

IMPLEMENTACIÓN DE UN AMBIENTE EXPERIMENTAL PARA ESTUDIOS DE  
CONVIVENCIA ENTRE SERVICIOS DE RADIODIFUSIÓN Y MÓVIL TERRESTRE  
EN BANDAS ADYACENTES

ANGIE DANIELA ORTEGA PICO  
BRAYAN SNHEIDER HERRERA AYALA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2020

IMPLEMENTACIÓN DE UN AMBIENTE EXPERIMENTAL PARA ESTUDIOS DE  
CONVIVENCIA ENTRE SERVICIOS DE RADIODIFUSIÓN Y MÓVIL TERRESTRE  
EN BANDAS ADYACENTES

ANGIE DANIELA ORTEGA PICO  
BRAYAN SNHEIDER HERRERA AYALA

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

Director  
Homero Ortega Boada  
Ph.D. En Ciencias de la Ingeniería

Codirectora  
Deisy Carolina Páez Casas  
Maestría en Ingeniería

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2020

## DEDICATORIA

*Dedico esta tesis a mis padres, que son fieles creyentes de que la educación es un arma para enfrentarse a la vida e incentivaron en mí el amor a la ciencia. A mis hermanas por ser apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera y de mi vida. A todos mis amigos, por estar allí y ayudarme a culminar esta meta.*

*-Angie.*

*Es mi deseo como gesto de agradecimiento, dedicarle este trabajo a mis padres, Luz y Virgilio por el apoyo, la motivación y la confianza que depositaron en mí contribuyendo al desarrollo de las metas y objetivos propuestos de este proceso. A mis amigos y compañeros que me han apoyado y acompañado en esta etapa universitaria.*

*-Brayan.*

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
1.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
<b>2. TECNOLOGÍAS DE LOS SERVICIOS</b>	<b>17</b>
2.1. SERVICIOS DE RADIOCOMUNICACIÓN	17
2.2. ESTÁNDAR LTE PARA EL SERVICIO MÓVIL TERRESTRE	17
2.2.1. Arquitectura global de un sistema basado en LTE	18
2.2.2. Estructura del enlace descendente (DL)	19
2.2.3. Estructura de canales	20
2.3. ESTÁNDAR DVB-T2 PARA EL SERVICIO DE RADIODIFUSIÓN	21
2.3.1. Televisión digital	21
2.3.2. Estándares de TV digital	23
2.3.3. Características técnicas de DVB-T2	24
2.3.4. Contexto colombiano	26
<b>3. INTERFERENCIA Y CONVIVENCIA</b>	<b>29</b>
3.1. INTERFERENCIA ENTRE SERVICIOS DE RADIO	29
3.1.1. Tipos de interferencia:	29
3.1.2. Escenario de comunicaciones	30
3.2. CONVIVENCIA	31
3.3. MÉTRICAS Y CRITERIOS DE INTERFERENCIA	34

3.3.1. Relación señal a interferencia - SIR	34
3.3.2. Radio de densidad espectral - SDR*	34
3.3.3. Relación de fuga de canal adyacente - ACLR	35
3.3.4. Método de punto de fallo subjetivo - SFP	35
3.3.5. Máscara de emisión espectral	35
<b>4. PROPUESTA PARA LA CONFIGURACIÓN DEL ESCENARIO</b>	<b>38</b>
4.1. FASE 1. DEFINICIÓN DEL ESCENARIO	38
4.1.1. Características del enlace	39
4.1.2. Bandas de frecuencias de interés	39
4.1.3. Sistemas	42
4.1.3.1. Sistema Víctima: DVB-T2 ( $V_S$ )	42
4.1.3.2. Transmisor del $V_S$	45
4.1.4. Sistema Interferente LTE ( $I_S$ )	47
4.1.4.1. Transmisor del $I_S$	47
4.2. FASE 2. TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE SERVICIOS	50
4.3. FASE 3. PLAN DE MEDICIÓN	54
4.3.1. Descripción de pruebas	55
<b>5. PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>58</b>
5.1. AMBIENTE EXPERIMENTAL	58
5.2. PRUEBA 1: VARIACIÓN EN FRECUENCIA Y ANCHO DE BANDA	61
5.3. PRUEBA 2: VARIACIÓN EN POTENCIA Y EN FRECUENCIA	67
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>72</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Arquitectura global de un sistema basado en LTE.	18
Figura 2. Estructura de la trama para el estándar LTE.	21
Figura 3. Canales del estándar LTE.	22
Figura 4. Estándares de TV digital en el mundo.	23
Figura 5. Estructura de la trama para el estándar DVB-T2.	26
Figura 6. Canalización colombiana para el servicio de radiodifusión en la banda UHF.	28
Figura 7. Tipos de Interferencia según la banda de estudio: (a) Interferencia de canal no adyacente, (b) Interferencia de canal adyacente, (c) Interferencia co-canal.	31
Figura 8. Máscara de DVB-T2 para una canalización de 6 [MHz]	37
Figura 9. Máscara de LTE para varios anchos de banda	37
Figura 10. Escenarios de interferencia.	39
Figura 11. Servicio de radiodifusión (DVB-T2) atribuido en banda 400 [MHz].	41
Figura 12. Relación de frecuencias entre DVB-T2 y LTE en Colombia.	41
Figura 13. Esquema de configuración de equipos	42
Figura 14. Analizador de espectro portátil R&S	43
Figura 15. Antena directiva logarítmica LP0410	43
Figura 16. TV Box AS-777.	44
Figura 17. USRP E310	46
Figura 18. Generador vectorial PXI M9383A	49
Figura 19. Flujograma de transmisión de DVB-T2	50

Figura 20.	Señal diseñada transmitida y señal recibida LTE	53
Figura 22.	Señal diseñada transmitida y señal recibida DVB-T2	53
Figura 21.	Software Signal Studio LTE - LTE Advanced FDD	54
Figura 23.	Prueba 1 diseñada	56
Figura 24.	Definición de frecuencias prueba 1	57
Figura 25.	Definición de frecuencias prueba 2	57
Figura 26.	1) Sistema transmisor LTE, 2) Aire acondicionado portátil, 3) Sistema receptor DVB-T2, 4) Analizador de espectro portátil, 5) Sistema transmisor DVB-T2, 6) Switch de escritorio.	59
Figura 27.	Piso o Nivel de ruido	60
Figura 28.	Comprobación máscara de DVB-T2	61
Figura 29.	Comprobación máscara de LTE	61
Figura 30.	Señal interferente de LTE con BW = 3[MHz] en diferentes frecuencias centrales (a) $F_c = 683$ [MHz] , (b) $F_c = 693$ [MHz] (c) $F_c = 701$ [MHz]	62
Figura 31.	Señal interferente de LTE con BW = 5[MHz] en diferentes frecuencias centrales (a) $F_c = 683$ [MHz] , (b) $F_c = 691$ [MHz] (c) $F_c = 703$ [MHz]	63
Figura 32.	Señal interferente de LTE con BW = 10[MHz] en diferentes frecuencias centrales (a) $F_c = 689$ [MHz] , (b) $F_c = 695$ [MHz] (c) $F_c = 703$ [MHz]	64
Figura 33.	Medición de ACLR en el analizar de espectro	65
Figura 34.	(a) SIR vs Guard (b) SIR vs Frequency offset (c) SDR* vs Channel (d) ACLR vs Guard band	65
Figura 35.	Fallo en recepción de DVB-T2 provocado por LTE	68
Figura 36.	Medida de interferencia usando SFP	69

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Opciones de configuración de ancho de banda LTE	20
Tabla 2. Comparación características técnicas entre estándares DVB-T y DVB-T2	25
Tabla 3. Parámetros antena set top box	44
Tabla 4. Parámetros transmisión DVB-T2	47
Tabla 5. Parámetros LTE	49
Tabla 6. Parámetros de configuración del analizador de espectro	55

## RESUMEN

**TÍTULO:** IMPLEMENTACIÓN DE UN AMBIENTE EXPERIMENTAL PARA ESTUDIOS DE CONVIVENCIA ENTRE SERVICIOS DE RADIODIFUSIÓN Y MÓVIL TERRESTRE EN BANDAS ADYACENTES \*

**AUTORES:** ANGIE DANIELA ORTEGA PICO, BRAYAN SNHEIDER HERRERA AYALA \*\*

**PALABRAS CLAVE:** COEXISTENCIA, INTERFERENCIA, LTE, DVB-T2, GNURADIO, GENERADOR VECTORIAL.

**DESCRIPCIÓN:** Debido a la reciente atribución de la banda de 700[MHz] a las IMT en Colombia, también conocida como Dividendo Digital, la realización de estudios de convivencia entre los servicios de radiodifusión y móvil terrestre toma gran relevancia en la medida en que pueden contribuir a la utilización eficiente del Espectro Radioeléctrico. En este proyecto de investigación se propone un ambiente experimental y una configuración de escenario, en la que se definen los parámetros técnicos para generar físicamente las señales correspondientes a los servicios de radiodifusión y móvil terrestre, empleando un equipo USRP E310 y el Generador Vectorial PXI M9383A, respectivamente. Se seleccionó el estándar DVB-T2 para el servicio de radiodifusión y el estándar LTE para el servicio móvil terrestre. La propuesta de configuración del escenario también involucra el plan de medición, allí se diseñaron dos tipos de pruebas con el fin de analizar la influencia de la señal interferente en el receptor víctima: variación en frecuencia y variación en potencia de la señal interferente. Se evaluaron los niveles de interferencia logrados en cada una de las pruebas, seleccionando criterios de interferencia como: Relación señal a interferencia (SIR), Radio de Densidad Espectral (SDR\*), Relación de fuga de canal adyacente (ACLR) y el método de punto de fallo subjetivo (SFP). Se encontró que, con los equipos y el análisis de interferencia realizado, el ambiente experimental logra emular un entorno donde es posible analizar la convivencia entre los dos servicios de radiocomunicaciones.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Homero Ortega Boada, Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Co-director: Deisy Carolina Páez Casas, Magister en ingeniería electrónica.

## ABSTRACT

**TITLE:** IMPLEMENTATION OF AN EXPERIMENTAL ENVIRONMENT FOR COEXISTENCE STUDIES BETWEEN BROADCASTING AND LAND MOBILE SERVICES IN ADJACENT BANDS \*

**AUTHORS:** ANGIE DANIELA ORTEGA PICO, BRAYAN SNHEIDER HERRERA AYALA \*\*

**KEYWORDS:** COEXISTENCE, INTERFERENCE, LTE, DVB-T2, GNURADIO, VECTOR GENERATOR.

### DESCRIPTION:

Due to the recent allocation of the 700 [MHz] band to IMT in Colombia, also known as the Digital Dividend, conducting studies of coexistence between broadcasting and land mobile services is of great relevance to the extent that they can contribute to the efficient use of the Radioelectric Spectrum. In this research project, an experimental environment and a scenario configuration are proposed, in which the technical parameters are defined to physically generate the signals corresponding to broadcasting and land mobile services, using a USRP E310 equipment and the PXI M9383A Vectorial Generator, respectively. The DVB-T2 standard was selected for the broadcasting service and the LTE standard for the land mobile service. The scenario configuration proposal also involves the measurement plan. Two types of tests were designed in order to analyze the influence of the interfering signal on the victim receiver: variation in frequency and variation in power of the interfering signal. The interference levels achieved in each of the tests were evaluated, selecting interference criteria such as: Signal to Interference Ratio (SIR), Spectral Density Ratio (SDR \*), Adjacent Channel Leak Ratio (ACLR) and the method of Subjective Failure Point (SFP). It was found that, with the equipment and the interference analysis carried out, the experimental environment manages to emulate an environment where it is possible to analyze the coexistence between the two radio communications services.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering; School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Homero Ortega Boada, Engineering Sciences Doctor. Co-director: Deisy Carolina Páez Casas, Electronic Engineering Magister.

## INTRODUCCIÓN

Lograr comunicarnos de un extremo de la tierra a otro en cuestión de segundos y visualizar contenidos en alta definición desde nuestro celular es algo que no se creía posible hace algunas décadas. El aumento en la demanda del Espectro Radioeléctrico (ERE) debido al progreso tecnológico de las telecomunicaciones ha exigido una utilización más eficiente de este recurso como también la aplicación de procesos de ingeniería mucho más eficaces para dar cabida a la diversidad de posibles usuarios que pretenden acceder a este. Por lo anterior al ERE se le asigna a nivel mundial un enorme valor estratégico, político y económico.

De acuerdo al Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) del Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R), el cual es el tratado internacional de mayor importancia para regular las telecomunicaciones, la capacidad de cada país para aprovechar las ventajas que ofrece el ERE depende en gran medida de las actividades de gestión del espectro que garanticen que la interferencia entre dos o más tecnologías de servicios sea mínima. Un servicio de radiocomunicación, según el RR, es todo aquello que implica la transmisión, emisión o recepción de ondas radioeléctricas para fines específicos de telecomunicación<sup>1</sup>. En el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF) están definidos 41 servicios de radio, entre los cuales resaltan el servicio móvil que comprende a las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT), el servicio de radiodifusión

---

<sup>1</sup> UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Reglamento de Radiocomunicaciones Edición 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR/es>. Consulted October 10th, 2020.*

que abarca la televisión y la emisión sonora, entre otros <sup>2</sup>.

La Agencia Nacional del Espectro (ANE) en coordinación con los distintos países que hacen parte de la UIT atribuyen las bandas de frecuencia a los servicios de radio. Esta atribución del espectro es producto de estudios técnicos, económicos y sociales para el mejoramiento y el empleo racional del ERE, con el fin de evitar interferencias perjudiciales entre las estaciones de radiocomunicación, en otras palabras se establece la base para un ambiente de convivencia entre servicios.

La demanda de altas velocidades de transmisión de datos ha aumentado a medida que las tecnologías han evolucionado. Un ejemplo lo tenemos en las comunicaciones móviles, con la aparición de la recomendación IMT-2000 y más adelante las IMT-Advanced. Las demandas de espectro no han dejado de crecer para satisfacer las demandas de datos, primero con la tecnología del Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) y luego con la tecnología LTE (Long Term Evolution). Podemos decir que hoy se ha cumplido un sueño trazado desde el año 2000: poder contar con un sistema de comunicaciones móviles único que evoluciona con el tiempo, un sistema de largo plazo: LTE el cual es tan válido hoy como en las próximas mejoras (release) que se realicen con la entrada de las 5G. Un sistema único significa para los usuarios una máxima economía de escala, que se traduce en menores costos de los equipos y mayor calidad. LTE supera a las anteriores tecnologías móviles en varios aspectos, por ejemplo, admite anchos de banda de canal flexibles que van desde 1.4 [M]Hz hasta 20 [MHz], como también admite Duplexación por División de Frecuencia (FDD) y Duplexación por División de Tiempo (TDD), lo que

---

<sup>2</sup> AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia*. [En línea]. Disponible en: [https://portalespectro.ane.gov.co/Style Library/ane\\_master/cnabf-tecnico.aspx](https://portalespectro.ane.gov.co/Style Library/ane_master/cnabf-tecnico.aspx). Consulted October 10th, 2020. Colombia.

significa que los prestadores de servicio pueden operar en bandas de frecuencia existentes y en nuevas con mayor facilidad <sup>3</sup>.

Otro servicio estrella para la sociedad es la radiodifusión, la cual contrasta con las comunicaciones móviles en varios sentidos, por ejemplo, una señal se difunde a miles o millones de usuarios, contrariamente en las comunicaciones móviles por cada usuario se tiene una señal única. El caso de uso más popular en radiodifusión es la televisión digital terrestre (TDT). En Colombia se usa el estándar europeo DVB-T2 (Digital Video Broadcasting - Terrestrial 2), que permite transmitir con mejor calidad de imagen y sonido, así como la recepción en dispositivos móviles, pero lo más relevante es que entre los varios sistemas existentes de TDT, el DVB-T2 es el que tiene una mayor economía de escala. Este estándar europeo utiliza la codificación de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) para transmitir audio y video a través del formato MPEG-2 <sup>4</sup>.

Debido a las mejoras implementadas de la TDT el uso de la tv analógica se vio drásticamente reducido, provocando la progresiva liberación de las frecuencias donde se transmitía esta señal, dando paso a lo que se conoce como el *Dividendo Digital (DD)*. Las bandas destinadas para el DD se establecieron desde 698 a 800 [MHz] <sup>5</sup>. En la última Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR-15) se acordó

---

<sup>3</sup> Willy WANG. «Evaluating the use of PXI modules in tests of a radio base station». Master's Thesis School of Information and Communication Technology. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2014.

<sup>4</sup> Uwe LADEBUSCH y LISS Claudia. «Terrestrial DVB (DVB-T): A broadcast technology for stationary portable and mobile use». En: *Proceedings of the IEEE 94.1* (2006), págs. 183-193.

<sup>5</sup> AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. *Plan Técnico de Televisión Colombia [En línea]*. Disponible en: <http://www.ane.gov.co/gestion-tecnica/SitePages/pttv-archivos.aspx?P=180>. Consulted October 10th, 2020. Colombia, 2014.

entre los estados participantes utilizar el espectro del DD para las IMT. Teniendo en cuenta esta nueva atribución se presenta un caso interesante de convivencia en la banda de 700 [MHz] entre el servicio de radiodifusión y el servicio móvil. Lo anterior generó un área de investigación que busca dar solución a una problemática real.

Para implementar el ambiente experimental que permita realizar estudios de convivencia entre servicios radioeléctricos son necesarios diferentes equipos que cumplan con las características técnicas suficientes para la transmisión y recepción de las tecnologías de ambos servicios de radio. En el grupo de investigación Radio-GIS contamos con el Generador Vectorial PXI M9383A, el cual tiene la capacidad de transmitir señales arbitrarias, entre ellas el estándar LTE y LTE-Advanced, este equipo también permite modificar gran variedad de parámetros haciendo posible el diseño a medida de la señal. Adicionalmente, se cuenta con equipos SDR como el USRP E310, que en conjunto con el software de GNU Radio permiten generar una señal bajo el estándar DVB-T2. El equipo encargado de la recepción de las señales es el Analizador de espectro portátil FPH model .13 que cuenta con las características apropiadas para la recepción de ambos servicios bajo los criterios de interferencia y dispone de un software que facilita el manejo de datos. Este proyecto se limita al estudio del impacto de la señal transmitida del estándar LTE considerada como la señal interferente sobre la señal recibida del estándar DVB-T2 considerada como la señal víctima.

El desarrollo del proyecto se documenta a través de los siguientes capítulos: en el capítulo 1 se describen los objetivos a cumplir con el desarrollo del proyecto; en el capítulo 2 se realiza la fundamentación referente a las tecnologías de los servicios de radio. En el capítulo 3 se realiza una revisión general de los estudios de convivencia realizados en distintos países, así como el marco teórico sobre interferencias

entre servicios de radio y criterios de interferencia. Más adelante en el capítulo 4 se describe la propuesta de configuración de escenario para implementar el ambiente de convivencia: desarrollo del escenario y especificación de parámetros técnicos de los servicios, bandas de frecuencias y conexión de equipos y por último en este mismo capítulo se diseña el plan de medición, que será llevado a cabo en el capítulo 5 como también Las pruebas realizadas en el ambiente implementado y el análisis de los resultados. Finalmente en el capítulo 6 se evalúa el desempeño del ambiente implementado en relación con las capacidades de los equipos y los criterios de interferencia.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

- Implementar un ambiente experimental para realizar estudios de convivencia entre los servicios de: radiodifusión (tecnología DVB-T2) y móvil terrestre (estándar LTE), utilizando un Generador Vectorial PXI y un equipo SDR.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar un escenario de análisis de coexistencia que incluya LTE y DVB-T2 en bandas de interés para Colombia.
- Definir los lineamientos para generar la transmisión de LTE con el PXI-M9383.
- Definir los lineamientos para generar la transmisión de DVB-T2 con un equipo SDR.
- Implementar el ambiente experimental para estudios de convivencia con el PXI-M9383 y un equipo SDR.
- Evaluar el desempeño del ambiente implementado para realizar estudios de convivencia, en relación con indicadores de interferencia y las capacidades de los equipos.

## 2. TECNOLOGÍAS DE LOS SERVICIOS

### 2.1. SERVICIOS DE RADIOCOMUNICACIÓN

Un servicio de radiocomunicación, según el artículo 1.19 del RR es: “un servicio que implica la transmisión, la emisión o la recepción de ondas radioeléctricas para fines específicos de telecomunicación” <sup>1</sup>. La radiocomunicación se divide en dos grandes grupos: espacial y terrestre.

- **Servicio móvil terrestre:** Se encuentra dentro del conjunto de servicios móviles y se define como el servicio móvil entre estaciones base y estaciones móviles terrestres o entre estaciones móviles terrestres <sup>1</sup>.
- **Servicio de radiodifusión:** Según la UIT en el RR <sup>1</sup> se define como un servicio de radiocomunicación cuyas emisiones se destinan a ser recibidas directamente por el público en general. Dicho servicio abarca emisiones sonoras, de televisión analógica y digital o de otro género.

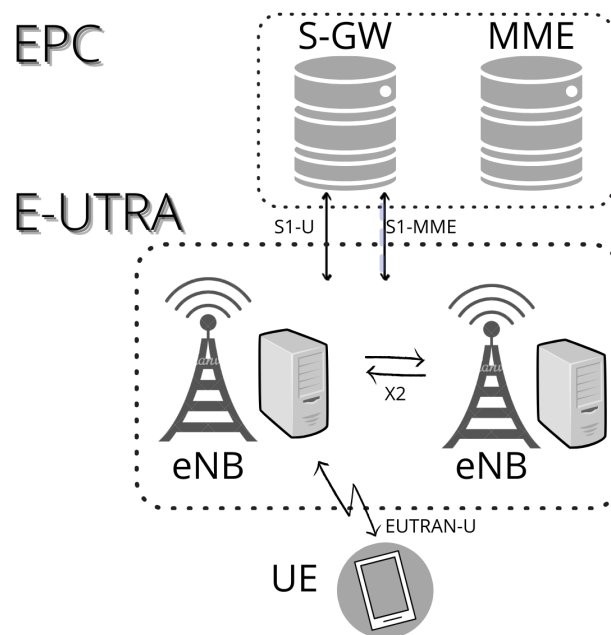
### 2.2. ESTÁNDAR LTE PARA EL SERVICIO MÓVIL TERRESTRE

Long Term Evolution (LTE) es un estándar para las comunicaciones inalámbricas de banda ancha utilizado principalmente en dispositivos móviles y terminales de información, está basado en las tecnologías de sistemas de comunicación: GSM y UMTS. Fue desarrollado por la colaboración internacional de asociaciones de telecomunicaciones 3GPP en su versión 8 (*Release 8*) y más adelante en la versión 10 aparece el LTE avanzado (*LTE-Advanced*) cumpliendo los requisitos del *IMT Advanced 4G*. La cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil (4G) es la sucesora a 2G y 3G, también precede a 5G. El cambio entre las generaciones corresponde a las mejoras realizadas al estándar de la tecnología y/o protocolos de telefonía

usados en cada generación. De acuerdo a la 3GPP en sus lanzamientos de versiones de cada generación también llamados Releases, en 4G se utilizó como base el estándar UMTS de la 3G y el protocolo de telefonía GSM de la 2G para formar el estándar LTE en el Release 8 y para la 5G actualmente se encuentran mejoras que incluyen el estándar LTE en el Release 15 y 16 aunque todavía no se ha definido un estándar general para 5G <sup>6</sup>.

**2.2.1. Arquitectura global de un sistema basado en LTE** La arquitectura de red se divide en tres bloques principales: el Equipo de Usuario (UE), la red de acceso (E-UTRAN) y el núcleo de red (EPC) como se muestra en la Figura 1:

**Figura 1.** Arquitectura global de un sistema basado en LTE.



Replicada de <http://rubensm.com/arquitectura-4g/>

<sup>6</sup> 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP). *Specification Group Radio Access Network Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 16)*. 2020.

- El UE permite que el usuario se conecte a la red LTE, este contiene dos elementos básicos: un módulo de suscripción de usuario (SIM) y el terminal móvil (celular, tablet).
- La red de acceso E-UTRAN se encarga de las comunicaciones de radio entre el UE y el EPC por medio de un elemento conocido como eNB (Evolved Node B). Cada uno de estos nodos o estaciones controla la comunicación con los UE en una o varias celdas y cuando un UE se comunica con una de ellas, a esta se le conoce como su eNB servidora.
- El núcleo de red (EPC) está compuesto de varios elementos para controlar los paquetes de información, el Servidor Suscriptor de Inicio (HSS) es una base de datos central que contiene información acerca todos los suscriptores de la red, el PDN se encarga de la comunicación fuera de la red (internet), por lo tanto almacena la identidad y la localización del UE. La compuerta de servicio (S-GW) funciona como enrutador entre la eNB y el PDN, y la Entidad de Manejo Móvil (MME) controla las operaciones de alto nivel del UE.<sup>7</sup>

**2.2.2. Estructura del enlace descendente (DL)** Las transmisiones LTE desde un estación base hasta un terminal móvil se componen de señales organizadas en tramas con múltiples portadoras bajo el esquema OFDM, lo que significa que se debe realizar dos procesos simultáneos, uno en el dominio del tiempo y el otro en el dominio de la frecuencia.

En frecuencia se divide la información en *Resource Elements* (RE). Los RE son símbolos de modulación unidos a una subportadora que están agrupados en *Resource*

---

<sup>7</sup> Victor Enrique OROBIO PÉREZ y HURTADO CANO. Héctor Julio. *Análisis de la planificación de paquetes en el enlace descendente sobre el desempeño de una red LTE*. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones). Popayán - Colombia: Universidad del Cauca, 2015.

*Blocks* (RB) y estos a su vez están compuestos por doce subportadoras consecutivas y seis o siete símbolos OFDM, dependiendo de la configuración del Prefijo Cíclico (CP) normal o extendida, respectivamente.

El ancho de banda del sistema depende del número de RBs y por ende del número de subportadoras como lo indica la Tabla 1. En el dominio temporal la información a

**Tabla 1.** Opciones de configuración de ancho de banda LTE

RBs	Ancho de banda [MHz]	Subportadoras
6	1.5	72
15	3	180
25	5	300
50	10	600
75	15	900
100	20	1200

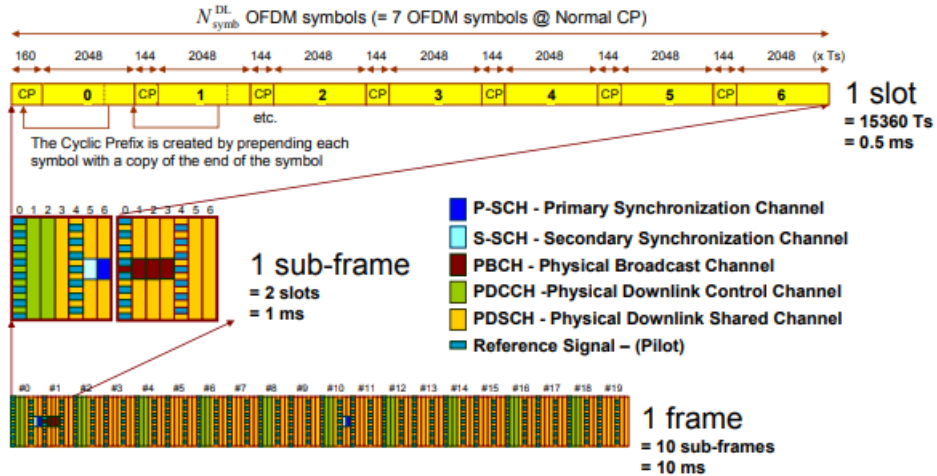
Replicada de <https://n9.cl/lte-bw>

transmitir se organiza por tramas. Cada trama está compuesta por diez subtramas incluyendo dos *slots* cada uno con los seis o siete símbolos OFDM agrupados en esa sola posición. El número de símbolos en cada *slot* depende de la configuración de CP y el modo normal indica que hay siete símbolos OFDM en un slot y 14 símbolos en una subtrama, por lo tanto la longitud de una trama es de 140 símbolos OFDM.

Para realizar procesos como la estimación del canal y la sincronización de los símbolos se transmiten los *Reference Symbols* (RS). Toda la información es multiplexada en el dominio del tiempo y transmitida por seis canales como se aprecia en la Figura 2.

**2.2.3. Estructura de canales** Existen tres principales canales de información presentes en una red LTE: canal lógico, canal de transporte y canal físico. El canal lógico se encarga de identificar el tipo de información que será transmitida, el canal

**Figura 2.** Estructura de la trama para el estándar LTE.



Tomada de [https://n9.cl/lte\\_channel](https://n9.cl/lte_channel)

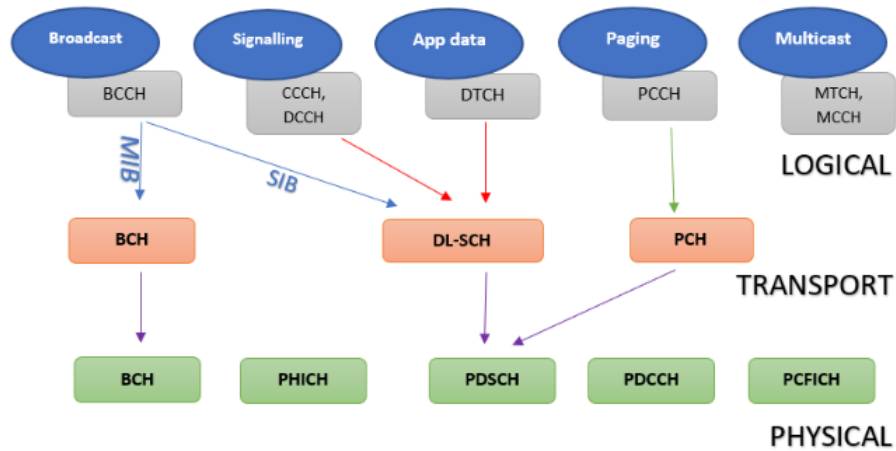
de transporte define cómo será enviada dicha información y el canal físico es por donde se envía la información mediante una interfaz en el aire.

Los canales lógicos se relacionan con los diferentes tipos de información que se pueden transmitir con el esquema LTE, por ejemplo, un dispositivo móvil puede enviar y recibir video (broadcast), también recibe señales de control desde la radio base (signaling), las aplicaciones instaladas reciben y envían información (application data), y otro escenario es cuando recibe información con protocolos de multidifusión, como la transmisión de un partido de fútbol en vivo (multicast). Ahora bien, para cada tipo de información transmitida se necesita un canal lógico para organizar dicha información.

## 2.3. ESTÁNDAR DVB-T2 PARA EL SERVICIO DE RADIODIFUSIÓN

**2.3.1. Televisión digital** La televisión digital consiste en el muestreo y codificación de las imágenes en un flujo de datos binarios que es transmitido mediante una red de transporte (terrestre, cable, satélite, etc.) hacia un dispositivo de recepción

**Figura 3.** Canales del estándar LTE.



Tomada de <https://n9.cl/9mr8t>

que decodifica y reconstruye la imagen original <sup>8</sup>. Este tipo de transmisión de información posee grandes ventajas en comparación con su antecesora la TV analógica:

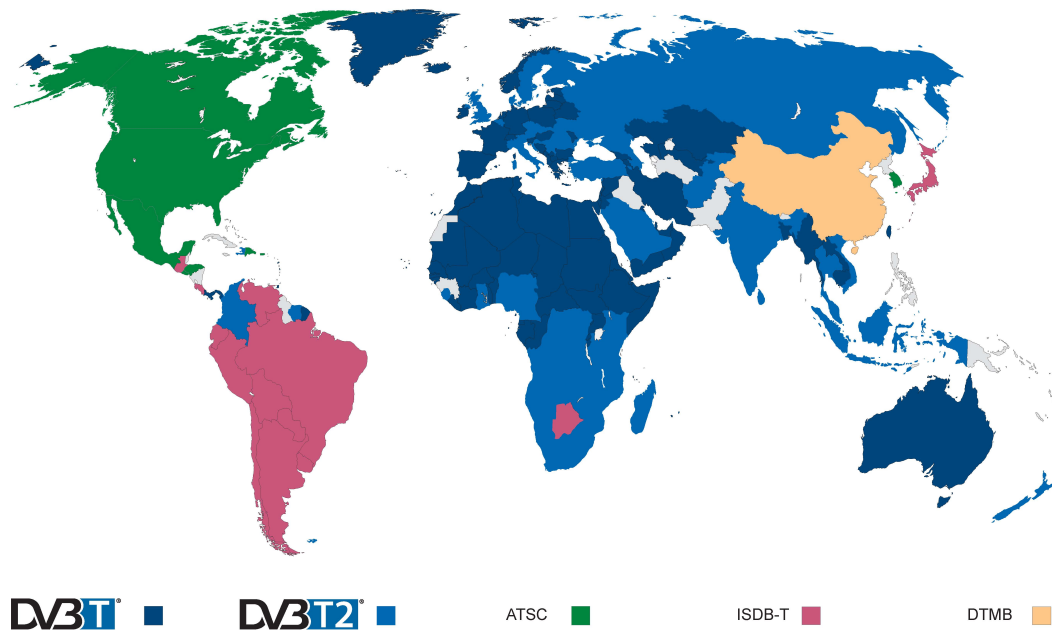
- *Mayor calidad de señales:* Los sistemas de corrección de errores integrados en la programación de la televisión digital permiten una mayor calidad de recepción tanto de audio como de video.
- *Eficiencia espectral:* Los procesos de compresión digital permiten transmitir en el mismo ancho de banda de un canal de TV analógica (6 MHz) cuatro a seis canales de TV digital de baja resolución. La separación entre canales también es menor, por ello, se optimiza aún más el uso del espectro.
- *Contenidos interactivos:* En este tipo de transmisión la información viaja en ambos sentidos, permitiendo así presentar contenidos interactivos.
- *Mayor flexibilidad en el uso del canal:* La multiplexación permite asignar diná-

<sup>8</sup> Hernan GALPERIN. «Comunicación e integración en la era digital: un balance de la transición hacia la televisión digital en Brasil y Argentina». En: *Comunicación y Sociedad* (2004).

micamente el ancho de banda de acuerdo con la necesidad de los distintos canales o servicios ofrecidos por el operador.

**2.3.2. Estándares de TV digital** Para la implementación de la televisión digital se desarrollaron una serie de estándares que en su momento respondían a las necesidades de distintas regiones y a la tecnología disponible. En la siguiente figura se puede observar la distribución de estándares para televisión digital adoptada por distintos países.

En Estados Unidos desde 1996 se utiliza el estándar ATSC el cual opera con ca-  
**Figura 4.** Estándares de TV digital en el mundo.



Tomada de <https://n9.cl/dvb-map>

nales de 6 MHz y utiliza el formato de descompresión MPEG para la señal de vídeo y Dolby para obtener un audio de alta calidad. En Japón se desarrolló el estándar ISDB-T que permite emitir en formato HD y SD, maneja multimedia para la inter-

actividad, opera servicios móviles y su modulación está basada en MPEG-2. En el 2002 se implementa el estándar DTMB en China y es diseñado para tener una gran cobertura, transmitir en HD y emitir distintos canales en una misma frecuencia.

En el año 2003 la EBU (European Broadcasting Union) implementa el estándar DVB caracterizado por transmisiones de alta definición y robustez ante interferencias de señales con retrasos y ecos por el terreno. El sistema DVB (Digital Video Broadcasting) define un conjunto de estándares que permiten la interoperabilidad de sistemas de difusión de video digital basados en el estándar MPEG-2 para varios medios de transmisión incluyendo satélite, cable, radiodifusión terrestre y microondas.

Los estándares DVB son desarrollados y administrados por la Oficina del Proyecto DVB ubicada en Ginebra, Suiza. DVB es un consorcio de más de 300 organizaciones pertenecientes al sector público y privado de la industria de la televisión, los cuales tienen como objetivo establecer una estructura actualizada para los servicios de televisión digital. Los estándares son publicados por el European Telecommunications Standards Institute (ETSI).

Existen distintos tipos de DVB dependiendo de su medio de transmisión, el DVB-S trabaja con sistemas digitales vía satélite, el DVB-C está asignado a sistemas digitales por conexión cableada, el DVB-H corresponde al estándar para sistemas móviles y el DVB-T agrupa los sistemas de transmisión por ondas terrestres.

El estándar con más acogida a nivel mundial es el DVB-T y su segunda generación DVB-T2. El estándar DVB-T posee grandes ventajas respecto a otros tipos de transmisión, como la cableada y la satelital, ya que soporta recepción portátil, permite la radiodifusión de programas regionales y locales debido a su bajo costo, y así mismo, permite llevar el servicio de televisión digital a zonas apartadas donde se dificulta implementar redes cableadas.

**2.3.3. Características técnicas de DVB-T2** El estándar DVB-T2 es la segunda generación del estándar DVB-T, el cual fue diseñado en 2009 para optimizar el uso

del espectro radioelctrico y permitir la transmisi3n de m1s canales con mayor definici3n. El aumento en la eficiencia espectral al implementar la segunda generaci3n del est1ndar alcanz3 entre el 30 % y 50,41 % y fue gracias a la utilizaci3n de nuevas t3cnicas de modulaci3n y codificaci3n <sup>9</sup>.

**Tabla 2.** Comparaci3n caracter1sticas t3cnicas entre est1ndares DVB-T y DVB-T2

<b>Est1ndar</b>	<b>DVB-T</b>	<b>DVB-T2</b>
Modulaci3n	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
BW [MHz]	6, 7, 8	<b>1.7, 5, 6, 7, 8, 10</b>
Codificaci3n video	MPEG-2	MPEG-4
Principales servicios	SD, HD	SD, HD
Algoritmos FEC	RS + Cod conv 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	LDPC + BCH 1/2, 3/5, 2/3, 4/5, 5/6
Tasa de datos [Mbps]	4.98 – 31.67	7.44 – 50.32
Intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/128
Modos de portadoras	2K, 8K	<b>1K, 2K, 4K, 8K-8KE, 16K, 16KE, 32K, 32KE</b>
Movilidad	S3	S3

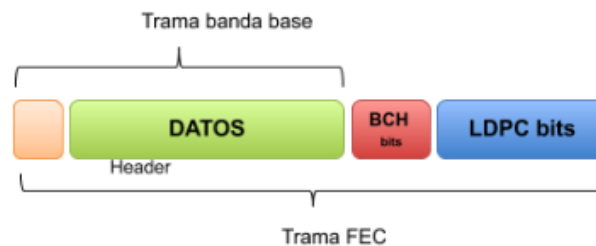
Replicada de referencia 10.

Al igual que el est1ndar DVB-T, la especificaci3n DVB-T2 utiliza modulaci3n OFDM y, adem1s, a1ade la modulaci3n 256QAM, lo cual permite aumentar el n1mero de bits transmitidos en cada paquete de datos y as3 mejorar los algoritmos de FEC (Forward Error Correction). Los algoritmos FEC son procesos para detectar y corregir errores en las tramas de bits debidos a efectos del canal, estos c3digos a1aden informaci3n extra en cada paquete de datos transmitidos para luego utilizar esta informaci3n en el proceso de decodificaci3n y as3 corregir bits que llegaron err3neos

<sup>9</sup> Andr3s Felipe LESMES AM3ZQUITA. *Identificaci3n de la conveniencia para Colombia de la adopci3n del est1ndar DVB-T2 y su estado de despliegue en el territorio colombiano*. Trabajo de Grado (Ingeniero de Telecomunicaciones). Bogot1 D.C - Colombia: Universidad Santo Tom1s, 2018.

o faltantes, sin necesidad de retransmitir todo el paquete de datos nuevamente. El LDPC (Low Density Parity Check) y el BCH (Bose Chaudhuri Hochquenghem) son mecanismos FEC utilizados por el estándar DVB-T2, el primero es muy útil a la hora de corregir errores en largas tramas de información cuando los bits erróneos están uniformemente distribuidos y el BCH actúa como complemento a la decodificación del LDPC eliminando el ruido de fondo de cada palabra mediante la corrección de unos pocos bits <sup>10</sup>.

**Figura 5.** Estructura de la trama para el estándar DVB-T2.



Tomada de referencia 10.

Una característica importante que se incluye en DVB-T2 es la técnica de entrelazado (interleaving), la cual consiste en organizar la información de forma no contigua para mejorar la transmisión de los paquetes de datos. Para cada PLP es posible configurar un entrelazado temporal distinto, para así evitar que largas secuencias de información del flujo original sean afectadas por perturbaciones de la señal OFDM y permite corregir también los efectos del desvanecimiento provocados por edificios cuando se realice una recepción móvil.

**2.3.4. Contexto colombiano** En Colombia se adoptó oficialmente el estándar DVB-T2 el 28 de agosto de 2008 debido a todas las ventajas que ofrecía como la

<sup>10</sup> et al. GÓMEZ BARQUERO David. «Funcionalidades avanzadas de DVB-T2 para el diseño de redes de televisión digital terrestre en latinoamérica». En: *Hologramática* (2005), págs. 68-70.

utilización del esquema OFDM para poder ofrecer una señal de buena calidad que disponía de una protección anti-ecos, la posibilidad de trabajar con distintos anchos de banda (canales), además de brindar una fácil adaptación y aumento en la cobertura para la televisión digital. Colombia junto con Surinam y Guyana fueron los únicos países en adoptar el estándar europeo para la TV digital en Latinoamérica, el resto de los países siguieron el ejemplo de Brasil (primer país de la región en implementar la TV digital) y adoptaron el estándar japonés ISDB-T.

En los siguientes años se instalaron centros de transmisión por todo el país, por lo cual se consideraba que para 2019 la transmisión de señal analógica disminuiría considerablemente y así poder sintonizar la señal digital abierta gratuita por medio de la TDT <sup>9</sup>.

Durante muchos años la banda de frecuencias UHF (470 a 862 [MHz]) se utilizó para transmitir televisión analógica a los hogares del mundo, sin embargo, con la llegada de las nuevas tecnologías de tv digital el uso de la tv analógica se redujo considerablemente. La liberación de espectro gracias a esta transición se conoce como el **Dividendo Digital**. En las conferencias mundiales de radiocomunicaciones de 2007 y 2012 se decidió reasignar las frecuencias recientemente liberadas al servicio móvil para el despliegue de la banda ancha móvil (4G y 5G).

Aún no se ha realizado el apagón analógico, pero se espera que este suceda en 2022, después de que se logre una cobertura total de TV digital en Colombia. La organización de espectro post-apagón que se está gestionando se ve reflejada en la Figura 6.

**Figura 6.** Canalización colombiana para el servicio de radiodifusión en la banda UHF.

	OPERADOR	# Canal	Frecuencia MHz (Start)
Banda Primaria TV	CARACOL	14	470
	RCN	15	475
	RCN	16	482
	REGIONAL	17	488
	REGIONAL	18	494
	3º CANAL	19	500
	4º CANAL	20	506
	CARACOL	21	512
	RCN	22	518
	CARACOL	23	524
Banda Secundaria TV	RCN	24	524
	CARACOL	25	530
	COMODIN	26	536
	COMODIN	27	542
	3º CANAL	28	548
	4º CANAL	29	554
	REGIONAL	30	560
	REGIONAL	31	566
	REGIONAL	32	572
	REGIONAL	33	578
Radioastronomía	RTVC	34	584
	RTVC	35	590
	COMODIN	36	596
	COMODIN	37	602
	Radioastronomía	38	608
	Radioastronomía	39	614
	Radioastronomía	40	620
	Radioastronomía	41	626
	Radioastronomía	42	632
	Radioastronomía	43	638
Banda Secundaria TV	Radioastronomía	44	644
	Radioastronomía	45	650
	Radioastronomía	46	656
	Radioastronomía	47	662
	Radioastronomía	48	668
	Radioastronomía	49	674
	Radioastronomía	50	680
	Radioastronomía	51	686
	FRONTERA 1º DD	52	692
	FRONTERA 1º DD	53	698
DIVIDENDO DIGITAL (BANDA 700MHz)	FRONTERA 1º DD	54	704
	FRONTERA 1º DD	55	710
	FRONTERA 1º DD	56	716
	FRONTERA 1º DD	57	722
	FRONTERA 1º DD	58	728
	FRONTERA 1º DD	59	734
	FRONTERA 1º DD	60	740
	FRONTERA 1º DD	61	746
	FRONTERA 1º DD	62	752
	FRONTERA 1º DD	63	758
FRONTERA 1º DD	64	764	
FRONTERA 1º DD	65	770	
FRONTERA 1º DD	66	776	
FRONTERA 1º DD	67	782	
FRONTERA 1º DD	68	788	
FRONTERA 1º DD	69	794	
FRONTERA 1º DD	70	800	

PTTV post apagón/reordenación

Tomada del PTTV

<https://www.ane.gov.co/gestion-tecnica/SitePages/pttv-archivos.aspx?P=177>

### 3. INTERFERENCIA Y CONVIVENCIA

En este capítulo se documentan los aspectos relacionados a las mediciones y métricas utilizadas para determinar la interferencia en un ambiente de convivencia de servicios de radio que incluyen parámetros y recomendaciones de diferentes normas como ITU, ETSI y 3GPP.

#### 3.1. INTERFERENCIA ENTRE SERVICIOS DE RADIO

La ITU en el Reglamento de Radiocomunicaciones <sup>1</sup> define la interferencia como: el efecto de energía no deseada debido a una emisión o una combinación de emisiones, radiaciones, o inducciones sobre el receptor de un sistema de radiocomunicaciones, manifestado en degradación, mal-interpretación, o pérdida de información que puede ser evitado en ausencia de esta energía no deseada.

**3.1.1. Tipos de interferencia:** Dependiendo de la afectación en el sistema receptor las interferencias se clasifican en 3 niveles: admisible, aceptada y perjudicial. Las **interferencias admisibles** son las que satisfacen los umbrales de protección establecidos en el CNABF. Las **interferencias aceptadas** son de mayor nivel que las admisibles pero son acordadas entre administradores de servicios en el espectro ya que su efecto no es degradante ni perjudicial. Las **interferencias perjudiciales** ocurren debido a violaciones de los acuerdos y la normativa establecida en el RR lo cual genera afectaciones graves en el funcionamiento y la calidad final del servicio <sup>11</sup>.

---

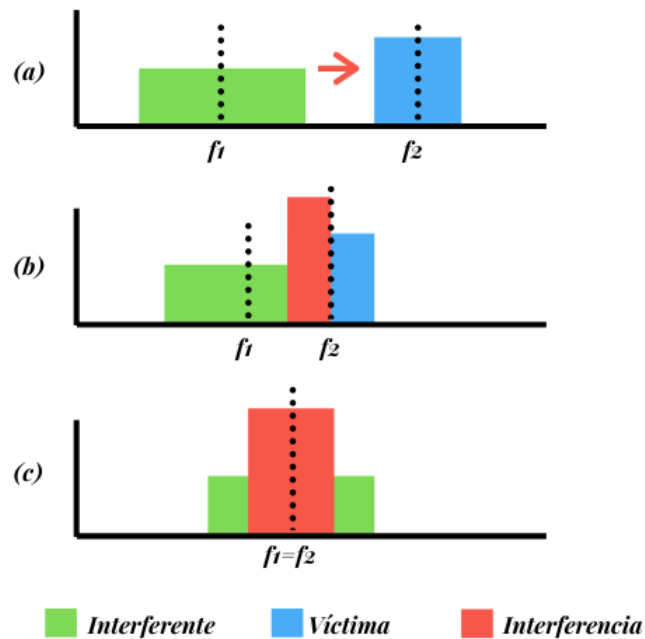
<sup>11</sup> Juan Pablo MORENO ACOSTA. *Metodología para el análisis de interferencia entre servicios de radio en canales adyacentes*. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2015.

Dentro del análisis de interferencias también se destacan las relacionadas con la banda de frecuencia de estudio. Las interferencias pueden ser en banda o fuera de banda. Las **interferencias en banda** (Figura 7) se caracterizan por tener dos o más servicios transmitiendo dentro de un mismo intervalo o banda de frecuencias causando algún nivel de interferencia. Se pueden dar 3 escenarios:

- **Interferencia de canal no adyacente:** ocurre cuando el sistema interferente se encuentra totalmente fuera del canal del sistema víctima, pero debido a condiciones sus técnicas puede generar interferencia.
- **Interferencia de canal adyacente:** ocurre cuando el sistema interferente se encuentra parcialmente en el canal o adyacente al canal del sistema víctima.
- **Interferencia co-canal:** ocurre cuando la frecuencia central del sistema interferente coincide con la frecuencia central del sistema víctima.

**3.1.2. Escenario de comunicaciones** Un escenario de comunicaciones se compone básicamente por un sistema transmisor, un sistema receptor y el enlace que los une. Cuando se estudian interferencias hay dos tipos de enlaces que deben ser analizados: el enlace víctima y el enlace interferente. El *enlace víctima* es la comunicación entre el sistema transmisor deseado y el receptor víctima. El *enlace interferente* es aquel que se da entre el receptor víctima y un transmisor interferente <sup>11</sup>. El escenario de convivencia que se define más adelante en el capítulo 4 es un conjunto de lineamientos y parámetros referentes a casos de interferencia entre servicios radioeléctricos, en este se identifican tanto el enlace interferente como el víctima, los anchos de banda de señales, las distancias entre equipos, etc.

**Figura 7.** Tipos de Interferencia según la banda de estudio: (a) Interferencia de canal no adyacente, (b) Interferencia de canal adyacente, (c) Interferencia co-canal.



Replicada de referencia 16.

### 3.2. CONVIVENCIA

La convivencia o coexistencia en el ámbito de las radiocomunicaciones se define como la habilidad de dos o más dispositivos o sistemas para operar en el espectro sin interferencias perjudiciales <sup>11</sup>. Un análisis de convivencia entre servicios de radio se enfoca en el rendimiento del sistema receptor en presencia de niveles de interferencia causados por un sistema externo. El sistema externo que ocasiona la interferencia es conocido como *sistema interferente* y el sistema afectado por la interferencia se denomina *sistema víctima*. Los estudios de convivencia se centran en comprender los beneficios e impactos de la coexistencia entre sistemas con la finalidad de mitigar el efecto de las interferencias en la calidad del servicio.

En distintos países se han realizado estudios de convivencia entre el servicio de radiodifusión (con estándar DVB-T2) y el servicio móvil terrestre (con estándar LTE) debido a que en la última Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones se decidió liberar una parte de la banda UHF (300-3000[MHz]) para ser utilizada por el servicio móvil a partir de 700 [MHz]. En la banda UHF también se encuentra atribuido el servicio de radiodifusión en las frecuencias de 400 a 700[MHz]. Por lo anterior, la porción del espectro que actualmente es centro de estudio de posibles escenarios de coexistencia corresponde a la primera y segunda banda del dividendo digital de 700 a 800[MHz] <sup>12</sup>.

Algunos de los estudios realizados son los siguientes:

- **República checa:** (a) En el artículo “Coexistence of DVB-T2 and LTE in the 800 MHz Band: Analysis of DVB-T2 System Configurations” <sup>12</sup> se propone medir el impacto del sistema LTE downlink sobre el sistema DVB-T2 con diferentes configuraciones en escenarios de convivencia en canal adyacente, para ello optaron por observar influencia de la interferencia a través del radio de protección (PR).
- (b) En el artículo “LTE and DVB-T2 networks in the first digital dividend band in Europe: A coexistence study” <sup>13</sup> se exploró de forma robusta la interferencia causada por señales de LTE sin carga de tráfico y con carga de tráfico comple-

---

<sup>12</sup> et al POLAK. Ladislav. «Coexistence of DVB-T2 and LTE in the 800 MHz Band: Analysis of DVB-T2 System Configurations». En: *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. 2018, págs. 1-5.

<sup>13</sup> et al POLAK. Ladislav. «LTE and DVB-T2 networks in the first digital dividend band in Europe: A coexistence study». En: *2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. 2018, págs. 1-4.

ta. Se usaron criterios de interferencia como el EVM (Error vector modulation) y el C/I (Carrier to interference ratio) para diferentes tipos de modulaciones de DVB-T2.

(c) En el artículo “Exploring and measuring the co-existence between LTE and DVB-T2-Lite services”<sup>14</sup> se exploró la influencia del solapamiento (overlap) de LTE sobre DVB-T2-Lite usando como criterios de interferencia: EVM (Error vector modulation), el SDR\* (Spectral Density Ratio), MER (Modulation Error Ratio) y QEF (Quasi Error-Free).

- **España:** En el artículo “Coexistence of digital terrestrial television and next generation cellular networks in the 700 MHz band”<sup>15</sup> se usó como criterio de interferencia el radio de protección (PR). Se concluyó que LTE-Uplink genera más interferencia que LTE-Downlink. También se encontró que entre más baja es la carga de tráfico de la señal LTE DL, mayor es la interferencia debido a la alta variación en tiempo cuando se encuentra en canal adyacente con DVB-T2.
- **Colombia:** En el documento “ESTUDIO DE LA COMPATIBILIDAD ELECTRO-MAGNÉTICA ENTRE LOS SERVICIOS DE TDT Y LTE EN LA SUB-BANDA UHF DE 614 A 698 MHZ EN COLOMBIA”<sup>16</sup> se determinaron parámetros como las bandas de guarda, los radios de protección (PR) y las máscaras espectrales, para esto se diseñaron nueve casos de interferencias.

---

<sup>14</sup> et al POLAK. Ladislav. «Exploring and measuring the co-existence between LTE and DVB-T2-Lite services». En: *2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2013, págs. 316-320.

<sup>15</sup> et al FUENTES. Manuel. «Coexistence of digital terrestrial television and next generation cellular networks in the 700 MHz band». En: *IEEE Wireless Communications* 21 (dic. de 2014), págs. 63-69. DOI: 10.1109/MWC.2014.7000973.

<sup>16</sup> et al MALDONADO. Carlos. *Estudio de la compatibilidad electromagnética entre los servicios de TDT y LTE en la sub-banda UHF de 614 A 698 MHZ en Colombia*. Inf. téc. Jul. de 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.14068.24966.

### 3.3. MÉTRICAS Y CRITERIOS DE INTERFERENCIA

Un criterio se puede definir como la regla o norma conforme a la cual se establece un juicio o se toma una determinación, en este caso, se busca implementar varios criterios de interferencia para analizar la influencia del sistema interferente en el receptor víctima. Los principales criterios para evaluar grados de interferencia son: SINR, SIR, I/N, ACLR, APBR e IT. Existen otros criterios que determinan el desempeño de los sistemas de radio, que también permiten analizar los niveles de interferencia, como por ejemplo: probabilidad de error de símbolo (SEP), bit (BEP), la relación entre el número de bit recibidos erróneos y el total de bits transmitidos (BER) y la calidad del servicio (QoS), sin embargo, para la medición de estos parámetros es necesario demodular las señales con equipos específicos, lo cual está fuera del alcance del presente estudio <sup>17</sup>.

A continuación, se describen los criterios de interferencia utilizados en este proyecto:

**3.3.1. Relación señal a interferencia - SIR** Se puede entender como la relación entre la potencia de la señal deseada y la potencia de la señal interferente en un escenario cocanal.

$$SIR = Señal_{deseada} - Señal_{interferente} [dB] \quad (1)$$

**3.3.2. Radio de densidad espectral - SDR\*** Se define como la relación de potencia entre dos sistemas por unidad de ancho de banda usado. En el caso donde

---

<sup>17</sup> Deisy Carolina PÁEZ CASAS. «Metodología para la Identificación de Interferencia de Espectro Radioeléctrico». 2020.

LTE es el sistema interferente y DVB-T2 el víctima, se calcula así:

$$SDR^* = P_{LTE} - 10\log(B_{LTE}) - (P_{DVB-T2} - 10\log(B_{DVB-T2})) \quad (2)$$

**3.3.3. Relación de fuga de canal adyacente - ACLR** Este parámetro mide la cantidad de potencia de la señal deseada que se pierde por influencia de una señal interferente en el canal adyacente. Es una medida que se utiliza para analizar la coexistencia entre dos sistemas que están en frecuencias adyacentes. Estos niveles están definidos en las normas de la 3GPP para distintos anchos de banda de transmisión de LTE.

**3.3.4. Método de punto de fallo subjetivo - SFP** Este método viene especificado en las recomendaciones ITU R BT.1368-12 <sup>18</sup> e ITU-R BT.2215 <sup>19</sup>, y consiste en realizar un barrido de potencias para la señal interferente, manteniendo la señal víctima (DVB-T2) con una potencia fija, y se observa en el receptor (televisión) el resultado en un video real de 20 segundos. Si durante los 20 segundos no se observa ningún error, se aumenta la potencia interferente en 0.1dB, y se vuelve a observar. Cuando se observe un error, la potencia interferente anterior a esa medida será la máxima que puede soportar el receptor, a esa separación en frecuencia, antes de presentar un error en pantalla.

**3.3.5. Máscara de emisión espectral** Una máscara espectral se puede entender como el conjunto de valores de potencia en los que se limita una señal emitida

---

<sup>18</sup> UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, de los servicios de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas*. 2015.

<sup>19</sup> UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers*. 2018.

en una determinada porción del espectro radioeléctrico.

### **Máscara DVB-T2:**

Las señales TDT deben cumplir con requisitos en cuanto a la máscara espectral de la señal radiodifundida al aire, y así, evitar interferencias en los canales adyacentes, por lo que se hace necesario un correcto filtrado en frecuencia.

En la norma ETSI EN 302 296-2 <sup>20</sup> se listan una serie de valores de potencia límites para emisiones con anchos de banda de 7MHz y 8MHz y se clasifican en dos tipos de máscara: “máscara no crítica” y “máscara crítica”, las cuales son definidas en función de la potencia transmitida y siendo menos exigentes para transmisores con potencias menores a 25 W <sup>21</sup>. La máscara no crítica se estableció para poder garantizar la convivencia de una señal TDT con una de TV analógica, siempre y cuando posean el mismo nivel de potencia y de polarización, en caso contrario, se debe aplicar la máscara crítica.

La recomendación de la ETSI que fue adoptada en Colombia no especifica la máscara para una canalización de 6MHz, sin embargo, es posible encontrar los valores de la canalización colombiana emitidos en la resolución 4337 de 2013 de la CRC, como se muestra en la Figura 8 <sup>22</sup>.

### **Máscara LTE:**

La señales del estándar LTE similar a las del estándar DVB-T2 deben cumplir con

---

<sup>20</sup> EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (ETSI). *Digital Terrestrial TV Transmitters; Harmonised Standard for access to radio spectrum*. 2020.

<sup>21</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE COMUNICACIONES (CRC). *Especificaciones técnicas aplicables a la red de servicio de Televisión Digital Terrestre - TDT*. Colombia, 2014.

<sup>22</sup> COMISIÓN DE REGULACIÓN DE COMUNICACIONES (CRC). *Seguimiento a la implementación de las especificaciones técnicas de la TDT en Colombia*. Colombia, 2013.

**Figura 8.** Máscara de DVB-T2 para una canalización de 6 [MHz]

*Tabla 2. VALORES MÁXIMOS DE EMISIONES ASOCIADOS A LAS MÁSCARAS CRÍTICAS PARA TRANSMISORES CON UNA POTENCIA INFERIOR A 25 W.*

<i>Diferencia de frecuencia con la frecuencia central</i>	<i>Valor máximo de emisiones</i>	<i>Diferencia de frecuencia con la frecuencia central</i>	<i>Valor máximo de emisiones</i>
$\pm 2,86$ MHz	12.5 dBm	$\pm 2,92$ MHz	12.4 dBm
$\pm 3,15$ MHz	-39 dBm	$\pm 3,15$ MHz	-39 dBm
$\pm 4,5$ MHz	-51 dBm	$\pm 4,5$ MHz	-51 dBm
$\pm 9$ MHz	-76 dBm	$\pm 9$ MHz	-76 dBm

**Sin portadoras extendidas**                      **Con portadoras extendidas**

Tomada de referencia 22

los requisitos de las máscaras de emisión espectral. En la especificación técnica TS 36.101 del release 16 de 3GPP <sup>6</sup>, se especifican los valores de la máscara de emisión espectral del estándar LTE para varios anchos de banda como se muestra en la Figura 9

**Figura 9.** Máscara de LTE para varios anchos de banda

Table 6.6.2.1.1-1: General E-UTRA spectrum emission **mask**

$\Delta f_{\text{OBS}}$ (MHz)	Spectrum emission limit (dBm)/ Channel bandwidth						Measurement bandwidth
	1.4 MHz	3.0 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	
$\pm 0-1$	-10	-13	-15	-18	-20	-21	30 kHz
$\pm 1-2.5$	-10	-10	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 2.5-2.8$	-25	-10	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 2.8-5$		-10	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 5-6$		-25	-13	-13	-13	-13	1 MHz
$\pm 6-10$			-25	-13	-13	-13	1 MHz
$\pm 10-15$				-25	-13	-13	1 MHz
$\pm 15-20$					-25	-13	1 MHz
$\pm 20-25$						-25	1 MHz

Tomada de referencia 6

## 4. PROPUESTA PARA LA CONFIGURACIÓN DEL ESCENARIO

En este capítulo se describe el proceso para seleccionar los aspectos o parámetros técnicos más relevantes o de interés a la hora de implementar un ambiente experimental para estudios de convivencia entre servicios de LTE y DVB-T2.

### 4.1. FASE 1. DEFINICIÓN DEL ESCENARIO

En este estudio nos centraremos en el escenario donde:

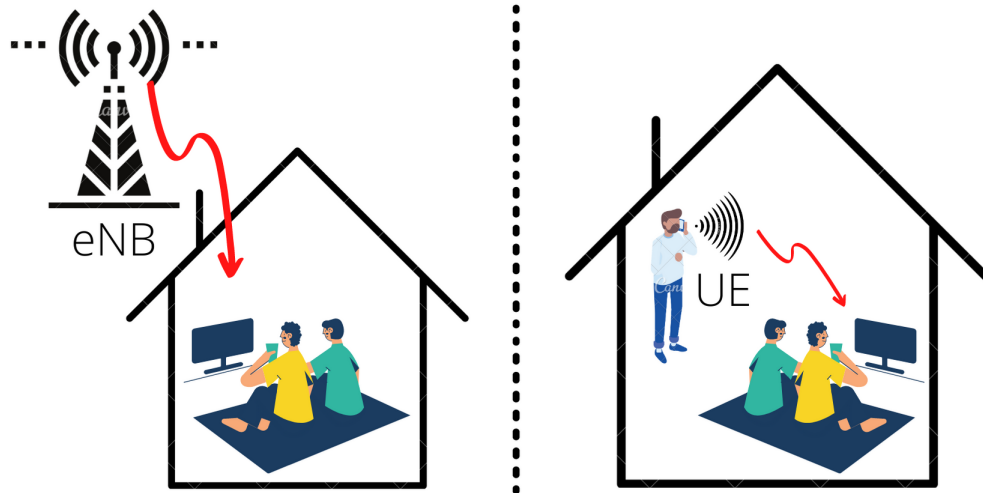
- Servicio Víctima ( $V_S$ ): DVB-T2 [614-698] MHz
- Servicio Interferente ( $I_S$ ): LTE [698-806] MHz
- Tipo de estudio: compatibilidad en canales adyacentes.

El escenario escogido puede ocurrir debido a las siguientes situaciones:

**Estación base de LTE genera interferencia hacia el receptor DVB-T2:** Este tipo de interferencia sucede generalmente cuando el eNB de LTE se encuentra cerca del receptor DVB-T2 (menos de 2km). El mayor grado de interferencia sucede cuando el eNB está inactivo, es decir, cuando solamente se transmiten señales de tráfico y control.

**Terminal móvil UE de LTE genera interferencia hacia receptor DVB-T2:** Este es el caso que presenta mayor probabilidad de interferencia y aumenta si el UE está en los bordes de la celda LTE ya que precisa de su mayor potencia de transmisión para establecer el enlace con el eNB y esta puede llegar a ser de mayor nivel que la potencia percibida por el receptor DVB-T2, especialmente en los últimos canales de TDT adyacentes a las frecuencias cercanas a LTE <sup>16</sup>.

**Figura 10.** Escenarios de interferencia.



**4.1.1. Características del enlace** Una de las variables que incide directamente en el grado de interferencia es el modo de recepción del sistema víctima, este puede ser interior (*indoor*) o exterior (*outdoor*). La campaña de medición de nuestro estudio se desarrolla en un ambiente controlado de laboratorio, *indoor*. La separación entre el subsistema víctima y el interferente es de 3 [m].

**4.1.2. Bandas de frecuencias de interés** Parte de las bandas de frecuencia del espectro que estaba reservada para el servicio de radiodifusión está siendo liberada en distintos países para ser utilizada por las IMT (dividendo digital), como resultado se presentan numerosos escenarios de coexistencia en banda y canales adyacentes entre TV e IMT.

Consultando el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) Colombiano<sup>2</sup> se observa la necesidad de estudiar la compatibilidad entre servicios de TDT (DVB-T2) y móvil (LTE) en las bandas de 400 y 700 [MHz].

### ■ Banda de 400 [MHz] en Colombia

En la década de los 80 se atribuyó y asignó la banda de 410 a 430 [MHz] a la operación de la llamada Telefonía Móvil Automática (TMA) que operaba en algunas ciudades como Bogotá, Cali y Medellín. En 2007 y 2008 se realizaron dos consultas públicas consolidadas en los documentos “Banda de 450 MHz para los Servicios Fijos y Móviles para Comunicaciones Digitales en Áreas de Densidad Demográfica Baja” y “Exploración de interesados en el otorgamiento de permisos en la banda de 450 MHz”. En la primera se buscaba guiar el uso de la banda de 450 [MHz] para reducir la brecha entre zonas de baja y alta densidad demográfica, en específico de 450 a 470 [MHz] por ser la banda de mayor utilización internacional. En la segunda consulta se llevó a cabo el análisis de viabilidad de servicios, las áreas geográficas y proyección de la planificación y atribución del espectro en esta banda, lo que dio como resultado la implementación de desarrollos en 295 municipios de 29 diferentes departamentos del país a cargo de 5 empresas de telecomunicaciones pero no de operadores móviles <sup>23</sup>.

### ■ Banda de 700 [MHz] en Colombia

Mediante la Resolución 668 del 12 de diciembre de 2012, la ANE atribuyó la banda del Dividendo Digital(698 a 806 [MHz]), para uso exclusivo de servicios de telecomunicaciones móviles terrestres.

En diciembre de 2019 el gobierno colombiano subastó la banda de 700 MHz y en febrero del 2020 fueron expedidas por el MinTic las resoluciones que otorgan los permisos para el uso de los bloques de espectro para los operadores que ganaron

---

<sup>23</sup> MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACION Y COMUNICACIONES (MINTIC). *Banda de 450[MHz]: Acciones Nacionales para el Desarrollo de la Banda de 450 MHz*. Colombia, 2009.

**Figura 11.** Servicio de radiodifusión (DVB-T2) atribuido en banda 400 [MHz].

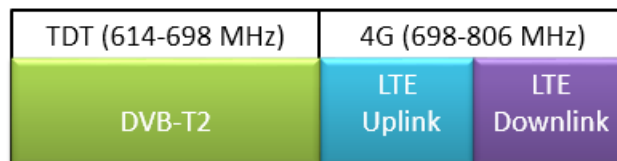
1. Notas internacionales relacionadas con los servicios de radiocomunicación		
Rango	Servicio	Nota Internacional
470 - 512 MHz	RADIODIFUSIÓN (Televisión)	No existen notas para el servicio...
2. Notas nacionales		3. Notas internacionales relacionadas con el rango de frecuencias
Nota Nacional	Nota Internacional	
CLM 3	CLM 11	5.292 5.293 5.295
CLM 24		
4. Tablas Anexas relacionadas con el rango de frecuencias		
Tabla Anexa	Descripción	
TABLA 3	PLAN DE DISTRIBUCIÓN DE CANALES SERVICIO DE RADIODIFUSIÓN DE TELEVISIÓN, FRECUENCIAS EN MHz	

Tomado de referencia 2

la subasta. A Claro Colombia le asignaron 80[MHz] en la banda en cuestión, y en junio del 2020 el operador anunció que inició el despliegue de antenas para adelantar un piloto de 5G en las principales ciudades del país.

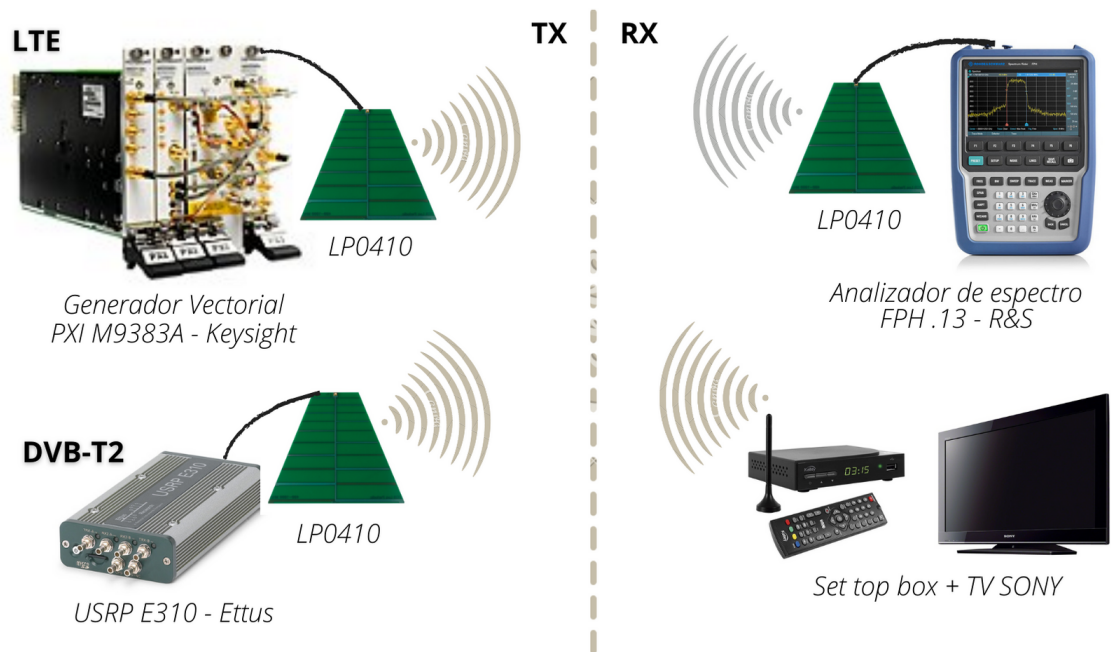
Teniendo en cuenta el contexto anterior donde ya se están realizando pruebas de IMT en la banda de 700 y el canal inmediatamente anterior es utilizado por operadores de radiodifusión (Veasé Figura 12), como se mencionó en el capítulo 2, sección 2.2.4, se hace indispensable realizar estudios de convivencia en dicha región del espectro, para lograr reducir o eliminar posibles interferencias que afecten la calidad de ambos servicios.

**Figura 12.** Relación de frecuencias entre DVB-T2 y LTE en Colombia.



**4.1.3. Sistemas** El esquema de conexión de equipos utilizado se aprecia en la Figura 13.

**Figura 13.** Esquema de configuración de equipos



#### 4.1.3.1. Sistema Víctima: DVB-T2 ( $V_S$ )

##### Receptor del $V_S$

- **Analizador de espectro portátil - Spectrum rider FPH model 13 R&S:**

Este dispositivo trabaja en un rango de frecuencias de 5[kHz] a 20[GHz]. Permite monitorear fácilmente el espectro radioeléctrico y medir parámetros como el ancho de banda ocupado de una señal, potencia de canal, medidas de ACLR para varios estándares preestablecidos, entre otras funcionalidades. Es compatible con el software *Instrument View* de Rohde & Schwarz posibilitando el análisis de datasets

obtenidos directamente del instrumento y la adaptación de estándares (3GPP, ETSI) para medición de ACLR.

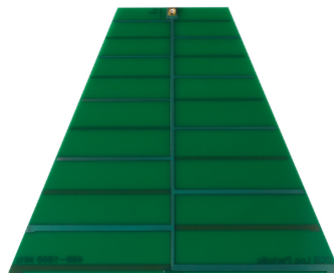
**Figura 14.** Analizador de espectro portátil R&S



Tomada de [https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/fph-pagina-de-inicio-producto\\_63493-147712.html](https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/fph-pagina-de-inicio-producto_63493-147712.html)

**Características de la antena:** La antena logarítmica LP0410 fue la elegida para la recepción de DVB-T2 debido a su amplio rango de frecuencias de trabajo (400-1000 [MHz]) y su capacidad para concentrar la potencia radiada en una dirección. Posee una ganancia típica de 5-6 [dBi].

**Figura 15.** Antena directiva logarítmica LP0410



Tomada de <https://www.ettus.com/all-products/lp0410/>

- **Tv box AS-777:**

Este dispositivo permite seleccionar la frecuencia central de la emisión y el ancho de banda del canal deseado, también reconoce el estándar DVB-T2 y decodifica los paquetes de datos para visualizar la información en una pantalla de TV.

**Figura 16.** TV Box AS-777.



Tomada de <https://n9.cl/decodificador-as777>

**Características de la antena:** La antena utilizada con el set top box para la recepción DVB-T2 es de tipo omnidireccional y cuenta con los parámetros descritos en la tabla 3.

**Tabla 3.** Parámetros antena set top box

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Rango frecuencias 1 [MHz]	172-240
Rango de frecuencias 2 [MHz]	470-860
Impedancia [Ohms]	75
Ganancia pasiva [dB]	3
Polarización	lineal
Rango de recepción [km]	80

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta los parámetros para la recepción de tdt en ambientes *indoor*

establecidos en la Recomendación BT.2036 de la UIT <sup>24</sup>, se define la altura de la antena en 1,5[m] y su ganancia mayor a 0[dBi].

**Características de recepción:** La recepción del servicio de radiodifusión se realizará en el canal 51, con frecuencia central de 695[MHz] tomando como referencia la asignación de canales a operadores públicos y privados en el CNABF. La canalización utilizada es de 6[MHz], con un ancho de banda de recepción de 5,71[MHz].

#### 4.1.3.2. Transmisor del $V_S$

- **USRP E310:**

Para realizar la transmisión se utiliza el equipo de *Software Defined Radio* (SDR) de Ettus Research. El USRP E310 es una plataforma flexible de bajo costo para sistemas de radio definido por software diseñada para trabajar como un procesador externo que permite implementar de forma rápida, sistema flexibles y potentes de SDR.

La interfaz de hardware USRP (UHD) es el controlador oficial preinstalado para todos los dispositivos USRP de Ettus Research, siendo éste soportado por sistemas operativos como Linux, Mac OSX y Windows, así como compatible con software de terceros, como GNU Radio, LabVIEW y Matlab <sup>25</sup>.

---

<sup>24</sup> UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Characteristics of a reference receiving system for frequency planning of digital terrestrial television systems*. 2019.

<sup>25</sup> Tania Lorena SANTOS DUARTE. *Caracterización de un sistema de bloqueo de emisiones clandestinas basado en tecnología SDR*. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2017.

**Figura 17.** USRP E310



Tomada de <https://www.ettus.com/all-products/e310/>

La arquitectura global del E310 se compone de: FPGA, ADC, DAC, la interfaz de procesador central, oscilador local y regulador de potencia. También cuenta con un banco de filtros y un front-end para adecuación de señal.

El E310 trabaja con dos modos de configuración:

**Modo network:** En esta configuración el USRP se encarga de obtener la envolvente compleja de la señal de interés que captura la antena empleando la FPGA y el banco de filtros, sin que el procesador del radio intervenga. Es la forma más rápida de controlar el dispositivo ya que se conecta directamente al computador para procesar la señal por medio del puerto Giga Ethernet a través del router de comunicación.

**Modo embebido:** En este caso el radio se programa para que utilice su sistema operativo embebido y no dependa de un dispositivo externo como un computador reduciendo así la pérdida de datos en la transferencia de un dispositivo a otro. Al emplear este modo de configuración se instalan los aplicativos en la iso y el procesador se encarga de recibir, enviar y procesar las muestras en la misma máquina.

**Características de emisión:** Siguiendo lo establecido en la Recomendación BT.2033

de la UIT <sup>26</sup> se adoptan los parámetros descritos en la tabla 4 para la transmisión del sistema víctima DVB-T2.

**Tabla 4.** Parámetros transmisión DVB-T2

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
FFTSIZE	32K
GI (Guard interval)	1/32
Símbolo de datos	59
SISO/MISO	SISO
PAPR	Ninguno
Tramas por supertrama	2
Ancho de banda	6 MHz
Patrón piloto	PP7
Modulación LI	64QAM
<b>PLP #0</b>	
Tipo	1
Modulación	256 QAM
Tasa	4/5

Tomada de referencia 25.

#### 4.1.4. Sistema Interferente LTE ( $I_S$ )

##### 4.1.4.1. Transmisor del $I_S$

- **Generador vectorial PXI M9383A:**

Un generador de señales es un equipo capaz de generar formas de onda con amplitud y frecuencia variable. Cuando se habla de un generador vectorial se refiere a un equipo que genera señales RF con distintos formatos de modulación tales como: QPSK, 16QAM, 64QAM, entre otros. Los generadores vectoriales se utilizan para

---

<sup>26</sup> UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands.* 2015.

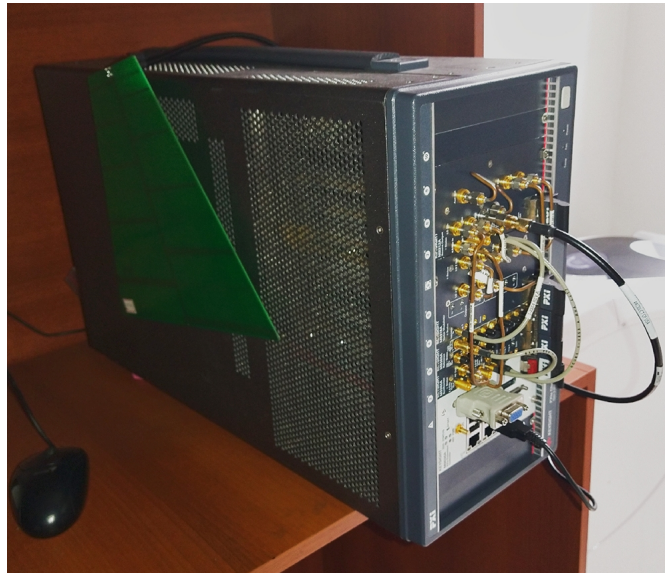
hacer pruebas en sistemas de comunicaciones modernos como 4G y 5G porque ofrecen la capacidad de realizar modulaciones personalizadas y generar formatos de comunicación estándares como GPS, WCDMA, DVB-T, LTE y más.

Los equipos de extensión PCI para instrumentación (PXI) cuentan con un chasis que proporciona alimentación y un bus de comunicación para instrumentos modulares. Los módulos son controlados desde un sistema embebido. La fácil adaptación de módulos dependiendo de las necesidades ha hecho que estos sistemas sean ampliamente utilizados en varias industrias que aprovechan esta característica de escalabilidad.

El Generador Vectorial M9383A fabricado por Keysight puede operar en un rango de frecuencias desde 1[MHz] hasta 20[GHz], interpreta estándares de comunicaciones móviles como CDMA2000, GSM, LTE/LTE-Advanced FDD y TDD, Custom 5G, 5G NR (bajo licencias cerradas).

Una cualidad interesante del PXI M9383A es que también cuenta con un módulo ARB, lo cual permite que señales creadas o almacenadas de otras fuentes sean reproducidas y transmitidas usando este equipo, sin embargo, es importante recalcar que se debe contar con las licencias necesarias para este tipo de función, y por el momento solo se tienen las licencias relacionadas con LTE.

**Figura 18.** Generador vectorial PXI M9383A



**Características de emisión:** Siguiendo lo establecido en la Recomendación BT.2215 de la UIT <sup>19</sup> se seleccionan las posibles variaciones de los parámetros descritos en la tabla 5 para la transmisión del sistema interferente LTE.

**Tabla 5.** Parámetros LTE

<i><b>Parámetro</b></i>	<i><b>Valor</b></i>
Modo de acceso múltiple	OFDMA
Duplex	FDD
Ancho de banda [MHz]	3, 5, 10
Portadoras OFDM	12
Longitud se subtrama	1ms
BW de portadora	15kHz
Modulación	QPSK
Tasa codificación	1/3

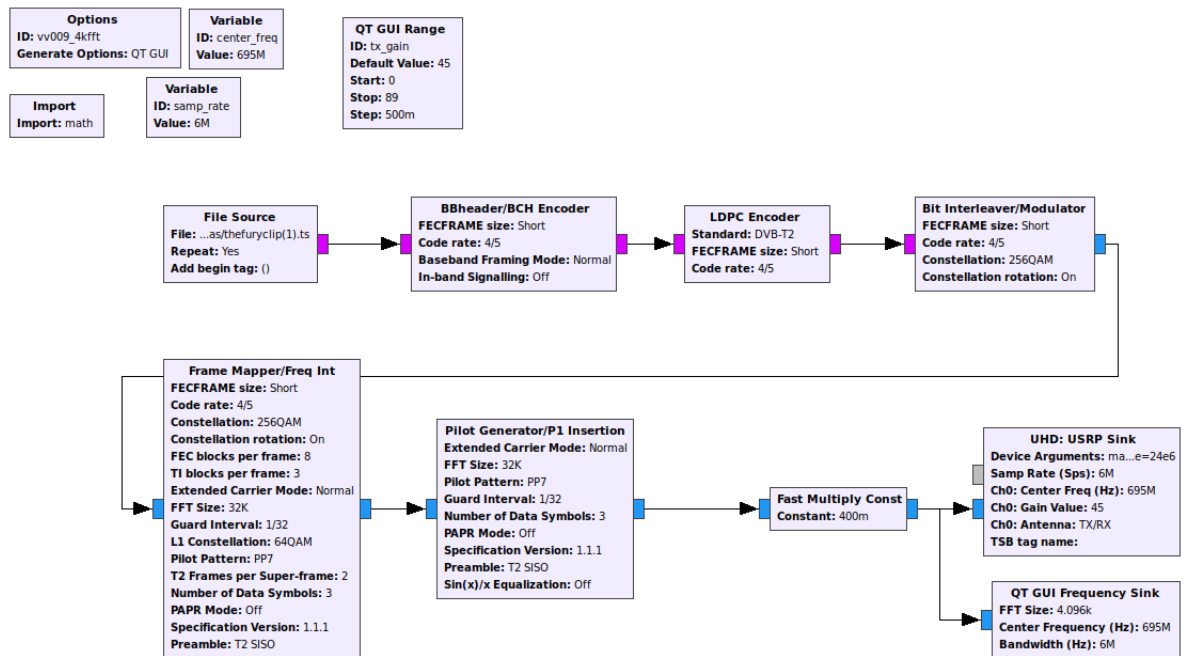
Replicada de referencia 19.

## 4.2. FASE 2. TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE SERVICIOS

### ■ Tx: DVB-T2 con Gnuradio

Para generar la señal de TV digital con el estándar DVB-T2 se diseñó un flujograma en GNURadio a partir de la librería de bloques gr-dvbt2ll <sup>27</sup>, el flujograma se logra apreciar en la Figura 19. El flujograma se compone de los siguientes bloques:

Figura 19. Flujograma de transmisión de DVB-T2



- **File Source:** Este bloque es el encargado de leer la información en datos binarios de un archivo de video en formato MPEG-2 que posee la extensión

<sup>27</sup> Ron ECONOMOS. *A low latency DVB-T2 transmitter for GNU Radio [En línea]. Disponible en: <https://github.com/drmpeg/gr-dvbt2ll>. Consulted October 3th, 2020.*

.TS (Transport Stream).

- **BBheader/BCH Encoder:** En la primera parte el bloque encarga de realizar el proceso de scrambling con el que se busca convertir las tramas de la señal en tramas de una señal digital aleatoria. En la segunda parte se encarga de realizar la codificación externa BCH de la trama de datos dando inicio al proceso de codificación FEC generando la cantidad de bits que determinan el tamaño de cada trama FEC: Normal (64800 bits) y short (16200 bits). La tasa de codificación permite seleccionar la protección de la trama.
- **LDPC Encoder:** Continúa con la codificación FEC realizando la codificación interna LDPC que transforma las tramas de información de la codificación externa BCH en tramas codeword (código y/o protocolo estandarizado) finalizando la codificación FEC.
- **Bit interleaver/Modulator:** En la primera parte intercala los bits en las tramas FEC. En la segunda parte mapea los bits de las tramas en constelaciones codificadas y moduladas dando origen a las tramas de tipo T1.
- **Frame Mapper/Frequency interleaver:** En la primera parte el bloque mapea de una o mas tramas tipo T1 en tramas mas grandes de tipo OFDM T2 para luego agregar la capa 1 conocida como L1. En la segunda parte se realiza un intercalado en frecuencia de las tramas T1 en cada trama OFDM T2.
- **Pilot Generetor/P1 insertion:** En la primera parte se encarga de generar una sección en las tramas OFDM T2 que se conoce como L1 y otra conocida como P1 que identifican el preámbulo de los símbolos P1. En la segunda parte los simbolos son agregados a la trama OFDM con un intervalo de guarda.
- **UHD: USRP Sink:** es el bloque encargado de realizar la interpretación de datos entre el software GNURadio y el equipo físico USRP E310, para ello

necesita de parámetros como la frecuencia central, la tasa de muestreo y la ganancia de transmisión los cuales se disponen en los bloques de variables. En este fujograma `Samp_rate` o tasa de muestreo corresponde al ancho de banda de la señal DVB-T2 transmitida. Bajo recomendación del autor de la librería de bloques es recomendado usar un ancho de banda en `samp_rate` un poco mayor al ancho de banda ocupado que se desea tener de la señal.

- **QT GUI Frequency Sink:** Genera una ventana gráfica de la señal transmitida.

Para lograr el ancho de banda de 6 [MHz] se agrego un argumento en el bloque UHD: USRP sink correspondiente al Master clock rate = 24 [MHz] del USRP E310 que tiene un rango de 5 a 61.11 [MHz].

El proceso de generación de la señal de DVB-T2 se encuentra definido en la norma EN 302 755 de la ETSI <sup>28</sup>. En la Figura 20 se puede ver el contraste entre la señal transmitida de DVB-T2 y la señal recibida en el analizador de espectro.

- **Tx: LTE con N7624B Signal Studio de Keysight**

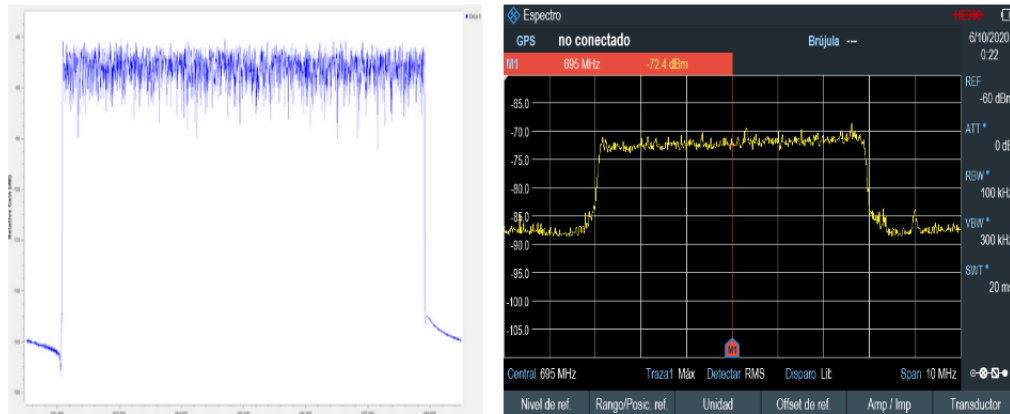
Para el diseño de la señal LTE se utilizó el software de Keysight *N7624B Signal Studio LTE - LTE Advanced FDD*. Este entorno de desarrollo permite configurar los canales físicos, los bloques de recursos, el tipo de modulación, el ancho de banda de la señal, entre muchas otras características. La señal resultante se carga en el software de control (SPF) del Generador Vectorial PXI M9383A y en esta interfaz se establecen parámetros de transmisión como la frecuencia central, la potencia y la atenuación.

En la Figura 22 se puede apreciar a la izquierda la señal diseñada en el software N7624B con un ancho de banda de 3 [MHz] y una potencia de transmisión de -

---

<sup>28</sup> EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (ETSI). *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. 2010.

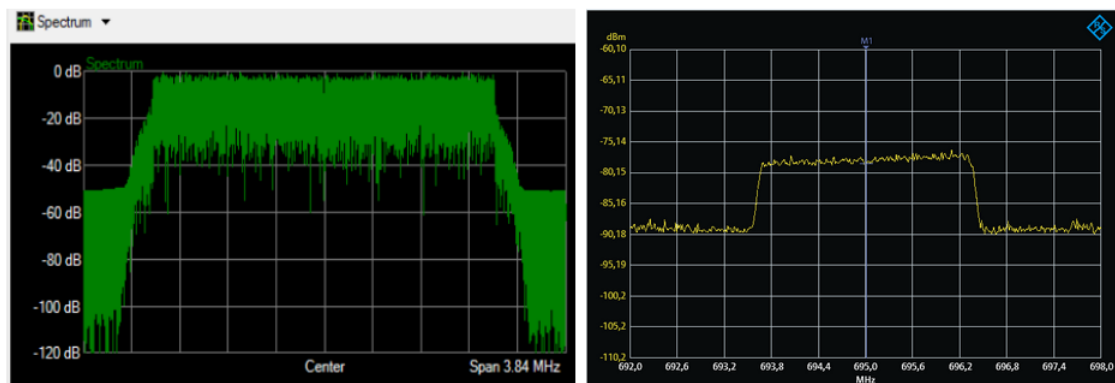
**Figura 20.** Señal diseñada transmitida y señal recibida LTE



Fuente propia

15[dBm]. A la derecha está la señal recibida en el analizador de espectro, esta cuenta con un ancho de banda ocupado de 2,7 [MHz] y una potencia de -78,6 [dBm].

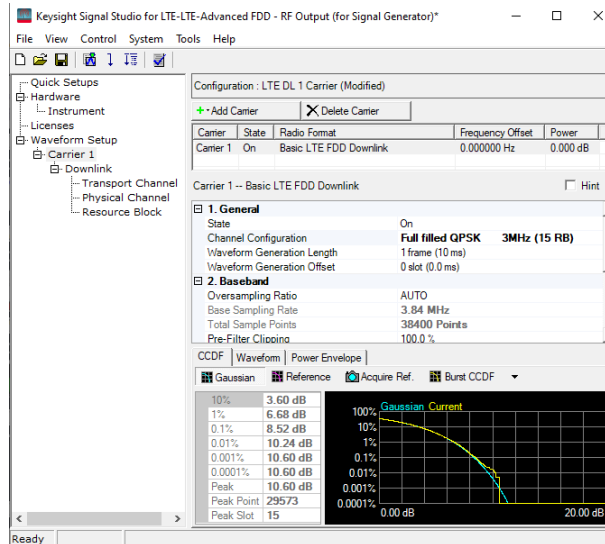
**Figura 22.** Señal diseñada transmitida y señal recibida DVB-T2



■ **Rx: Analizador de espectro R&S**

Antes de iniciar la toma de datos se configuraron los parámetros de la tabla 6 en el equipo. Para lograr visualizar dos canales adyacentes al canal de transmisión del sistema víctima se eligió un span de 33[MHz], el cual se calculó multiplicando el ancho de banda de la señal deseada (6 MHz) por el número de canales (5) y

**Figura 21.** Software Signal Studio LTE - LTE Advanced FDD



agregando un 10 % extra.

Una característica relevante a la hora de realizar mediciones es la habilidad del analizador para separar componentes espectrales presentes en una mezcla de señales. La resolución con la que se separan dichas componentes individuales queda determinada por el parámetro llamado: Resolución de ancho de banda (RBW). Seleccionando un RBW demasiado elevado, es imposible distinguir entre diferentes señales, es decir, se mostrarían como una única componente, sin embargo, si se elige un RBW pequeño para un span muy amplio se incrementa rápidamente el Tiempo de barrido (SWT), por lo tanto, estos parámetros deben seleccionarse para responder a necesidades propias del estudio.

### 4.3. FASE 3. PLAN DE MEDICIÓN

En esta sección se describen las pruebas realizadas para evaluar el ambiente experimental, teniendo en cuenta las capacidades de los equipos usados, los criterios de interferencia y los parámetros de los servicios mencionados previamente.

**Tabla 6.** Parámetros de configuración del analizador de espectro

<i><b>Parámetro</b></i>	<i><b>Valor</b></i>
Span [MHz]	33
REF [dBm]	-60
RBW [kHz]	100
VBW [kHz]	300
SWT [ms]	20

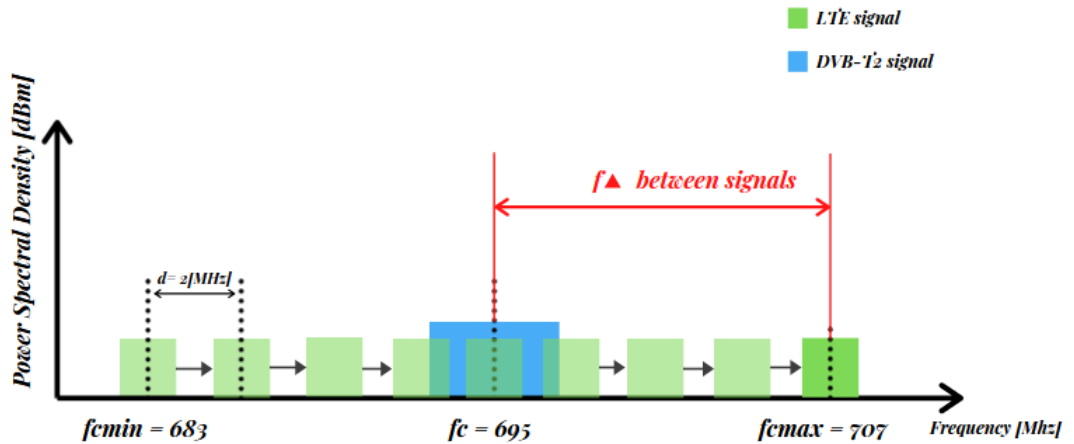
Fuente: elaboración propia

#### **4.3.1. Descripción de pruebas**

- **Prueba 1:** En esta prueba de medición se realizó la transmisión de la señal del estándar DVB-T2 (Sistema Víctima) desde el USRP E310 a una frecuencia de portadora de 695[MHz] y ancho de banda de 6[MHz]. Se utilizó el generador vectorial PXI M9383A para la transmisión de la señal del estándar LTE (Sistema interferente) y se realizaron las mediciones variando el ancho de banda de la señal LTE.

La señal LTE transmitida con anchos de banda de: 3, 5 y 10 [MHz] se desplaza en espectro al variar su frecuencia central desde 683 hasta 707 [MHz] con un paso de 2[MHz], véase Figura 23. Este desplazamiento de frecuencia permite tomar mediciones para los 3 tipos de interferencias en banda: co-canal, canal adyacente y canal no adyacente mencionados en el capítulo 3.

Figura 23. Prueba 1 diseñada



- **Prueba 2:** En este evento de medición se realizó la recepción de la señal DVB-T2 proveniente de un operador comercial (Caracol) utilizando el tv box AS-777 conectado a un TV Sony, sintonizando la frecuencia de portadora de 473[MHz]. Esta prueba está enfocada en el análisis del impacto generado por la señal interferente LTE sobre la capacidad del receptor víctima para demodular la información, por esto, las pruebas consisten en variar la potencia de transmisión de LTE y la separación de frecuencias centrales entre ambos sistemas, e ir registrando en qué punto se generan fallas en la calidad de la imagen o del sonido en pantalla. Se utilizó el Analizador de espectro portátil para verificar el comportamiento en espectro de ambos sistemas.

**Figura 24.** Definición de frecuencias prueba 1

Prueba	DVB-T2			Banda de guarda [MHz]	LTE		
	Mínimo	Central	Máximo		Mínimo	Central	Máximo
1	692	695	698	7,5	681,5	683	684,5
2	692	695	698	5,5	683,5	685	686,5
3	692	695	698	3,5	685,5	687	688,5
4	692	695	698	1,5	687,5	689	690,5
5	692	695	698	-0,5	689,5	691	692,5
6	692	695	698	-2,5	691,5	693	694,5
7	692	695	698	-3	693,5	695	696,5
8	692	695	698	-2,5	695,5	697	698,5
9	692	695	698	-0,5	697,5	699	700,5
10	692	695	698	1,5	699,5	701	702,5
11	692	695	698	3,5	701,5	703	704,5
12	692	695	698	5,5	703,5	705	706,5
13	692	695	698	7,5	705,5	707	708,5

**Figura 25.** Definición de frecuencias prueba 2

Prueba	DVB-T2			Potencia TDT [dBm]	LTE			Rango de potencia LTE [dBm]
	Mínimo	Central	Máximo		Mínimo	Central	Máximo	
1	470	473	476	-67	467	468,5	470	-20 a 10
2	470	473	476	-67	468	469,5	471	-20 a -1
3	470	473	476	-67	469	470,5	472	-30 a -15
4	470	473	476	-67	470	471,5	473	-30 a -24
5	470	473	476	-67	471	472,5	474	-35 a -24
6	470	473	476	-67	471,5	473	474,5	-35 a -27
7	470	473	476	-67	473	474,5	476	-35 a -26
8	470	473	476	-67	474	475,5	477	-30 a -20

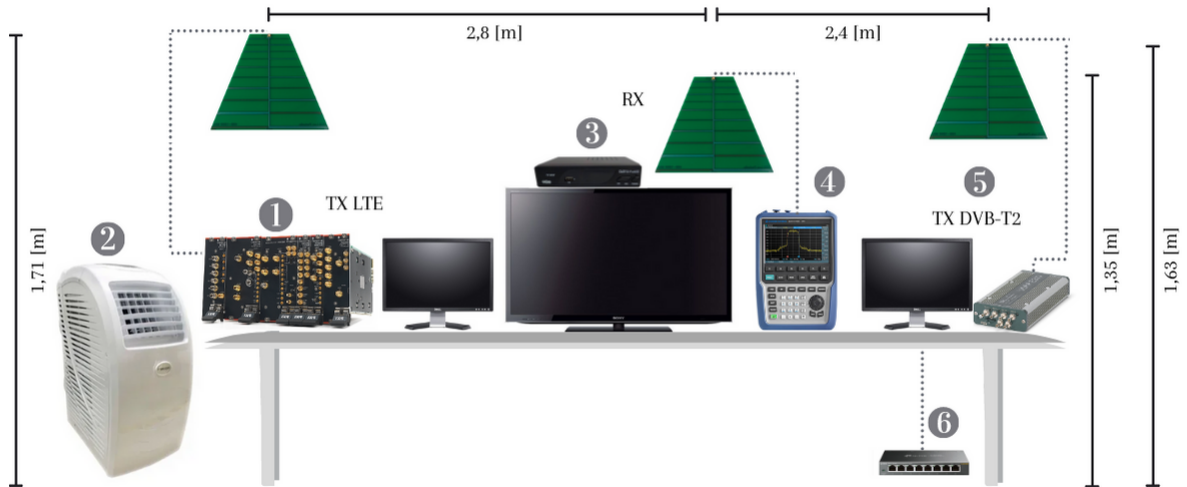
## **5. PRUEBAS Y RESULTADOS**

En este capítulo se detalla la ejecución de las pruebas y se condensan los resultados obtenidos en gráficas utilizando los criterios de interferencia mencionados en el capítulo 2.

### **5.1. AMBIENTE EXPERIMENTAL**

En este proyecto se define al ambiente experimental como el conjunto de equipos de laboratorio para realizar la generación, transmisión y recepción de los servicios de radio, En la Figura 26 se detalla la disposición de los equipos de laboratorio necesarios para realizar las pruebas. El sistema transmisor de LTE precisa de un equipo de enfriamiento ya que el Generador Vectorial tiene estrictos controles de temperatura que deben ser monitoreados constantemente.

**Figura 26.** 1) Sistema transmisor LTE, 2) Aire acondicionado portátil, 3) Sistema receptor DVB-T2, 4) Analizador de espectro portátil, 5) Sistema transmisor DVB-T2, 6) Switch de escritorio.

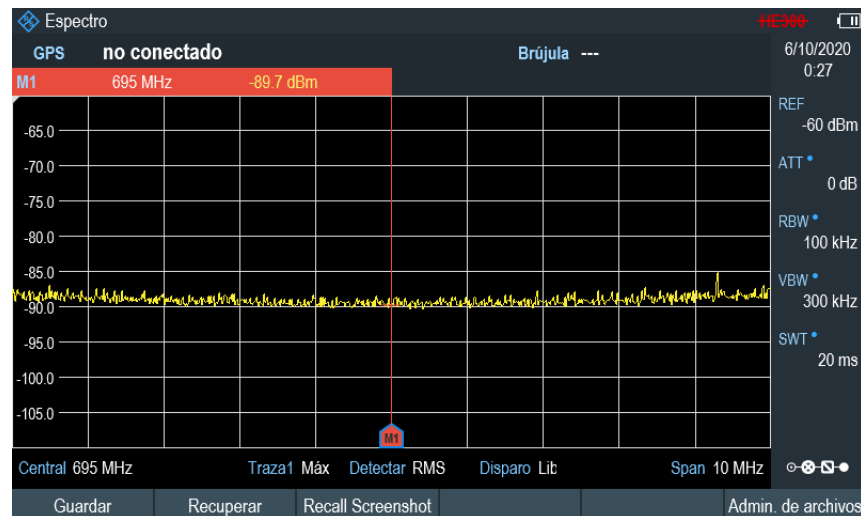


### Piso de ruido

Dentro de un sistema de medición se define al piso de ruido como la suma de todas las fuentes de ruido y las señales no deseadas. En radiocomunicaciones las fuentes de ruido incluyen el ruido térmico, el ruido cósmico, así como cualquier otro tipo de ruido no deseado provocado por el hombre, denominados como ruido incidental.

Los niveles más altos de ruido percibidos en nuestro sistema de medición rondan los -90 [dBm] y son ocasionados en gran parte por el calentamiento del equipo de recepción (analizador) lo que se traduce en ruido térmico.

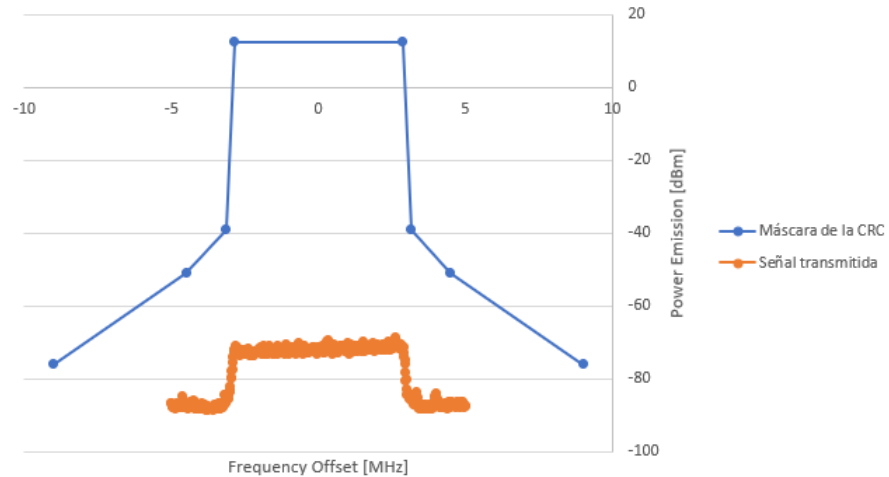
**Figura 27.** Piso o Nivel de ruido



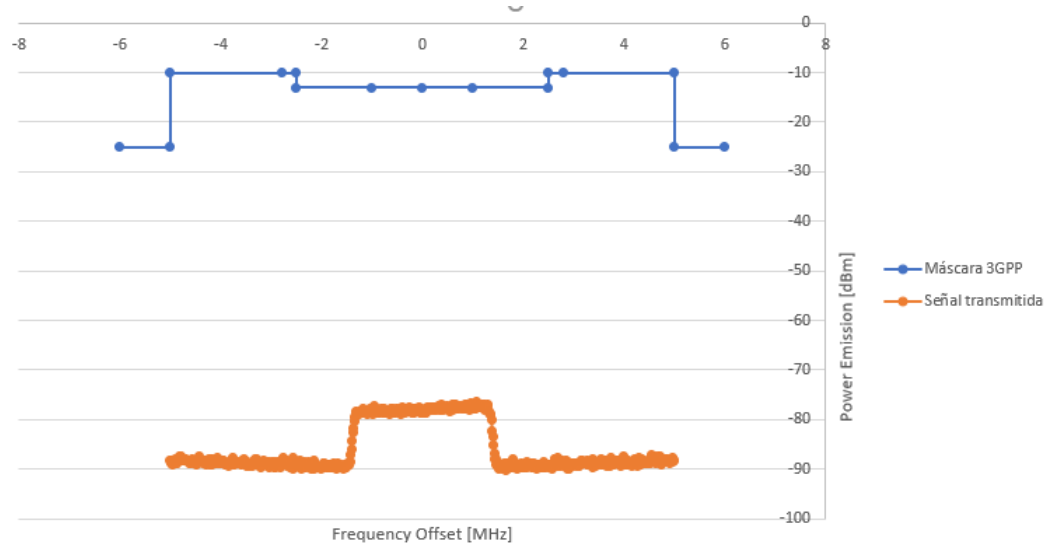
### **Comprobación de máscaras de emisión espectral**

Un primer paso que se realizó fue comparar la señal transmitida de los estándares con sus respectivas máscaras de emisión espectral con el fin de verificar si se encontraban dentro de sus límites. Se obtuvieron los datos de la señal LTE y la señal DVB-T2 directamente desde el analizador de espectro portátil. Los archivos de datos tienen un formato .set el cual es reconocido por el software Instrument View desarrollado por R&S. En la Figura 28 y 29 se observa que tanto la señal de DVB-T2 como la señal de LTE cumplen con su respectivo estándar de máscara de emisión espectral especificado en el capítulo 3.

**Figura 28.** Comprobación máscara de DVB-T2



**Figura 29.** Comprobación máscara de LTE



## 5.2. PRUEBA 1: VARIACIÓN EN FRECUENCIA Y ANCHO DE BANDA

Para esta prueba se usaron los parámetros de las señales del estándar LTE y DVB-T2 como se describen en el capítulo 4 sección 4.2. Se tomaron las mediciones de potencia de recepción de ambas señales y la banda de guarda entre ellas. Con la

señal de DVB-T2 fija en la frecuencia central  $F_c = 695$  [MHz] se realizó el procedimiento que se observa en la Figura 23 para el cual se presentan 3 casos teniendo en cuenta el ancho de banda de la señal interferente LTE.

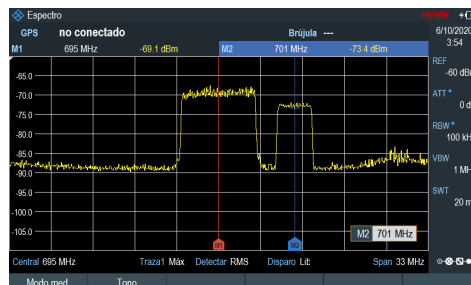
- **Caso 1: LTE 3 [MHz]** Algunas de las señales obtenidas en el analizador de espectro se detallan en la Figura 30

**Figura 30.** Señal interferente de LTE con  $BW = 3$ [MHz] en diferentes frecuencias centrales (a)  $F_c = 683$  [MHz] , (b)  $F_c = 693$ [MHz] (c)  $F_c = 701$  [MHz]



(a)

(b)



(c)

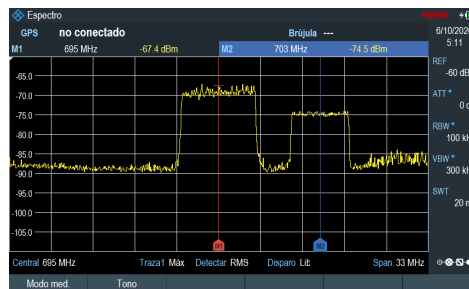
- **Caso 2: LTE 5 [MHz]** Algunas de las señales obtenidas en el analizador de espectro se detallan en la Figura 31

**Figura 31.** Señal interferente de LTE con BW = 5[MHz] en diferentes frecuencias centrales (a)  $F_c = 683$  [MHz] , (b)  $F_c = 691$  [MHz] (c)  $F_c = 703$  [MHz]



(a)

(b)



(c)

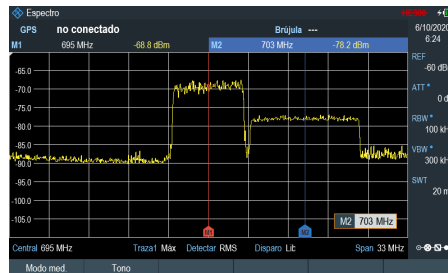
- **Caso 3: LTE 10 [MHz]** Algunas de las señales obtenidas en el analizador de espectro se detallan en la Figura 32

**Figura 32.** Señal interferente de LTE con BW = 10[MHz] en diferentes frecuencias centrales (a)  $F_c = 689$  [MHz] , (b)  $F_c = 695$ [MHz] (c)  $F_c = 703$  [MHz]



(a)

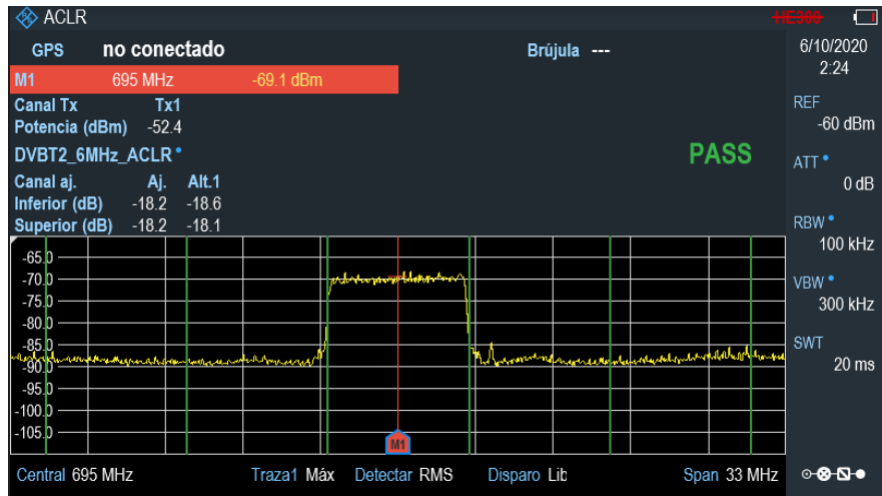
(b)



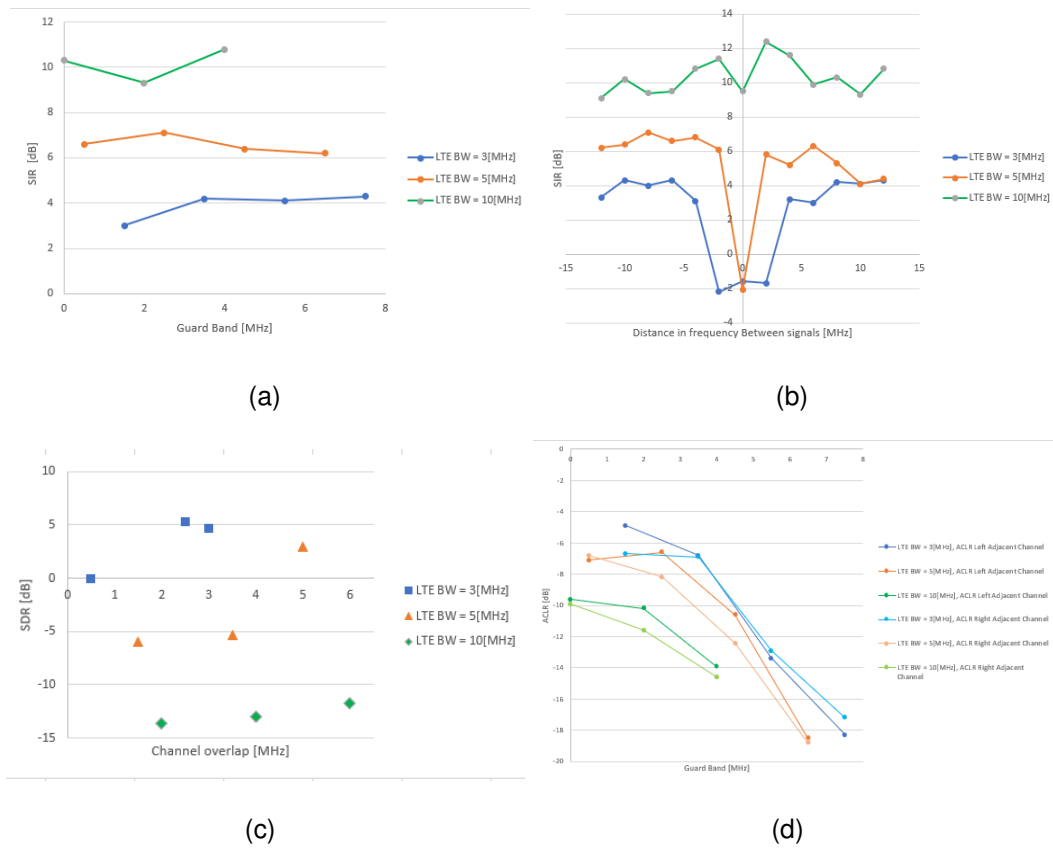
(c)

Para analizar el impacto de la interferencia con la prueba descrita anteriormente, los criterios SIR y SDR\* fueron calculados. El parámetro ACLR fue monitoreado ya que este es entregado por el equipo receptor como se muestra en la Figura 33.

**Figura 33.** Medición de ACLR en el analizador de espectro



**Figura 34.** (a) SIR vs Guard (b) SIR vs Frequency offset (c) SDR\* vs Channel (d) ACLR vs Guard band



Los resultados obtenidos al calcular el SIR muestran un comportamiento relacionado con el ancho de banda de la señal interferente (LTE). En la Figuras 34 (a) y (b) se observa la influencia de la señal interferente LTE sobre la señal de DVB-T2 para varias bandas de guarda y diferencia entre frecuencias centrales.

En la gráfica (a) se aprecia como los valores SIR dependen directamente del ancho de banda de la señal interferente, para anchos de banda mayores se reduce la banda de guarda entre ambos servicios provocando que el valor de SIR requerido aumente. Se observa también que los valores de SIR en cada caso tienden a estabilizarse en un mismo rango cuando la banda de guarda es mayor a 2.5 [MHz], es decir, que la variación de la banda de guarda después de superar este umbral no afecta considerablemente el grado de interferencia en canal adyacente. Los valores de SIR se encuentran dentro del rango 3.3 - 4.3[dB] para  $BW = 3$ [MHz], 6.2 - 7.1[dB] para  $BW = 5$ [MHz] y 10.3 - 10.8[dB] para  $BW = 10$ [MHz].

En la Figura (b), SIR vs distancia entre frecuencias centrales, se observa que al tener el valor de SIR crece a una tasa de 0,875 unidades por cada mega a partir del evento donde se presenta interferencia co-canal, teniendo como mejor caso LTE 10[MHz], en el cual el SIR no decae drásticamente; esto indica que el efecto de la interferencia en el canal adyacente es menor en comparación a los otros dos casos. La Figura 34 (c) es la representación gráfica del comportamiento de la convivencia entre DVB-T2 y LTE dependiendo del parámetro SDR\* en niveles de superposición de canal (Channel Overlap). Cuando el SDR\* es negativo se indica que la densidad espectral de la señal DVB-T2 es mayor que la de la señal interferente de LTE, esto influye directamente en la posible afectación de un sistema a otro.

El parámetro de ACLR permite cuantificar la afectación de la señal víctima ante emisiones de la señal interferente en un canal adyacente. En la Figura 34 (d) se tienen los valores de ACLR del canal adyacente a la izquierda y a la derecha del canal de recepción de la señal DVB-T2 de 6 [Mhz], centrada en 695[MHz]. Al aumentar la

banda de guarda se puede observar que el valor de ACLR disminuye debido a que la señal interferente se aleja de los canales en cuestión reduciendo el nivel de interferencia. El anterior comportamiento se repite para los 3 anchos de banda de LTE. En el caso donde se tiene la mínima banda de guarda, el sistema de LTE 10[MHz] presenta la menor afectación en comparación a los valores más altos de ACLR de los otros casos.

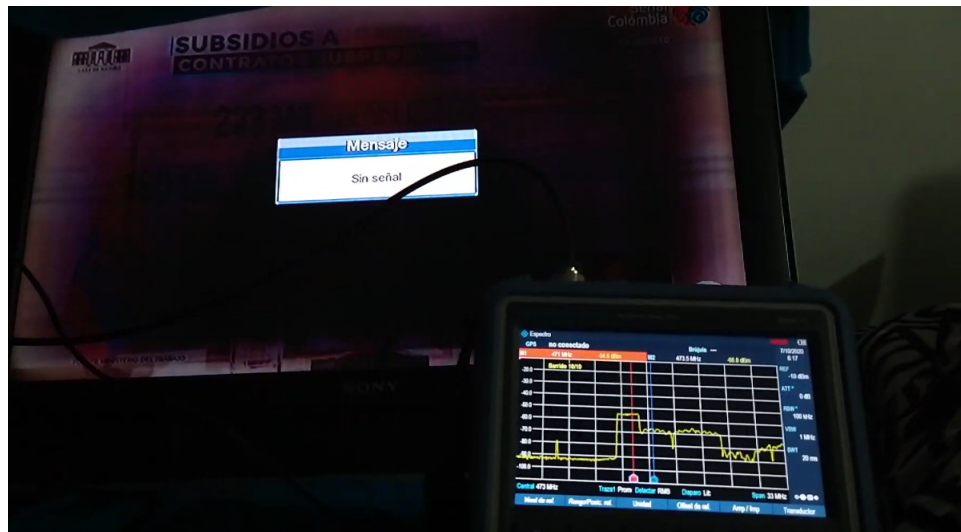
En las 4 gráficas presentadas de la Figura 34 la señal que presenta el mejor desempeño en relación con la interferencia causada sobre el sistema víctima es LTE 10 [MHz], esto se debe a que la potencia de la señal se distribuye a lo largo de su ancho de banda reduciendo su potencia media en recepción. La disminución de potencia influye directamente en los parámetros SIR, SDR\* y ACLR.

### 5.3. PRUEBA 2: VARIACIÓN EN POTENCIA Y EN FRECUENCIA

Para esta prueba se usaron los parámetros de la señal del estándar LTE descritos en el capítulo 4 sección 4.2 y se utilizó la señal del estándar DVB-T2 del canal privado Caracol, el cual se transmite a una  $f_c = 473$  [MHz]. Para tomar los datos se realizó el procedimiento descrito en la sección 4.3.1.

- **Fallo grave** Véase en la Figura 35. Este fallo se considera grave ya que el receptor no es capaz de demodular la información y esto se ve reflejado en que no se puede observar ni imagen ni sonido, y el receptor no recupera la señal útil.

**Figura 35.** Fallo en recepción de DVB-T2 provocado por LTE



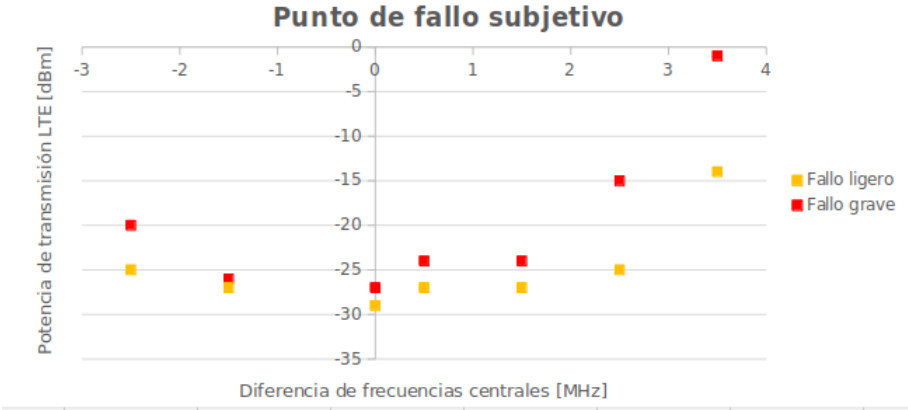
- **Fallo ligero** Se presenta cuando hay pérdida parcial de sonido en el receptor víctima. Generalmente este error es intermitente, es decir que, el receptor logra sobreponerse a la afectación en ciertos momentos y luego recae presentando fallos.

En la Figura 36 se observa el comportamiento del receptor víctima ante variaciones de potencia del transmisor LTE para diferentes distancias entre frecuencias centrales. Para provocar un fallo grave cuando la diferencia de frecuencias centrales es de 2.5 [MHz] se precisa de -15[dBm] en el transmisor LTE, contrario a esto cuando el offset es de -2.5[MHz] se necesita de -20 [dBm]. A medida que la señal LTE se acerca al canal adyacente derecho la potencia necesaria en el transmisor para provocar un fallo en el receptor disminuye debido a que en este canal adyacente se encuentra otra señal DVB-T2 del canal privado RCN, por lo que la interferencia de este canal se suma a la causada por nuestra señal LTE.

Con esta prueba se obtienen umbrales de protección para la señal DVB-T2 en función de la potencia de transmisión de la señal LTE, para distintas separaciones en frecuencia de ambos sistemas, esto se logra al tomar la potencia inmediatamen-

te anterior a la que ocasionó un fallo ligero en el receptor(TV) y que no superó la prueba de los 20s propuesta en este método.

**Figura 36.** Medida de interferencia usando SFP



## 6. CONCLUSIONES

- Con la implementación del ambiente experimental para el análisis de interferencias se pudo valorar que las capacidades del Generador Vectorial PXI M9383A son suficientes para transmitir señales correspondientes al servicio móvil terrestre adoptando el estándar LTE.
- Con este proyecto se adquirió valiosa experiencia relacionada con la generación y transmisión de señales del estándar DVB-T2 utilizando un USRP E310, esto fue logrado mediante el uso de un flujograma de GNURadio capaz de integrar tecnología SDR para transmitir una señal con todas las características relevantes del estándar.
- El ambiente experimental implementado puede ser usado como base para estudios futuros en los grupos de investigación de la E3T que estén relacionados con estudios de convivencia entre servicios de radio y que requieran modificaciones de acuerdo a otras necesidades.
- El análisis de interferencias en canal adyacente se logró gracias al plan de medición descrito en la propuesta de configuración del escenario y a las características de los equipos. Además, las capacidades del ambiente experimental implementado fueron suficientes para realizar análisis de otros tipos de escenarios de interferencia como: de canal no adyacente y co-canal.
- Se pudo comprobar experimentalmente la relación entre el ancho de banda de la señal interferente con el nivel de afectación en el receptor del sistema víctima. Se encontró que a mayor ancho de banda el impacto de la interferencia en el servicio víctima es menor, debido a la distribución de potencia por ancho de banda y a las posibles emisiones espurias. Este resultado fue obtenido del

análisis de los criterios de interferencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP). *Specification Group Radio Access Network Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 16)*. 2020 (vid. págs. 18, 37).
- AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia*. [En línea]. Disponible en: [https://portalespectro.ane.gov.co/StyleLibrary/ane\\_master/cnabf-tecnico.aspx](https://portalespectro.ane.gov.co/StyleLibrary/ane_master/cnabf-tecnico.aspx). Consulted October 10th, 2020. Colombia (vid. págs. 12, 39).
- *Plan Técnico de Televisión Colombia* [En línea]. Disponible en: <http://www.ane.gov.co/gestion-tecnica/SitePages/pttv-archivos.aspx?P=180>. Consulted October 10th, 2020. Colombia, 2014 (vid. pág. 13).
- COMISIÓN DE REGULACIÓN DE COMUNICACIONES (CRC). *Especificaciones técnicas aplicables a la red de servicio de Televisión Digital Terrestre - TDT*. Colombia, 2014 (vid. pág. 36).
- *Seguimiento a la implementación de las especificaciones técnicas de la TDT en Colombia*. Colombia, 2013 (vid. pág. 36).
- ECONOMOS, Ron. *A low latency DVB-T2 transmitter for GNU Radio* [En línea]. Disponible en: <https://github.com/drmpeg/gr-dvbt2ll>. Consulted October 3th, 2020 (vid. pág. 50).

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (ETSI). *Digital Terrestrial TV Transmitters; Harmonised Standard for access to radio spectrum*. 2020 (vid. pág. 36).

— *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. 2010 (vid. pág. 52).

FUENTES. Manuel, et al. «Coexistence of digital terrestrial television and next generation cellular networks in the 700 MHz band». En: *IEEE Wireless Communications* 21 (dic. de 2014), págs. 63-69. DOI: 10.1109/MWC.2014.7000973 (vid. pág. 33).

GALPERIN, Hernan. «Comunicación e integración en la era digital: un balance de la transición hacia la televisión digital en Brasil y Argentina». En: *Comunicación y Sociedad* (2004) (vid. pág. 22).

GÓMEZ BARQUERO David, et al. «Funcionalidades avanzadas de DVB-T2 para el diseño de redes de televisión digital terrestre en latinoamérica». En: *Hologramática* (2005), págs. 68-70 (vid. pág. 26).

LADEBUSCH, Uwe y LISS Claudia. «Terrestrial DVB (DVB-T): A broadcast technology for stationary portable and mobile use». En: *Proceedings of the IEEE* 94.1 (2006), págs. 183-193 (vid. pág. 13).

LESMESS AMÉZQUITA, Andrés Felipe. *Identificación de la conveniencia para Colombia de la adopción del estándar DVB-T2 y su estado de despliegue en el territorio colombiano*. Trabajo de Grado (Ingeniero de Telecomunicaciones). Bogotá D.C - Colombia: Universidad Santo Tomás, 2018 (vid. págs. 25, 27).

MALDONADO. Carlos, et al. *Estudio de la compatibilidad electromagnética entre los servicios de TDT y LTE en la sub-banda UHF de 614 A 698 MHz en Colombia*. Inf. téc. Jul. de 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.14068.24966 (vid. págs. 33, 38).

MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACION Y COMUNICACIONES (MINTIC). *Banda de 450[MHz]: Acciones Nacionales para el Desarrollo de la Banda de 450 MHz*. Colombia, 2009 (vid. pág. 40).

MORENO ACOSTA, Juan Pablo. *Metodología para el análisis de interferencia entre servicios de radio en canales adyacentes*. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2015 (vid. págs. 29-31).

OROBIO PÉREZ, Victor Enrique y HURTADO CANO. Héctor Julio. *Análisis de la planificación de paquetes en el enlace descendente sobre el desempeño de una red LTE*. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones). Popayán - Colombia: Universidad del Cauca, 2015 (vid. pág. 19).

POLAK. Ladislav, et al. «Coexistence of DVB-T2 and LTE in the 800 MHz Band: Analysis of DVB-T2 System Configurations». En: *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. 2018, págs. 1-5 (vid. pág. 32).

— «Exploring and measuring the co-existence between LTE and DVB-T2-Lite services». En: *2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2013, págs. 316-320 (vid. pág. 33).

POLAK, Ladislav, et al. «LTE and DVB-T2 networks in the first digital dividend band in Europe: A coexistence study». En: *2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. 2018, págs. 1-4 (vid. pág. 32).

PÁEZ CASAS, Deisy Carolina. «Metodología para la Identificación de Interferencia de Espectro Radioeléctrico». 2020 (vid. pág. 34).

SANTOS DUARTE, Tania Lorena. *Caracterización de un sistema de bloqueo de emisiones clandestinas basado en tecnología SDR*. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga - Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2017 (vid. pág. 45).

UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). *Characteristics of a reference receiving system for frequency planning of digital terrestrial television systems*. 2019 (vid. pág. 45).

— *Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, de los servicios de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas*. 2015 (vid. pág. 35).

— *Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers*. 2018 (vid. págs. 35, 49).

— *Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands*. 2015 (vid. pág. 47).

— *Reglamento de Radiocomunicaciones Edición 2016*. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR/es>. Consulted October 10th, 2020 (vid. págs. 11, 17, 29).

WANG, Willy. «Evaluating the use of PXI modules in tests of a radio base station». Master's Thesis School of Information and Communication Technology. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2014 (vid. pág. 13).