linux-headers-4.10.0-35 linux-headers-4.10.0-35-generic
linux-headers-4.10.0-38 linux-headers-4.10.0-38-generic
linux-headers-4.10.0-40 linux-headers-4.10.0-40-generic
linux-headers-4.10.0-42 linux-headers-4.10.0-42-generic
linux-image-4.10.0-27-generic linux-image-4.10.0-30-generic
linux-image-4.10.0-32-generic linux-image-4.10.0-33-generic
linux-image-4.10.0-35-generic linux-image-4.10.0-38-generic
linux-image-4.10.0-40-generic linux-image-4.10.0-42-generic
linux-image-extra-4.10.0-27-generic linux-image-extra-4.10.0-30-generic
linux-image-extra-4.10.0-32-generic linux-image-extra-4.10.0-33-generic
linux-image-extra-4.10.0-35-generic linux-image-extra-4.10.0-38-generic
linux-image-extra-4.10.0-40-generic linux-image-extra-4.10.0-42-generic
```

Una vez conectado a la Intel Edison aparecerá un interfaz gráfico que pide la contraseña del dispositivo Intel Edison.



A terminal window showing the login prompt for 'Poky (Yocto Project Reference Distro) 1.7.3 ceaiotpub ttyMFD2'. The user 'ceaiotpub' logs in as 'root'. The last login was on Fri Apr 6 15:03:01 UTC 2018 on ttyMFD2. The prompt is 'root@ceaiotpub:~#'.

```
Poky (Yocto Project Reference Distro) 1.7.3 ceaiotpub ttyMFD2
ceaiotpub login: root
Password:
Last login: Fri Apr 6 15:03:01 UTC 2018 on ttyMFD2
root@ceaiotpub:~#
```

3. Conexión a internet

Para establecer la conexión a internet por wifi en la tarjeta Intel Edison se utiliza el comando

- `Configure_edison --wifi`

Configure Edison: WiFi Connection

Scanning: 1 seconds left

```
0 :    Rescan for networks
1 :    Exit WiFi Setup
2 :    Manually input a hidden SSID
3 :    Clara Rodriguez
4 :    DIRECT-SsM2070 Series
5 :    PATINO__JO
6 :    Familia_Roncancio
```

Enter 0 to rescan for networks.

Enter 1 to exit.

Enter 2 to input a hidden network SSID.

Enter a number between 3 to 6 to choose one of the listed network SSIDs

:

Para la instalación de librerías del SDR se utiliza los siguientes comandos:

- Opkg update
- Opkg install libusb-1.0-dev
- Cd
- Git clone [git://git.osmocom.org/rtl-sdr.git](https://git.osmocom.org/rtl-sdr.git)
- Cd /rtl-sdr
- Cmake./-DINSTALL_UDEV_RULES=ON
-DDETACH_KERNEL_DRIVER=ON
- Make
- Sudo make install
- Sudo ldconfig
-

Una vez instalas las librerías se puede probar su funcionamiento por medio del comando:

- rtl_test

```
root@ceaiotpub:~# rtl_test
Found 1 device(s):
  0: Realtek, RTL2838UHIDIR, SN:

Using device 0: Generic RTL2832U OEM
Found Elonics E4000 tuner
Supported gain values (14): -1.0 1.5 4.0 6.5 9.0 11.5 14.0 16.5 19.0 21
.5 24.0 29.0 34.0 42.0
Sampling at 2048000 S/s.

Info: This tool will continuously read from the device, and report if
samples get lost. If you observe no further output, everything is fine.

^Reading samples in async mode...
lost at least 72 bytes
```

REFERENCIAS

- [1] D. Evans, "The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything," *CISCO white Pap.*, vol. 1, no. 2011, pp. 1–11, 2011.
- [2] E. Summary, "Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update , 2016 – 2021," pp. 2016–2021, 2017.
- [3] McLean Foster & Co. en colaboración con Martin Cave y Robert W. Jones, "Gestión del espectro radioeléctrico," vol. 5, p. 122, 2009.
- [4] M. D. T. D. L. I. Y. L. C. MinTIC and A. N. D. E. ANE, "Ingeniería Del Espectro Radioeléctrico," *Man. Gestión Nac. Del Espectro Radioeléctrico*, p. 260, 2012.
- [5] Agencia Nacional del Espectro and Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, "MANUAL DE GESTIÓN NACIONAL DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO. Fundamentos de gestión nacional del espectro radioeléctrico."
- [6] "CNABF2017," pp. 1–17, 2002.
- [7] J. Luque Ordóñez, "Servicios de radiocomunicaciones," 2014.
- [8] ANE, "Manual De Gestión Nacional Del Espectro Radioeléctrico: Permisos para el uso del espectro radioeléctrico y procedimientos para la asignación de frecuencias.," 2012.
- [9] "Inicio." .
- [10] C. Moreno, A. Marín, J. Sierra, and F. Gil, "DISEÑO Y ANÁLISIS DE RED DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE (TDT) PARA MEDELLIN-ANTIOQUIA," *Rev. en telecomunicaciones e informática*, vol. 1, no. 1, 2011.
- [11] ETSI, "EN 300 744 - V1.6.1 - Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television," *Eur. Broadcast. Union*, vol. 1, pp. 1–66, 2009.
- [12] A. D. Gutiérrez, "Transmisión de señales de TV digital en el estándar terreno DVB-T," *Univ. Politécnica Madrid*, 2002.

- [13] Comisión de Regulación de Comunicaciones, "Definición de las especificaciones técnicas de la TDT en Colombia." Sep-2012.
- [14] M. F. Muela, "Coexistencia entre servicios TDT y 4G en la banda de 700 MHz," 2013.
- [15] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE COMUNICACIONES, "Resolución CRC 4337 de 2013." REPUBLICA DE COLOMBIA, Oct-2013.
- [16] resolución ANTV, "RESOLUCIÓN ANTV 1132 de 2013." 2013.
- [17] M. C. Medina, "Análisis del proceso de transición de la televisión análoga a la televisión digital en Colombia," 2014.
- [18] "Cobertura TDT." 2015.
- [19] A. N. del Espectro, "#PonteEnOnda El espectro radioeléctrico y los avances tecnológicos," 2016.
- [20] AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO, "RESOLUCIÓN 461 DE AGOSTO 1 DE 2017 -." 2017.
- [21] "acuerdo_003_04_junio_2009.pdf." .
- [22] L. A. Junta, D. D. E. La, N. D. E. Televisi, and D. T. Tdt, "Acuerdo 004," 2011.
- [23] resolución ANTV, "acuerdo 08 de 2010," vol. 5, no. 220, p. 2014, 1987.
- [24] Comisión Nacional de Televisión., "Acuerdo_002_2012_TDT.pdf." p. 15, 2012.
- [25] "Resolucion_442_2017.pdf." .
- [26] "Convenio Uso del Espectro RadioeléctricoRadiodifusión Perú-Colombia." .
- [27] M. Conti, S. K. Das, C. Bisdikian, M. Kumar, L. M. Ni, A. Passarella, G. Roussos, G. Tröster, G. Tsudik, and F. Zambonelli, "Looking ahead in pervasive computing: Challenges and opportunities in the era of cyber--physical convergence," *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 8, no. 1, pp. 2–21, 2012.
- [28] R. Poovendran, "Cyber--physical systems: Close encounters between two parallel worlds [point of view]," *Proc. IEEE*, vol. 98, no. 8, pp. 1363–1366, 2010.

- [29] K.-J. Park, R. Zheng, and X. Liu, "Cyber-physical systems: Milestones and research challenges." Elsevier, 2012.
- [30] I. Lee and K. Lee, "The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises," *Bus. Horiz.*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, 2015.
- [31] S. Forge, "Radio spectrum for the internet of things," *info*, vol. 18, no. 1, pp. 67–84, 2016.
- [32] A. A. Khan, M. H. Rehmani, and A. Rachedi, "When Cognitive Radio meets the Internet of Things?," *2016 Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. IWCMC 2016*, pp. 469–474, 2016.
- [33] S. Hu, H. Guo, C. Jin, Y. Huang, B. Yu, and S. Li, "Frequency-domain oversampling for cognitive CDMA systems: Enabling robust and massive multiple access for internet of things," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 4583–4589, 2016.
- [34] M. A. Shah, S. Zhang, and C. Maple, "Cognitive Radio Networks for Internet of Things : Applications , Challenges and Future," no. September, pp. 13–14, 2013.
- [35] Z. A. Khan and Y. Faheem, "Cognitive radio sensor networks: Smart communication for smart grids—A case study of Pakistan," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 463–474, 2014.
- [36] P. Rawat, K. D. Singh, and J. M. Bonnin, "Cognitive radio for M2M and Internet of Things: A survey," *Comput. Commun.*, vol. 94, pp. 1–29, 2016.
- [37] T. A. Sohan, H. H. Haque, A. Hasan, J. Islam, and A. B. M. A. Al Islam, "A Graph Coloring Based Dynamic Channel Assignment Algorithm For Cognitive Radio Vehicular Ad Hoc Networks."
- [38] G. P. Joshi, S. Y. Nam, and S. W. Kim, "Cognitive radio wireless sensor networks: applications, challenges and research trends," *Sensors*, vol. 13, no. 9, pp. 11196–11228, 2013.
- [39] T. L. Doumi, "Spectrum considerations for public safety in the United States," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 1, pp. 30–37, 2006.
- [40] S. Ball, A. Ferguson, and T. W. Rondeau, "Consumer applications of cognitive radio defined networks," *2005 1st IEEE Int. Symp. New Front. Dyn. Spectr. Access Networks, DySPAN 2005*, pp. 518–525, 2005.

- [41] A. Medeisis, O. Holland, and L. De Nardis, "Taxonomy of Cognitive Radio applications," *2012 IEEE Int. Symp. Dyn. Spectr. Access Networks*, pp. 166–170, 2012.
- [42] A. Anderson, E. W. Frew, and D. Grunwald, "Cognitive radio development for UAS applications," *2015 Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. ICUAS 2015*, pp. 695–703, 2015.
- [43] Z. Wang and Y. Li, "Main challenges in practical applications of cognitive radio," *Proc. - 2011 4th IEEE Int. Conf. Broadband Netw. Multimed. Technol. IC-BNMT 2011*, pp. 478–482, 2011.
- [44] S. Yanbin, T. Zhongji, and L. Xu, "The Application of the Cognitive Radio in the Aviation Communication Spectrum Management," *Phys. Procedia*, vol. 25, pp. 1720–1725, 2012.
- [45] M. Espinosa Buitrago, M. R. Pérez Cerquera, and D. patricia Reinales Mendoza, "Espectro radioeléctrico para el desarrollo de internet de las cosas.,", .
- [46] E. Commission, "RADIO SPECTRUM POLICY GROUP A Spectrum Roadmap for IoT Opinion on the Spectrum Aspects of the Internet-of-things (IoT) including M2M," no. November, 2016.
- [47] Y. Ito, "Reglamento de Radiocomunicaciones para una utilización inteligente del espectro radioeléctrico," *Actual. la UIT*, no. 5, pp. 11–13, 2015.
- [48] K. A. Qaraqe, H. Celebi, M. S. Alouini, A. El-Saigh, L. Abuhantash, M. Al-Mulla, O. Al-Mulla, A. Jolo, and A. Ahmed, "Measurement and analysis of wideband spectrum utilization in indoor and outdoor environments," in *International Conference on Communications Technologies (ICCT 2010)*, 2010.
- [49] M. López-Ben'ítez, A. Umbert, and F. Casadevall, "Evaluation of spectrum occupancy in Spain for cognitive radio applications," in *Vehicular technology conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, 2009, pp. 1–5.
- [50] T. Harrold, R. Cepeda, and M. Beach, "Long-term measurements of spectrum occupancy characteristics," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symposium on*, 2011, pp. 83–89.
- [51] S. Yin, D. Chen, Q. Zhang, M. Liu, and S. Li, "Mining spectrum usage data: a large-scale spectrum measurement study," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 11, no. 6, pp. 1033–1046, 2012.

- [52] M. H. Islam, C. L. Koh, S. W. Oh, X. Qing, Y. Y. Lai, C. Wang, Y.-C. Liang, B. E. Toh, F. Chin, G. L. Tan, and others, "Spectrum survey in Singapore: Occupancy measurements and analyses," in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on*, 2008, pp. 1–7.
- [53] V. Valenta, R. Maršálek, G. Baudoin, M. Villegas, M. Suarez, and F. Robert, "Survey on spectrum utilization in Europe: Measurements, analyses and observations," in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications (CROWNCOM), 2010 Proceedings of the Fifth International Conference on*, 2010, pp. 1–5.
- [54] L. F. Pedraza, F. Forero, and I. Paez, "Metropolitan spectrum survey in bogota colombia," in *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2013 27th International Conference on*, 2013, pp. 548–553.
- [55] A. Palaos, J. Riihijarvi, and P. Mahonen, "From Paris to London: Comparative analysis of licensed spectrum use in two European metropolises," in *Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN), 2014 IEEE International Symposium on*, 2014, pp. 48–59.
- [56] R. Akhtyamov, I. L. i Cruz, H. Matevosyan, D. Knoll, U. Pica, M. Lisi, and A. Golkar, "An implementation of Software Defined Radios for federated aerospace networks: Informing satellite implementations using an inter-balloon communications experiment," *Acta Astronaut.*, vol. 123, pp. 470–478, 2016.
- [57] R. C. Reinhart, S. K. Johnson, T. J. Kacpura, C. S. Hall, C. R. Smith, and J. Liebetreu, "Open architecture standard for NASA's software-defined space telecommunications radio systems," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 10, pp. 1986–1993, 2007.
- [58] R. W. Thomas, D. H. Friend, L. A. Dasilva, and A. B. Mackenzie, "Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 12, pp. 51–57, 2006.
- [59] D. D. Clark, C. Partridge, J. C. Ramming, and J. T. Wroclawski, "A knowledge plane for the internet," in *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, 2003, pp. 3–10.
- [60] K. C. Carlos and D. Birru, "Ieee 802.22: an introduction to the first wireless standard based on cognitive radios;"IEEE journal of communications" vol. I, no. I." April, 2006.
- [61] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE*

Pers. Commun., vol. 6, no. 4, pp. 13–18, 1999.

- [62] D. García Gómez, J. M. Riera Salis, and P. del Pino, “Implementación y configuración de un receptor de radio definido por software (SDR) para estudios de propagación,” 2012.
- [63] D. T. Otermat, C. E. Otero, and I. Kostanic, “Analysis of the FM radio spectrum for Internet of Things opportunistic access via Cognitive Radio,” *IEEE World Forum Internet Things, WF-IoT 2015 - Proc.*, pp. 166–171, 2016.
- [64] X. Huang, J. Wu, S. Member, W. Li, and Z. Zhang, “for Cognitive Radio Enabled Vehicular Ad-Hoc Networks,” vol. 13, no. 1, pp. 59–70, 2016.
- [65] “Cognitive Radio Wireless Sensor Network...ations, Challenges and Research Trends.pdf.” .
- [66] J. Wang, M. Ghosh, and K. Challapali, “Emerging cognitive radio applications: A survey,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 3, pp. 74–81, 2011.
- [67] V. De, “Rec. UIT-R V.573-5 1,” 2007.
- [68] T. R. Cognitivos, Z. Rurales, E. Blancos, T. V. A. Galv, and A. Fecha, “Radios Cognitivos : Conectividad en Zonas Rurales utilizando Espacios Blancos de TV,” 2016.
- [69] T. Baykas, J. Wang, M. A. Rahman, H. N. Tran, C. Song, S. Filin, Y. Alemseged, C. Sun, G. P. Villardi, C. S. Sum, Z. Lan, and H. Harada, “Overview of TV white spaces: Current regulations, standards and coexistence between secondary users,” *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, pp. 38–43, 2010.
- [70] S. W. Oh, Y. Ma, M. Tao, E. Chu, and Y. Peh, “an Overview and Comparison of Tv White Space Regulations Worldwide,” pp. 1–5, 2014.
- [71] F. Paisana, J. P. Miranda, N. Marchetti, and L. A. Dasilva, “Database-aided sensing for radar bands,” *2014 IEEE Int. Symp. Dyn. Spectr. Access Networks, DYSPAN 2014*, pp. 1–6, 2014.
- [72] A. N. D. E. ANE, “Plataforma de software para el uso de los espacios en blanco en Colombia.” pp. 1–5, 2016.
- [73] “Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones inicia convenio de cooperación con la Agencia Nacional del Espectro - ANE.” .

- [74] G. E. Chanch'i, W. Y. Campo, J. P. Amaya, and J. L. Arciniegas, "Esquema de servicios para Televisión Digital Interactiva, basados en el protocolo REST-JSON," *Cad. Informática*, vol. 6, no. 1, pp. 233–240, 2011.
- [75] V. Chen, S. Das, L. Zhu, J. Malyar, and P. McCann, "Protocol to Access White-Space (PAWS) Databases," *Internet Eng. Task Force (IETF), RFC 7545*, pp. 1–90, 2015.
- [76] I. Pm, "A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)," 2000.
- [77] J. . H. B. . S. M. . A. L. HUIDOBRO, "Revista de la construcción.," *Rev. la Construcción*, vol. 8, no. 2, 2009.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura de petición de canales disponibles en la banda de TV	5
Figura 2 Diagrama de metodología.....	6
Figura 3 Regiones de atribución de frecuencias	8
Figura 4 División regulatoria del ERE	10
Figura 5 Ciclo de la gestión y control del ER.....	14
Figura 6 Columnas del CNABF	15
Figura 7 Información del CNABF	15
Figura 8 Distribución de espectro para TDT.....	20
Figura 9 Dispositivos Conectados a IoT.....	24
Figura 10 Sectores para IoT	25
Figura 11 Clasificación de requerimientos funcionales para el acceso de dispositivos IoT	26
Figura 12 Hoja de ruta para el acceso de dispositivos IoT.....	26
Figura 13 Modelo de Tres Capas para un Framework Cognitivo	30
Figura 14 Arquitectura de radios.....	31
Figura 15 Modelo Funcional SDR	32
Figura 16 Diagrama de Bloques Rx y Tx SDR	33
Figura 17 Arquitectura ideal del subsistema digital SDR.....	33
Figura 18 Arquitectura de red inteligente	35
Figura 19 Modelo de la red BAN.....	36
Figura 20 Arquitectura de una red de emergencia	37
Figura 21 Arquitectura TVWS	40
Figura 22 Arquitectura de TVWS establecida por la ANE	41
Figura 23 Estructura Maestro – Esclavo	44
Figura 24 Conexión maestro – esclavo.....	45
Figura 25 info.txt	45
Figura 26 Arquitectura PAWS.....	46
Figura 27 Proceso de Inicialización.....	48
Figura 28 Registro del Dispositivo.....	49

Figura 29 Consulta de espectro disponible	50
Figura 30 Validación del dispositivo	51
Figura 31 Diagrama de Secuencia PAWS	68
Figura 32 Comunicación protocolo PAWS mensajes INIT_REQ – INIT_RESP	69
Figura 33 Comunicación protocolo PAWS mensajes AVAIL_SPECTRUM_REQ - AVAIL_SPECTRUM_RESP	69
Figura 34 Comunicación protocolo PAWS mensajes REGISTRATION_REQ – REGISTRATION_RESP	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Bandas de frecuencia del ER.....	9
Tabla 2 Servicios de radiocomunicaciones	11
Tabla 3 Sistema de gestión Nacional del Espectro	12
Tabla 4 plan de cobertura en tecnología Digital	17
Tabla 5 Porcentaje de cobertura para televisión análoga y digital [17]	17
Tabla 6 Descripción de tipo de conectividad que podría utilizar IoT	28
Tabla 7 Características de equipos utilizados en el sistema de petición de canales para la red de TVWS	42
Tabla 8 Elementos de Linux.....	43
Tabla 9 Mensaje INIT_REQ	52
Tabla 10 Mensaje INIT_RESP	54
Tabla 11 Mensaje REGISTRATION_REQ	55
Tabla 12 Mensaje REGISTRATION_RESP	58
Tabla 13 Mensaje DEV_VALID_REQ	59
Tabla 14 Mensaje DEV_VALID_RESP	61
Tabla 15 Mensaje AVAIL_SPECTRUM_REQ	63
Tabla 16 Mensaje AVAIL_SPECTRUM_RESP	65
Tabla 17 Matriz de definición de impacto	71
Tabla 18 Identificación de riesgos.....	72
Tabla 19 Matriz de Riesgo del Sistema de petición de canales de tvws.....	75
Tabla 20 Clasificación de riesgos.....	78