

Análisis Técnico para la Implementación de un Sistema de Transmisión de Datos
Mediante el Despliegue de la Tecnología TVWS en Zonas Rurales

Jherson Ferley Cáceres Chanagá

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

Director

Efrén Darío Acevedo Cárdenas
Magíster en Ingeniería Electrónica

Codirector

Julián Gustavo Rodríguez Ferreira
Doctor en Física

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mis padres quienes me dieron su apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera y gracias a su ejemplo es quien soy el día de hoy.

A Yessica Piñeres, mi novia, sin ella este logro no hubiera sido posible, gracias por apoyarme, ayudarme, motivarme y creer en mí.

A mi director de trabajo de grado el profesor Efrén Acevedo, quien dedicó su tiempo y experiencia para orientarme y así llevar a cabo este proyecto.

Y a todas las personas que conocí a lo largo de estos años en la Universidad, compañeros, amigos, profesores, quienes me aportaron su granito de arena para mi crecimiento personal e intelectual y a los cuales recordaré por siempre.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Alcances	17
3. Marco Teórico, Regulatorio y Antecedentes.....	19
3.1. TV White Space	19
3.2. Radio Cognitiva.....	22
3.3. Ventajas al Utilizar TVWS.....	24
3.4. Estándares Aprobados por la IEEE para TVWS	27
3.4.1. Estándar IEEE 802.22	29
3.4.2. Estándar IEEE 802.11af	33
3.4.3. Diferencias entre el estándar IEEE 802.22 e IEEE 802.11af	36
3.5. Antecedentes: Uso de TVWS en el Mundo.....	38
3.5.1 Reino Unido.....	39
3.5.2. Omán.....	40
3.5.3 Vietnam.....	42
3.5.4 Botswana.....	43
3.5.5 Estados Unidos.....	45
3.5.6 El Salvador.....	47
3.5.7 Colombia.....	49

3.6. Control de Interferencias	51
3.6.1. Dispositivos Fijos	52
3.6.2. Dispositivos portátiles	52
3.7. Regulación para TVWS en Colombia	53
3.7.1. Normativas Vigentes	54
3.7.2. Condiciones Técnicas y Operativas para Dispositivos de Espacios en Blanco (WSD)	54
3.7.3. Protocolo de Comunicación con la WSDB (White Space Data Base)	59
3.8. Bases del Plan Nacional de Desarrollo (2018-2022)	62
3.9. Plan Estratégico de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (2016-2019)	64
4. Modelos de Radiopropagación	66
4.1. Free Space Path Loss / Plane Earth	67
4.2. Okumura-Hata Model	68
4.3. Stanford University Interim (SUI) Model	68
4.4. Longley-Rice (ITM) Model	71
4.5. Comparación de los Modelos	72
4.6. Diseño de Radioenlaces	75
4.6.1. Presupuesto de Enlace de Radio	76
4.6.2. Zonas de Fresnel	79
5. Infraestructura Tecnológica	81
5.1. Equipos TVWS	89
5.2. Investigación de Proveedores	99
5.3. Matriz de Evaluación de Infraestructura Tecnológica	103
5.4. Diseño y Simulación de Antena	109
5.4.1. Especificaciones	110

5.4.2. Diseño.....	110
5.4.3. Simulación en CST.....	116
6. Planificación para la Implementación de TVWS	123
6.1. Selección del Área de Implementación	123
6.2. Selección del Equipo de TVWS	131
6.3. Evaluación e Instalación del Equipo	132
7. Conclusiones.....	135
8. Trabajo Futuro y Recomendaciones	138
Bibliografía	140
Anexos	151

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Caso de uso de TVWS.....	22
Figura 2. Problemática a solucionar.	25
Figura 3. Infraestructura inalámbrica usando estándares para TVWS.	29
Figura 4. Red TVWS con componentes de la arquitectura 802.22.	31
Figura 5. Red TVWS con todas las entidades de la arquitectura 802.11af.....	33
Figura 6. Red de saltos múltiples con sistemas IEEE 802.22 e IEEE 802.11af.	38
Figura 7. Arquitectura del sistema prototipo IEEE 802.11af desarrollado.....	40
Figura 8. Arquitectura de la red.	41
Figura 9. Sistema de banda ancha inalámbrico para espacios en blanco de televisión.	42
Figura 10. Operación simple de TVWS.	47
Figura 11. Instalación de antena transmisora y receptora.	48
Figura 12. (a) Ubicación del enlace TVWS – Aguadas, Caldas. (b) Videollamada del presidente con profesora de la Escuela Rioarriba.....	50
Figura 13. (a) Fotos de la instalación de los radios y antenas del enlace TVWS Dibulla. (b) Ubicación del enlace TVWS - Dibulla, La Guajira	50
Figura 14. (a) Ubicación del enlace TVWS-Pamplonita, Norte de Santander. (b) Estudiantes con tabletas en la escuela El páramo.	51
Figura 15. Atenuaciones de las emisiones fuera de banda.	57
Figura 16. Normativa colombiana para el uso de TVWS.	59
Figura 17. Modelos de radiopropagación disponibles en Xirio.	73
Figura 18. Simulación de cobertura en Xirio.	73
Figura 19. Comparación de modelos de radiopropagación.	74
Figura 20. Componentes del presupuesto de potencia.....	76
Figura 21. Curvas de atenuación por lluvias.	78
Figura 22. Atenuación específica en zona boscosa.	78
Figura 23. Zona de Fresnel.....	80

Figura 24. Infraestructura de una red TVWS.....	81
Figura 25. Antenas de Panel y Logarítmica.....	83
Figura 26. Router inalámbrico.....	84
Figura 27. Conmutador de red o Switch.....	85
Figura 28. Cable Coaxial Rg6 y Cable De Red UTP.	85
Figura 29. Apantallamiento presente en cables Ethernet.	86
Figura 30. Conexión fuente de alimentación PoE.	86
Figura 31. Torre de telecomunicación, poste de alumbrado público y mástil.....	87
Figura 32. Esquema general del sistema de transmisión de datos para el despliegue de la tecnología TVWS.	88
Figura 33. Radio de 6Harmonics.	90
Figura 34. Antenas de 6Harmonics.	92
Figura 35. Radio de Adaptrum.	92
Figura 36. Valores de sensibilidad para diferentes tasas de transmisión.....	94
Figura 37. Antenas de Adaptrum.	95
Figura 38. Radio de Carlson Wireless.	95
Figura 39. Radio de Redline Communications.....	97
Figura 40. Antenas de Redline.....	99
Figura 41. Personal contactado.....	100
Figura 42. Curvas de contorno calculadas para una ganancia constante contra τ y σ para una agrupación de dipolos.....	111
Figura 43. Antena logarítmica periódica con agrupación de dipolos.	112
Figura 44. Antena simulada en CST.....	117
Figura 45. Coeficiente de reflexión.	118
Figura 46. Gráfico de VSWR.	119
Figura 47. Impedancia de entrada.	119
Figura 48. Eficiencia de radiación.....	120
Figura 49. Patrón de radiación a 520 MHz.....	121
Figura 50. Patrón de radiación a 585 MHz.....	122
Figura 51. Patrón de radiación a 620 MHz.....	122

Figura 52. Distancia entre los puntos.....	125
Figura 53. Aplicación de la ANE para buscar disponibilidad de canales TVWS.....	126
Figura 54. Cobertura con Radio Mobile.....	127
Figura 55. Línea de vista entre los puntos del Radio Enlace.....	128
Figura 56. Herramienta airLink.	129
Figura 57. Conversación con personal de 6Harmonics.	151
Figura 58. Conversación con personal de Adaptrum.	151
Figura 59. Conversación con personal de Winncom Technologies	152
Figura 60. Webinar dado por Redline Communications.....	153
Figura 61. Reunión virtual con personal de Redline y Winncom Technologies.	153

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones de un sistema basado en IEEE 802.22.....	32
Tabla 2. Especificaciones de un sistema basado en IEEE 802.11af.	36
Tabla 3. Diferencias entre el estándar IEEE 802.22 e IEEE 802.11af.	37
Tabla 4. Pruebas de velocidad de Internet promedio (download y upload) para los sitios conectados con TVWS.	45
Tabla 5. Límite para la densidad espectral de potencia y emisiones en canales adyacentes.	53
Tabla 6. Lista de canales utilizables para TVWS en Colombia.	55
Tabla 7. Parámetros del modelo SUI.	71
Tabla 8. Productos autorizados por la FCC.	89
Tabla 9. Características del equipo de 6Harmonics.	90
Tabla 10. Características de las antenas 6Harmonics.	91
Tabla 11. Características del equipo de Adaptrum.	93
Tabla 12. Características de las antenas Adaptrum.	94
Tabla 13. Características del equipo de Carlson.	96
Tabla 14. Características del equipo de Redline.	97
Tabla 15. Características de las antenas Redline.	98
Tabla 16. Presupuesto para la implementación del sistema TVWS.	101
Tabla 17. Matriz de evaluación de infraestructura tecnológica.	104
Tabla 18. Longitud de los Dipolos.	114
Tabla 19. Distancia entre dipolos.	115
Tabla 20. Análisis de Precios Unitarios	154

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Contacto con Proveedores de dispositivos para TVWS.....	151
Anexo B. Análisis de Precios Unitarios (APU).....	154
Anexo C. Resumen Ejecutivo.....	159

Resumen

Título: Análisis técnico para la implementación de un sistema de transmisión de datos mediante el despliegue de la tecnología TVWS en zonas rurales.*

Autor: Jherson Ferley Cáceres Chanagá**

Palabras Clave: TVWS, Radio propagación, Radiofrecuencia, Transmisión de datos, Banda UHF, Frecuencias libres, Internet.

Descripción:

En este trabajo de investigación se presenta el estudio técnico realizado para la implementación de un sistema de transmisión de datos con el fin de minimizar la brecha digital existente entre el sector rural y urbano en Colombia, dejando así un documento guía para proporcionar un servicio de internet a estas zonas remotas, donde por diversas circunstancias no cuentan con acceso a este servicio.

De manera transversal y a medida que avanza el desarrollo del proyecto, se lleva a cabo la debida documentación alusiva a los diferentes aspectos referidos a TVWS, donde se condensan las diferentes especificaciones que conciernen a dicha tecnología; además se evidencian múltiples casos de su uso tanto a nivel nacional como internacionalmente. Así mismo, se expone la regulación presentada por la ANE para TVWS con el fin de analizar, caracterizar el sistema y mostrar la normativa que se debe cumplir para un óptimo despliegue de la tecnología. Por otra parte, se presenta una propuesta de infraestructura tecnológica para la implementación de TVWS, junto al diseño de las antenas necesarias para el sistema de transmisión de datos. Como resultado se desarrolla la fase de planificación de un proyecto que permite la implementación de un piloto de transmisión de datos para el despliegue de la tecnología TV White Space en zonas rurales de Colombia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Efrén Darío Acevedo Cárdenas. M. Sc. en Ingeniería Electrónica. Codirector: Julián Gustavo Rodríguez Ferreira. Doctor en Física.

Abstract

Title: Technical analysis for the implementation of a data transmission system through the deployment of TVWS technology in rural areas.*

Author: Jherson Ferley Cáceres Chanagá**

Key Words: TVWS, Radio propagation, Radio frequency, Data transmission, UHF band, Free frequencies, Internet.

Description:

This research work presents the technical study carried out for the implementation of a data transmission system to minimize the existing digital gap between the rural and urban sector in Colombia, consequently leaving a guide document to provide an-internet service to these remote areas, where due to various circumstances they do not have access to this service.

In a transversal way and as the development of the project progresses, the due documentation is carried out alluding to the different aspects related to TVWS, where the different specifications that concern said technology are condensed; In addition, there are multiple cases of its use both nationally and internationally. Likewise, the regulation presented by the ANE for TVWS is exposed in order to analyze, characterize the system and show the regulations that must be complied with for an optimal deployment of the technology. On the other hand, a technological infrastructure proposal for the implementation of TVWS is presented, together with the design of the antennas necessary for the data transmission system. As a result, the planning phase of a project is developed that allows the implementation of a data transmission pilot for the deployment of TV White Space technology in rural areas of Colombia.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Efrén Darío Acevedo Cárdenas. M. Sc. en Ingeniería Electrónica. Codirector: Julián Gustavo Rodríguez Ferreira. Doctor en Física.

Introducción

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas del inglés), más de la mitad de la población mundial está utilizando Internet por primera vez, y muchas organizaciones en todo el mundo declaran que el acceso a Internet es un derecho humano fundamental. Al mismo tiempo, una parte importante de la población de las zonas rurales de los países en desarrollo no pueden disfrutar de este privilegio (Lysko, Burger, & Hagopian, 2019).

En el contexto colombiano, un estudio desarrollado por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), encontró que solo el 9.4% de los hogares rurales tenían acceso a Internet hacia 2012, esto dado por el hecho que para ampliar las redes de servicios de telecomunicaciones en el sector rural se requiere una gran inversión pensando en el uso de redes tradicionales como la fibra óptica, el móvil y los satélites. Debido a esta problemática se deben buscar soluciones que ayuden a cerrar esta brecha digital mejorando el servicio de Internet en estas zonas; una de ellas es la tecnología TV White Space (TVWS), la cual plantea la oportunidad de proveer servicio de banda ancha de bajo costo, con amplia cobertura y una velocidad aceptable en la transmisión de datos (Krom, 2016).

El desarrollo del proyecto presenta un análisis técnico para la implementación de la tecnología TVWS en las zonas rurales de Colombia, con la finalidad de mejorar e incrementar el acceso al servicio de internet para estas áreas rurales mediante el uso de los espacios en blanco de la banda UHF asignada para televisión, de modo que se aproveche el ancho de banda de los canales de radiodifusión de TV que no están siendo utilizados.

De esa manera, dicho análisis parte de la planificación técnica necesaria que permita elaborar una propuesta para la implementación de la tecnología mediante un sistema de transmisión de datos por medio del uso de las bandas libres de televisión en zonas rurales. Este documento está dividido en siete capítulos, el primero contiene los objetivos que motivaron la investigación, en el segundo capítulo se aborda los alcances del proyecto; los cuales describen el desglose de los compromisos investigativos.

En el tercer capítulo se muestran algunos antecedentes referidos a la tecnología TVWS donde se observan los resultados de investigaciones técnico-científicas y pilotos implementados en nuestro país y en diferentes partes del mundo. Adicionalmente, trata el marco teórico analizando y describiendo las temáticas que abordan la tecnología, para finalizar con el marco regulatorio presentado por la ANE para la tecnología TVWS. Por otra parte, el cuarto capítulo expone los modelos de radiopropagación existentes y el quinto contiene la infraestructura tecnológica utilizada en la red de transmisión de datos, además del diseño y simulación de una antena para uso en TVWS. Posteriormente, el sexto capítulo presenta la metodología para realizar la implementación de un piloto de transmisión de datos mediante el despliegue de la tecnología TV White Space en zonas rurales; al final, en el séptimo capítulo se encuentran las conclusiones y por último se plantea el trabajo futuro y recomendaciones.

En pocas palabras esta investigación se realizó en función de contribuir con el progreso de las zonas rurales de Colombia, permitiendo mejorar el acceso a internet o llevarlo a los sectores que aún no cuentan con este servicio, debido a que, por la complejidad geográfica del país, desplegar infraestructura para sistemas de telecomunicaciones en estas áreas, utilizando medios convencionales como la fibra, el cobre o tecnologías inalámbricas, se ha convertido en todo un

reto. Esta problemática dificulta que las ventajas de la era digital lleguen a todas las regiones, lo cual es primordial para generar e impulsar el crecimiento económico, disminuir la pobreza y contribuir a la mejora de las condiciones de vida de los colombianos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un estudio técnico científico para la implementación de un sistema de transmisión de datos para el despliegue de la tecnología TVWS en zonas rurales de Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar un modelo de radio propagación bajo las condiciones particulares del macizo colombiano en la banda de frecuencia comprendida entre los 470 y 698 MHz.
- Crear una matriz de evaluación de infraestructura tecnológica usada en la implementación de TVWS.
- Desarrollar la fase de planificación de un proyecto que permita la implementación de un piloto de transmisión de datos para el despliegue de la tecnología TV White Space en zonas rurales de Colombia.

2. Alcances

El espectro radioeléctrico es un recurso limitado el cual debe usarse de forma racional, eficaz y económica. No obstante, en la actualidad hay frecuencias que no están siendo usadas en todos los sitios de país. Específicamente, el espectro empleado para el servicio de radiodifusión de televisión (TV abierta analógica y Televisión Digital Terrestre – TDT), tiene una cantidad considerable de frecuencias que no están siendo utilizadas por los operadores de este servicio, ya que en el 99% de municipios del país sólo están siendo usadas cerca del 20% del total de frecuencias asignadas para los servicios de televisión (Iglesias R. , 2019).

Considerando lo anterior, nuestro proyecto se enfoca en el uso de dispositivos que aprovechen los espacios en blanco de televisión (TVWS); estos radios son reconfigurables y se pueden asignar los canales de acuerdo con la necesidad del área donde se desea operar, para brindar otros servicios de telecomunicaciones diferentes a la televisión sin afectar a los canales de televisión en operación. Es importante resaltar que las frecuencias empleadas por estos dispositivos tienen la misma forma de propagación de las señales de televisión (son de mayor cobertura que los radioenlaces tradicionales de internet); TVWS permite conexiones inalámbricas con una cobertura superior a 15 Km de radio y tasas de transmisión de hasta 10Mbps sin tener línea de vista entre los dos puntos.

Para lograr el alcance de los objetivos, se iniciará con la documentación de las temáticas referidas a TVWS, mediante la indagación y estudio acerca del funcionamiento, características y normas que debe cumplir el sistema, viabilidad y las necesidades existentes en el país; junto con

esto se realiza una investigación de los diferentes modelos de radiopropagación con el fin de analizar y modelar una zona geográfica de terreno irregular, para así poder predecir las pérdidas a través del camino y obtener un óptimo despliegue de la tecnología. Se creará una matriz de evaluación de infraestructura tecnológica usada en la implementación de TVWS, con el fin de dejar especificado todos los equipos y elementos que necesita el sistema, junto con sus características y precios en el mercado. Además, se realizará el diseño de las antenas necesarias para el sistema de transmisión de datos, teniendo en cuenta las condiciones necesarias para el aprovechamiento máximo de transmisión y recepción.

Se quisiera llevar a cabo la implementación del sistema, sin embargo, por el alto costo de los equipos el alcance del presente proyecto será la elaboración de un documento base con todos los conceptos, especificaciones y características que debe cumplir el sistema TVWS para futura implementación. Además, se elaborará un documento con el resumen ejecutivo del proyecto para la búsqueda de posibles patrocinadores, y así poder llevar a cabo su ejecución.

En resumen, como resultado se busca dejar especificada completamente la tecnología y desarrollar la fase de planificación de un proyecto que permita realizar la implementación de un piloto de transmisión de datos mediante el despliegue de la tecnología TV White Space en zonas rurales de Colombia que no cuenten con el servicio de internet, soportado en un estudio técnico sobre la zona a implementar, la regulación actual del país para TVWS, equipos requeridos y costos para su implementación, con el fin de dejar un servicio estable de conexión a internet.

3. Marco Teórico, Regulatorio y Antecedentes

En la actualidad, es un derecho que todas las áreas de la población se unan a la era digital, además por la alta demanda del espectro se busca reducir la carga de los sistemas inalámbricos tradicionales, haciendo necesaria la invención de tecnologías nuevas, como TVWS, para que entren al mercado utilizando el espectro de manera eficiente. La temática del presente trabajo de investigación encierra todo lo relacionado con el uso de Espacios Blancos de Televisión (TVWS) como un medio prometedor para el acceso de banda ancha rural. Por lo cual en este capítulo se presentan definiciones, características, ventajas y estándares de la tecnología, antecedentes de TVWS a nivel nacional e internacional, se muestra la regulación desarrollada para la tecnología en Colombia, junto a algunos planes de desarrollo expuestos por el gobierno local y nacional, y demás tópicos que encierran esta tecnología con el fin de entenderla y analizarla para aprovechar al máximo su uso.

3.1. TV White Space

En primer lugar, los espacios en blanco son frecuencias libres ubicadas entre los 470 y 698 MHz, la cual es la banda dedicada para transmisión de televisión, es decir, son frecuencias que no han sido asignadas en una zona específica y por lo tanto podrán ser utilizadas para otros servicios de radiocomunicación, sin que se generen interferencias para los usuarios primarios o secundarios, que ya se encuentren operando o cuando les sean asignadas frecuencias. (ANE, 2019).

Estos espacios se dan gracias a la migración de la TV analógica a los sistemas digitales, lo cual ha llevado a la liberación de una parte importante del espectro debido al hecho de que la radiodifusión digital puede transmitir varias estaciones a través de un canal. Por otra parte, estos

espacios en blanco se presentan primordialmente en las zonas rurales, esto debido a que hay menos estaciones de TV ubicadas fuera de las principales áreas metropolitanas, provocado que haya más espectro de TVWS disponible en estas áreas que tienden a estar desatendida. Según reportes de la ANE (Agencia Nacional del Espectro), en el 99% de las zonas rurales colombianas apenas se usan diez de los 48 canales disponibles (Krom, 2016).

Estudios del IGAC han mostrado que alrededor del 99,6% de área geográfica del país está conformada por áreas rurales (IGAC, 2015). Un entorno rural con una densa vegetación y distancias relativamente largas, generalmente kilómetros o decenas de kilómetros, es un desafío técnico para dar acceso a Internet, además la baja teledensidad agrega un desafío económico, ya que una ubicación con muy pocos usuarios, especialmente usuarios con ingresos limitados, dificulta la devolución de cualquier inversión significativa en infraestructura de telecomunicaciones utilizando tecnologías tradicionales. Además, dado que las telecomunicaciones y otros servicios experimentaron un fuerte crecimiento y exigieron más ancho de banda, se ha presentado una escasez de espectro (Lysko, Burger, & Hagopian, 2019).

En busca de soluciones a estos problemas estudios han encontrado que la banda de televisión está infrutilizada en la mayor parte del mundo. Este hallazgo ha llevado al rápido crecimiento y desarrollo del concepto de acceso dinámico al espectro (DSA), que se refiere al cambio del intercambio de espectro de las asignaciones fijas tradicionales a compartir en tiempo real, y la creación de una nueva clase de tecnología comúnmente llamada espacio en blanco de televisión (TVWS).

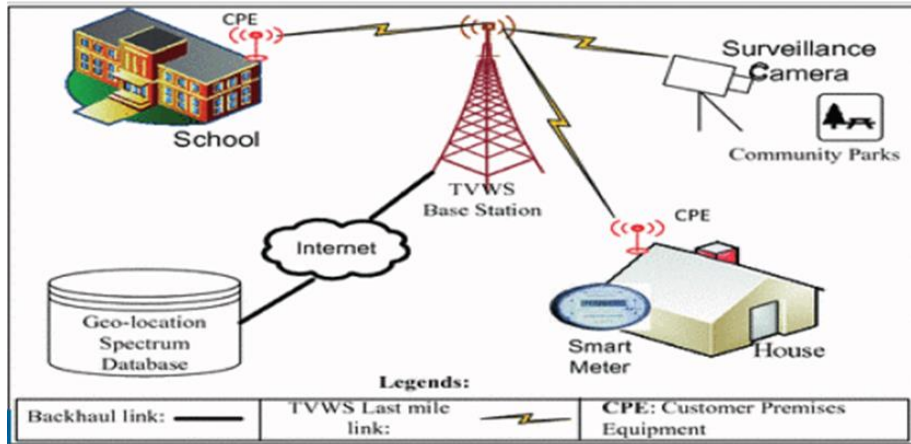
Cuando hablamos de TV White Space, nos referimos al uso de canales libres de televisión, ubicados en la banda del espectro UHF, que no han sido asignadas, o que no están siendo utilizadas

por los operadores, para así poder realizar transmisiones de datos durante un tiempo y una ubicación específica. El desaprovechamiento antes mencionado de esta banda de frecuencias se da ya que, los usuarios principales, que tiene el uso exclusivo de sus recursos de frecuencia, no los usan de manera eficiente, esto da como resultado el hecho de que todo el espectro parecerá no estar plenamente explotado en ningún momento (Amine, Adil, & Aawatif, 2017).

Hay varias formas en que se puede operar TVWS, mediante una base de datos, detección de espectro o incluso a través de balizas. Las pruebas y ensayos han demostrado que la forma más confiable de operar TVWS es mediante el uso de una base de datos de geolocalización que mantiene información sobre transmisores, información técnica y regulaciones (Lysko, Burger, & Hagopian, 2019); y esto se hace mediante sistemas de radio cognitivos o más comúnmente denotados como dispositivos de espacios en blanco, los cuales cumplen con los requisitos de bajo costo de despliegue y operación, amplia cobertura y buena velocidad de datos. (Krom, 2016).

Las autoridades reguladoras han adoptado reglas que permiten los dispositivos de espacio en blanco (WSD) operar en la banda de TV en lugares donde no se utiliza el espectro, con la protección del Receptor de TV. Las investigaciones han demostrado que cuando la asignación de espectro se gestiona de forma adecuada, los usuarios secundarios (TVWS) pueden coexistir en la misma banda de espectro de radiofrecuencia (RF) con redes con licencia. (Ndlovu, Mbero, Kovarik, & Patel, 2017)

TVWS puede ser claramente una solución a los desafíos de conectividad en áreas rurales y generar soluciones de aprendizaje electrónico, seguridad, salud, gobernanza, hogares inteligentes y áreas de crecimiento económico como agricultura e innovación. En la figura 1 se muestra el esquema general de un sistema TVWS con algunos de los casos de uso descritos anteriormente.

Figura 1.*Caso de uso de TVWS.*

Nota. El grafico muestra un sistema de transmisión de datos desarrollado mediante el uso de la tecnología TVWS. Tomado de (Ismail, Kissaka, & Mafole, 2019)

3.2. Radio Cognitiva

Como se mencionó anteriormente la escasez de espectro es un factor limitante para que los sistemas de comunicaciones inalámbricas se adapten a más usuarios e incorporen más servicios. Asignar un nuevo espectro para los servicios adicionales y el incremento de capacidad es costoso porque el espectro disponible es un recurso limitado y se ha asignado a varios sistemas inalámbricos. Estos sistemas, conocidos como usuarios con licencia, tienen uso exclusivo del espectro asignado. Contrariamente a la congestión observada en la ocupación de frecuencias por parte de los organismos reguladores, la carga espectral real muestra que existen grandes bandas espectrales inactivas. La radio cognitiva (CR) se considera un enfoque eficiente para resolver el problema de la escasez de espectro y su idea central es el acceso dinámico al espectro (DSA). La CR permite la comunicación de dispositivos sin licencia para usar los recursos del espectro de forma dinámica y que están asignados, pero temporalmente no utilizados o subutilizados por los

usuarios primarios sin afectar su autoridad, de modo que varios servicios o usuarios secundarios puedan compartir una parte del espectro en el mismo lugar y/o tiempo, mejorando así la utilización y eficiencia de este recurso. (Sun & Guo, 2017), (NaiQian, XiaoShuang, & LiBiao, 2018)

La tecnología TVWS es una de las implementaciones más prometedoras del concepto de radio cognitiva. El término radio cognitiva fue propuesto por primera vez por Joseph Mitola, quien se dice que es el padre de la radio cognitiva. Según su definición, la CR es un sistema de radio que despliega tecnología para el uso y el intercambio de espectro secundario. Su propósito es obtener conocimiento sobre los requisitos del usuario y de la red, y el entorno de radio externo. Hacer un seguimiento de este conocimiento ayudaría al sistema CR a decidir qué parte del espectro es mejor para la reutilización secundaria en diferentes condiciones ambientales, además, de garantizar la protección del sistema primario. (Denkovska, Latkoski, & Gavrilovska, 2011)

Por otro parte los expertos de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) han definido la Radio Cognitiva como un sistema de radio que emplea tecnología capaz de permitir al sistema obtener conocimiento de su entorno operativo y geográfico, las políticas establecidas y su estado interno; ajustar de forma dinámica y autónoma sus parámetros y protocolos operativos de acuerdo con su conocimiento obtenido, para alcanzar objetivos predefinidos; y aprender de los resultados. (Pietrosemoli & Zennaro, 2013), (Carro, Hernández, & Beltramelli, 2019)

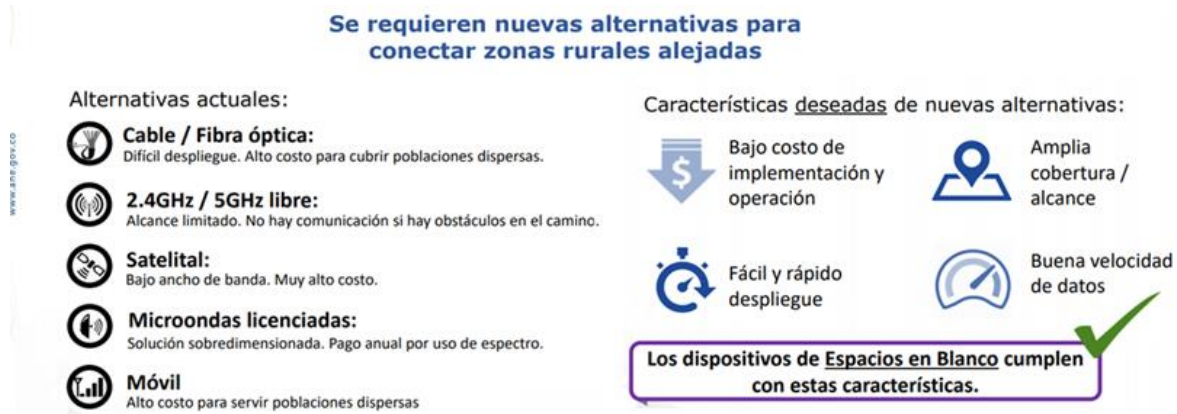
La radio cognitiva tiene tres enfoques principales, la geolocalización, base de datos y detección de espectro. Los dispositivos de TVWS deben contar con la capacidad de geolocalización, la cual les permitirá obtener su ubicación geográfica en tiempo real, para luego enviarla y obtener la información requerida para poder operar dependiendo de dicha ubicación. Esta información se encontrará en una base de datos, a la cual es dispositivo debe poder acceder,

ya que contiene datos como la disponibilidad de espectro y las normas técnicas que debe cumplir para su correcta operación; y por ultimo debe tener la capacidad de detección de espectro, con el fin de censar un canal y detectar señales interferentes. (Vásquez, 2018)

En resumen La Radio cognitiva se podría ver como una radio “ajustable” en la cual tanto las redes como los mismos nodos inalámbricos cambian los parámetros particulares de transmisión o de recepción (como potencia o frecuencia) para ejecutar su cometido de forma eficiente sin interferir con los usuarios autorizados.

3.3. Ventajas al Utilizar TVWS

Tecnologías como el WiFi operan en bandas de frecuencia por encima de 1 GHz y como se sabe la frecuencia y la longitud de onda son inversamente proporcionales entre sí, por lo que, si hay un aumento en la frecuencia, la longitud de onda disminuye y con la disminución de la longitud de onda la señal se atenúa fácilmente y no podrá viajar una distancia más larga y también enfrentará problemas mientras penetra paredes y edificios. Con una frecuencia más alta, la demanda de energía también se aumenta para transmitir y recibir la señal. Además, una frecuencia más alta conduce a hardware y software más complejos, y con el fin de ampliar las redes de servicios de telecomunicaciones se requeriría una gran inversión pensando en el uso de redes tradicionales como los radioenlaces y la fibra óptica. Estos inconvenientes se compensan utilizando la banda de TVWS. (Sarkar, Shankar, & Singh, 2016)

Figura 2.*Problemática a solucionar.*

Nota. Tomado de (ANE, 2017)

Esta tecnología trabaja en la banda de frecuencias UHF dadas sus ventajas de propagación. Las frecuencias de UHF son especialmente adecuadas para la telefonía celular y dispositivos inalámbricos de banda ancha. Ofrecen un mayor alcance y un área de cobertura más extensa, así como una mejor penetración de obstáculos en terrenos difíciles, por lo que también es posible operar sin línea de vista entre transmisor y receptor (Iglesias R. , 2019).

De hecho, el uso del espectro de radiodifusión televisiva para la conectividad de banda ancha tiene tres ventajas principales sobre las tecnologías clásicas similares a WiFi o LTE. Pueden proporcionar un menor consumo de energía, una mejor penetración de obstáculos y un menor costo. (Amine, Adil, & Aawatif, 2017)

A diferencia de la longitud de onda de las bandas de frecuencia exclusivas para tecnologías como WiFi o WiMAX (2,4 GHz, 3,5 GHz o 5,7 GHz), la longitud de onda UHF es mayor, lo que da como resultado una mejor penetrabilidad y menos propensa a los efectos de sombra causados por los obstáculos (árboles, edificios, colinas, edificio, etc.) además de ser menos propensas a la

difracción y atenuación por lluvia o temperatura. En bandas de frecuencia más altas, como se mencionó, estas características son casi inexistentes y para garantizar la cobertura de ondas de radio, se debe cumplir con el principio de línea de vista (LOS). (Lamola, Johnson, & Densmore, 2019)

Basado en hechos probados, el espectro de TV tiene mejores características de propagación, en primer lugar, debido a que esta banda se encuentra por debajo de la frecuencia de 1 GHz, la obstrucción material es menos dañina que en las frecuencias más altas, lo que permite una cobertura sin línea de vista directa (NLOS). En segundo lugar, la banda TVWS presenta una ventaja de pérdida de trayectoria sobre las bandas industriales, científicas y médicas (ISM) sin licencia (2,4 y 5,7 GHz) debido únicamente a la frecuencia de funcionamiento. Por ejemplo, el canal de TV 2 (54–60 MHz) tiene 20 dB menos de pérdida de trayectoria que el canal de TV 30 (566–572 MHz), que a su vez tiene una ganancia de 20 dB sobre la banda de 5,7 GHz. Canales más amplios en esta banda ISM de alta frecuencia, como los canales de 80 MHz, proporcionan una mayor capacidad en un rango corto, pero requieren más infraestructura para lograr una cobertura de área amplia. Por el contrario, la señal de espacio en blanco de 6 MHz de ancho de banda es más robusta y se propaga a distancias más largas con una capacidad significativa. (Ishizu, y otros, 2014)

Hablando de costos las implementaciones de TVWS en comparación, por ejemplo con Long-Term Evolution (LTE), son mucho más baratas para las áreas rurales donde el número de usuarios finales también es menor en comparación con las áreas urbanas. Es decir, es probable que el retorno de la inversión (ROI) sea mejor cuando se usa TVWS en comparación con las conexiones de datos tradicionales como LTE o Fibra. Es por ello que se espera lograr

comunicación de banda ancha inalámbrica de larga distancia en áreas donde el tendido de cables es difícil, como en áreas montañosas o islas, porque el costo de las redes inalámbricas es mucho menor que las redes con cables. Además, en caso de que la infraestructura de comunicaciones se dañe debido a desastres, se espera una red de banda ancha inalámbrica rápida y flexible. La tecnología TVWS se puede aprovechar para proporcionar soluciones innovadoras en muchas disciplinas, incluida la educación, servicios bancarios, la agricultura, la salud y muchos otros sectores. (Ndlovu, Mbero, Kovarik, & Patel, 2017)

Ya habiendo mencionado las ventajas de la tecnología, se podría mencionar que la principal desventaja de TVWS se resume en la interferencia que podría crear el uso de esta tecnología con el uso licenciado de TV. El desafío de implementación es lograr que cada uno de los dispositivos de la red pueda acceder a un canal desocupado con las condiciones de seguridad establecidas, de manera que las potencias no generen consecuencias negativas con los canales adyacentes. (Peña, Delgado, & Guerrero, 2017). Por otro lado está la limitación en el periodo de operatividad, ya que la prioridad del uso del espectro lo tiene la radiodifusión de TV.

En conclusión, tanto por la disponibilidad del espectro como por las excelentes cualidades técnicas que presenta, se demuestra así la factibilidad de proporcionar conectividad a Internet mediante el uso de TVWS.

3.4. Estándares Aprobados por la IEEE para TVWS

La banda TVWS es utilizada actualmente por una gran variedad de servicios protegidos con licencia, primordialmente por el servicio de transmisión de televisión digital terrestre. La concesión de licencias protege a los usuarios titulares de la banda TVWS de la interferencia dentro

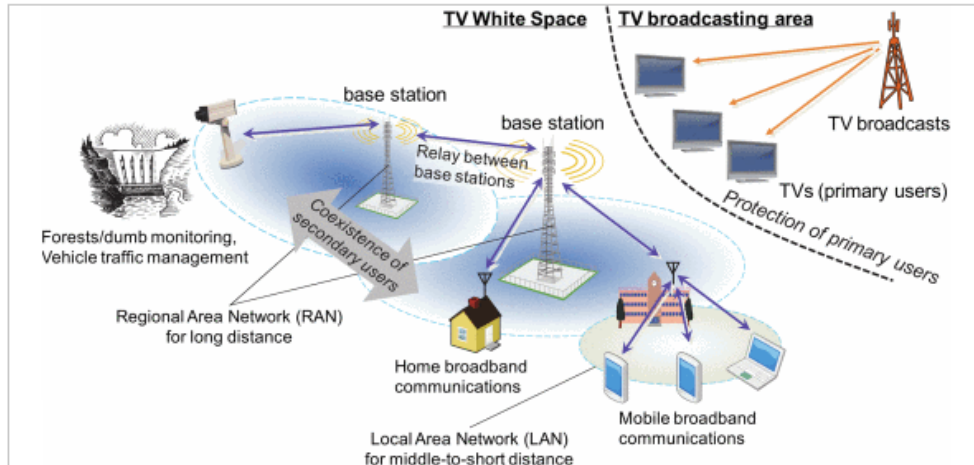
de su área de servicio. Por lo tanto, los WSD (White Space Device) que operan en la banda TVWS no pueden interferir con ningún usuario titular protegido en su región operativa específica.

Para lograr la coexistencia entre los WSD y las emisoras de TV con licencia, muchos desafíos deben abordarse mediante estándares en común. Se requiere que los WSD funcionen en un espectro desocupado, que puede variar en tamaño, ubicación y tiempo. Esto significa que los WSD deben admitir diferentes anchos de canal y poder aprender de una base de datos de geolocalización qué canales están disponibles y por cuánto tiempo. Una vez que operan en un canal disponible, se requiere que los WSD no interfieran con los dispositivos establecidos en los canales vecinos. Finalmente, se requiere que los WSD cesen inmediatamente las transmisiones cuando la base de datos les informe que se detengan. Para abordar estos desafíos, El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) han desarrollado los estándares IEEE 802.22 e IEEE 802.11af los cuales proporcionan un marco internacional que se adapta a los diferentes parámetros operativos y dominios regulatorios de WSD en todo el mundo. (Flores & Guerra, 2013)

Como se verá más adelante, estos estándares son derivados de redes RAN y LAN. La Figura 3 muestra un ejemplo de infraestructura inalámbrica que utiliza TVWS utilizando los estándares aprobados para la tecnología y respetando la protección de usuarios primarios.

Figura 3.

Infraestructura inalámbrica usando estándares para TVWS.



Nota. Tomado de (Ishizu, y otros, 2014)

La anterior figura presenta una combinación de ambos estándares. RAN se utiliza para proporcionar una red de banda ancha doméstica, monitorear bosques o administrar el tráfico de vehículos; también se utiliza para establecer un enlace entre estaciones base para ampliar el rango de comunicación. LAN se utiliza para ampliar el área de acceso, por ejemplo, para realizar banda ancha móvil en un área determinada.

En este apartado, se presenta una vista general de los estándares IEEE 802.22 e IEEE 802.11af, donde el primero es utilizado para enlaces principales y el segundo para la expansión del área de acceso.

3.4.1. Estándar IEEE 802.22

Publicado en septiembre de 2011 y desarrollado por Hitachi Kokusai Electric Inc., IEEE 802.22 es una especificación estandarizada de la red de área regional (RAN) inalámbrica para la

operación en TVWS, utilizada para comunicaciones de larga distancia (decenas de kilómetro) (Ishizu, y otros, 2014).

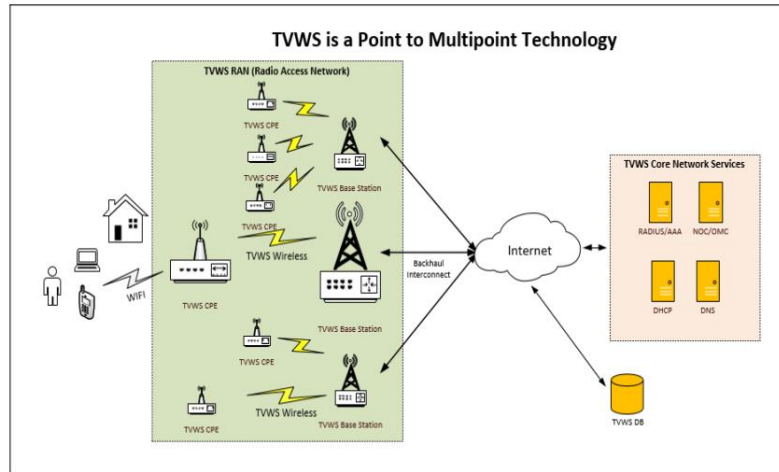
Este estándar se utiliza para redes troncales de banda ancha en áreas rurales mediante redes punto a multipunto; en esta red, el transmisor brinda servicios a los puntos receptores, teniendo como prioridad mitigar posibles interferencias a los servicios principales. Estas interferencias se evitan con técnicas de DSA (Dynamic Spectrum Access), “las cuales incluyen un censado del espectro antes de la ocupación para determinar qué porciones de espectro no están siendo utilizadas por la red primaria (TV) y así asignarles estos recursos a los usuarios del sistema secundario (WRAN)” (Herrera & Gutierrez, 2012)

En este proceso los CPE estarán detectando el espectro y enviarán informes periódicos a la BS informándole sobre lo que perciben. La BS, con la información recabada, evaluará si es necesario un cambio en el canal utilizado, o por el contrario, si debe permanecer transmitiendo y recibiendo en el mismo. Las BS controlarán el acceso al medio para todos los CPE adjuntos, los cuales se conectarán a la estación base mediante un enlace inalámbrico. (IEEE Standard, 2019)

En la Figura 4 se presenta la arquitectura de este estándar, la cual está dividida principalmente en cinco componentes: Estación base, CPE, Base de datos, Router y Punto de Acceso. Estos componentes conforman la arquitectura utilizada para TVWS, en el capítulo 5 se detallará cada uno de estos elementos.

Figura 4.

Red TVWS con componentes de la arquitectura 802.22.



Nota. Tomado de (Vásquez, 2018)

Dentro de la estructura del estándar IEEE 802.11af se especifican capas físicas (PHY) y de control de acceso a medios (MAC). La capa PHY debe poder adaptarse a diferentes condiciones y también debe ser flexible para saltar de un canal a otro sin errores en la transmisión. Esta flexibilidad también es necesaria para poder ajustar dinámicamente los esquemas de ancho de banda, modulación y codificación. OFDMA (versión multiusuario de la conocida OFDM) será el esquema de modulación para la transmisión en enlaces ascendentes y descendentes ya que permite lograr esta rápida adaptación necesaria para las BS y los CPE. Utilizando un solo canal de TV la tasa de bits máxima que se espera aproximadamente es de 20 Mbps a una distancia de 30 km. La velocidad y la distancia alcanzada se puede mejorar haciendo uso de la vinculación de canales, la cual consiste en utilizar más de un canal para para que el sistema tenga un mayor ancho de banda, lo que se reflejará en un mejor rendimiento del sistema.

La capa MAC se basa en la tecnología de radio cognitiva. Al igual que la capa PHY debe poder adaptarse dinámicamente a los cambios en el entorno mediante la detección del espectro. Con este protocolo el CPE realiza dos tipos diferentes de medición del espectro: dentro de la banda y fuera de la banda. La medición dentro de la banda consiste en detectar el canal real que está siendo utilizado por la BS y el CPE. La medición fuera de banda consistirá en detectar el resto de los canales. La capa MAC realizará dos tipos diferentes de detección en mediciones dentro o fuera de la banda: detección rápida y detección fina. La detección rápida consistirá en detectar a velocidades inferiores a 1 ms por canal. Esta detección es realizada por el CPE y el BS recopilará toda la información y decidirá si hay algo nuevo que hacer. La detección fina lleva más tiempo (aproximadamente 25 ms por canal o más) y se utiliza en función del resultado anterior del mecanismo de detección rápida. (IEEE Standard, 2019)

Estos mecanismos de detección se utilizan principalmente para identificar si hay un transmisor titular y si es necesario evitar interferir con él. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones de un sistema desarrollado basado en el estándar IEEE 802.22.

Tabla 1.

Especificaciones de un sistema basado en IEEE 802.22.

System	IEEE 802.22 PHY/MAC
Carrier frequency	470-710 MHz
Channel bandwidth	6 MHz
Signal bandwidth	5.6 MHz
TRX/PA unit output	1 mW / 1W
Modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Error correcting code	Convolutional code (coding rate: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6)
Multiple acces	OFDMA

Nota. Tomado de (Ishizu, y otros, 2014)

Este estándar utiliza bandas ubicadas en VHF y UHF, más específicamente, entre los 54 y los 862 Mhz de frecuencia. Como se puede observar en la tabla 1, este sistema opera en la banda de frecuencias comprendida entre 470 y 710 MHz; normalmente las modulaciones utilizadas por este estándar son QPSK, 16-QAM y 64-QAM con diferentes tasas de codificación. El radio de cobertura típico está entre 17-30 km, pero en condiciones ideales, dependiendo del tipo de modulación adaptativa utilizada por esta norma, se puede extender a 100 km.

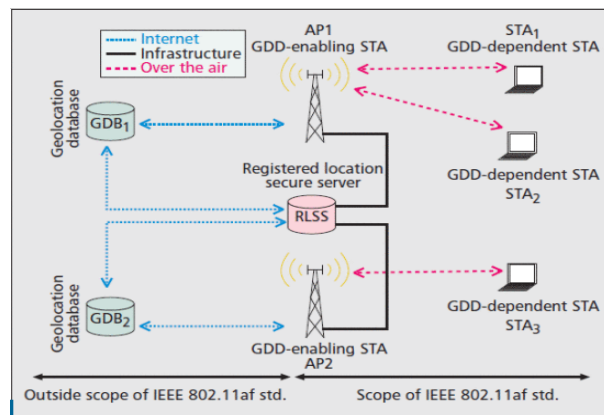
3.4.2. Estándar IEEE 802.11af

Publicado en febrero de 2014 y desarrollado por el Instituto Nacional de Tecnología de la Información y las Comunicaciones (NICT), IEEE 802.11af es una especificación estandarizada del sistema de LAN inalámbrica para operar en TVWS, utilizada para comunicaciones con distancias de corto a medio alcance (Ishizu, y otros, 2014).

El estándar toma medidas para limitar la interferencia para los usuarios principales, mediante la obtención de información de funcionamiento, como la frecuencia disponible y la potencia de transmisión. En la siguiente figura se puede observar la arquitectura de este estándar.

Figura 5.

Red TVWS con todas las entidades de la arquitectura 802.11af.



Nota. Tomado de (Flores & Guerra, 2013)

La Figura 5 ilustra dos BSS (conjuntos de servicios básicos) que contienen los componentes clave de la arquitectura del estándar IEEE 802.11af, los cuales se explicaran brevemente a continuación.

Base de datos de geolocalización (GDB)

Es el elemento principal, y lo que principalmente diferencia la operación IEEE 802.11af de otros estándares 802.11. La GDB es una base de datos que almacena, por ubicación geográfica, las frecuencias permitidas y los parámetros operativos para que los WSD cumplan con los requisitos reglamentarios. Están autorizadas y administradas por autoridades reguladoras; por lo tanto, el funcionamiento de una GDB depende de los requisitos de seguridad dados por el ente regulatorio de cada país. (Flores & Guerra, 2013)

Servidor seguro de ubicación registrada (RLSS)

Para evitar interferencias con otros sistemas IEEE 802.11af, se introduce el RLSS. Esta entidad opera como una base de datos local, la cual contiene la ubicación geográfica y los parámetros operativos para un pequeño grupo de dispositivos llamados conjuntos de servicios básicos (BSS). El RLSS distribuye los parámetros de operación adecuados a los puntos de acceso (AP) y estaciones (STA) que estén dentro de los BSS bajo su control, para evitar su interferencia.

Entidades dependientes de la base de datos de geolocalización (GDD)

Los siguientes componentes de la red IEEE 802.11af están referenciados por el término GDD (Geolocation Database Dependent), que especifica que su funcionamiento está controlado por una GDB, lo que garantiza que cumplen los requisitos de la normativa.

Estación habilitadora - GDD

Comúnmente conocida como AP, esta entidad controla el funcionamiento de las STA en su BSS de servicio. La estación habilitadora puede acceder de forma segura a la GDB para buscar las frecuencias operativas y los parámetros permitidos en su región de cobertura. Con esta información, la AP tiene la autoridad para habilitar y controlar la operación de las STA bajo su servicio, identificadas como estación dependiente - GDD. Los parámetros obtenidos de la GDB se representan mediante un mapa de espacios en blanco (WSM). La AP asegura el mantenimiento y distribución de un WSM válido, además, transmite una señal de verificación de contacto (CVS) para las STA dependientes - GDD para verificar la validez de los espacios en blanco asignados para su operación. (Flores & Guerra, 2013)

Estación dependiente - GDD

La estación dependiente de GDD puede identificarse como las STA en la arquitectura BSS. Las STA dependientes-GDD obtienen las frecuencias y los parámetros de funcionamiento permitidos en forma de WSM de la STA habilitadora-GDD o del RLSS. Además es la encargada de identificar y conectar a sus estaciones asociadas mediante la transmisión de datos generada con la estación habilitadora. (Flores & Guerra, 2013)

Cabe mencionar que el estándar 802.11af define el protocolo de comunicación entre las STA dependientes-GDD, las STA habilitadoras-GDD y el RLSS. Sin embargo, el flujo de comunicación entre el GDB y las entidades de alto nivel (RLSS y STA habilitadoras GDD) está fuera del alcance de este estándar. Los mecanismos del estándar son independientes de cómo se realiza esta comunicación.

Por otro lado, el estándar IEEE 802.11af especifica capas físicas (PHY) y de control de acceso a medios (MAC) para extender la LAN inalámbrica convencional con la funcionalidad mencionada anteriormente, pero no nos centraremos en este tema.

Por último, en la siguiente figura se pueden observar las especificaciones de un sistema basado en IEEE 802.11af.

Tabla 2.

Especificaciones de un sistema basado en IEEE 802.11af.

System	IEEE 802.11 PHY/MAC
Carrier frequency	470-710 MHz
Channel bandwidth	6 MHz
Signal bandwidth	4.83 MHz
Tx power	10 mW
Modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Error correcting code	Convolutional code (coding rate: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6)
Multiple acces	CSMA/CA
Multiplexing	OFDMA

Nota. Tomado de (Ishizu, y otros, 2014)

Como se puede observar, este sistema opera en la banda de frecuencias comprendida entre 470 y 710 MHz, típicamente se utilizan las modulaciones BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. La cobertura que se puede obtener mediante el uso de este estándar es de aproximadamente 1 km de radio.

3.4.3. *Diferencias entre el Estándar IEEE 802.22 e IEEE 802.11af*

Estos estándares se basan en la tecnología de radio cognitiva, sin embargo, presentan diferencias evidentes como, por ejemplo, mientras que 802.11af es un estándar de LAN inalámbrica diseñado para rangos de hasta 1 km, 802.22 es un estándar de red de área regional

inalámbrica (WRAN), para rangos de hasta 100km. Las principales diferencias encontradas entre los parámetros de estos estándares se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Diferencias entre el estándar IEEE 802.22 e IEEE 802.11af.

Características	802.11af	802.22
Rango de frecuencias de operación	470-710 MHz	54-862 MHz
Bandas de Funcionamiento	UHF	VHF y UHF
Radio de cobertura típico	0-1 km	17-33 km típico máximo 100 km teóricos
Ancho de banda total	5, 10, 20, 40 MHz	6, 7 y 8 MHz
Tamaño de FFT	64, 128, 256; opcional: 512 1024	2048
Potencia de Transmisión	20 dBm	>36 dBm
Modulación	OFDM	OFDM
Tipos de Modulaciones Permitidas	BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM	QPSK 16-QAM 64-QAM
Código corrector de errores	Código convolucional	Código convolucional; Opcional: CTC, LDPC, SBTC.
Velocidad máxima de datos	12 Mbps	22,69 Mbps
Máximo retraso de propagación	<1 μ s interiores hasta 100 metros 1-10 μ s exteriores hasta 1 km	11-25 μ s típico en 17-33 km 25-60 μ s hasta los 100 km

Nota. Tomado de (Vásquez, 2018)

Estas diferencias se presentan dado que, como se mencionó anteriormente, cada estándar se utiliza para fines diferentes, pero en conjunto forman el uso completo de la tecnología TVWS. La coexistencia entre los estándares 802.22 y 802.11af se puede implementar de la siguiente forma:

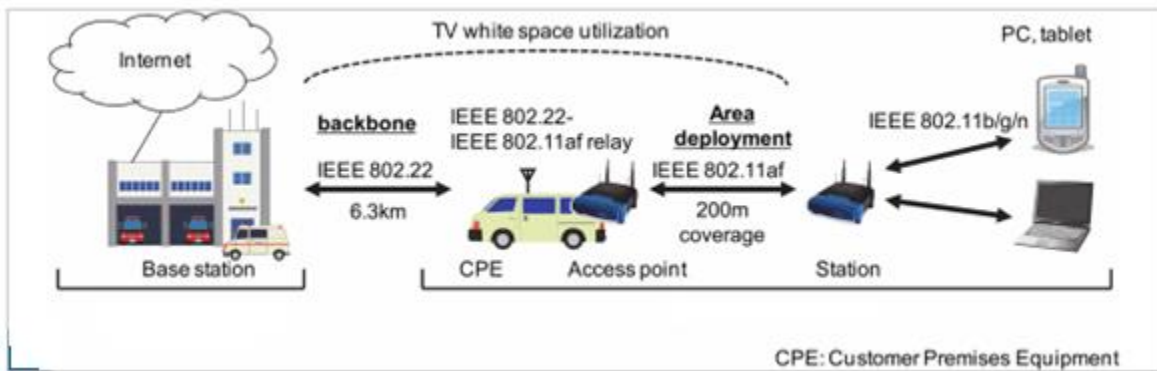
Se configura una red multi-hop (saltos múltiples) mediante la retransmisión de los sistemas IEEE 802.22 e IEEE 802.11af. La arquitectura de la red de saltos múltiples se muestra en la Fig.6. Sus elementos son: IEEE 802.22 BS y CPE, la estación base se conecta a un enrutador con acceso

a Internet. IEEE 802.11af AP se estableció cerca del IEEE 802.22 CPE. El AP y el CPE se conectan con un cable Ethernet. IEEE 802.11af STA se instaló dentro de un automóvil. IEEE 802.11af STA también tiene una función como AP IEEE 802.11b/g/n al que se conectan los dispositivos LAN inalámbricos (celulares, Tablet, etc.).

Teniendo esta red cualquier dispositivo LAN inalámbrico disponible puede acceder a Internet a través de sus elementos en el siguiente orden: IEEE 802.11af STA, AP, IEEE 802.22 CPE y BS. La distancia entre la BS y CPE es de 6,3 km. El acceso a Internet mediante IEEE 802.11af estará disponible en un diámetro de aproximadamente 200 m alrededor del AP IEEE 802.11af.

Figura 6.

Red de saltos múltiples con sistemas IEEE 802.22 e IEEE 802.11af.



Nota. Tomado de (Ishizu, y otros, 2014)

3.5. Antecedentes: Uso de TVWS en el Mundo

A nivel internacional se han logrado identificar varios estudios o artículos científicos referentes al uso de la tecnología TV White Space, realizados con diferentes enfoques, dependiendo de la necesidad que presenta cada país. Los estudios muestran que, en los últimos 10

años, se han realizado varios ensayos a nivel mundial, la mayoría de ellos en países en desarrollo. Ha habido ensayos en Tanzania, Kenia, Botswana, Estados Unidos, Reino Unido, Singapur, Vietnam, Filipinas, India y muchos otros países han realizado ensayos o están considerando hacerlo. Algunos países tienen marcos técnicos para la implementación de TVWS y otros están considerando la estandarización para permitir la implementación de la tecnología (Ismail, Kissaka, & Mafole, 2019).

Para la búsqueda del uso de TVWS en el mundo se utiliza como base la información suministrada por la DSA (Dynamic Spectrum Alliance), la cual es la organización de espectro de referencia que promueve el acceso sin licencia a la banda de 6 GHz, espectro compartido de banda media, CBRS, TVWS, innovación en ondas milimétricas y más; esta información se encuentra en su página web.

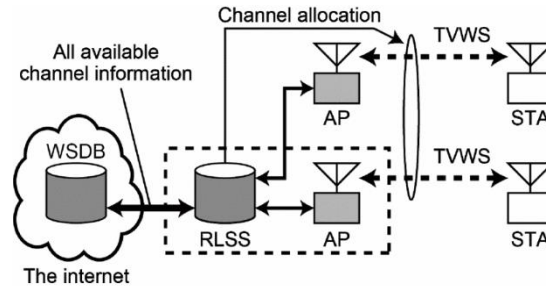
A continuación, se presentan algunos de los diferentes despliegues comerciales, pilotos y pruebas que se han desarrollado en diferentes países incluyendo a Colombia.

3.5.1 Reino Unido

El Reino Unido desarrolló el primer experimento de redes de área local inalámbricas (WLAN) en interiores del mundo, basadas en IEEE 802.11af que funcionan en espacios en blanco de TV (TVWS), desarrollado por el programa piloto OFCOM TVWS. El sistema prototipo, el cual se muestra en la Fig.7, consta de la base de datos TVWS (WSDB), el servidor seguro de ubicación registrada (RLSS) y dos prototipos de hardware para un punto de acceso (AP) y una estación (STA) (Mizutani, 2015).

Figura 7.

Arquitectura del sistema prototipo IEEE 802.11af desarrollado.



Nota. Tomado de (Mizutani, 2015)

La prueba se llevó a cabo en el edificio del King's College London (KCL), Denmark Hill Campus en Londres, Reino Unido, con el fin de mirar el rendimiento en interiores; El AP se instaló y fijó en un pasillo el punto medio entre dos habitaciones donde se encontraban las STA.

Con los resultados de este experimento se encontró que solo un IEEE 802.11af AP podría cubrir no solo el área de línea de vista (LoS), sino también el área de donde no la había (NLoS), por ejemplo, en diferentes aulas u oficinas siempre y cuando no hubiera una gran pérdida de penetración provocada por obstáculos metálicos de gran tamaño. El sistema prototipo desarrollado y los resultados del experimento mostraron la eficacia del uso de TVWS (Mizutani, 2015).

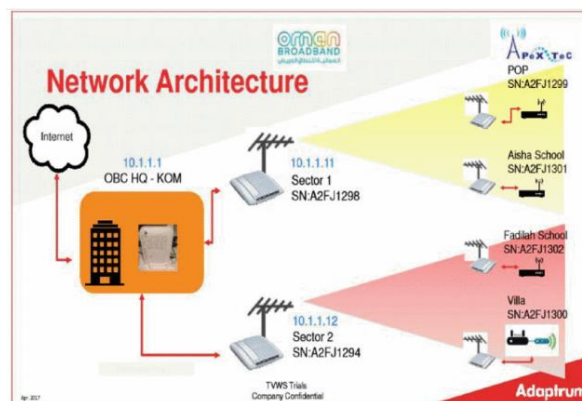
3.5.2. Omán

En busca de soluciones disponibles para extender el servicio de Internet a áreas rurales con un costo de inversión mínimo y un tiempo de implementación razonable, el Sultanato de Omán implementó un ensayo de espacios en blanco de televisión (TVWS). El ensayo fue realizado por Oman Broadband Company (OBC) con la cooperación de la Autoridad Reguladora de Telecomunicaciones (TRA) del país.

Se estableció una red TVWS compuesta por dos estaciones base TVWS (BS) y cuatro conjuntos de equipos de instalaciones para el consumidor (CPE), ubicados entre 4 y 10 km de distancia de las BS. Las dos estaciones base se conectaron a Internet a través de un enlace de fibra y se conectaron a los CPE a través del enlace UHF. A su vez, los CPE se conectaron a un conversor UHF-Wi-Fi y eventualmente a un Hot Spot (HS) Wi-Fi que suministra a los usuarios locales con servicio de Internet (Almantheri et al., 2018). La arquitectura de la red se puede observar en la siguiente figura.

Figura 8.

Arquitectura de la red.



Nota. Tomado de (Almantheri, Al Amri, Al Bahri , & Al Rahbi, 2018)

En esta prueba se seleccionó el hardware y software fabricado por Adaptrum de EE. UU. El rendimiento máximo de datos logrado para el enlace descendente (DL) fue de 16 Mbps y de 11.6 Mbps para el enlace ascendente (UL), mientras que el DL y UL promedio se encontraron en 5.21 Mbps y 2.3 Mbps, respectivamente (Almantheri et al., 2018).

En vista de las ventajas de la tecnología TVWS, la prueba demostró la capacidad de utilizar dicha tecnología para extender los servicios inalámbricos de Internet de banda ancha a las zonas

rurales de Omán, dado que el servicio está rezagado debido a las difíciles condiciones geográficas y el terreno del país.

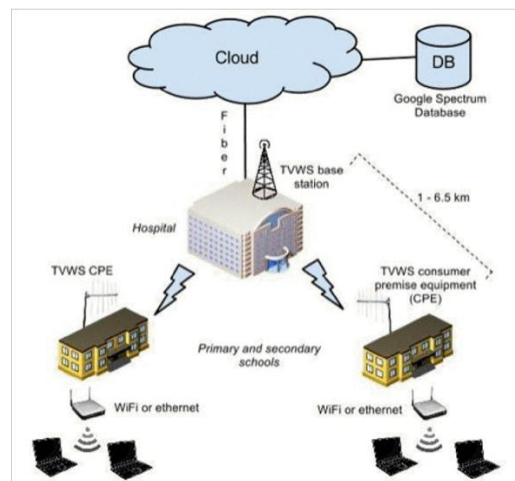
3.5.3 Vietnam

El estudio realizado con la tecnología TVWS en este país se desarrolló en Hanói, Vietnam. El proyecto de prueba se basó en el diseño del fabricante Carlson Wireless, ya que tiene una buena compatibilidad con el estándar de tecnologías TVWS IEEE802.22 (Tran, Dang, & Hoang, 2014). Un esquema del sistema de banda ancha implementado se puede observar en la figura 9.

La prueba llevó a cabo mediciones de ruido, medición de la señal de la estación base con CPE fijo y CPE móvil (enlace BS-CPE) y primordialmente mediciones de protección para operadores establecidos (radiodifusión de TV).

Figura 9.

Sistema de banda ancha inalámbrico para espacios en blanco de televisión.



Nota. Tomado de (Tran, Dang, & Hoang, 2014)

En estas pruebas técnicas se tuvo como objetivo medir el nivel de interferencia causado por los dispositivos de espacios en blanco (WSD) al receptor de televisión, midiendo los cambios en

el nivel de potencia del canal transmitido por la estación base. Se observó que la velocidad de datos medida de los dispositivos de prueba es buena en comparación con los valores de especificación para varias modulaciones, y con un buen presupuesto de enlace; obtuvieron una alta velocidad de datos, de hasta 12,69 Mbps para enlace descendente y 6,18 Mbps para enlace ascendente. Las pruebas se llevaron a cabo con el equipo “White Spaces equipment RuralConnect™” de Carlson Wireless (Tran, Dang, & Hoang, 2014).

De esta evaluación inicial, de investigación y pruebas operativas con un sistema TVWS en un área pequeña en Hanói, se concluyó que la tecnología demuestra ser perfectamente adecuada para las condiciones regionales de Hanói y de todo el país en general. Con las ventajas que proporciona la tecnología TVWS se tiene la perspectiva de ser desarrollada en Vietnam y se espera que reemplace la tecnología tradicional Wi-Fi y 3G en el futuro (Tran, Dang, & Hoang, 2014).

3.5.4 Botswana

Este piloto presenta la red de prueba de TVWS para telemedicina, la cual proporcionó conectividad a Internet punto a punto a 6 centros de salud rurales. Se obtuvieron resultados de monitoreo de radiofrecuencia (RF) de 24 horas a la red de prueba durante un período de un año que muestra el comportamiento de los dispositivos de espacio en blanco con respecto a los servicios de banda de TV establecidos (Ndlovu, Mbero, Kovarik, & Patel, 2017).

Estos proyectos piloto de TVWS se dan gracias a la autorización de la Autoridad Reguladora de Comunicaciones de cada país, en el caso de Botswana (BOCRA), ya que estos dan el aval de transmitir utilizando espacios en blanco de TV. Este piloto convirtió al país en la primera nación en probar el uso de la conectividad TVWS en el sector de la salud. El proyecto tuvo como

objetivo establecer una infraestructura de TVWS, llegando a las poblaciones que tienen una conectividad muy deficiente; poniéndose a prueba inicialmente para la prestación de atención médica especializada a través de la telemedicina, con una futura expansión a otros sectores como la educación y la agricultura. Las características geográficas de Botswana son principalmente de terreno plano, por lo que facilita el despliegue de equipos de telecomunicaciones. El espectro dinámico de TVWS del país está dentro del rango de frecuencia 470-694 MHz (Ndlovu et al., 2017).

La red de TVWS se diseñó para cubrir y conectar la ciudad capital como el eje central, con 3 hospitales regionales y sus clínicas de salud circundantes. Las estaciones base (BS) de cada uno de los hospitales se instalaron en las azoteas y estaban conectadas a la red de backhaul mediante un enlace de red de fibra óptica; a su vez las clínicas conectadas por TVWS estaban equipadas con el equipo local del cliente (CPE) y se encontraban a una distancia de entre 6 y 2 km de su respectivo hospital. Las instalaciones contaban con dispositivos para uso de telemedicina como lo son Smartphone, portátiles, monitores de televisión, etc.

A lo largo del piloto se realizaron estudios técnicos por cada sitio, para medir el rendimiento de la red TVWS en términos de velocidad, latencia y variaciones de retardo de paquetes (jitter). Estos se llevaron a cabo para evaluar la viabilidad del programa y también determinar si era necesario optimizar o mejorar la conectividad de TVWS para su uso comercial. Una observación realizada mostró que los enlaces con distancias más cortas logran un rendimiento promedio más alto en comparación con aquellos con distancias más largas (Ndlovu et al., 2017).

Los resultados de la prueba de velocidad de descarga y carga del Internet, que se llevaron a cabo durante el piloto se registraron y resumieron en la siguiente tabla.

Tabla 4.

Pruebas de velocidad de Internet promedio (download y upload) para los sitios conectados con TVWS.

Location	Avg. Download Speed (Mbps)	Avg. Upload Speed (Mbps)
Tsopeng Clinic (TVWS connection)	1.19	3.86
Nyangabwe Referral Hospital (TVWS connection)	2.83	4.38
Donga Clinic (TVWS connection)	2.78	3.61

Nota. Tomado de (Ndlovu, Mbero, Kovarik, & Patel, 2017)

Los resultados mostraron un buen rendimiento para cada sitio, con una velocidad de conexión entre 1 y 4 Mbps, y una latencia media en los enlaces TVWS inferior a 10 ms para paquetes de tamaños típicos que van de 32 a 1500 bytes, mostrando así la factibilidad de proporcionar conectividad a Internet mediante el uso de TVWS (Ndlovu et al., 2017).

3.5.5 Estados Unidos

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), la cual es la agencia reguladora del país, junto a Motorola fueron los primeros en impulsar el uso de TVWS estableciendo reglas para permitir el uso secundario sin licencia del espacio en blanco de la TV. Lo fundamental era proteger a los usuarios titulares con licencia, para ello expusieron tecnologías de radio cognitiva que permiten que los sistemas de radio que operan en el espectro de TVWS protejan de manera confiable a estos usuarios titulares. Estas tecnologías incluyen la geolocalización, la detección y balizas.

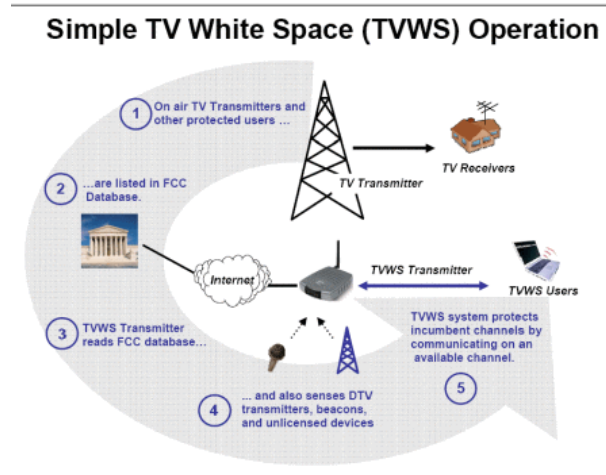
El uso de una base de datos de geolocalización es la tecnología principal para proteger a los titulares. Esta base de datos contendría la ubicación de todos los transmisores con licencia en

un área específica, junto con información técnica de cada uno, como potencia, tipo y altura de la antena, etc. El sistema TVWS verificaría esta base de datos para determinar si un canal de TV está disponible para usarse de forma secundaria en un área específica. (Borth, Ekl, Oberlies, & Overby, 2008)

Una segunda tecnología es la detección, la cual es la capacidad de captar una señal desde el aire y determinar si es un titular. La tecnología del receptor y los algoritmos de detección son lo suficientemente sofisticados como para detectar niveles que determinarían si un titular está en un área en específico. (Borth et al., 2008)

Una preocupación adicional es que los micrófonos inalámbricos con licencia transmiten aleatoriamente con características no distintivas, lo que hace que la detección sea un desafío muy difícil, ya que el dispositivo creerá que hay una señal presente pero no lo está. Para superar esta dificultad de detectar dichos micrófonos, un método adicional para proteger a los titulares es el uso de balizas. En este método se utiliza una señal de control (baliza), esta señal le indicaría a cualquier dispositivo TVWS, que no opere en ese canal. Además, si la baliza se puede decodificar en lugar de simplemente detectar, esto aumentaría aún más la base de datos de geolocalización volviéndola una base de datos inalámbrica, proporcionando información complementaria casi en tiempo real sobre ese titular; el sistema TVWS recibiría la baliza y elegiría los parámetros operativos para no interferir con él. (Borth et al., 2008)

En la siguiente figura se muestra un diagrama simplificado de cómo operarían estas tecnologías en TVWS.

Figura 10.*Operación simple de TVWS.*

Nota. Tomado de (Borth, Ekl, Oberlies, & Overby, 2008)

Otra recomendación dada fue el desarrollo de una base de datos en común donde cada usuario de TVWS registre su sistema, para que así cada usuario adicional pueda verificar las operaciones en dicha base de datos y usar información de ella para elegir sus parámetros operativos: potencia de transmisión, protocolo de transmisión, etc. Este registro en una base de datos de terceros ayudaría a permitir la coordinación dinámica de la selección de canales entre operadores de TVWS, lo cual proporciona una gestión de espectro adicional que ayuda a que el enfoque sin licencia de TVWS sea potencialmente más atractivo para los usuarios empresariales y los WISP (Proveedor de servicios de Internet inalámbrico). (Borth et al., 2008)

3.5.6 El Salvador

En este proyecto se desarrolló una infraestructura experimental de última milla de TVWS para desplegar servicios de banda ancha a zonas de difícil acceso y facilitar el desarrollo de nuevas aplicaciones usando tecnología de Internet de las cosas.

Esto se hizo mediante la implementación de dos estaciones base (BS) ubicadas cada una en una universidad diferente, las cuales harían conexión con 6 escuelas rurales donde se instalaron los equipos CPE.

En las BS las antenas se instalaron a una altura de 15 metros, la conexión a internet proporcionada por las universidades era de 100mbps. En los puntos CPE se instalaron equipos como: Antena TVWS, antena WIFI, Router, cámaras, sensor de movimiento y sensor de humo. En la siguiente figura se puede observar la instalación tanto de la antena transmisora (BS) como la receptora (CPE). (USAID, 2019)

Figura 11.

Instalación de antena transmisora y receptora.



Nota. Tomado de (USAID, 2019)

Como resultado de esta implementación se logró establecer una conexión de hasta 10 Mbps por enlace y una cobertura superior a 10Km de radio. Estos resultados evidencian el buen rendimiento de la tecnología TVWS y su útil uso para otras aplicaciones como: sistemas de alerta temprana, sistema de emergencias y mucho más, mediante el uso de IOT.

3.5.7 Colombia

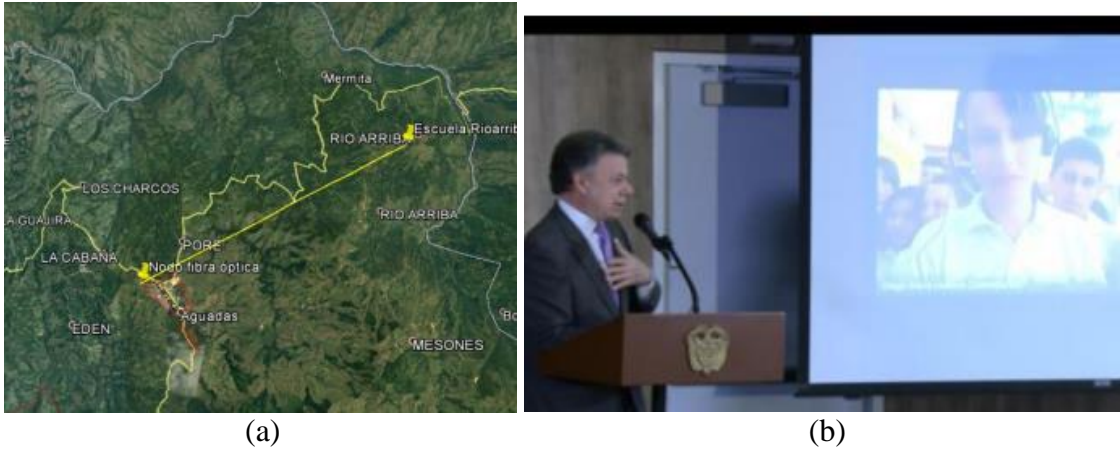
Esta tecnología ya ha sido usada antes en el país, el trabajo propuesto en (Espinosa, Arbeláez, & Castellanos, 2017), (Castellanos, 2013) describen un piloto que tiene lugar en el campo cerca de la ciudad capital de Bogotá, donde algunas mediciones de campo se llevaron a cabo a través de un dispositivo SDR (Software Defined Radio). Dicho dispositivo permitió a los ingenieros en el campo identificar espacios en blanco de TV que podrían usarse en el futuro para alimentar una base de datos TVWS. Por otro lado, la ANE (Agencia Nacional del Espectro), que es la agencia que controla el uso del espectro y su distribución en el país, en asociación con el Ministerio de Educación, el Mintic, la Administración Nacional de TV (ANTV) y las empresas Azteca y Microsoft, entre otros, desarrollaron tres pruebas piloto para proporcionar acceso a Internet a escuelas en diferentes regiones rurales, dejando resultados positivos en el uso de TVWS para este fin (Pineda & Hernandez, 2019), (ANE, 2017). La infraestructura desplegada se basó en el enfoque de la base de datos de geolocalización que ofrece resultados altamente positivos y demuestra la usabilidad de las oportunidades espectrales en las bandas de televisión.

Pilotos desplegados: Aguadas - Caldas

Esta prueba piloto se desarrolló en la Institución Educativa Rioarriba. Esta escuela tiene un total de 137 estudiantes y la distancia del enlace es 8,5km. Fue la primera escuela conectada con esta tecnología en Colombia.

Figura 12.

(a) Ubicación del enlace TVWS – Aguadas, Caldas. (b) Videollamada del presidente con profesora de la Escuela Rioarriba.



Nota. Tomado de (ANE, 2017)

Dibulla - La Guajira

Este piloto se ubicó en la Escuela La Punta de los Remedios, la distancia del enlace es de 5,5km y contaban con 56 estudiantes.

Figura 13.

(a) Fotos de la instalación de los radios y antenas del enlace TVWS Dibulla. (b) Ubicación del enlace TVWS - Dibulla, La Guajira



Nota. Tomado de (ANE, 2017)

Pamplonita – Norte de Santander

Se desarrolló en el Centro Educativo Sede El Páramo. La distancia del enlace fue de 4km y la cantidad de estudiantes que presentaban era de 64 alumnos.

Figura 14.

(a) Ubicación del enlace TVWS-Pamplonita, Norte de Santander. (b) Estudiantes con tabletas en la escuela El páramo.



Nota. Tomado de (ANE, 2017)

Los resultados de las pruebas piloto a nivel de conectividad y uso del espectro, fueron satisfactorios, llevando internet de banda ancha a escuelas que anteriormente no contaban con este servicio.

3.6. Control de Interferencias

Existen distintos enfoques sobre la tecnología TVWS: para algunos debe implementarse sólo en poblaciones pequeñas, en donde existe menor ocupación de espectro, lo que aleja el problema de interferencias. Sin embargo, Marta Suárez exdirectora de la ANE afirma que en Colombia se ha logrado que la TVWS funcione en zonas pobladas sin problemas significativos,

ya que se le puede emplear en cualquier lugar del país bajo un régimen libre, es decir, sin necesidad de licencia (Iglesias R. , 2019).

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) ha establecido recomendaciones para evitar interferencias a los usuarios primarios por el funcionamiento de los dispositivos de espacio en blanco, tanto fijos como móviles; estos deberán cumplir una serie de normas para su correcta operación. Dichas recomendaciones se presentan a continuación.

3.6.1. Dispositivos Fijos

Estos dispositivos operan en una ubicación específica establecida o fija y su potencia de transmisión deberá ser de 1 watt máximo, también se recomienda no ejecutar estos dispositivos en canales adyacentes a la señal de TV. Por otro lado, estos equipos deben contar con la capacidad de informar su ubicación geográfica a una base de datos y recibir de ella parámetros de operación. (Vásquez, 2018)

3.6.2. Dispositivos Portátiles

Los dispositivos portátiles deberán cumplir con una potencia de transmisión máxima, dependiendo de si operan en un canal adyacente o no; 40 mW si el canal es adyacente y 100 mW si no lo es. Para que la capacidad de geolocalización de los dispositivos TVWS sea efectiva, es importante que su precisión sea mínimo de 50 m. Otra condición era la capacidad de detección de espectro, pero esta fue retirada ya que se podía remplazar mediante el uso de geolocalización y el acceso a la base datos. (Vásquez, 2018)

En la siguiente Tabla se pueden observar los límites para la densidad espectral de potencia (PSD) y para las emisiones en canal adyacente, donde la recomendación es tomar la medida en un ancho de banda de 100 kHz.

Tabla 5.

Límite para la densidad espectral de potencia y emisiones en canales adyacentes.

Tipo de Dispositivo para las bandas de TV	Límites de potencia (6 MHz)	PSD Limites (100 kHz)	Límites Canal Adyacente (100 kHz)
Fijo	30 dBm (1 W)	12.6 dBm	-42.8 dBm
Personal/Portable (canal adyacente)	16 dBm (40 mW)	-1.4 dBm	-56.8 dBm
Solo para detección	17 dBm (50 mW)	-0.4 dBm	-55.8 dBm
Otro personal/portable	20 dBm (100 mW)	2.6 dBm	-52.8 dBm

Nota. Tomado de (Vásquez, 2018)

La ANE ha tomado en cuenta estas recomendaciones para elaborar la regulación de TVWS en Colombia, la cual es un conjunto de normas y características que debe cumplir el sistema para no causar interferencias al servicio primario, de esto se hablará en el siguiente apartado.

3.7. Regulación para TVWS en Colombia

El servicio de TV colombiano, “cataloga la señal de TV como nacional pública, nacional privada, regional pública, local con ánimo de lucro y local sin ánimo de lucro, así mismo cuenta con 69 canales de 6 MHz en las bandas UHF y VHF” (Arteaga & Navarro, 2016). “Nosotros tenemos canales de televisión de 6 MHz y adoptamos el estándar de TV digital DVB-T2, que es el estándar europeo, pero que en Europa funciona con canales de 8 MHz; nuestra preocupación al principio era que la tecnología espacios de blanco, cuando estuviese operando, fuera a interferir a

los canales de televisión, por lo cual se hicieron pruebas de laboratorio demostrando que no hay riesgos de interferencia para los usuarios de televisión” dijo Martha Suárez presidenta de la Dynamic Spectrum Alliance (DSA) y exdirectora de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) (Pautacio, 2016).

A continuación, se muestran las normativas desarrolladas por la ANE y publicadas mediante la resolución 181 de 2019.

3.7.1. Normativas Vigentes

La ANE ha elaborado la regulación para el uso de la tecnología TVWS mediante la resolución 181 de 30 de abril de 2019, donde aparecen las normativas a seguir para el correcto uso de esta tecnología.

Resolución 181 de 30 de abril de 2019. Por medio de la cual se simplifica el marco normativo relacionado con la planeación y atribución del espectro radioeléctrico (Agencia Nacional Del Espectro, 2019).

Además, actualmente publico la **Resolución 105 de 27 de marzo de 2020.** Esta es la última resolución sacada por la ANE por medio de la cual se actualiza el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias mejorando la estructura de la reglamentación, sin haber cambios significativos para la tecnología TVWS (Agencia Nacional Del Espectro, 2020).

3.7.2. Condiciones Técnicas y Operativas para Dispositivos de Espacios en Blanco (WSD)

La ANE presento las condiciones técnicas y operativas para la coexistencia garantizando la protección de los servicios primarios, asignados en la banda comprendida entre los 470 y 698MHz. En donde se encuentran las normas de protección, las potencias y alturas máximas, los

canales prohibidos a nivel nacional por zonas, y más. Dichas condiciones se pueden hallar en la base de datos de espacios en blanco (WSDB, por sus siglas en inglés) desarrollada por la ANE y con ellas generar una lista de canales disponibles que garanticen a las asignaciones existentes, la protección contra interferencias. Cabe resaltar que la ANE puede realizar cambios a estas normativas sin aviso previo.

A continuación se presentan las condiciones técnicas y operativas de la regulación para TVWS en Colombia, las cuales tendrán que cumplir todos los equipos TVWS que funcionen en el país.

Frecuencia de operación. La banda de operación dada para trabajar con la tecnología TVWS en Colombia está comprendida entre los 470 y 698 MHz; en ella se encuentran un total de 37 canales los cuales tienen un ancho de banda de 6MHz. La lista de canales que pueden utilizar los WSD se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.

Lista de canales utilizables para TVWS en Colombia.

Channel number	Low limit MHz	Central Frequency MHz	Up limit MHz	Channel number	Low limit MHz	Central Frequency MHz	Up limit MHz
14	470	473	476	33	584	587	590
15	476	479	482	34	590	593	596
16	482	485	488	35	596	599	602
17	488	491	494	36	602	605	608
18	494	497	500	38	614	617	620
19	500	503	506	39	620	623	626
20	506	509	512	40	626	629	632
21	512	515	518	41	632	635	638
22	518	521	524	42	638	641	644
23	524	527	530	43	644	647	650
24	530	533	536	44	650	653	656
25	536	539	542	45	656	659	662
26	542	545	548	46	662	665	668
27	548	551	554	47	668	671	674
28	554	557	560	48	674	677	680
29	560	563	566	49	680	683	686
30	566	569	572	50	686	689	692
31	572	575	578	51	692	695	698
32	578	581	584				

Nota. Tomado de (Agencia Nacional Del Espectro, 2019)

Como se puede ver en la tabla anterior falta el canal 37 dado que ya ha sido asignado para fines de micrófono inalámbrico, radioastronomía y telemetría médica. La base de datos de espacios en blanco (WSDB) calculará una lista con los canales que se encuentren libres y la enviará al dispositivo TVWS maestro que haya realizado una petición de canales disponibles.

Modo de operación. Los dispositivos TVWS tienen permitido operar mediante enlaces PtP o PtMP y estar ubicados en un sitio específico o fijo únicamente, no está permitido utilizar dispositivos portátiles o móviles. Debido a que el propósito de TVWS en Colombia es conectar áreas rurales aisladas, solo los dispositivos fijos, que permiten largas distancias de conexión, están autorizados.

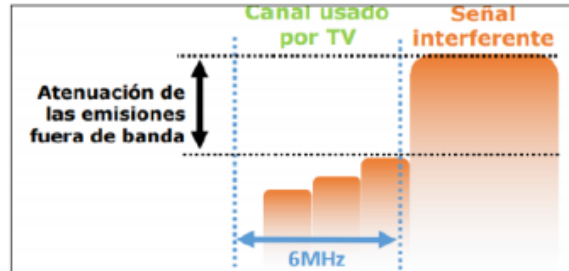
Densidad espectral de potencia. Un dispositivo TVWS podrá operar con una potencia de transmisión máxima de 1 W por canal de TV (30 dBm) o lo que es equivalente, la potencia entregada a la antena no debe superar los 12.6 dBm medidos en un ancho de banda de 100 kHz.

Ganancia máxima de la antena. Las antenas utilizada en los sistemas TVWS deben tener una ganancia máxima de 14 dBd, o lo que es igual a 16.15 dBi. Esta ganancia máxima fue seleccionada para permitir la mayoría de los tipos de antenas UHF, como Panel, Yagi y Log-Periodic.

Límite de emisiones no deseadas. Para evitar generar interferencias, la potencia de las emisiones en canales adyacentes o no deseadas debe estar por debajo de -42,8 dBm medidos en un ancho de banda de 100 kHz.

Figura 15.

Atenuaciones de las emisiones fuera de banda.



Nota. Tomado de (Aragon & Gomez, 2019)

Las emisiones no deseadas se pueden decir que son emisiones fuera del ancho de banda necesario de la señal, por lo cual, como se observa en la anterior figura, debe haber una atenuación de la emisión fuera de banda, tal que la potencia irradiada sea menor -42.8 dBm.

Control automático de potencia. Los dispositivos TVWS deben tener la capacidad de controlar automáticamente su potencia de tal forma que la transmisión de la señal se realice con la mínima potencia requerida para obtener una comunicación exitosa.

Alturas máximas de la antena. La altura de la antena dependerá de dos condiciones, la altura medida desde el suelo y la altura por encima del promedio del terreno. Por lo tanto, la antena no deberá estar a una altura mayor de 50 metros por encima del nivel del suelo. Ni tampoco deberán ubicarse en zonas geográficas que se encuentren a una altura superior a 800 metros por encima del promedio del terreno.

Petición periódica de la lista de canales disponibles. Los dispositivos maestros deberán obtener periódicamente una lista de canales disponibles para hacer uso del espectro.

Restricciones de operación. La ANE ha prohibido en algunas áreas geográficas del país el funcionamiento de dispositivos TVWS, al igual que en determinados canales, donde se le da prioridad a las asignaciones existentes con el objetivo de no generar interferencias a los servicios primarios que se encuentren operando en canales adyacentes. La ANE podrá cambiar sin aviso previo la disponibilidad de dichos canales y áreas prohibidas.

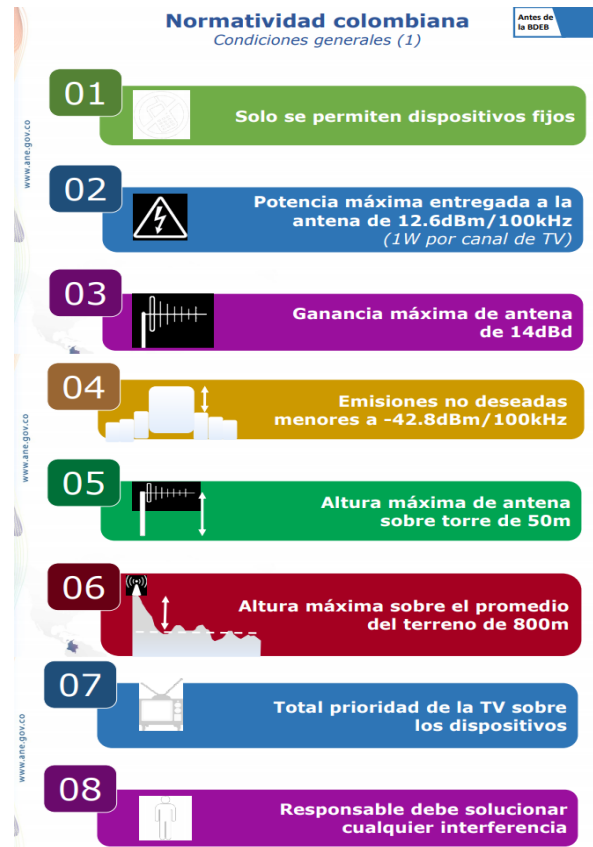
Disponibilidad de espectro. No habrá garantía de que una vez instalado un WSD, siempre se encuentre un canal disponible para transmitir, ya que si un usuario de servicios primarios se ubica en la misma zona tendrá la prioridad sobre el espectro.

Solución de interferencias. Si en algún momento se sospecha que un dispositivo TVWS está ocasionando interferencias, la ANE tendrá el derecho de realizar sus respectivas verificaciones técnicas. Si se encuentra que el dispositivo es el causante de dichas interferencias, el responsable del dispositivo estará en la obligación de presentar oficialmente las medidas que ejecutará para mitigar la interferencia, la ANE ordenará el cese de su transmisión mientras revisa y aprueba las medidas planteadas. “Si el causante de la interferencia no presenta las medidas que empleará para cesar la interferencia o no cumple aquellas que haya propuesto, se impondrán las sanciones previstas en la Ley 1341 de 2009” (Agencia Nacional Del Espectro, 2019, 2 de mayo).

En la Figura 16 se presenta un resumen de algunas de las características anteriormente mencionadas que debe cumplir el sistema para que se permita su uso.

Figura 16.

Normativa colombiana para el uso de TVWS.



Nota. Tomado de (Daza, 2017)

3.7.3. Protocolo de Comunicación con la WSDB (White Space Data Base)

La WSDB es “la herramienta de software administrada por la ANE que calcula la lista de canales disponibles y responde a un dispositivo de espacios en blanco, esta base de datos entrega dicha lista de canales disponibles que el dispositivo puede usar” (Agencia Nacional Del Espectro, 2019).

Esta petición por parte del WSD podrá ser efectuada de manera automática o manual, ambos procedimientos serán explicados a continuación.

Procedimiento automático para solicitud de canales disponibles.

En caso de que la solicitud sea automática, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- **Uso del espectro.** Los dispositivos de espacios en blanco solamente podrán conectarse a la WSDB designada por la ANE.
- **Capacidad de geolocalización.** Solo dispositivos con capacidad de geolocalización automática con un margen de error inferior a ± 50 metros.
- **Uso de múltiples canales.** Un WSD podrá utilizar más de un canal de la lista de canales disponibles que la WSDB le comunique.
- **Inicio de la comunicación de los dispositivos esclavos.** Un dispositivo esclavo realiza la petición de canales disponibles a la WSDB a través del dispositivo maestro asociado y deberá emplear inmediatamente un canal que pertenezca a dicha lista para continuar su operación.
- **Peticiones periódicas de canales disponibles.** Los WSD deberán realizar al menos una petición de canales disponibles a la WSDB cada 24 horas y solamente podrán emplear los canales incluidos en la lista más reciente.
- **Confirmación de uso de canales.** los dispositivos maestros deberán informar a la WSDB el canal de operación elegido. (Agencia Nacional Del Espectro, 2019)

Cabe resaltar que cada solicitud realizada por un dispositivo de espacios en blanco a la WSDB, va acompañada de los datos básicos de contacto del responsable del dispositivo:

- a) Número serial del dispositivo.
- b) Coordenadas de su ubicación (Datum WGS-84).
- c) Nombre de la persona/entidad responsable del dispositivo.

- d) Dirección física de la persona/entidad responsable del dispositivo.
- e) Correo electrónico de la persona/entidad responsable del dispositivo.
- f) Teléfono de la persona/entidad responsable del dispositivo. (Agencia Nacional Del Espectro, 2019)

Teniendo como premisa que dicha persona o entidad serán los responsables de solucionar las posibles interferencias llegaran a suceder.

Procedimiento manual para solicitud de canales disponibles.

En el procedimiento manual todas las solicitudes de canales disponibles se realizan por correo electrónico, teniendo en cuenta los siguientes requerimientos:

Se inicia con la solicitud de disponibilidad de canales. Se realiza enviando un correo electrónico a tvws@ane.gov.co, especificando de manera obligatoria la siguiente información:

- a) Nombre de la persona/entidad responsable del dispositivo.
- b) Tipo y número de documento de identidad de la persona/entidad responsable del dispositivo.
- c) Datos de contacto de la persona/entidad responsable del dispositivo: dirección física, correo electrónico y teléfono (fijo o móvil).
- d) Para cada uno de los WSD a desplegar: marca (o nombre del fabricante) y modelo, coordenada geográfica (datum WGS-84) junto al municipio y departamento de la ubicación donde será desplegado;
- e) Cantidad total de canales requeridos. (Agencia Nacional Del Espectro, 2019)

Es importante tener en cuenta que el plazo para obtener una respuesta afirmativa es de 10 días hábiles, si al pasar dicho lapso de tiempo aún no ha sido contactado por la ANE se presume que la solicitud se ha rechazado.

- **Requerimiento de aclaración de la solicitud.** En caso de que la solicitud no tenga toda la información, la ANE informará al el responsable que no es válida y hará un requerimiento con el fin de que se corrija lo necesario. El cual, deberá responder dentro de 3 días hábiles o se entenderá como desistida la solicitud.
- **Disponibilidad de canales.** En caso de que la solicitud sea válida, la ANE enviará un correo electrónico informando al responsable la disponibilidad de canales para los dispositivos a desplegar y su tiempo de validez.
- **Validez de la disponibilidad de canales.** Si el responsable desea continuar la operación de sus dispositivos, deberá realizar una nueva solicitud de canales a la ANE antes que finalice el tiempo de la disponibilidad.

NOTA: Si se lleva a cabo algún cambio en la asignación de frecuencias, la ANE informará al Responsable con la antelación suficiente para que éste realice una nueva solicitud de canales o apague los dispositivos de espacios en blanco que estén usando dichas frecuencias.

(Agencia Nacional Del Espectro, 2019)

3.8. Bases del Plan Nacional de Desarrollo (2018-2022)

En este apartado se presentan fragmentos del plan de desarrollo expuesto por el gobierno nacional con el fin de impulsar el uso de nuevas tecnologías para el manejo de la información y las comunicaciones. En donde se abordan iniciativas y programas diseñados para el cierre de la brecha digital presente en el país.

- **Pacto por la transformación digital de Colombia: Gobierno, empresas y hogares conectados con la era del conocimiento:** “Actualmente, 18 departamentos se encuentran por debajo del promedio nacional de suscriptores de Internet fijo por cada 100 habitantes, y los estratos 1, 2 y 3 tienen penetración de Internet en hogares por debajo del 50%” (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2019). Lo anterior da cuenta del nivel de desigualdad y falta de acceso a una gran variedad de información que genera la ausencia de conexión al mundo digital, en Colombia es de vital importancia que se trabaje en llevar de manera oportuna internet a todos los rincones del país dando prioridad a la población menos favorecida.

- **Algunas estrategias y programas:**
 - ✓ Fortalecer y adaptar el marco normativo del sector TIC teniendo en cuenta la realidad tecnológica y de mercados convergentes.
 - ✓ Mejorar la disposición de insumos para la conectividad y la velocidad de conexión a Internet.
 - ✓ Proveer a la población el acceso a las habilidades digitales básicas, así como herramientas, aplicaciones y contenidos que les permitan hacer uso productivo del entorno digital para solucionar sus problemas, generar ingresos y desarrollar sus actividades diarias.
 - ✓ Implementar políticas de promoción y medidas regulatorias para el despliegue de la red de última milla en segmentos de la población menos atendida.
 - ✓ Generar un modelo sostenible para la conectividad social en zonas urbanas y, en especial, rural.
 - ✓ Fortalecer el programa Computadores para Educar (CPE), con el fin de cerrar la brecha entre regiones. (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2019)

Las anteriores son algunas estrategias que ha venido llevando a cabo el gobierno colombiano por medio de MINTIC, en pro de cerrar la brecha digital a nivel nacional, cuyos beneficiarios son en su mayoría la población más vulnerable. A continuación se presenta un proyecto a modo de ejemplo:

Como se hizo con el **proyecto Conexiones Digitales**. La primera fase se adjudicó en 2013 con un total de 144.578 nuevos accesos de banda ancha para hogares de Viviendas de Interés Prioritario (VIP) y de estratos 1 y 2, distribuidos en 617 municipios. La segunda fase del proyecto se adjudicó en 2015, abarcó 42 municipios y un total de 40.339 accesos a banda ancha para hogares VIP y de estratos 1 y 2. Adicionalmente, se contempló la entrega de un terminal para las VIP sin costo alguno para los beneficiarios. (CONPES 3968 - Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia, 2019)

3.9. Plan Estratégico de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (2016-2019).

Bucaramanga, Colombia

Este apartado presenta las estrategias desarrolladas por el gobierno local para impulsar el uso de nuevas tecnologías para el manejo de la información y las comunicaciones. En el Plan de Desarrollo Municipal las TIC son un importante pilar por lo tanto, “cada una de las acciones, recomendaciones y fundamentos estratégicos del documento están pensadas para el empoderamiento del ciudadano, para la optimización de los recursos de información públicos y para el fortalecimiento de la industria TIC en la región” (Alcaldía de Bucaramanga, 2016-2019).

La alcaldía presenta un documento con el plan estratégico, teniendo como eje orientador y de manera transversal, la optimización de recursos públicos, pues se evidencian las múltiples

problemáticas debido al bajo acceso a la conectividad de algunos sectores en la ciudad y la necesidad de una pronta solución a las mismas, por supuesto teniendo presentes las opiniones y expectativas de la población en todo momento.

En el plan de desarrollo municipal se puede destacar la línea estratégica infraestructura y conectividad, cuyos componentes estratégicos y programas se identifican en gran medida con el presente trabajo de grado. Los cuales se mencionarán brevemente los de mayor relevancia:

- **Comunidades inteligentes.** Esta estrategia promoverá la participación de todos los residentes y negocios en la economía digital. La formación, el entrenamiento y los programas de promoción a la inclusión harán que se cree un interés por el desarrollo de propuestas y soluciones a partir del uso de tecnologías de información con potencial de generación de riqueza local.
- **Aumento de opciones de acceso a banda ancha de bajo costo.** La ciudad de Bucaramanga deberá trabajar de manera conjunta con los proveedores de acceso actuales y futuros con el fin de encontrar y diseñar productos y servicios que ofrezcan banda ancha según estándares internacionales a los usuarios.
- **Educación y atracción de la población joven hacia el uso intensivo de la tecnología.** El suministro de herramientas y recursos de manera que despierten interés en carreras y profesiones enfocadas en la tecnología será crítico en la construcción de ciudad digital y la consolidación de un ambiente tecnológicamente amigable. En este sentido el concepto de alfabetismo digital más reciente y generalmente aceptado expresa que es “Aquellas capacidades que le permiten a un individuo adaptarse al modo de vida, aprendizaje y trabajo en una sociedad digital. (Alcaldía de Bucaramanga, 2016-2019)

4. Modelos de Radiopropagación

Los modelos de radiopropagación son utilizados para modelar áreas geográficas de terreno irregular, con el fin de predecir las pérdidas a lo largo de la trayectoria de una señal. Estos modelos están diseñados para predecir la intensidad de la señal en una zona de recepción específica, donde cada método varía en su complejidad, enfoque y precisión (Treviño, 2003). Teniendo esto en cuenta, es importante determinar el modelo de propagación utilizado por los simuladores que se adapta mejor a las condiciones del terreno, especialmente las condiciones específicas que proporciona el macizo colombiano; esto con el fin de obtener resultados reales sobre el comportamiento de la propagación de las ondas electromagnéticas.

En TVWS, los modelos de propagación se desarrollan a partir de una base de datos con la geolocalización de las distintas fuentes emisoras de televisión, con esto se estima la disponibilidad de espectro para una ubicación específica; partiendo de esta información se determina la potencia de transmisión, la ganancia de antena y altura de posicionamiento. Por ejemplo, el modelo de propagación empleado en (Arteaga & Navarro, 2016) es una optimización del modelo de Deygout con el fin de obtener la cobertura de un transmisor de televisión (Deygout, 1966), este método puede trabajar normalmente entre los 150 y 1500MHz y calcula la pérdida en el camino por difracción ocasionada por obstáculos, para culminar sumándolas y generando la atenuación total. En la actualidad, existe una gran variedad de modelos de radiopropagación desarrollados para distintos escenarios. A continuación, se presentan los modelos más idóneos para TVWS.

4.1. Free Space Path Loss / Plane Earth

Desarrollado a partir de la ecuación de espacio libre de Friis, este modelo predice la reducción de potencia como función de la distancia entre el transmisor y el receptor, en relación con la frecuencia de funcionamiento (Yassini, 2014). Es utilizado para calcular el presupuesto de enlace y está dado por la siguiente ecuación:

$$PL_{FreeSpace} = 20\text{Log}(d) + 20\text{Log}(f) + 92.5 \quad (1)$$

Dónde:

- d es la distancia en kilómetros;
- f es la frecuencia en GHz;

Si se tiene en cuenta la reflexión con el suelo, se utiliza el modelo de Tierra Plana o de Dos Rayos. Este modelo, basado en óptica geométrica, considera tanto la transmisión directa, como una componente de propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y el receptor. El modelo, es considerado uno de los más adecuados para predecir la potencia de la señal en distancias de varios kilómetros tomando en cuenta que la antena del sistema debe tener una altura mínima de 50 metros. Sin embargo, no tiene en cuenta las ondas reflejadas en los edificios y árboles ni las variaciones estadísticas como algunos de los modelos más avanzados, pero puede proporcionar una buena aproximación de referencia para la pérdida por trayectoria. La ecuación es la siguiente:

$$PL_{PlaneEarth} = 40\text{Log}(d) - 20\text{Log}(h_t) - 20\text{Log}(h_r) \quad (2)$$

Dónde:

- d es la distancia en metros;
- h_t es la altura del transmisor en metros;

- h_r es la altura del receptor en metros;

Estos modelos serán una buena aproximación de nivel básico, sin embargo, cuando hay un terreno que no es perfectamente plano, estos modelos comienzan a variar.

4.2. Okumura-Hata Model

Este modelo es una formulación empírica de los datos obtenidos por Okumura para las pérdidas de propagación, por parte de Masaharu Hata, quien definió por medio de ecuaciones matemáticas, las características de propagación encontradas por Okumura, donde se desarrolló un set de curvas que entregan la atenuación relativa al espacio libre (que se usa como nivel de referencia) para una zona urbana sobre terreno casi-plano, en base a extensas mediciones, además de basarse en parámetros predefinidos. El modelo de Okumura es uno de los más simples y adecuados para las predicciones de atenuación para sistemas celulares y sistemas de radio terrestre en ambientes poblados. Sin embargo, la principal desventaja es que, a pesar de ser bueno en zonas urbanas, no lo es en zonas rurales. Es aquí donde Hata hace mejoras, proponiendo ecuaciones para ambientes suburbanos y rurales, considerando un terreno ligeramente montañoso, creando así el modelo de Okumura-Hata (Treviño, 2003).

Este modelo es válido en el rango de frecuencias de VHF y UHF, de los 150 MHz a los 1500 MHz y distancias de 1 km a 100 km; las pérdidas dentro de un área urbana se pueden expresar de la siguiente manera:

$$L_{urbano}[dB] = 69.55 + 26.16\text{Log}(f) - 13.82\text{Log}(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55\text{Log}(h_t))\text{Log}(d) \quad (3)$$

Dónde:

- d es la distancia entre transmisor y receptor en kilómetros;

- $150 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz}$;
- h_t es la altura del transmisor en un rango de 30 a 200 metros;
- h_r es la altura del receptor en metros en un rango de 1 a 10 metros;
- $a(h_r)$ es el factor de corrección para la altura efectiva de la antena receptora que es función del tipo de área de servicio;

Este factor de corrección se define según el tamaño de la ciudad. Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_r) = (1.1\text{Log}(f) - 0.7)h_r - (1.56\text{Log}(f) - 0.8) \text{ [dB]} \quad (4)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_r) = 8.29(\text{Log}(1.54h_r))^2 - 1.1 \text{ [dB]} \quad \text{para } f < 300\text{MHz} \quad (5)$$

$$a(h_r) = 3.2(\text{Log}(11.75h_r))^2 - 4.97 \text{ [dB]} \quad \text{para } f > 300\text{MHz} \quad (6)$$

Ahora, de la ecuación (3) para un área suburbana la ecuación queda de la siguiente forma:

$$L[\text{dB}] = L_{\text{urbano}} - 2(\text{Log}(f/28))^2 - 5.4 \quad (7)$$

De la misma manera para las áreas rurales las pérdidas se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

$$L[\text{dB}] = L_{\text{urbano}} - 4.78(\text{Log}(f))^2 + 18.33\text{Log}(f) - 40.94 \quad (8)$$

4.3. Stanford University Interim (SUI) Model

El modelo Interino de la Universidad de Stanford o SUI es una extensión del modelo de Hata. Es válido cuando la altura de la antena de la estación base esta entre 10 y 80 m y la altura de

la antena CPE entre 2 y 10 m y para un rango de frecuencia entre 0 y 2000 MHz. El modelo SUI se desarrolló para mejorar los modelos de pérdida de trayectoria para tener en cuenta los parámetros estadísticos en el canal que muchos otros modelos ignoran. El modelo está diseñado para su uso en tres terrenos diferentes, terreno montañoso con densidades de árboles de moderadas a pesadas, se relaciona a la mayor cantidad de pérdidas (Categoría A), terreno plano con abundantes árboles o terreno montañoso con poca vegetación, asociado a pérdidas intermedias (Categoría B), en su mayoría terreno plano con densidades de árboles ligeras, asociado a la menor cantidad de pérdidas (Categoría C) (Barrios & Arjona, 2018), (IEEE Standard, 2009).

Las pérdidas para el modelo SUI vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$PL[\text{dB}] = A + 10\gamma \text{Log}(d/d_0) + X_f + X_h + S \quad (9)$$

Donde A es una cantidad que viene dada por las pérdidas por trayectoria en el espacio libre mostrada en la ecuación (10):

$$A = 20\text{Log}(4\pi d_0/\lambda) \quad (10)$$

Donde d_0 es una distancia de referencia igual a 100 m y λ es la longitud de onda. γ corresponde al exponente de pérdidas por dispersión dado por la ecuación:

$$\gamma = a - bh_b + c/h_b \quad (11)$$

En la cual, h_b es la altura de la estación base, a, b y c son constantes que dependen de la categoría del terreno. X_f y X_h son factores de corrección para la frecuencia y para la altura del receptor respectivamente y se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$X_f = 6\text{Log}\left(\frac{f}{2000}\right) ; X_h = H\text{Log}\left(\frac{h_r}{2000}\right) \quad (12)$$

Por último, S es el factor de desvanecimiento y al igual que otros parámetros del modelo, su valor se encuentra en la siguiente tabla.

Tabla 7.

Parámetros del modelo SUI.

Parámetros del modelo	Categoría del terreno		
	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a	4,6	0,0075	12,6
b	4	0,0065	17,1
c	3,6	0,005	20
S	10,6	9,6	8,2
H	10,8	10,8	20

Nota. Tomado de (Barrios & Arjona, 2018)

4.4. Longley-Rice (ITM) Model

Uno de los métodos de análisis de propagación de la señal comúnmente usados para aplicaciones de TVWS es el conocido como Longley-Rice, que toma en cuenta la orografía del terreno entre otros factores. Este modelo es incorporado en el programa Radio Mobile. Usando datos digitales del terreno disponibles, bases de datos de cobertura de follaje y características eléctricas del suelo, el software utiliza este modelo para predecir la pérdida de trayectoria. El modelo Longley-Rice utiliza modelos estadísticos para determinar un rango de valores que uno podría esperar ver en una ubicación determinada. Cambiar la variabilidad de diferentes parámetros cambiará que tan estricto el usuario necesita que los resultados se basen en el rendimiento requerido (Borda, 2019).

Este modelo, también conocido como ITM (Irregular Terrain Model), predice las pérdidas promedio para frecuencias entre 20 MHz y 40 GHz, y para trayectorias entre 1 y 2000 km. Para aplicar este método de propagación es necesario tener la frecuencia de la señal en MHz, la distancia de la trayectoria de la señal en Km y las alturas de la antena transmisora y receptora en metros, la polarización de la antena que puede ser horizontal o vertical (Cuevas, 2017). El nivel de atenuación de la señal está definido por la siguiente expresión:

$$W(t, l, s) = w_0 + y_s(s) + \delta_L(s)y_L(l) + \delta_T(s)y_T(t) \quad (13)$$

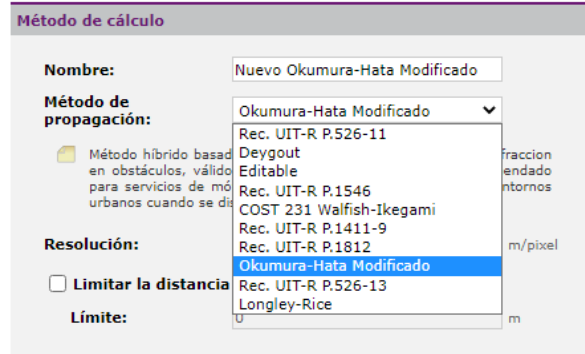
Donde W es la atenuación total, w_0 representa la atenuación en el espacio libre, y las variables aleatorias $y_s(s)$, $y_L(l)$ y $y_T(t)$ representan las atenuaciones debidas a condiciones topográficas del lugar, cambios atmosféricos y localización del transmisor y receptor. La variable δ representa las desviaciones que los niveles de atenuación pudieran presentar (Cuevas, 2017).

4.5. Comparación de los Modelos

Para comparar los modelos de radiopropagación se pueden realizar simulaciones mediante el simulador Xirio online, es gratuito y cuenta con una variedad de modelos para compararlos entre sí y verificar su uso (Figura 17). Al simular la cobertura con algunos de los métodos anteriormente presentados, se obtienen diferentes medidas de potencia e intensidad de campo de la señal, como se observa en la figura 18; para poder deducir que método es el más acertado se tendría que medir estas características en campo, y comparar cual se asemeja más. Aunque estudios han demostrado que el modelo Longley-Rice es el más utilizado y acertado para la tecnología TVWS (Kasampalis, Lazaridis, & Zaharis, 2015), (Cuevas, 2017). Por otro lado, en el capítulo 7 se presenta una simulación desarrollada en Radio Mobile para la cobertura que se tiene de un área mediante el modelo Longley-Rice utilizado por el software.

Figura 17.

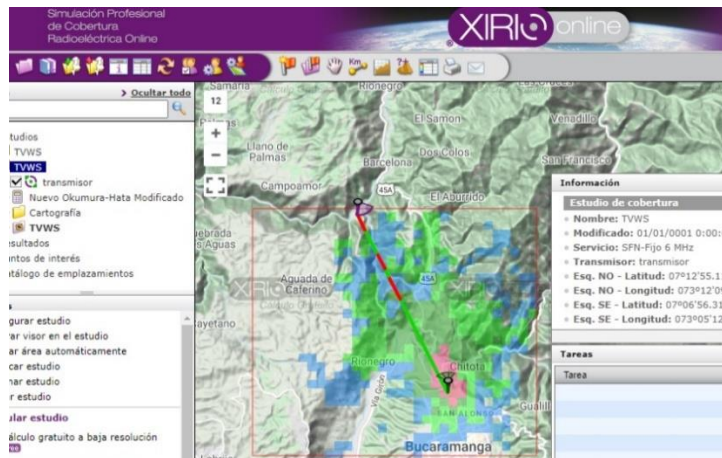
Modelos de radiopropagación disponibles en Xirio.



Nota. Tomado de (Xirio, 2020)

Figura 18.

Simulación de cobertura en Xirio.



Nota. Tomado de (Xirio, 2020)

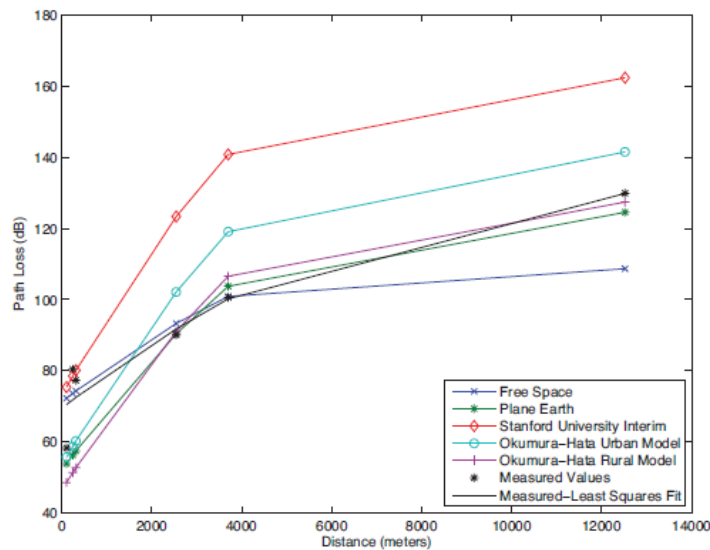
En la literatura se encuentran trabajos realizados con el fin de comparar estos modelos de radiopropagación, como en (Yassini, 2014) donde se comparan los modelos de Free Space, Plane Earth, SUI y Okamura-Hata (Figura 19); en este estudio se encontró que el modelo de pérdida por trayectoria Free Space es el que se aproxima más a la pérdida de trayectoria observada entre la

estación base y los clientes a corta distancia. En este caso, la estación base está situada a una altura inferior a la de los clientes y a una altura de antena lo suficientemente alta como para que la pérdida de espacio libre sea la causa predominante de pérdida entre las unidades. Entre más grande sea la distancia, el efecto debido al follaje y los reflejos del suelo, se verán mayormente reflejados, es por esto que los modelos que más se aproximan en el caso de una larga distancia son el Okamura-Hata para áreas rurales y el Plane Earth, ya que tienen en cuenta estos factores.

En el caso donde la pérdida por trayectoria fuera mucho mayor, se debería a la proximidad a edificios y árboles entre la estación base y el CPE. Aunque las señales TVWS en las frecuencias UHF tienen menos pérdidas a través de estos, es claro que la propagación a través de ellos causa más pérdidas que a través del aire. Es por eso que la medición en este caso se acercaría más al modelo SUI, que fue diseñado con datos tomados en entornos suburbanos y urbanos, teniendo en cuenta los reflejos y las pérdidas debidas a los edificios.

Figura 19.

Comparación de modelos de radiopropagación.



Nota. Tomado de (Yassini, 2014)

En (Lysko, Burger, & Hagopian, 2019) utilizando el modelo de propagación de Okumura-Hata, estiman que, asumiendo un margen de enlace de 10 dB, un par de dispositivos TVWS con antenas de 14 dBi instaladas en postes de 5 m de altura pueden comunicarse a una distancia de hasta 17 km y mediante el uso de un poste de 10 m de altura puede casi duplicar los rangos de comunicación para TVWS.

Es por esto que el entorno en el que se implementa el sistema tendrá un gran efecto sobre qué modelos deben usarse para predecir el alcance y el rendimiento del sistema. La correcta selección del modelo de radiopropagación para una aplicación en un entorno específico dependerá de la amplia comparación que se lleve a cabo en cuanto a parámetros del entorno y cantidad de modelos.

4.6. Diseño de Radioenlaces

Diseñar un radioenlace conlleva a tener en cuenta los diferentes parámetros involucrados en esta disciplina, como lo son: la selección de la banda de frecuencias, los tipos de antenas a utilizar junto a los dispositivos de radiocomunicación, otros aspectos como el presupuesto de potencia, la estimación de los niveles de ruido, interferencia y la zona de Fresnel, el conocimiento de fenómenos de propagación radioeléctrica, entre otras. Para esta tarea el uso de software desarrollado para simulación con cartografía digital del terreno constituye una potente herramienta de ayuda, haciendo posible determinar las mejores localizaciones para instalar las antenas y estimar su alcance y cobertura (Ramos, Diseño de Radioenlaces, s.f.). En esta sección se hará mención del presupuesto de potencia y la zona de Fresnel.

4.6.1. Presupuesto de Enlace de Radio

Al igual que la selección de los dispositivos de radiocomunicación junto con sus parámetros de operación, uno de los aspectos de mayor importancia que determinarán el buen funcionamiento de un sistema de transmisión de datos inalámbrico es la correcta planificación del enlace radioeléctrico, sólo con un buen presupuesto de enlace de radio entre transmisor y receptor, se puede conseguir mitigar las interferencias y los desvanecimientos de la señal, generando un excelente rendimiento del sistema.

La planificación del radioenlace de un sistema de transmisión de datos empieza con el presupuesto de potencia, el cual comprende el cálculo de ganancias y pérdidas desde el radio transmisor, a través de cables, conectores y espacio libre hacia el receptor. Para ello se debe contar con las especificaciones técnicas de los dispositivos de radio como la potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor, además de la ganancia de las antenas, y tener conocimiento de la banda de frecuencias en la que se va a trabajar, al igual que las características climáticas y geográficas de la zona.

Figura 20.

Componentes del presupuesto de potencia.



Nota. Tomado de (Buettrich, 2007)

El Presupuesto de Potencia (PP) nos dirá si la potencia con la que llega la señal al receptor es la suficiente para mantener la conexión. Está dado por (Buettrich, 2007):

$$PP = \text{PIRE}[\text{dBm}] - \text{FSL}[\text{dB}] - \text{Precipitaciones}[\text{dB}] + G.\text{Antena RX}[\text{dBi}] - \text{Pérdidas en la Línea RX}[\text{dB}] \quad (14)$$

Donde el PIRE es la Potencia Irradiada Isotrópica Efectiva:

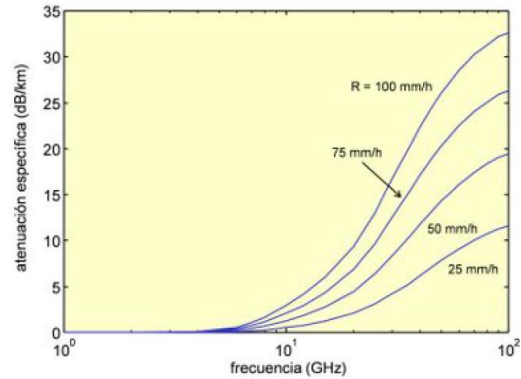
$$\text{PIRE} = \text{Potencia TX} [\text{dBm}] - \text{Pérdidas en la línea TX} [\text{dB}] + G.\text{Antena TX} [\text{dBi}] \quad (15)$$

La atenuación total en un enlace se compone de la atenuación del espacio libre, la atenuación por precipitaciones, las pérdidas debido a la vegetación y la atenuación adicional debida a los obstáculos.

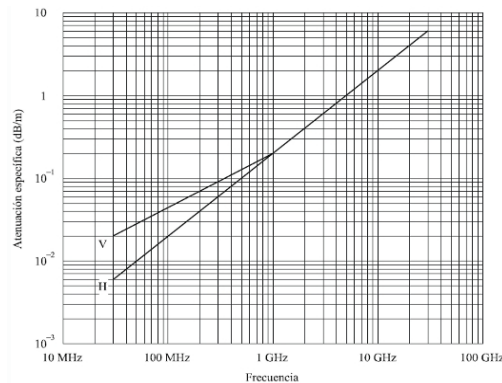
La FSL son las pérdidas en el espacio libre, donde f es la frecuencia de operación y d es la distancia entre el transmisor y el receptor:

$$\text{FSL}[\text{dB}] = 20\text{Log}(f [\text{GHz}]) + 20\text{Log}(d [\text{km}]) + 92.5 [\text{dB}] \quad (16)$$

Las precipitaciones son el valor de la atenuación por lluvias en la zona, este valor puede ser estimado con el uso de curvas de atenuación por lluvia en función de la frecuencia y para distintos valores de precipitación usando la Figura 21. Para las frecuencias en que opera TVWS las pérdidas que agrega esta atenuación son despreciables, como puede observarse estas pérdidas son considerables para frecuencias por encima de 1 GHz.

Figura 21.*Curvas de atenuación por lluvias.**Nota.* Tomado de (Lameda & Durante, 2007)

Acá también se puede agregar la atenuación por vegetación, el valor de esta atenuación puede ser estimado con el uso de curvas de atenuación específica en zona boscosa en función de la frecuencia como se muestra en la Figura 22. Basados en esta curva se puede hacer una aproximación de cuantos dB's se pierden por cada metro de vegetación que atraviesa la señal. Esta atenuación para las frecuencias TVWS es de alrededor de 0,15 dB/m, esta pérdida relativamente baja hace posible que los enlaces puedan operar a través de una cantidad limitada de vegetación.

Figura 22.*Atenuación específica en zona boscosa.**Nota.* Tomado de (Ramos, Cálculo de la atenuación por vegetación en un radioenlace, 2013)

Las pérdidas en la línea consta de las pérdidas en el cable y en los conectores, estos valores se toman de los datasheet de los elementos a utilizar. Los valores típicos de pérdidas en el cable varían entre 0,1 dB/m y 1 dB/m, es por ello que el cable de la antena debe ser lo más corto posible; por otro lado la pérdida en conectores es de aproximadamente 0,25 dB por conector. Además, los protectores contra descargas eléctricas que se usan entre las antenas y el radio deben ser presupuestados hasta con 1 dB de pérdida, dependiendo del tipo, los de buena calidad sólo introducen 0,2 dB. (Buettrich, 2007)

Se puede esperar que la atenuación debida a obstáculos para TVWS sea similar a la de 5,8 GHz, siempre que se disponga de al menos una línea de visión parcial y el tamaño del obstáculo sea menor que la longitud de onda.

Por último, el margen de operatividad del sistema es la diferencia entre la señal recibida en el receptor (PP) y su sensibilidad. Para que el enlace sea exitoso, este margen debe ser positivo de al menos 10 dB.

$$\text{Margen [dB]} = PP - \text{Sensibilidad del receptor [dBm]} \quad (17)$$

4.6.2. Zonas de Fresnel

Una de las cosas más importantes a la hora de diseñar un radioenlace punto a punto es calcular las zonas de Fresnel, estas nos permiten saber el radio que los obstáculos entre antenas deben respetar para que no se generen problemas de pérdida de señal.

Podemos imaginar las zonas de Fresnel como varias elipses en 3D. Todas tienen la misma distancia entre antenas, pero cada una dispone de un radio al centro cada vez mayor. La primera zona es la que más afecta a la intensidad de la señal y es la que generalmente se calcula.

Para la zona de Fresnel se tiene que:

$$r = \sqrt{\frac{d1 * d2}{d} * \lambda} \quad (18)$$

Figura 23.

Zona de Fresnel.



Nota. Tomado de (Martínez, 2018)

$d1$ = distancia a la que queremos calcular la zona desde el transmisor [m]

$d2$ = distancia a la que queremos calcular la zona desde el receptor [m]

d = distancia entre transmisor y receptor [m]

λ = longitud de onda [m] (velocidad de la luz [m] / frecuencia [Hz])

r = radio de la primera zona de Fresnel [m]

Lo ideal es que la primera zona de Fresnel no esté obstruida, pero normalmente es suficiente despejar el 60% del radio de la primera zona de Fresnel para tener un enlace satisfactorio. Por lo general cualquier obstáculo debería respetar la zona de Fresnel, pero para la tecnología TVWS, por sus ventajas ya mencionadas, solo es suficiente con que esta zona no sea obstruida por obstáculos de gran proporción como lo son las montañas.

5. Infraestructura Tecnológica

En este capítulo se presenta la infraestructura de la red necesaria para implementar la tecnología TVWS, se explicarán los equipos necesarios, los dispositivos TVWS disponibles, la matriz de infraestructura tecnológica y por último el diseño y simulación de una antena Logarítmica Periódica utilizada en TVWS

En la siguiente figura se muestra un esquema de la infraestructura de la red a montar al momento de implementar la tecnología TVWS.

Figura 24.

Infraestructura de una red TVWS.



Nota. Tomado de (Niño & Díaz, 2017)

A manera general el sistema consta de una estación base (BS), la cual está conformada por un radio (WSDM - Dispositivo de Espacios en Blanco Maestro), el cual va a generar la señal que lleva los datos para la conexión a internet, y una antena que transmitirá esta señal; al otro lado del sistema (punto rural) se encontrará una antena de recepción junto con el radio CPE (Equipo local

de cliente o WSDS – Dispositivo de Espacios en Blanco Esclavo). Además, se debe instalar un Router inalámbrico para las conexiones por WiFi de dispositivos finales (usuario final) como celulares, portátiles, tabletas, etc.

A continuación, se presenta una breve descripción de los elementos que conforman el sistema de transmisión de datos.

Base de Datos

La base de datos se utiliza para almacenar información relevante para su envío a la estación base. Cuenta con datos de operación como canales disponibles, nivel máximo de potencia, altura máxima de las antenas, frecuencias libres y utilizadas a nivel nacional, ubicación de otros equipos de radio, etc. Toda la información almacenada permitirá entregar una lista actualizada de canales disponibles que el dispositivo puede usar, de manera que el comportamiento del dispositivo TVWS se establecerá de acuerdo con la información recibida, evitando así interferencias con estaciones primarias o servicios que operen en canales adyacentes.

Antenas

El sistema debe tener mínimo 2 antenas para un enlace punto a punto o más de dos para un enlace punto a multipunto dependiendo de cuantos CPE's se tengan; hay dos tipos de antenas que se pueden utilizar para esta tecnología, antenas de panel y antenas logarítmicas periódicas; las primeras son antenas sectoriales que permiten obtener grandes coberturas idealmente para sistemas PtMP, para uso en la estación base, las segundas son Antenas direccionales eficaces para enlaces PtP, estas enfocan su radiación hacia una sola dirección logrando llegar a mayores distancias, se utilizan tanto para los CPE como para la estación base.

Figura 25.

Antenas de Panel y Logarítmica.



Nota. Tomado de (zcmayoristas, 2020)

Dispositivo de Espacios en Blanco (WSD – White Space Device)

Son radios con la capacidad de utilizar los espacios en blanco para transmitir y recibir datos mediante la interacción con una base de datos de espacios en blanco y el uso de geolocalización. Se clasifican en dispositivos maestros y dispositivos esclavos.

El **dispositivo maestro** (WSDM) es el radio que estará ubicado en la estación base, este tendrá acceso a Internet mediante la conexión con el Router o Switch que se encuentre disponible en el lugar, este radio realiza la petición de canales libres directamente a la base de datos para él y para sus dispositivos esclavos asociados con el fin de hacer uso del espectro. Por otra parte, el **dispositivo esclavo** (WSDS), es el radio ubicado en el punto rural, por medio del enlace con el dispositivo maestro, este dará acceso a internet al usuario final mediante un Router inalámbrico (celular, Tablet) o un Switch (computadores); cabe recordar que este radio realiza la petición de canales disponibles a la base de datos a través del dispositivo maestro. Los dispositivos TVWS disponibles en el mercado se mostrarán más adelante

Router (inalámbrico)

En la estación base es el encargado de interconectar el dispositivo maestro con la red de internet (a no ser que haya un Switch) para el enlace de datos con el dispositivo esclavo. En la ubicación del CPE, su función principal es compartir internet, a través de cable, ADSL o WiFi estableciendo comunicación entre el dispositivo TVWS y los dispositivos finales como se observa en la Figura 32.

Figura 26.

Router inalámbrico.



Nota. Tomado de (tp-link, 2020)

Un Router inalámbrico o WiFi provee acceso a la red local y a internet de forma inalámbrica a cualquier dispositivo, ya sea Tablet, impresoras o Smartphone que estén dentro del alcance de la señal, mediante conexiones de 2,4 GHz o 5 GHz en las bandas de frecuencia libres. Generalmente viene equipado de fábrica con 4 puertos para red local por cable (LAN) y un puerto Ethernet para conectar la entrada de internet (puerto WLAN).

Conmutador de red (Switch)

Un Switch o conmutador es un dispositivo de interconexión utilizado para conectar equipos en red formando lo que se conoce como una red de área local (LAN), estos se utilizan cuando no

es suficiente el uso del Router dado que hallan varios equipos (computadores) a conectar a la red, es aquí cuando es necesario un Switch para interconectar los computadores a la red con lo cual se establecerá la comunicación con el servicio de acceso a Internet. Estos van conectados al Router.

Figura 27.

Conmutador de red o Switch.



Nota. Tomado de (tp-link, 2020)

Cables

Son necesarios dos tipos de cables en esta red, cable coaxial y cable Ethernet. El uso de cable Ethernet permitirá la conexión entre el radio de TVWS y el dispositivo Wi-Fi para dar acceso a la red. Por otro lado, mediante el uso de cable coaxial se establece la conexión entre el radio y la antena, teniendo en cuenta que la distancia entre ellos debe ser lo más corta posible.

Figura 28.

Cable Coaxial Rg6 y Cable De Red UTP.



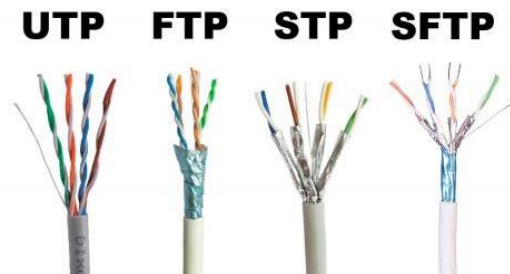
Nota. Tomado de (Mercado Libre, 2020)

Estos cables tienen una inscripción que aparece impresa en el exterior del cable que dan información respecto a qué categoría pertenece el cable de red, la cual refiere al rendimiento del

cable en cuestión de velocidad de transmisión y frecuencias de funcionamiento, también acostumbra a indicarse el tipo de apantallamiento que lo protege. Este apantallamiento viene recogido por las siglas UTP, FTP, STP o la mezcla de algunos de ellos como es el caso del SFTP.

Figura 29.

Apantallamiento presente en cables Ethernet.



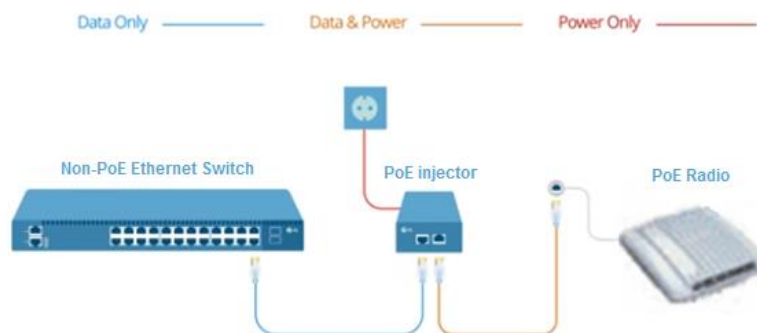
Nota. Tomado de (Rubén, 2018).

Fuente de alimentación PoE

Los radios pueden operar sin tener cerca una conexión a la red eléctrica, esto se puede lograr mediante el uso de la tecnología PoE (Power over Ethernet). Esta tecnología es capaz de suministrar energía y datos simultáneamente en cableado Ethernet de par trenzado.

Figura 30.

Conexión fuente de alimentación PoE.



Nota. Tomado de (Don, 2019)

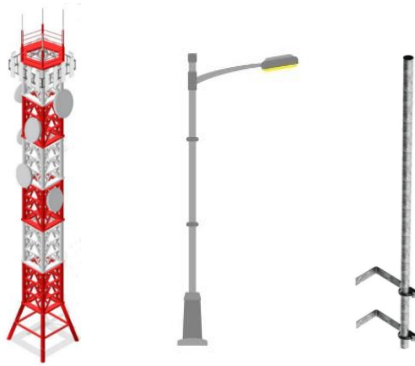
La fuente añade energía (de la fuente de alimentación externa) a la misma línea que transmite datos que provienen de un switch no PoE o del dispositivo TVWS, con el fin de alimentar el radio como se puede observar en la anterior figura.

Torres, postes o mástiles

Para ubicar la antena y que tengan línea de vista parcial entre ellas, se necesita el uso de una torre de telecomunicación, en caso de que el lugar cuente con una ya que su instalación sería costosa, principalmente para la estación base y un poste de alumbrado público o un mástil para el punto CPE, un poste sería una opción viable si se encuentra próximo al lugar destinado a proveer con la conexión a internet, lo ideal sería instalar un mástil en el techo o azotea de la edificación.

Figura 31.

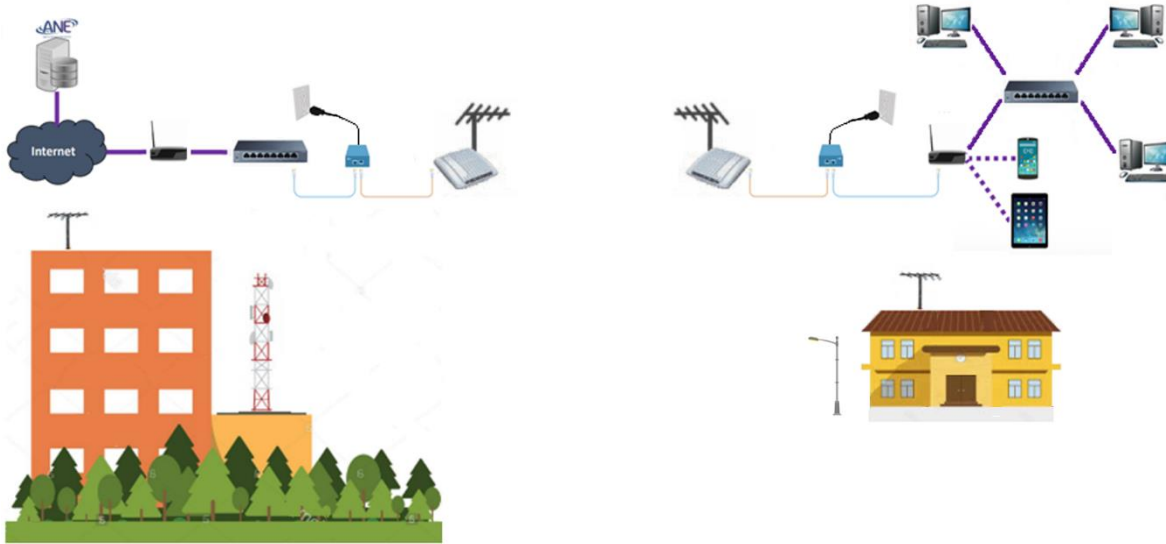
Torre de telecomunicación, poste de alumbrado público y mástil.



La siguiente figura presenta un esquema general de los lugares y elementos que conforman el sistema de transmisión de datos.

Figura 32.

Esquema general del sistema de transmisión de datos para el despliegue de la tecnología TVWS.



La figura 32 muestra nuestro caso de estudio, donde se busca brindar un servicio de transmisión remota a zonas rurales. Se tiene la parte transmisora (estación base) del lado izquierdo y la parte receptora (CPE) del lado derecho. La BS cuenta con un Router con conexión a internet y por tal a la base de datos, un Switch conectado a una fuente PoE y por último el radio y la antena TVWS; el punto CPE está conformado por la antena y el radio TVWS que procesa la señal y la traduce para que coincida con la familia de protocolos 802.11 incorporados en los puntos de acceso WiFi y el equipo de usuario; este radio es alimentado por la fuente PoE, el cual entrega los datos a un Router para que este los disponga a los diferentes equipos inalámbricos (celular, Tablet, portátil) por WiFi o mediante cable a un Switch para generar una red de área local.

5.1. Equipos TVWS

A continuación, se muestran los dispositivos TVWS disponibles en el mercado que han sido autorizados por la FCC, agencia reguladora en EE.UU. La FCC ha autorizado doce productos diferentes que se muestran en la Tabla 8. Cada producto cuenta con un FCC ID, el cual es una identificación para productos inalámbricos en el mercado estadounidense. Al realizar la búsqueda de este ID en la “FCC ID Application Database” se pueden encontrar especificaciones técnicas como potencia de operación, rango de frecuencias, manual de usuario e instalación, fotografías del hardware y los resultados de las pruebas realizadas por la FCC previo a la autorización del producto. (Carro, Hernández, & Beltramelli, 2019)

Tabla 8.

Productos autorizados por la FCC.

Proveedor	Descripción	FCC ID
8Harmonics	Cognitive radio for global WS market	2AASTGWS-3000
Adaptrum	Fixed TV band device	A2UACRS20F
Adaptrum	Personal/portable TV band device	A2UACRS20P1
Adaptrum	TV band device	A2UACRS10
Carlson Wireless Tech.	WS broadband Radio	OPA-RC2-BS
Carlson Wireless Tech.	WS broadband Radio	OPA-RC2-CPE
FCC Laboratory	Test grantee co test	OPS1
Koos Technical Services	Fixed TVDB	ZBGAWR-1
Koos Technical Services	WS radio controlled by database	ZBGAWR2UHF
Meld Technology	Low power fixed TVBD	OKVMT300
Metric Systems Corp.	Broadband VHF/UHF networking radio system	2ABCU-50739
Redline Communications	WS device with geo-location-fixed	QC8-RDL3000RMF

Nota, Tomado de (Carro, Hernández, & Beltramelli, 2019)

Se ha investigado sobre las características de los equipos de cuatro proveedores: 6Harmonics, Adaptrum, Carlson Wireless y Redline Communications.

- **6Harmonics**

Figura 33.

Radio de 6Harmonics.



Nota. Tomado de (6Harmonics, 2016)

En la siguiente tabla se presentan las características del radio disponible del fabricante 6Harmonics.

Tabla 9.

Características del equipo de 6Harmonics.

Característica	Valor
Throughput Rates	33 Mbps
Channel Bandwidth	6MHz
Operating Frequency	470MHz-698MHz
Transmit Power	23dBm
Geolocation	No
Link Distance	>20 km
Latency	<5 ms

System Power	PoE
Power Consumption	<25 W Transmit Mode 5W Receive Mode
Receive Sensitivity	-98 dBm
Adjacent Channel Emission	-41dBm
Modulation	Adaptative OFDM from BPSK ½ rate to 64QAM 5/6 rate
System Interfaces	10/100Base-T Ethernet

Nota. Tomado de (6Harmonics, 2016)

Por otra parte, el fabricante también dispone de las antenas necesarias para implementar la tecnología. En la figura 34 se pueden observar las antenas presentadas por 6Harmonics, y en la siguiente tabla se muestran sus características.

Tabla 10.

Características de las antenas 6Harmonics.

Log-Periodic Antenna	Panel Antenna
Frecuency Range: 470- 700 MHz	Frecuency Range: 470- 700 MHz
Polarization: Vertical	Polarization: Vertical
Gain: 10.3 dBi	Gain: 7.8 dBi
Front to back ratio: >25 dB	Front to back ratio: >22 dB
Impedance: 50 Ω	Impedance: 50 Ω
VSWR: <1.8	VSWR: <1.7
Dimensions: 110x30 cm	Dimensions: 980x350x172 mm

Beam Width: 70°

Beam Width: 90°

Nota. Tomado de (6Harmonics, 2016)

Figura 34.

Antenas de 6Harmonics.

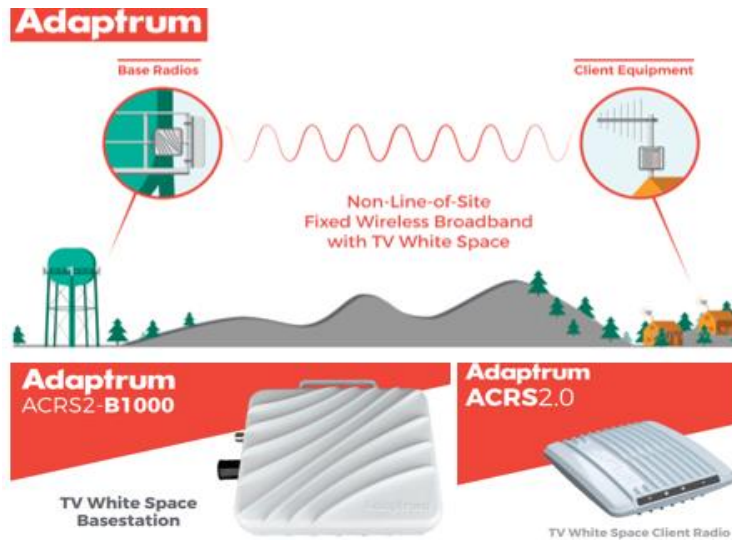


Nota. Tomado de (6Harmonics, 2016)

- **Adaptrum**

Figura 35.

Radio de Adaptrum.



Nota. Tomado de (Adaptrum, 2017)

En la siguiente tabla se presentan las características del radio disponible del fabricante Adaptrum.

Tabla 11.

Características del equipo de Adaptrum.

Característica	Valor
Throughput Rates	26.7 Mbps
Channel Bandwidth	6MHz
Operating Frequency	400MHz - 1GHz
Transmit Power	28dBm
Geolocation	Si
Link Distance	10 km
Latency	15ms
System Power	PoE
Power Consumption	30 W Tx Mode / 20 W Rx Mode
Receive Sensitivity	-98 dBm
Adjacent Channel Emission	< -55dBm
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
System Interfaces	10/100 Ethernet

Nota. Tomado de (Adaptrum, 2017)

Cabe recalcar que la sensibilidad de -98 dBm es la requerida para una tasa de transmisión mínima de 4 Mbps utilizando la modulación QPSK $\frac{1}{2}$, para obtener mayores tasas de transmisión es necesario valores más altos de sensibilidad, esto se puede observar en la siguiente figura extraída del datasheet del equipo.

Figura 36.

Valores de sensibilidad para diferentes tasas de transmisión.

SNR (dB)	6MHz Ch.		8MHz Ch.		Modulation
	Sensitivity (dBm)	Rate (Mbps)	Sensitivity (dBm)	Rate (Mbps)	
3.5	-98.0	4.0	-96.75	5.6	QPSK 1/2
11.5	-90.0	10.6	-88.75	14.8	16QAM 2/3
21.5	-80.0	20.0	-78.75	28	64QAM 5/6
29.0	-72.5	26.7	-71.25	37.3	256QAM 5/6

Nota. Tomado de (Adaptrum, 2017)

Este el fabricante también dispone de las antenas necesarias para implementar la tecnología. En la figura 37 se pueden observar las antenas presentadas por Adaptrum, y en la siguiente tabla se muestran sus características.

Tabla 12.

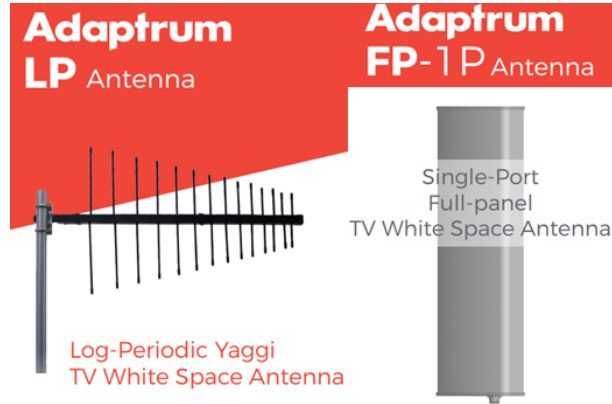
Características de las antenas Adaptrum.

Log-Periodic Antenna	Panel Antenna
Frecuency Range: 400- 800 MHz	Frecuency Range: 470- 698 MHz
Polarization: Vertical	Polarization: Vertical
Gain: 11 dBi	Gain: 11 dBi
Front to back ratio: >22 dB	Front to back ratio: >20 dB
Impedance: 50 Ω	Impedance: 50 Ω
VSWR: <1.5	VSWR: <1.5
Dimensions: 116x36 cm	Dimensions: 858x300x146 mm
Beam Width: 65°	Beam Width: 90°

Nota. Tomado de (Adaptrum, 2017)

Figura 37.

Antenas de Adaptrum.

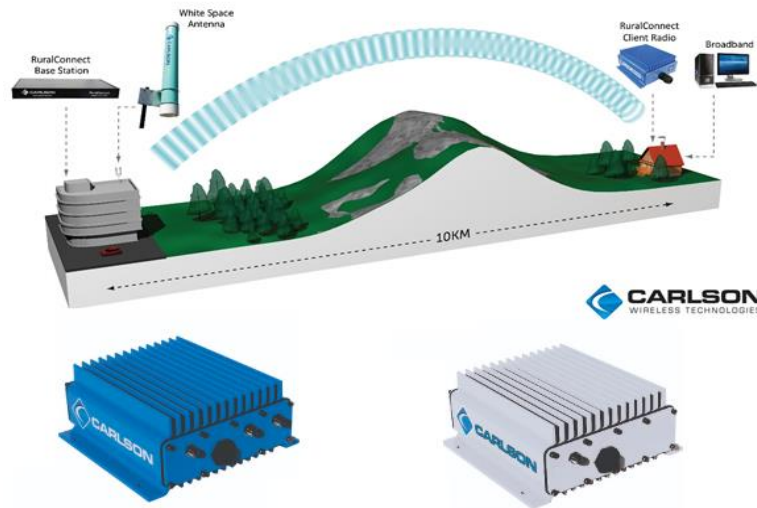


Nota. Tomado de (Adaptrum, 2017)

- **Carlson Wireless**

Figura 38.

Radio de Carlson Wireless.



Nota. Tomado de (Carlson Wireless, 2018)

En la siguiente tabla se presentan las características del radio disponible del fabricante Carlson Wireless.

Tabla 13.*Características del equipo de Carlson.*

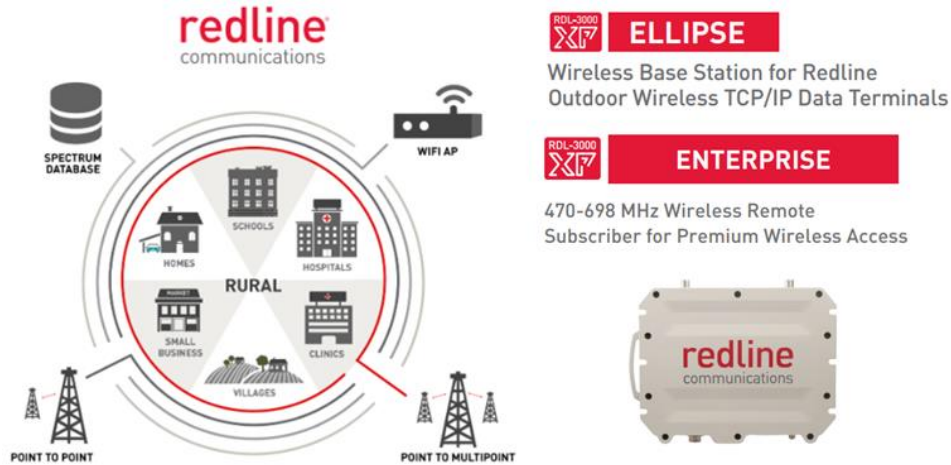
Característica	Valor
Throughput Rates	24 Mbps
Channel Bandwidth	6MHz
Operating Frequency	470MHz – 696 MHz
Transmit Power	21dBm
Geolocation	No
Link Distance	10 km
Latency	5-35 ms
System Power	PoE
Power Consumption	20 W Tx Mode / 8 W Rx Mode
Receive Sensitivity	-96.4 dBm
Adjacent Channel Emission	-48dBm
Modulation	QPSK ^{3/4} , 16QAM ^{3/4} , 64QAM ^{5/6} , 256QAM ^{5/6}
System Interfaces	10/100 base T Ethernet

Nota. Tomado de (Carlson Wireless, 2018)

- **Redline Communications**

Figura 39.

Radio de Redline Communications.



Nota. Tomado de (Redline Communications, 2017)

En la siguiente tabla se presentan las características del radio disponible por el fabricante Redline Communications.

Tabla 14.

Características del equipo de Redline.

Característica	Valor
Throughput Rates	30 Mbps
Channel Bandwidth	6MHz
Operating Frequency	470MHz – 698 MHz
Transmit Power	31dBm
Geolocation	Si
Link Distance	150 km
Latency	<10 ms

System Power	PoE
Power Consumption	17 W Tx Mode / 8 W Rx Mode
Receive Sensitivity	-98 dBm
Adjacent Channel Emission	-46dBm
Modulation	BPSK to 256QAM 7/8
System Interfaces	10/100 Ethernet

Nota. Tomado de (Redline Communications, 2017)

Este fabricante también dispone de antenas propias para la tecnología. En la figura 40 se pueden observar las antenas presentadas por Redline, y en la siguiente tabla se muestran sus características.

Tabla 15.

Características de las antenas Redline.

Log-Periodic Antenna	Panel Antenna
Frecuency Range: 470- 698 MHz	Frecuency Range: 470- 698 MHz
Polarization: Vertical or Horizontal	Polarization: Vertical or Horizontal
Gain: 11 dBi	Gain: 11 dBi
Front to back ratio: >20 dB	Front to back ratio: >25 dB
Impedance: 50 Ω	Impedance: 50 Ω
VSWR: 2:1	VSWR: 1.5:1
Dimensions: 121x33x6.8 cm	Dimensions: 1550x5500x232 mm
Beam Width: 50°	Beam Width: 90°

Nota. Tomado de (Redline Communications, 2017)

Figura 40.

Antenas de Redline.



Nota. Tomado de (Redline Communications, 2017)

5.2. Investigación de Proveedores

Ya habiendo investigado teóricamente todo lo referente a aquello que se necesita en la tecnología, se inicia la búsqueda de quipos contactando a diversos proveedores nacionales e internacionales observando con que equipos contaban, sus características, que servicios prestaban y costos; con el fin de poder obtener como resultado la mejor cotización. Se hizo contacto mediante correo electrónico con las empresas fabricantes 6Harmonics, Adaptrum y Redline, esta última expresó que había que comunicarse con Winncom Technologies quien es su distribuidor y además tienen sucursal en Bogotá-Colombia.

En el apartado de Anexos se presentan las figuras donde se muestran fragmentos de las conversaciones entabladas con dichos fabricantes; en una de las figuras se puede observar como la empresa Winncom Technologies envía una cotización estructurada para la implementación de la tecnología TVWS con equipos de Redline Communications, esta empresa fue la que más brindo información incluyendo una tele-llamada (Figura 61) para aclarar aspectos de la cotización y de la tecnología en general.

Al momento de buscar cotizaciones de equipos referentes a la tecnología, se hizo contacto con las empresas enviando un correo electrónico a la cuenta que se encontraba en la página web de cada empresa. La respuesta se demoró en llegar de 1 a 3 días hábiles.

6Harmonics presento los precios más altos, pero tenían buen interés, respondieron las preguntas que se les plantearon y elaboraron una simulación de la factibilidad del radioenlace en la zona de posible implementación que se les indico; Adaptrum presento el mejor precio respecto al equipo CPE, pero por el contrario a 6Harmonics, el personal de Adaptrum se demoraba en responder y no brindaba mucha información respecto a las características del sistema.

Por último con la empresa Winncom Technologies, distribuidor de equipos de Redline Communications, se logró tener la mejor conversación dado que, gracias a la asistencia de un par de Webinars dirigidos por Redline y Winncom, se pudo obtener el número telefónico de Santiago Bravo, gerente de ventas de Winncom Technologies (Figura 41), encargado de atender cualquier solicitud; con él se logra obtener una cotización detallada de los dispositivos necesarios para implementar la tecnología TVWS, pensando en un enlace punto a punto, esta cotización se presenta en Anexos.

Figura 41.

Personal contactado.

 <p>Winncom Technologies®</p>	<p>Santiago Bravo Vidal Regional Sales Manager Andean Region Winncom Technologies Corp.</p> <ul style="list-style-type: none">• Mobil: (+57) 301-2876722• Email: s.bravo@winncom.com• Site: www.winncom.com/es• Address: Calle 113 # 7-21 Torre A, Piso 1101 Bogotá, Colombia <p>  </p>	<p>German Guerrero Technical Sales Manager CALA Redline Communications</p> <hr/> <p>e gguerrero@rdlcom.com wrdlcom.com</p> <p>  </p>

Además, se organiza una reunión virtual donde se contacta a German Guerrero, ingeniero de preventas de Redline Communications invitado por Santiago Bravo, con el fin de discutir la cotización elaborada para implementar la tecnología TVWS y despejar cualquier duda respecto al tema. En los Anexos se encuentra una figura donde se muestra una captura de pantalla de la reunión virtual realizada.

También se buscó contactar a la empresa fabricante Carlson Wireless Technologies pero nunca se dio el contacto, dado que no respondieron el correo enviado.

Después de cotizar con distintos fabricantes los diferentes equipos y herramientas necesarias al momento de implementar el sistema de transmisión de datos, se saca un presupuesto aproximado para implementar la tecnología, se debe tener en cuenta que este presupuesto incluye la instalación y compra de mástiles telescópicos para la montura de la antena en ambos puntos del radioenlace, lo cual incrementa el costo; en caso de que uno o ambos puntos (estación base y CPE) cuenten con una torre, poste o mástil para la instalación de la antena, el costo de este elemento se debe omitir del presupuesto. Dicho presupuesto se presenta en la siguiente tabla, la cual es un resumen del Análisis de Precios Unitarios (APU) quien tiene a detalle todos los elementos que componen cada uno de los ítems mostrados en la Tabla 16. Este APU se puede encontrar al final del documento en el apartado de Anexos.

Tabla 16.

Presupuesto para la implementación del sistema TVWS.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor parcial	Valor total
1	TRANSMISOR				
1.1	Suministro e Instalación de empotrado para mástil telescópico	UND	1	\$ 30.806	\$ 30.806

1.2	Suministro e Instalación de mástil telescópico	UND	1	\$ 1'228.037	\$ 1'228.037
1.3	Suministro e Instalación de sistema de puesta a tierra	UND	1	\$ 678.681	\$ 678.681
1.4	Suministro e Instalación de sistema de pararrayos	UND	1	\$ 2'539.239	\$ 2'539.239
1.5	Suministro e Instalación de radio y antena de transmisión	UND	1	\$ 9'919.188	\$ 9'919.188
				SUBTOTAL	\$14.395.951
2	RECEPTOR				
2.1	Suministro e Instalación de empotrado para mástil telescópico	UND	1	\$ 30.806	\$ 30.806
2.2	Suministro e Instalación de mástil telescópico	UND	1	\$ 1'228.037	\$ 1'228.037
2.3	Suministro e Instalación de sistema de puesta a tierra	UND	1	\$ 678.681	\$ 678.681
2.4	Suministro e Instalación de sistema de pararrayos	UND	1	\$ 2'539.239	\$ 2'539.239
2.5	Suministro e Instalación de radio y antena de recepción	UND	1	\$ 3'273.912	\$ 3'273.912
				SUBTOTAL	\$7.750.675
3	HERRAMIENTAS				
3.1	Suministro de herramientas	UND	1	\$ 151.160	\$ 151.160
4	TRANSPORTE				
4.1	Servicio de transporte	UND	1	\$ 400.000	\$ 400.000
5	MANO DE OBRA				
5.1	Personal necesario	UND	1	\$ 453.000	\$ 453.000
				COSTO DIRECTO	\$ 23.150.786
				ADMINISTRACION (10%)	\$ 2.315.078
				IMPREVISTOS (1%)	\$ 231.507
				UTILIDADES (5%)	\$ 1.157.539
				IVA sobre las utilidades (19%)	\$ 219.932
				Valor TOTAL	\$ 27.074.842

5.3. Matriz de Evaluación de Infraestructura Tecnológica

En esta sección se presenta la matriz de evaluación de infraestructura tecnológica desarrollada a partir de las características encontradas conforme a la ficha técnica para los diferentes equipos utilizados al momento de implementar la tecnología TVWS, esto con el fin de poder comparar y analizar los equipos que presentan diferentes proveedores para así tener la certeza de seleccionar el equipo que más se adapte a las necesidades del proyecto. En esta matriz se tienen en cuenta características como:

- Para los radios: potencia de transmisión, sensibilidad, tasa de transmisión, latencia, ancho de banda, capacidad de geolocalización y precio.
- Para las antenas: ganancia, tamaño, frecuencia de operación y precio. Se toman las características de la antena Log-Periodic ya que esta es la ideal pensando en un enlace punto a punto.
- Para el Router: el número de usuarios que permiten, la velocidad de transmisión, el número de puertos y por último el precio.
- Para los Switch: el número de puertos que disponga, la velocidad que estos permiten, si cuenta con capacidad PoE y el precio en el mercado.

(USAID, 2019)

Se utilizará una ponderación de máximo 10 puntos, descrita en la tabla, con lo cual cada dispositivo obtendrá un puntaje total y el que obtenga el puntaje más alto será la mejor opción. Se tendrá un código de colores para ayudar a distinguir que equipo fue el mejor en cada característica comparada, utilizando escala de grises, pasando desde el de mejor característica con el tono más oscuro, hasta el de la menos favorable con el tono mas suave.

Tabla 17.

Matriz de evaluación de infraestructura tecnológica.

Elemento	Ponderación	Criterio	Puntaje máximo	Proveedores		
				ADAPTRUM	REDLINE	6HARMONICS
TVWSD	10 para el equipo que posea el mejor valor, para los equipos restantes es la relación entre el valor del equipo a evaluar y el valor del equipo de referencia (equipo de mejor valor) multiplicado todo por 10.	Potencia de transmisión	70	28 dBm	30 dBm	23 dBm
		Sensibilidad		-98 dBm	-98 dBm	-98 dBm
		Tasa de transmisión		27 Mbps	30 Mbps	33 Mbps
		Latencia		15 ms	10 ms	5 ms
		Ancho de banda		6 MHz	6 MHz	6 MHz

	10 si cuenta con geolocalización de lo contrario es 0.	Geolocalización		Si	Si	No
	10 para el costo más bajo, 5 para el siguiente y 0 para el costo más alto.	Precio		BS USD 2995 CPE USD 295	BS USD 2406 CPE USD 765	BS USD 3350 CPE USD720
	Total			55	65	47
ANTENAS	10 para la de mayor ganancia, 5 para la siguiente y 0 para la de menor o si excede la ganancia permitida.	Ganancia	40	11 dBi	11 dBi	10.3 dBi
	10 para la de menor tamaño, 5 para la siguiente y 0 para la de mayor tamaño.	Tamaño		116x36 cm	121x33 cm	110x30 cm
	10 si trabaja en la banda de frecuencias de TVWS, de lo contrario es 0.	Frecuencia		400- 800 MHz	470- 698 MHz	470- 700 MHz

	10 para el costo más bajo, 5 para el siguiente y 0 para el costo más alto.	Precio		Log-Periodic USD 110 Panel USD 295	Log-Periodic USD 95 Panel USD 375	Log-Periodic USD 120 Panel USD 310
	Total			30	30	20
				FRITZ! BOX 4020	TP-LINK TOUCH P5	NETGEAR NIGHTHAWK X6
ROUTER	10 para el que provea a más usuarios, 5 para el siguiente y 0 para el más bajo.	Número de usuarios	40	5	5	5
		Numero de puertos		4 puertos Ethernet y otro WAN	4 puertos Gigabit Ethernet y otro WAN Gigabit	4 puertos Gigabit Ethernet y otro WAN Gigabit
	10 para el que posea la mayor velocidad, 5 para el siguiente y 0 para el lento.	Velocidad		450 Mbps	1.900 Mbps	3.200 Mbps.
	10 para el costo más bajo, 5 para el siguiente y 0 para el costo más alto.	Precio		USD 73	USD 184	USD 295
	Total			25	30	30

		TP-Link LS1008G	TP-Link TL-SG1016D	TP-Link TL-SG1005P	
SWITCH	10 para el que provea a más puertos, 5 para el siguiente y 0 para el más bajo.	Numero de puertos	8	16	5
	10 para el que posea la mayor velocidad, 5 para el siguiente y 0 para el lento.	Capacidad de conmutación	1000 Mbps	32 Gbps	10 Gbps
	10 si cuenta con puertos PoE, de lo contrario es 0	PoE	No	No	4 puertos PoE
	10 para el costo más bajo, 5 para el siguiente y 0 para el costo más alto.	Precio	USD 25	USD 92	USD 52
Total		40	15	20	25

Al revisar la Matriz expuesta en la anterior tabla, se puede observar que la mejor opción respecto al dispositivo TVWS sería la brindada por Redline, ya que en cuanto a la ponderación descrita anteriormente obtuvo el mejor puntaje, sobresaliendo en características de importancia como lo es la potencia de transmisión, y pese a no tener el mejor valor en la tasa de transmisión, es superior al equipo de Adaptrum, esta característica es muy importante ya que indica la capacidad de obtener mejores velocidades en el servicio de internet.

Cabe recordar que a diferencia de los otros fabricantes, Redline tiene un punto de distribución en Bogotá, lo cual facilita el contacto con la empresa y el rápido acceso a los equipos. Es importante señalar que aunque presenta el precio más bajo, este costo es el de una pareja de radios, es decir con un solo CPE, si se quisiera expandir la red se necesitaría la compra de más dispositivos CPE, motivo por el cual, en este caso, sería mejor opción la brindada por Adaptrum, puesto que el precio de su CPE es mucho menor.

Es por esto que la elección dependerá del sistema que se quiera implementar, si se pretende tener un enlace punto a punto (PtP) o si se quiere un conjunto de varios puntos CPE (PtMP), para este último la característica del precio elevaría su importancia, dejando el equipo de Adaptrum como la opción que más se adapta a dicho requerimiento.

En cuanto a la antena, Adaptrum y Redline obtuvieron el mismo puntaje, ambas presentan características muy similares; hay que aclarar que la antena presentada por Redline tiene el mejor puntaje respecto a precio, debido a que se está tomando como referencia la antena Log-Periodic, pensando en un enlace PtP, de igual manera si se requiere un enlace PtMP aunque el precio de la antena sectorial sea el más alto, solo se necesitaría una (estación base) y su costo se nivelaría, dado que los puntos CPE utilizan antenas Log-Periodic. Sin embargo esto dependería de la posición de

los CPE ya que si están dispersos en los 360° alrededor del punto transmisor se necesitarían más antenas sectoriales, lo cual incrementa el costo y en consecuencia dejaría ver como mejor opción a los otros fabricantes.

En el caso del Router y el Switch, escoger el mejor dispositivo va a depender del fin que tengamos para ellos, por ejemplo, si se mira la velocidad, siempre es mejor tener mayor velocidad, pero esto va a incrementar el costo del dispositivo, por eso hay que examinar para que los necesitamos, si van a transferir grandes cantidades de datos, lo mejor sería encontrar uno compatible con conectividad gigabit Ethernet. Sin embargo, si los usuarios realizan tareas más simples como navegación web o imprimir, uno de 100 megabits puede ser suficiente y ese será el mejor en este caso. O si necesitamos otorgar energía eléctrica a través del cable de red a equipos como teléfonos, o access point, se necesitará un Switch PoE, pero igualmente esto aumentará el precio, por lo cual, si en el proyecto no es necesaria la tecnología PoE, esto generará que el mejor Switch no es el que cuente con esta capacidad como se ve planteado en la matriz presentada.

5.4. Diseño y Simulación de Antena

Como se ha evidenciado en los anteriores capítulos, es necesaria una antena que cumpla con las características necesarias para poder transmitir y recibir la señal de TVWS. En este apartado se presentan las especificaciones, el diseño y simulación de una antena de banda ancha tanto para la estación base como para las instalaciones del cliente (CPE) en la banda de espectro de TV White Space (TVWS) que opera entre 470 MHz-698 MHz. Para realizar antenas de banda ancha, se ha utilizado el concepto de matriz de dipolos periódicos logarítmicos (LPDA), que proporciona un ancho de banda amplio. El volumen total de la antena es $167 \times 32.4 \times 1.65 \text{ cm}^3$. El factor de escala (τ) para este diseño se considera como 0.964 y el espaciado relativo (σ) se elige

como 0.185, más adelante se explica porque se seleccionaron estos valores. La antena se alimenta en la base del elemento más pequeño. La antena muestra un ancho de banda de impedancia para $VSWR \leq 2$ en la banda de frecuencias de 470 MHz a 698 MHz. La ganancia de esta antena está entre 11 dBi y 12.9 dBi en toda la banda de funcionamiento. El patrón de radiación muestra el comportamiento del final con un patrón de radiación uniforme en los planos E y H con una relación máxima entre lóbulos frontales y posteriores (F / B) de 22 dB. La simulación de la antena se desarrolla en el software CST.

5.4.1. Especificaciones

Una antena para uso en TVWS debe cumplir un mínimo de especificaciones, la más importante es que trabaje en la banda de TV, y dentro de esta banda en las frecuencias dispuestas para esta tecnología, como se vio en el capítulo 5, por último que tenga una ganancia considerable ya que dadas las características de la banda de TV es habitual que la antena tenga una buena directividad. Por lo cual las especificaciones a cumplir son:

- Banda TV UHF (Ultra High Frequency)
- Frecuencia 470 – 698 MHz
- Ganancia >11 dBi

5.4.2. Diseño

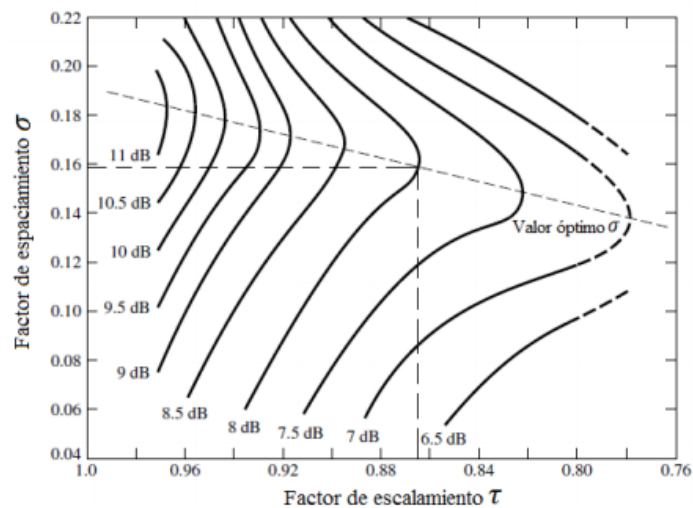
La estructura de la antena se deriva de la LPDA tradicional. Las características de la antena están determinadas por tres factores, a saber, Factor de escala (τ), Espaciado relativo (σ) y Número de elementos (N). Tau (τ) es la razón de la longitud de un elemento con su vecino próximo más largo. Sigma (σ) es conocida como el espaciamiento constante relativo con el cual se determina el ángulo del vértice de la antena.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1-\tau}{4*\sigma} \right) \quad (19)$$

Los valores de las constantes τ y σ están relacionados con la ganancia de la antena, por lo que en la figura 42 se muestran las curvas de contorno para diferentes valores de ganancia. Se escogen valores cercanos a la línea Valor óptimo σ con el fin de obtener una máxima ganancia (Cruz, 2005).

Figura 42.

Curvas de contorno calculadas para una ganancia constante contra τ y σ para una agrupación de dipolos.



Nota. Tomado de (Trujillo, 2012)

Ya que se desea obtener una ganancia de 11 dBi se han elegido los siguientes valores para el factor de escala y el factor de espaciamiento:

$$\tau = 0.964 ; \sigma = 0.185$$

Por otra parte se halla la longitud de onda a la frecuencia de funcionamiento más baja, es decir 470 MHz, la cual se llamará λ_{max} , y la longitud de onda a la frecuencia más alta de 698 MHz, esta será λ_{min} :

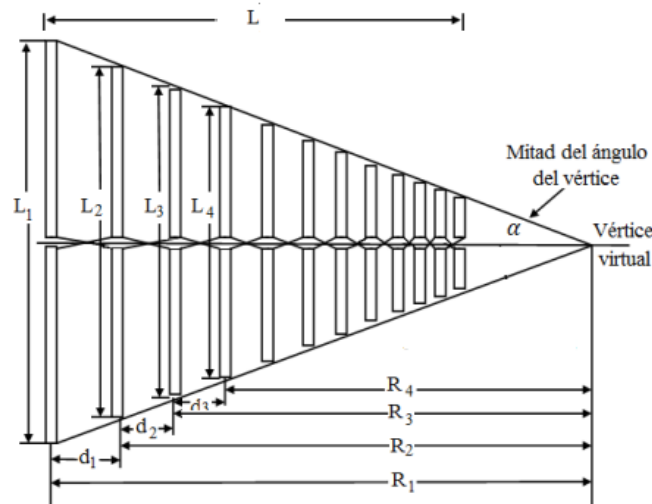
$$\lambda_{max} = \frac{c}{f_{min}} = \frac{3 \times 10^8}{470 \times 10^6} = 0.638 [m] \tag{20}$$

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} = \frac{3 \times 10^8}{698 \times 10^6} = 0.430 [m] \tag{21}$$

Con estas constantes y valores calculados anteriormente, se procede a hallar las medidas de las variables de diseño. En la figura 43 se muestra un bosquejo general de cada una de estas variables involucradas en el diseño de la antena logarítmica periódica.

Figura 43.

Antena logarítmica periódica con agrupación de dipolos.



Nota. Tomado de (Trujillo, 2012)

El ángulo de la posición final de los dipolos y la línea central forman la mitad del vértice, el cual está determinado por la ecuación (1):

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1 - 0.964}{4 * 0.185} \right) = 2.785^\circ$$

La longitud del dipolo más largo (L1) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$L1 = K1 * \lambda_{max} \quad (22)$$

Donde K1 es la constante de truncamiento menor y se determina de forma empírica mediante la ecuación (5) como sigue (Trujillo, 2012):

$$K1 = 1.01 - 0.519\tau \quad (23)$$

La longitud del dipolo más corto se obtiene de $L_N = K2 * \lambda_{min}$, donde K2 es la constante de truncamiento mayor y se determina de forma empírica mediante la ecuación (6):

$$K2 = 7.08\tau^3 - 21.3\tau^2 + 21.98\tau - 7.3 + \sigma(21.82 - 66\tau + 62.12\tau^2 - 18.29\tau^3) \quad (24)$$

Por lo tanto, las longitudes de los dipolos más largo y más corto respectivamente, son las siguientes:

$$L1 = 0.509 * 0.638 = 0.324 \text{ mts}$$

$$L_N = 0.365 * 0.430 = 0.157 \text{ mts}$$

Usando las constantes de truncamientos y considerando los límites de frecuencia superior e inferior se determina el número de dipolos requeridos de la antena.

$$N = 1 + \frac{\log\left(\frac{K2}{K1}\right) + \log\left(\frac{f_{min}}{f_{max}}\right)}{\log(\tau)} = 20 \text{ elementos} \quad (25)$$

Para determinar la longitud de los demás dipolos que forman el conjunto, se empieza tomando L1 y se multiplica por el valor de τ , con lo cual se obtiene la longitud del segundo elemento. Este a su vez se multiplica por el mismo factor τ , con lo que se consigue la longitud del tercer elemento, y así se continúa reduciendo cada nuevo elemento hasta conseguir uno cuya longitud sea aproximada a L_N (Rojas, Sanchez, & Gomez, 1998).

Las longitudes de los demás dipolos que conforman la antena se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 18.

Longitud de los Dipolos.

Elemento	Formula	Longitud calculada [m]	Elemento	Formula	Longitud calculada [m]
L1	$K1 * \lambda_{max}$	0.324	L11	$L10 * \tau$	0.224
L2	$L1 * \tau$	0.312	L12	$L11 * \tau$	0.216
L3	$L2 * \tau$	0.301	L13	$L12 * \tau$	0.208
L4	$L3 * \tau$	0.290	L14	$L13 * \tau$	0.201
L5	$L4 * \tau$	0.279	L15	$L14 * \tau$	0.193
L6	$L5 * \tau$	0.269	L16	$L15 * \tau$	0.186
L7	$L6 * \tau$	0.260	L17	$L16 * \tau$	0.179
L8	$L7 * \tau$	0.250	L18	$L17 * \tau$	0.172
L9	$L8 * \tau$	0.241	L19	$L18 * \tau$	0.166
L10	$L9 * \tau$	0.232	L20	$L19 * \tau$	0.159

Para determinar la distancia del vértice virtual a cada uno de los dipolos se tiene la siguiente ecuación:

$$R_N = \frac{2 * L_N * \sigma}{1 - \tau} \tag{26}$$

La longitud del eje de la antena es la diferencia entre R_1 y R_N , que sirven para encontrar la longitud total de la antena usando un número entero de dipolos:

$$L = R_1 - R_N = R_1(1 - \tau^{N-1}) = \frac{2 * L1 * \sigma(1 - \tau^{N-1})}{1 - \tau} \tag{27}$$

$$L = 1.67 \text{ mts}$$

Por último, se hallan las distancias entre cada uno de los dipolos. Por la disposición periódica de los elementos, el espaciado entre ellos disminuye en forma logarítmica, para obtener el espaciado d_n se tiene la siguiente ecuación (Trujillo, 2012):

$$d_n = 2 * L_N * \sigma \tag{28}$$

En la siguiente tabla se presenta el espaciado entre cada uno de los dipolos que conforman la antena logarítmica.

Tabla 19.

Distancia entre dipolos.

Distancia	Formula	Distancia calculada	Distancia	Formula	Distancia calculada
		[m]			[m]
$D_{1,2}$	$2*L1*\sigma$	0.1199	$D_{11,12}$	$2*L11*\sigma$	0.0829
$D_{2,3}$	$2*L2*\sigma$	0.1154	$D_{12,13}$	$2*L12*\sigma$	0.0799
$D_{3,4}$	$2*L3*\sigma$	0.1114	$D_{13,14}$	$2*L13*\sigma$	0.0770

$D_{4,5}$	$2*L4*\sigma$	0.1073	$D_{14,15}$	$2*L14*\sigma$	0.0743
$D_{5,6}$	$2*L5*\sigma$	0.1032	$D_{15,16}$	$2*L15*\sigma$	0.0714
$D_{6,7}$	$2*L6*\sigma$	0.0995	$D_{16,17}$	$2*L16*\sigma$	0.0688
$D_{7,8}$	$2*L7*\sigma$	0.0962	$D_{17,18}$	$2*L17*\sigma$	0.0662
$D_{8,9}$	$2*L8*\sigma$	0.0925	$D_{18,19}$	$2*L18*\sigma$	0.0636
$D_{9,10}$	$2*L9*\sigma$	0.0892	$D_{19,20}$	$2*L19*\sigma$	0.0614
$D_{10,11}$	$2*L10*\sigma$	0.0858			

Sumando todos estos espaciados obtenemos aproximadamente la Longitud total (L) ocupada por la antena.

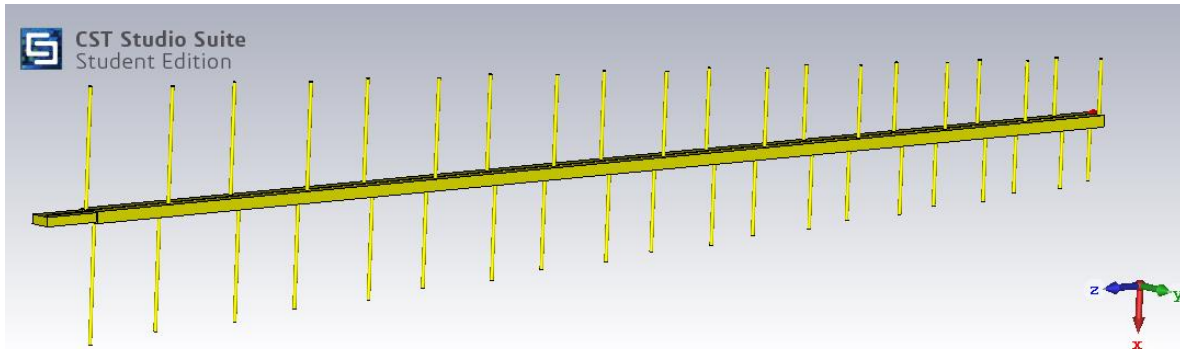
5.4.3. Simulación en CST

El análisis y optimización de la antena logarítmica periódica para TVWS fue facilitado por el software de diseño y simulación de antenas llamado CST Studio Suite (versión para estudiantes) (CST, 2020). Los parámetros de diseño y análisis que se presentarán incluyen el coeficiente de reflexión (S11) o pérdida de retorno; relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR); impedancia de entrada, la eficiencia de radiación, ganancia y patrón de radiación. Los primeros tres parámetros se relacionan con el ancho de banda y las características de entrada de la antena útiles para fines de adaptación al equipo de radio. Los tres últimos parámetros se relacionan con el rendimiento de radiación y la directividad de la antena con respecto a la comunicación por aire.

A continuación se muestra el resultado final de la antena:

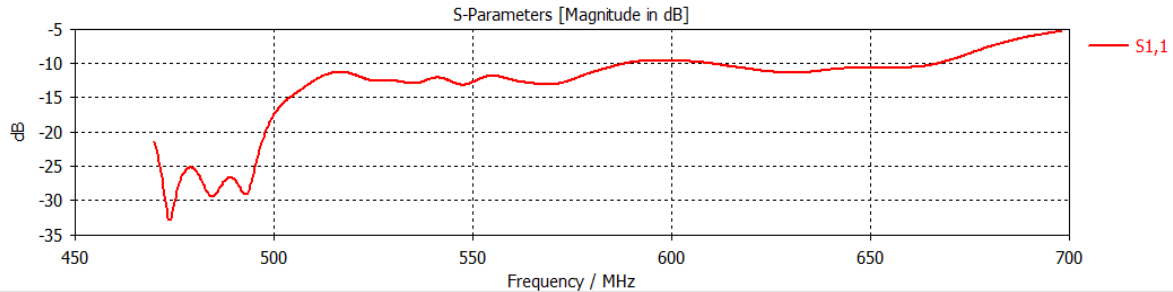
Figura 44.

Antena simulada en CST.



5.4.3.1. Pérdida de Retorno dB [S11]. Al observar la representación gráfica del coeficiente de reflexión de la antena (S11), se puede determinar la adaptabilidad de esta, proporcionando así información sobre la transmisión de potencia. Para considerar una buena adaptabilidad de la antena, la figura debe presentar un valor por debajo de -10 dB en la frecuencia o banda de frecuencia donde se desea la adaptabilidad. Esto indica que la pérdida por reflexión es despreciable y la potencia máxima transmitida a la carga es de por lo menos un 90% (Jiménez, 2011).

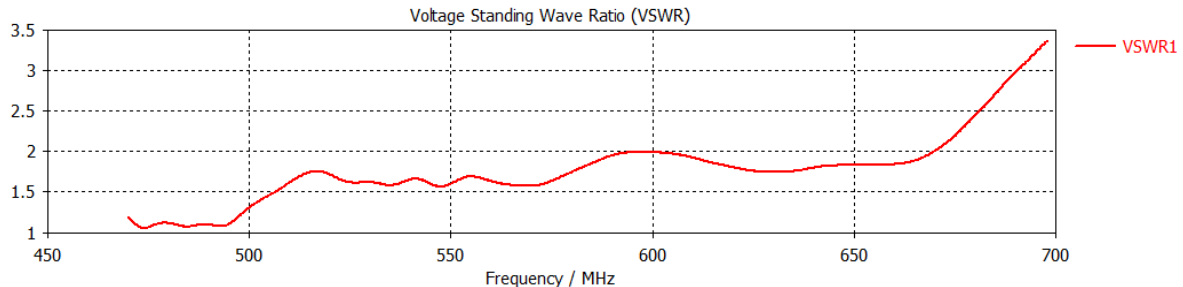
Es importante mencionar que una antena tiene un buen funcionamiento cuando las pérdidas por retorno son menores o iguales a -10 dB. En la figura 45 se puede observar claramente que en la mayor parte del ancho de banda cumple con este requisito, dado que solo hacia la parte final de la banda de frecuencias, después de 670 MHz, se encuentra por encima del rango permitido lo cual no es deseable.

Figura 45.*Coeficiente de reflexión.*

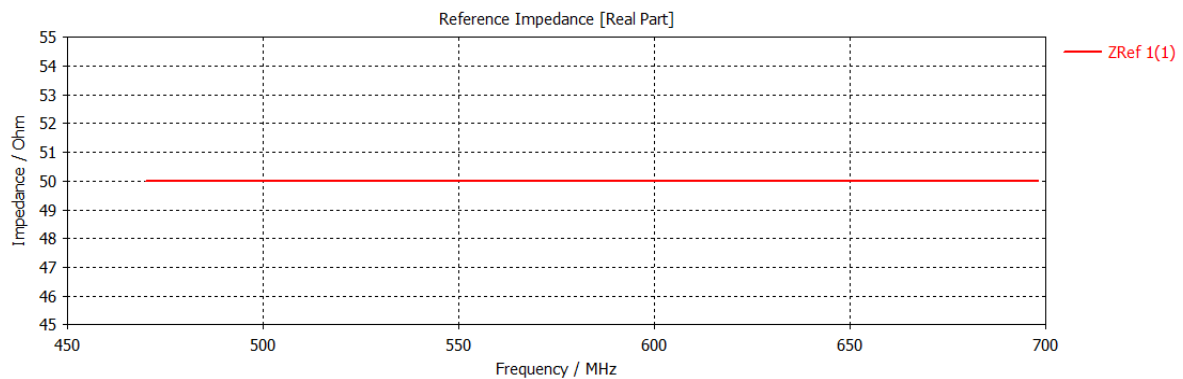
A partir del gráfico anterior, los resultados de la simulación S₁₁ (en dB) muestran que la antena cubre una banda ancha de 200 MHz dentro de la banda UHF de TV comprendida desde una frecuencia de corte más baja de 470 MHz hasta una frecuencia de corte más alta de 670 MHz, por lo cual es adecuada para la red de radio TVWS.

5.4.3.2. Relación de Onda Estacionaria de Voltaje (VSWR). En general, VSWR es un parámetro que mide numéricamente qué tan bien coincide la impedancia de la antena con el circuito eléctrico (es decir, el transmisor o receptor) o la línea de transmisión a la que está conectada (Pinifolo, Rimer, & Paul, 2015). En la siguiente figura se muestra el gráfico de VSWR en función de la frecuencia para la antena logarítmica.

El gráfico de VSWR contra la frecuencia, en la siguiente figura, muestra que la antena para TVWS está bien adaptada para casi todo el ancho de banda con VSWR <2 en el rango de frecuencia de la banda de 470 hasta 698 MHz. Solo no tiene un VSWR deseado en el último tramo desde 670 MHz.

Figura 46.*Gráfico de VSWR.*

5.4.3.3. Impedancia de Entrada. Otro parámetro de interés es la impedancia de entrada de la antena. El gráfico de impedancia frente a la frecuencia de funcionamiento de la antena se muestra a continuación.

Figura 47.*Impedancia de entrada.*

A partir del gráfico de la figura anterior, se ha demostrado que la antena para TVWS diseñada tiene una impedancia de 50 Ω que es idealmente un mejor valor para lograr una adaptación de impedancia para los analizadores de espectro y radios de banda de microondas típicos.

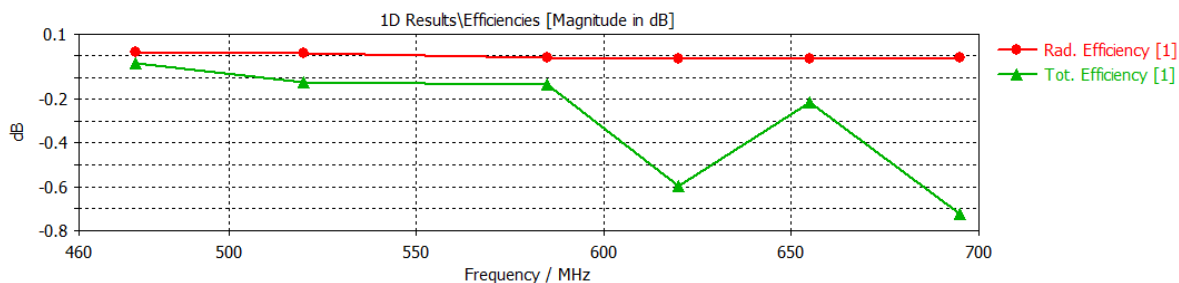
5.4.3.4. Eficiencia de Radiación. La eficiencia de radiación de la antena se puede calcular a partir del valor obtenido en decibelios como (Jiménez, 2011):

$$\eta (\%) = (10^{\text{dB}/10}) \cdot 100 \tag{29}$$

La siguiente figura muestra el valor obtenido de la eficiencia de radiación en la banda de frecuencias a trabajar

Figura 48.

Eficiencia de radiación.



La antena simulada ha logrado una eficiencia de radiación aproximadamente del 99% y una eficiencia total entre 84% y 99% en la banda 470 MHz-698 MHz, como se muestra en la anterior figura.

5.4.3.5. Ganancia y Patrones de Radiación. La ganancia de una antena describe cuánta potencia se transmite en la dirección del pico de radiación a la de una fuente isótropa. Es decir, la ganancia tiene en cuenta las pérdidas de potencia reales que se producen en la antena. Normalmente, cuanto mayor es la ganancia, más eficiente es el rendimiento de la antena y mayor es el alcance (es decir, la distancia de cobertura) de la antena. Por lo tanto, por cada 6 dBi de ganancia, duplica el alcance de la antena.

Por otro lado, el patrón de radiación se refiere básicamente a la representación gráfica de la intensidad de campo relativa transmitida o recibida por la antena. En realidad, define la variación

de la potencia radiada por una antena en función de la dirección que se aleja de la antena. Esta variación de potencia en función del ángulo de llegada se observa en el campo lejano de la antena (Pinifolo, Rimer, & Paul, 2015).

Las siguientes figuras muestran los resultados simulados para los patrones de radiación de la antena logarítmica para TVWS UHF para tres frecuencias diferentes (520, 585 y 620 MHz).

Figura 49.

Patrón de radiación a 520 MHz.

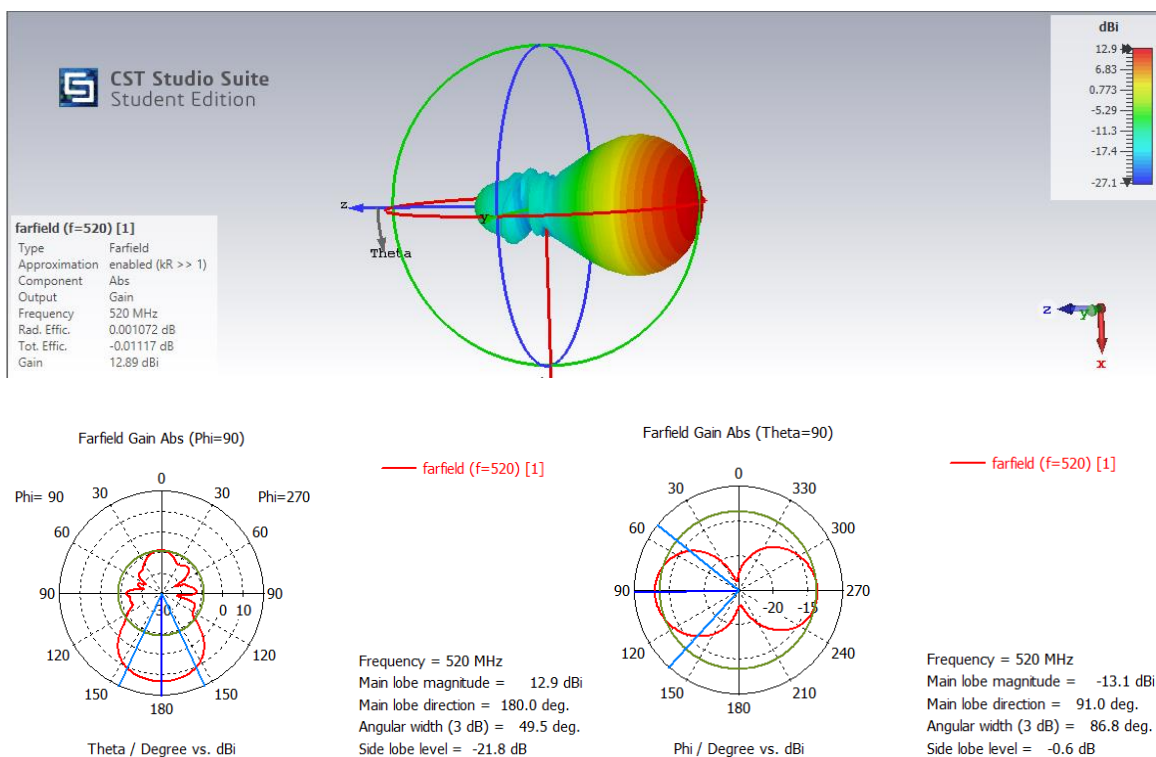


Figura 50.

Patrón de radiación a 585 MHz.

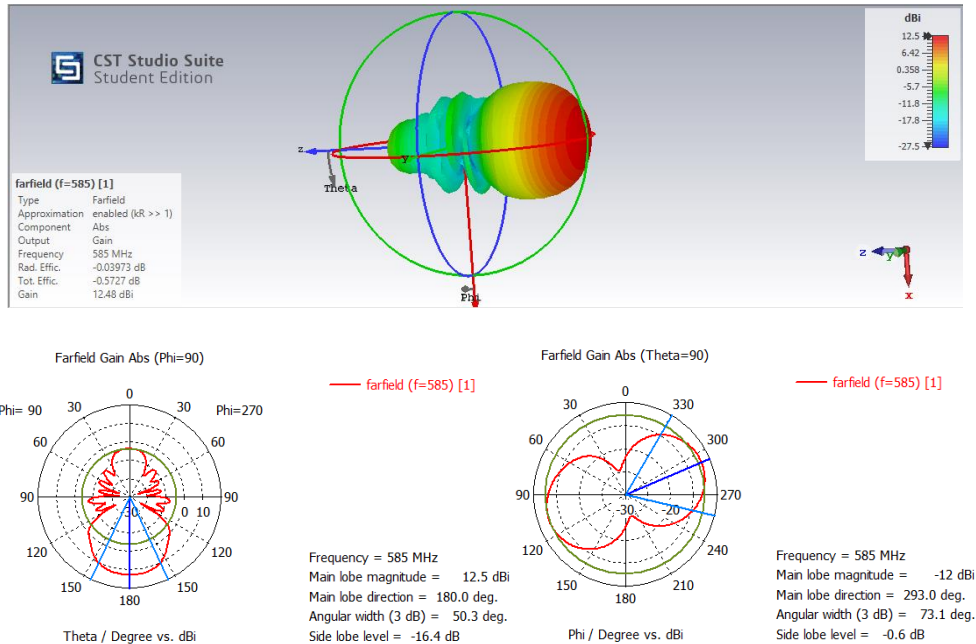
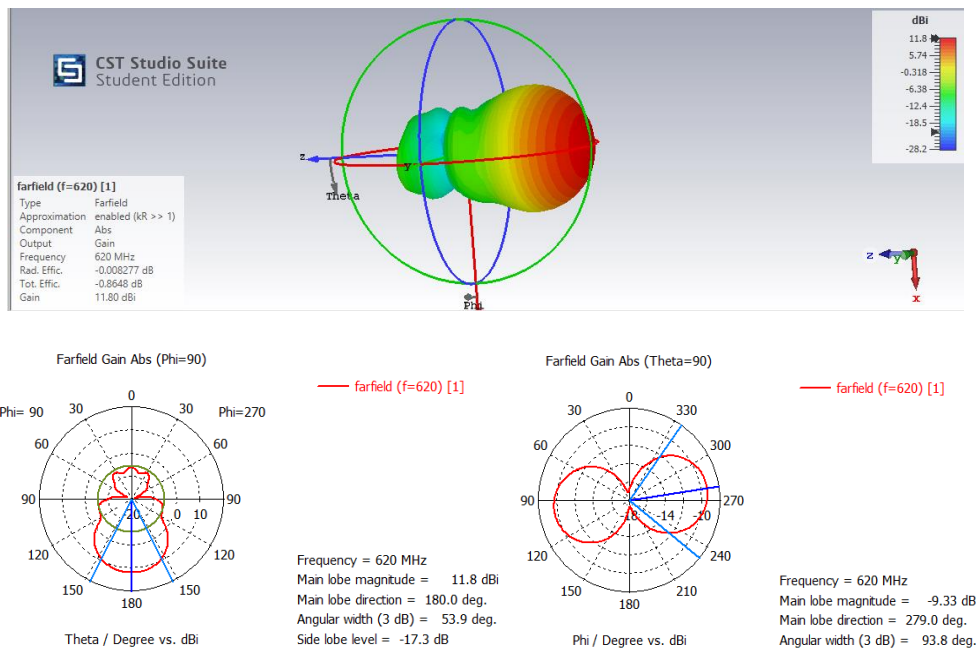


Figura 51.

Patrón de radiación a 620 MHz.



Observando los anteriores diagramas de radiación, representado en coordenadas polares con cortes en los planos E y H y tridimensionalmente, se puede ver que la ganancia máxima de la antena diseñada es de 12.89 dBi y la relación máxima entre lóbulos frontales y posteriores (F / B) es de 22 dB.

A partir de estas observaciones, se puede concluir que la antena logarítmica periódica diseñada cumple con las especificaciones requeridas presentando un rendimiento óptimo para uso de TVWS en la banda UHF.

6. Planificación para la Implementación de TVWS

En este capítulo se establece la fase de planificación para la implementación de un sistema de servicio de datos a través de la red TVWS; en él se podrán encontrar las características del sistema y criterios que debe cumplir el área donde se desee implementar, se presentan algunas recomendaciones, ejemplos y la metodología para llevar a cabo el proyecto; el capítulo se divide en tres secciones: Selección del área de implementación, Selección del equipo TVWS y Evaluación e instalación de los dispositivos.

6.1. Selección del Área de Implementación

Debido a la naturaleza del proyecto, llevar servicio de Internet a diferentes zonas rurales, el primer paso para la implementación del proyecto es seleccionar las áreas de implementación, por ejemplo, centros escolares y la conexión al backbone de Internet.

Para una prueba piloto se podrían seleccionar zonas conforme a los siguientes criterios:

- Que se encuentren dentro del rango de cobertura de los equipos de TVWS, aproximadamente 15 Km de Radio, a partir de la estación base, Universidades, alcaldías interesadas o establecimiento con conexión a internet.
- Conexión al backbone de Internet, este punto es donde se encuentra el acceso a internet y el equipo a instalar es la estación base, esta zona de instalación debe encontrarse de manera céntrica conforme al área de cobertura que se desea generar.
- Que se encuentren canales de televisión disponibles.
- Que no existan grandes obstrucciones (montañas) en la trayectoria del radioenlace.
- Que el punto CPE cuente con computadoras o dispositivos para pruebas disponibles.
- No poseer acceso de Internet actualmente ó el ancho de banda del internet con el que se cuenta no pueda cubrir la demanda.
- Cuente con el mínimo de requerimiento con infraestructura de red ó permita la instalación de la infraestructura de red sin modificar la estructura del lugar.

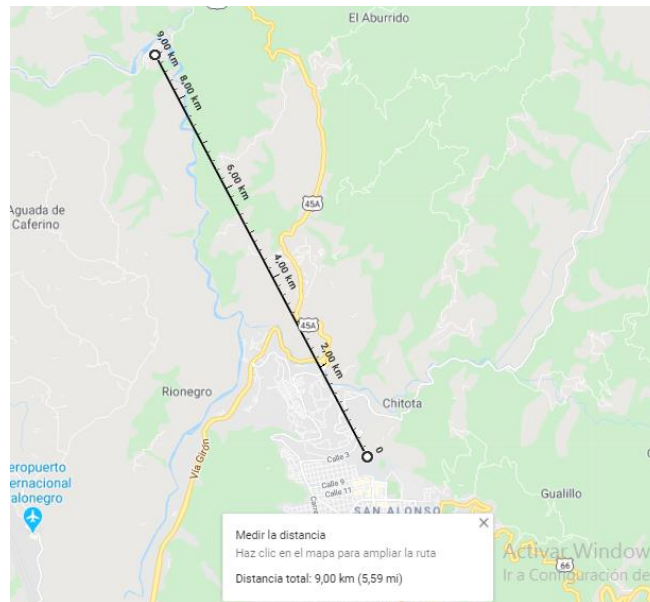
(USAID, 2019)

Además, se recomienda verificar si hay antenas de TDT, ya que TVWS es susceptible al ruido generado por transmisores de TV, es decir, se generarán interferencias y por tanto el sistema tendrá que transmitir en una modulación más baja lo cual llevará a una tasa de transmisión menor.

Por consiguiente, lo primero es identificar los puntos a conectar, estación base y CPE, teniendo en cuenta las recomendaciones y criterios dados, para seguidamente utilizando la herramienta de medir distancias de Google Maps saber a qué distancia se encuentran los dos puntos, para verificar que se encuentre dentro del rango óptimo para un buen enlace (15 km). Un ejemplo de este procedimiento se puede observar en la siguiente figura.

Figura 52.

Distancia entre los puntos.



Nota. Tomado de (Maps, 2020)

En este ejemplo se ha escogido como estación base la Universidad Industrial de Santander, la cual cuenta con una torre de telecomunicaciones de 30 metros de altura aproximadamente y como CPE una escuela rural en la vereda de Las Bocas-Girón, de la cual se sabe que no cuentan con acceso a internet. Como se observa en la Fig.52 la distancia entre los puntos es de 9 km.

A continuación, se debe verificar que los puntos escogidos tengan disponibilidad de canales TVWS, esto se puede hacer mediante la aplicación virtual de la ANE, como se muestra en la figura 55, o pidiendo por correo un listado de canales disponibles a la ANE, siguiendo el protocolo establecido por la agencia reguladora, como se mostró en el capítulo 5. Es muy importante recordar que ambos puntos deben tener canales disponibles en común.

Figura 53.

Aplicación de la ANE para buscar disponibilidad de canales TVWS.

The screenshot shows the ANE (Agencia Nacional del Espectro) website interface. At the top, there is a navigation bar with 'Inicio', 'Acerca de espacios en blanco en TV(TVWS)', 'Preguntas frecuentes', and 'Ayuda'. Below this is the 'Visor de canales' section, which includes a search form for latitude (7.213262387559844) and longitude (-73.16006140315754), with 'Buscar' and 'Resetear' buttons. To the right is a map showing the location of Bocas. Below the map is the 'Listado de canales' section, which has a filter for 'Disponible' (checked) and 'No Disponible' (unchecked). The table below shows the availability of channels 14 through 51.

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
x	x	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Nota. Tomado de (ANE, 2020)

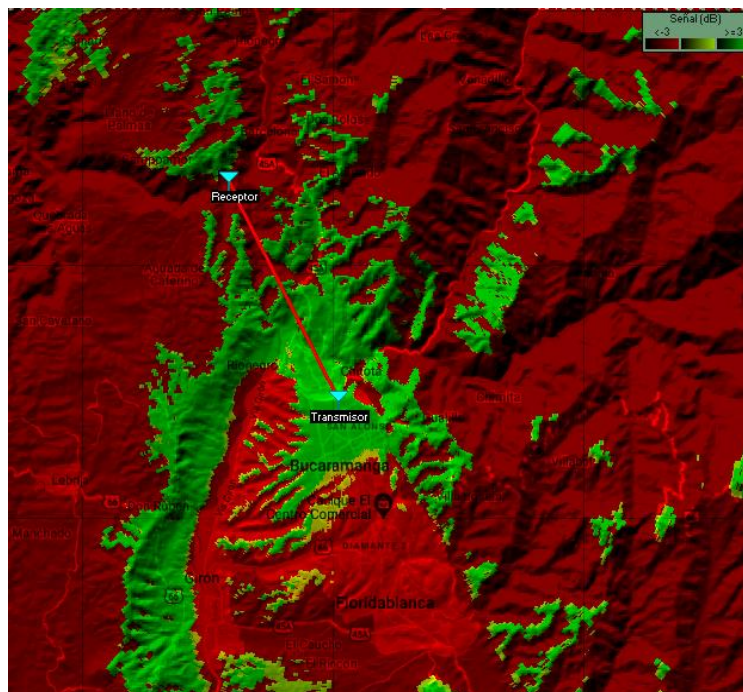
Como se puede observar en la anterior figura, a la aplicación se le deben ingresar las coordenadas de latitud y longitud de la zona escogida y esta nos mostrará que canales están disponibles para su uso.

Lo siguiente es verificar, mediante el software Radio Mobile, la cobertura que se tiene al momento de poner el transmisor (Estación base) en el punto escogido, con esto se podrá descartar las zonas a las cuales no es posible llevar el radioenlace y en qué puntos si puedo implementar

teniendo en cuenta que de una estación base puedo conectar varios CPE's. La simulación de la cobertura que se obtiene con el transmisor en el punto escogido, desarrollada en Radio Mobile se presenta en la siguiente figura.

Figura 54.

Cobertura con Radio Mobile.

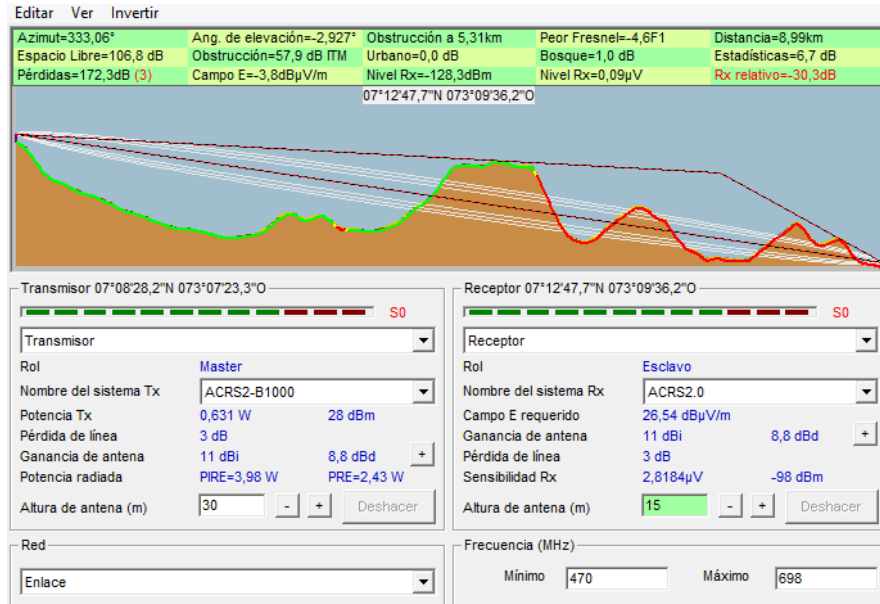


Nota. Tomado de (Radio Mobile, 2020)

Ya teniendo claro que lugares tienen cobertura (zonas verdes), se puede observar si el punto seleccionado está dentro de ella; igualmente se puede verificar que sea factible el radioenlace, observando que haya línea de vista entre los dos puntos mediante simulación. Radio Mobile permite hacer esta simulación si se le ingresan características del sistema como altura y ganancia de las antenas, potencia de transmisión y sensibilidad de los radios.

Figura 55.

Línea de vista entre los puntos del Radio Enlace.



Nota. Tomado de (Radio Mobile, 2020)

Como se observa en la Figura 55, la zona rural seleccionada no es apta para implementar un radioenlace, gracias a la herramienta de simulación, se puede observar que por la geografía de la zona la línea de vista entre el transmisor y receptor es obstruida por una montaña, por tal motivo se descartaría el lugar, ya que no permite que se dé una comunicación exitosa entre estación base y cliente. Este resultado era el esperado pues en el gráfico de la cobertura, esta zona rural se encontraba por fuera de ella.

Además, como última verificación, se puede comprobar que se respete la zona de Fresnel a lo largo del trayecto del Radioenlace y elaborar el presupuesto de potencia, como se vio en el capítulo 4, para tener la certeza de obtener un enlace correcto y de alta precisión, así como de estar

usando los dispositivos correctos, en cuanto a características como potencia, ganancia y sensibilidad.

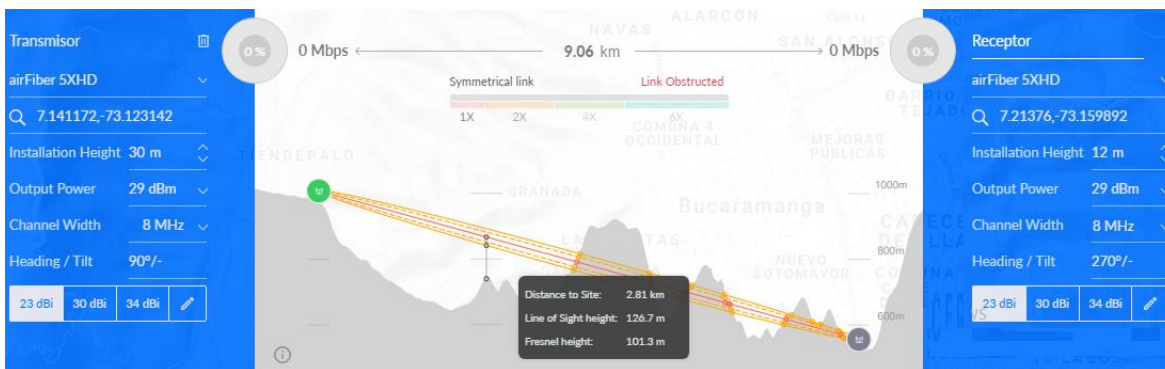
Aunque, como ya se observó el área de implementación seleccionada como ejemplo fue descartada y no tendría sentido seguir revisándola, se presenta el presupuesto de potencia y la verificación de la zona de Fresnel a manera de ejemplo.

Para este proceso se puede utilizar la plataforma online airLink, esta herramienta permite observar si hay línea de vista entre los puntos a comunicar además de poder verificar otras características del Radioenlace como lo son: distancia entre los puntos, zonas de Fresnel y la altura necesaria de las antenas para mantener línea de vista.

Como se puede observar en la Figura 56 se vuelve a verificar que no hay línea de vista entre los dos puntos, generado por varias montañas. La distancia del enlace es de 9.06 km. La herramienta permite ingresar la altura de las antenas y observar la altura de la zona de Fresnel y la distancia a la que fue calculada en cualquier punto del trayecto del radioenlace.

Figura 56.

Herramienta airLink.



Nota. Tomado de (airLink, 2020)

Se calcula la zona de Fresnel a la distancia mostrada en la anterior figura para demostrar la veracidad de la información. Entonces $d_1=2.81$ km, $d_2=6.25$ km, $d=9.06$ km, la frecuencia mínima que airLink permite simular es de 900MHz. Utilizando la formula vista en el capítulo 4:

$$r = \sqrt{\frac{2.81km * 6.25km}{9.06km} * \frac{3 * 10^9}{900 * 10^6}} = 25.41m$$

Lo cual coincide con lo que muestra la herramienta, ya que al restar la altura de la línea de vista (126.7 m) y la altura de la zona de Fresnel (101.3 m) da como resultado que el radio tiene una medida de 25.4 m. Por lo cual si esa montaña hubiera tenido 111.5 m más de altura, interferiría con el 60% de la zona de Fresnel que debe estar despejada.

Para el Presupuesto de Potencia se tiene lo siguiente:

$$PIRE = 30 dBm - 5 dB + 16.15 dBi = 41.15 dBm$$

Se utilizan los valores permitidos por la regulación colombiana para la potencia de transmisión y la ganancia de las antenas, la pérdida en la línea se toma como 5 dB entre cable y conectores.

$$FSL[dB] = 20Log(0.6) + 20Log(9) + 92.5 dB = 107.15 dB$$

Se toma una frecuencia de operación de 600 MHz y una distancia de 9 km. Por lo tanto el presupuesto de potencia, teniendo en cuenta una atenuación por obstáculos de 10 dB, queda así:

$$PP = 41.15dBm - 107.15dB - 10dB + 16.15dBi - 5dB = - 64.9$$

$$Margen = - 64.9 + 98 dBm = 33.15 dB$$

Asumiendo que el radio receptor tiene una sensibilidad de -98 dBm. Como el margen dio por encima de 10 dB se esperaba que el radioenlace para este trayecto funcionará correctamente, pero como ya se observó la zona montañosa no lo permite.

Con estas verificaciones se podrá tener un estimado de la factibilidad y un alto grado de confianza del correcto funcionamiento del sistema de transmisión de datos.

6.2. Selección del Equipo de TVWS

Como segunda etapa para la implementación del proyecto, se deben verificar los equipos que existen actualmente en el mercado, una vez verificado los equipos se proceder a evaluar conforme a la ficha técnica hasta obtener el equipo que más se adapte a las necesidades del proyecto.

Para la evaluación de los equipos se debe poner atención principalmente a las siguientes características:

- **Potencia de transmisión y sensibilidad del receptor:** estas características son necesarias para definir el alcance que se tendrá en la comunicación entre los equipos, a mayor sensibilidad y potencia mayor será el alcance de transmisión.
- **Ancho de banda de canal:** se debe verificar que el ancho de banda de los canales que maneja el equipo sea el debido para que cumpla con las normas de regulación del espectro radioeléctrico de Colombia.
- **Tasa de transmisión:** la tasa de transmisión define la velocidad en que los usuarios se pueden hacer conexión hacia internet, se debe tener en cuenta que la velocidad final de conexión influye la cantidad de usuario conectados, el ancho de banda de la backbone y el destino de conexión.
- **Frecuencia de operación y Geolocalización:** es indispensable que los equipos trabajen en la banda de frecuencias establecidas y tengan integrado un sistema de geolocalización para obtener y comunicar sus coordenadas geográficas.

(USAID, 2019)

Para mirar algunos equipos, sus características y tener una idea de cuál podría ser el equipo más adaptable se recomienda utilizar la Tabla 17. Matriz de evaluación de infraestructura tecnológica, en la cual se ponderan las características mencionadas y se llega a concluir cual es la mejor opción entre algunos de los equipos existentes.

6.3. Evaluación e Instalación del Equipo

Verificado el equipo a utilizar y su adquisición se proseguiría a hacer su instalación y a verificar con pruebas que en efecto el equipo adquirido es adecuado para nuestro proyecto.

Para la evaluación del equipo:

- Verificar los canales de televisión disponibles.

Con el objetivo de verificar los canales libres en la zona, además de solicitar el listado de canales disponibles a la ANE, se puede utilizar un analizador de espectro, con los cuales se obtienen mediciones de densidad espectral de potencia, como lo hicieron en la tesis (Guerra, 2019) donde tomaron estas medidas en diversos lugares para averiguar la disponibilidad de espectro utilizando un analizador de espectro Agilent E4402B.

- Configurar el equipo utilizando los canales disponibles.

El trabajo de la estación base está estrechamente relacionado y depende de forma directa de la información recibida por la base de datos, donde la BS tiene como función notificar al CPE específicamente el canal a utilizar para su operación.

En este proceso la BS contacta a la WSDB con la ubicación, datos del transmisor y parámetros de antena suyos y de su CPE asociado mediante internet. Basándose en estos parámetros y sus datos almacenados, la base de datos calcula la disponibilidad de espectro para la

ubicación de la estación base y le proporciona los canales de TV y el nivel máximo de potencia que puede utilizar. Si la WSDB encuentra espectro disponible para TVWS, la BS puede empezar con las transmisiones en los canales de TV proporcionados. En ese momento envía una baliza que avisa a los terminales de usuario CPE que pueden comenzar a transmitir también. Una vez que se recibe la baliza, se puede establecer el enlace y se puede producir el intercambio de información entre la estación base TVWS y sus terminales de usuario.

- Verificar la conectividad del equipo con diferentes distancias entre BTS y CPE.

Hay que tener en cuenta que la disponibilidad de canales libres de TVWS va a estar sujeto al área en la que se encuentran los dispositivos, por lo cual si se cambia la ubicación o distancia entre los dispositivos hay que contar con que se puede perder la disponibilidad de canales. Cuando la WSDB informa a la estación base sobre la falta de disponibilidad del canal de TV previamente permitido para su uso, la estación base de TVWS debe detener cualquier transmisión en ese canal. Además, si el CPE deja de escuchar las transmisiones de la estación base, entonces debe detener sus transmisiones hasta que escuche una nueva baliza.

- Verificar la tasa de transmisión entre BTS y CPE.

Al operar en un canal UHF de 6 MHz, se espera un enlace descendente 30 Mbps. Si el objetivo es llevar internet a una escuela rural que en promedio tienen de 20 a 50 estudiantes, se tendría la necesidad de utilizar cuatro canales de 6 MHz para tener un enlace descendente total de 120 Mbps y que cada estudiante tenga una velocidad de navegación de 5 Mbps aproximadamente.

Además, es absolutamente necesario hacer contacto con la Autoridad Reguladora en este caso la ANE, la cual debe aprobar los canales seleccionados para su uso en la implementación,

esto es un consejo dado por German Guerrero, ingeniero de preventas de Redline Communications, ya que si no se tiene certeza de si el uso de estos canales de TV ha sido aprobado en los puntos destinados para la implementación, por parte de la agencia reguladora, esta misma puede venir después y denegar el uso del espectro por lo cual tocaría desinstalar los equipos y buscar una nueva zona para implementar.

Para la instalación del equipo:

- Verificar la infraestructura de las edificaciones donde se instalaran los equipos.
- Definir un diseño de red básico.
- Instalar el equipo CPE en el punto sin conexión a internet.
- Instalar el equipo BTS en la Universidad, alcaldía o lugar con conexión a internet.

Ya estando en los lugares establecidos para desplegar los equipos, se procede a verificar la infraestructura presente en las edificaciones, si se cuenta con alguna torre, poste o mástil disponible; también se examina los sitios destinados para la ubicación del Router o Switch dependiendo del caso, para elaborar el diseño de la red y organizar el cableado. Al pasar a la instalación, la antena y radio de la BS se puede fijar en un mástil en la azotea de la edificación o hacer la instalación de un poste o una torre de telecomunicaciones o hacer uso de ella en caso de que el lugar cuente con una; mientras que la antena y radio del punto CPE se instalan en un mástil en la azotea o tejado de la edificación o se puede hacer uso de un poste de iluminación que este próximo al lugar, por último se hacen las conexiones con el Router para de esta forma tener como resultado un sistema de transmisión de datos como el que se presentó en la Fig. 32 del capítulo 5.

7. Conclusiones

- La tecnología TVWS es un sistema de distribución de banda ancha intermedia de bajo costo para uso principalmente en las zonas rurales con servicios insuficientes o desatendidos. Las simulaciones, los bancos de pruebas, pilotos y las regulaciones desarrolladas para TVWS tanto en diferentes partes del mundo como en nuestro país, confirmar el valor, la facilidad de implementación, la flexibilidad y la confiabilidad en general de la tecnología TVWS para ser claramente una solución a los desafíos de conectividad en áreas rurales y brindar conectividad de banda ancha a largas distancias.
- En áreas urbanas densas, es muy posible que no haya espectro disponible para el uso de TVWS. Sin embargo, esta falta de espectro es poco probable en áreas rurales, ya que con unos cuantos transmisores se cubren grandes áreas utilizando pocos canales, dejando la mayor parte de los 222 MHz del espectro de TV disponible para su uso por dispositivos TVWS. Con lo cual se abre la oportunidad de proporcionar soluciones en muchas disciplinas, incluido el aprendizaje electrónico, servicios bancarios, gobernanza, la salud, seguridad con sistema de emergencias, hogares inteligentes mediante el uso de IOT y áreas de crecimiento económico como agricultura, innovación y mucho más.
- Las escuelas públicas en el área rural no tienen acceso a un servicio de Internet de calidad, lo que restringe el desarrollo de su población generando una brecha entre el sector rural y urbano; el principal motivo del problema es que las instalaciones de telecomunicaciones principalmente se enfocan en las áreas de mayor densidad poblacional, por lo que es difícil

encontrar conexiones de última milla de calidad y con una relación precio ancho de banda favorable. Es por esto que surge la necesidad e importancia de poder implementar este proyecto.

- Los usuarios principales (TV) se pueden proteger mediante una predicción precisa de los espacios en blanco de TV mediante el uso de modelos de radiopropagación. Estos modelos caracterizan en qué medida afecta el medio de propagación a la energía electromagnética que se transporta entre una antena transmisora y una antena receptora. Se ha utilizado el modelo de Free Space para calcular el presupuesto de potencia y el modelo de Longley-Rice para hallar la cobertura de una posible área de implementación mediante RadioMobile, la literatura muestra que este modelo es uno de los más acertados para modelar la propagación en TVWS, sin embargo lo que llevara a concluir que modelo tiene un mejor rendimiento, será la comparación con medidas tomadas en campo de las características de la señal.
- Mediante la matriz de infraestructura tecnológica se pudo verificar las características que deben tener en cuenta al momento de examinar los dispositivos de TVWS para llevar a cabo un enlace satisfactorio, en ella se presentan algunos de los equipos que se encuentran en el mercado, mostrando sus ventajas y desventajas, para con esto tener una idea de que dispositivos pueden ser la mejor opción en cuanto a eficiencia y precio.
- Se ha diseñado y simulado una antena de matriz de dipolos periódicos (LPDA) de banda ancha de veinte elementos para aplicaciones de estaciones base y CPE de espacios en blanco de TV (TVWS). El tamaño de la antena es grande debido a la mayor longitud de onda y a la ganancia

que se quiere obtener. Se obtiene una banda ancha de 470-698 MHz para $VSWR \leq 2$. La ganancia de la antena esta entre 11 dB a 13 dB en toda la banda de operación. La antena ha logrado una eficiencia de radiación entre 82% y 99% en la frecuencia de operación deseada. El patrón de radiación muestra el comportamiento final de la antena con una relación máxima entre lóbulos frontales y posteriores (F/B) máxima de 22 dB.

- Se ha desarrollado la fase de planificación para la implementación de un sistema de transmisión de datos mediante el uso de la tecnología TVWS, donde el lector podrá encontrar, características, recomendaciones, ejemplos y la metodología para llevar a cabo el proyecto, sus puntos de importancia son: la selección del área de implementación, la selección del equipo TVWS y la evaluación e instalación de los dispositivos.
- El costo directo, sin incluir lugar de instalación (poste, mástil, etc.), para implementar un enlace punto a punto para la transmisión de datos mediante el uso de TVWS es de \$13'193.100 con el cual se podrá obtener, sin condiciones adversas, un enlace con velocidad de 30 Mbps por cada canal con ancho de banda de 6MHZ utilizado; además con la ventaja de poder expandir la red, ya que con una estación base se pueden tener asociados alrededor de 100 CPE's, la capacidad que le llegue a cada uno dependerá del ancho de banda que se tenga dado por la cantidad de canales libres que hallan a disposición, el costo de cada CPE es de \$3'273.912.

8. Trabajo Futuro y Recomendaciones

A futuro se recomienda llevar a cabo la construcción, implementación y prueba del proyecto planteado en este documento, ya que se evidencia la necesidad de llevar la teoría a la práctica y comprobar su funcionalidad en tiempo real. Puesto que por cuestiones de tiempo, falta de recursos y la situación de aislamiento que conlleva la pandemia del COVID-19 no se pudo llevar a cabo en la investigación actual.

Para iniciar la implementación del este proyecto, en primera medida se aconseja buscar algún patrocinador interesado en el tema que desee contribuir a su progreso, pues como se ha evidenciado previamente los componentes de la estación base y el punto cliente son costosos. Por lo tanto, como posibles inversores interesados se han pensado en las alcaldías municipales cuyas veredas sin acceso alguno a internet tienen escuelas que presentan limitación en los alcances de la educación y por lo tanto en el desarrollo del municipio.

De igual manera se debe presentar la idea a diversos futuros inversores hasta lograr la financiación necesaria, dando así inicio al estudio de la zona en la cual se pretende ubicar el servicio de internet, pues hay que tener en cuenta que debe cumplir con los requerimientos regulatorios y técnicos exigidos por la ANE; paralelamente se haría la compra de los equipos para finalmente hacer la instalación tanto de la estación base como del punto cliente con el cual se lleva el servicio.

Para dar integralidad al proyecto sería óptimo solicitar a la alcaldía interesada, un proyecto social completo incluyendo una sala de cómputo, si no se cuenta con una, pues la meta es conectar a los desconectados mediante tecnologías de la información y la comunicación.

Cabe resaltar la importancia de tener a la mano dichas tecnologías en el siglo XXI, en especial desde que la pandemia generó la necesidad virtualizar todos los servicios que usualmente requerían presencia física en las oficinas de cada entidad correspondiente.

Bibliografía

6Harmonics. (2016). *GWS 4000 Series Rural Broadband Solution*. Obtenido de Datasheet:

<http://www.6harmonics.com/products/>

Adaptrum. (2017). *ACRS2-B1000*. Obtenido de Datasheet: <https://www.adaptrum.com/Products>

Agencia Nacional Del Espectro. (2019, 2 de mayo). *Resolución 181 de 2019*. Diario Oficial No.

50.941. Obtenido de <https://normograma.mintic.gov.co>

AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. (2020, 1 de Abril). *RESOLUCIÓN 105 DE 2020*.

Colombia: Diario Oficial No. 51.274. Obtenido de <https://normograma.mintic.gov.co>

airLink. (2020). *Herramienta online para simulación de radioenlaces*. Obtenido de

<https://link.ui.com/#>

Alcaldía de Bucaramanga. (2016-2019). *Plan Estratégico Tecnologías de la Información y*

Comunicaciones. Bucaramanga, Santander, Colombia. Obtenido de

<https://www.bucaramanga.gov.co/el-atril/tecnologias-de-la-informacion-y-las-comunicaciones-tic/>

Almantheri, H., Al Amri, K., Al Bahri , Y., & Al Rahbi, G. (2018). *TV White Space (TVWS) trial*

in Oman: Phase one (Technical). Beirut: Sixth International Conference on Digital

Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC).

Amine, L., Adil, E., & Aawatif, P. (2017). *Toward enhancing connectivity through TVWS in outdoor rural isolated environment*. Beirut: Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET).

ANE. (Febrero de 2017). *Charla introductoria: Tecnología Espacios en Blanco*. Obtenido de Ane.gov.co:
http://portalanterior.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Espacios_en_Blanco_TV/Presentaciones_Eventos/20170209_3.%20TVWS%20Intro.pdf

ANE. (2017). *Más de 550 beneficiados por proyecto TVWS*. Obtenido de Ane.gov.co:
<http://portalanterior.ane.gov.co/index.php/informacion-de-interes/noticias/680-mas-de-550-beneficiados-por-proyecto-tvws>

ANE. (2020). *Disponibilidad de canales TVWS en un área determinada*. Obtenido de ane.gov.co: <https://tvwhitespaces.ane.gov.co/app/>

Aragon , D., & Gomez, L. (2019). *Estudio de la tecnología de TVWS en Colombia y comparación con el mundo*. Cundinamarca: Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.

Arteaga, A., & Navarro, A. (2016). *Availability of TV White Spaces Using Spectrum Occupancy Information and Coverage Maps*. IEEE Latin America Transactions.

Barrios, A., & Arjona, R. (2018). *Comparación de Modelos de Radiopropagación en el Área Suburbana de la Ciudad de Barranquilla*. Universidad de Pamplona. Barranquilla: Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.

- Borda, D. (2019). *Estudio técnico de modelos de propagación de cobertura en el servicio de televisión*. Bogotá: Universitaria Agustiniiana.
- Borth, D., Ekl, R., Oberlies, B., & Overby, S. (2008). *Considerations for Successful Cognitive Radio Systems in US TV White Space*. Chicago: 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks.
- Buettrich, S. (2007). *Cálculo de Radioenlace*. TRICALCAR.
- Carlson Wireless. (2018). *RuralConnect Gen 3*. Obtenido de Datasheet:
<https://carlsonwireless.com/ruralconnect/>
- Carro, G., Hernández, P., & Beltramelli, F. (2019). *Consideraciones para el Despliegue de Redes basadas en Radio Cognitiva: Ocupación y Regulación del Espectro*. Montevideo, Uruguay: Revista Politécnica.
- Castellanos, G. (2013). *DVB-T and DVB-T2 Measurements in Bogota Metropolitan área*. VI Conferencia Científica de Telecomunicaciones, Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
- Congreso de la república. (2009, 30 de julio). *Ley 1341 DE 2009*. Colombia: Diario Oficial No. 47.426. Obtenido de <http://www.secretariassenado.gov.co/>
- CONPES 3968 - Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia. (2019). *Declaración de importancia estratégica del proyecto de desarrollo, masificación y acceso a internet nacional, a través de la fase II de la iniciativa de incentivos a la demanda de acceso a internet*. Bogotá : DNP - Departamento Nacional de Planeación .

- Cruz, V. (2005). *Diseño y Fabricación de una Antena Log- Periódica 200-1000 MHz*. Lima - Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- CST. (2020). *CST Studio Suite (edición estudiantil)*.
- Cuevas, J. (2017). *Espacios blancos de la TV para zonas rurales*. Cartagena: Instituto Federal de Telecomunicaciones.
- Daza, C. (2017). *Espacios en Blanco en Colombia*. Obtenido de ITU:
https://www.itu.int/en/ITU-R/seminars/rrs/RRS-17-Americas/Documents/Forum/4_ANE%20Carolina%20Daza%20TVWS.pdf
- Denkovska, M., Latkoski, P., & Gavrilovska, L. (2011). *Geolocation database approach for secondary spectrum usage of TVWS*. Belgrade: 19th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers.
- Departamento Nacional de Planeación DNP. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: Pacto por Colombia, pacto por la equidad*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación .
- Deygout, J. (1966). *Multiple knife-edge diffraction of microwaves*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
- Don, J. (4 de Octubre de 2019). *¿Qué es un inyector PoE y cómo utilizarlo?* Obtenido de <https://xxxamin1314.medium.com/qu%C3%A9-es-un-inyector-poe-y-c%C3%B3mo-utilizarlo-10247dce4b97>

Espinosa, N., Arbeláez, N., & Castellanos, G. (2017). *Recognition of available TV channels for TVWS using SDR devices*. IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, COLCOM 2017–Proceedings.

Flores, A., & Guerra, R. (2013). *IEEE 802.11af: a standard for TV white space spectrum sharing*. IEEE Communications Magazine.

Guerra, R. (2019). *Large-Scale Software Defined Radio Systems: Design, Implementation, and Evaluation*. Houston, Texas: Rice University.

Herrera, O., & Gutierrez, A. (2012). *WRAN AND LTE COMPARISON IN RURAL ENVIRONMENTS*. Medellín: Centro de Investigación de las Telecomunicaciones (CINTEL).

IEEE Standard. (2009). *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*. IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004).

IEEE Standard. (2019). *Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Wireless Regional Area Networks-Specific requirements-Part 22: Cognitive Wireless RAN MAC and PHY specifications*. IEEE Std 802.22-2019 .

IGAC. (5 de Noviembre de 2015). *Tan solo el 0,3 por ciento de todo el territorio colombiano corresponde a áreas urbanas*. Obtenido de igac.gov.co:
<https://igac.gov.co/es/noticias/tan-solo-el-03-por-ciento-de-todo-el-territorio-colombiano-corresponde-areas-urbanas-igac>

Iglesias, R. (2019). *La nueva tecnología TVWS en el contexto del uso eficiente del espectro*.

Obtenido de josecretta: <https://josecretta.com/tecnologia/la-nueva-tecnologia-tvws-en-el-contexto-del-uso-eficiente-del-espectro/>

Iglesias, R. (19 de Agosto de 2019). *TV white spaces: uso dinámico del espectro para conectar a*

los desconectados. Obtenido de josecretta: <https://josecretta.com/tecnologia/tv-white-spaces-uso-dinamico-del-espectro-para-conectar-los-desconectados/>

Ishizu, K., Hasegawa, K., Mizutani, K., Sawada, H., Yanagisawa, K., Matsumura, T., & Sasaki,

S. (2014). *Field experiment of long-distance broadband communications in TV white*

space using IEEE 802.22 and IEEE 802.11af. Sydney: International Symposium on

Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC).

Ismail, M., Kissaka, M., & Mafole, P. (2019). *television White Space Opportunities and*

Challenges: What Next for the Developing Countries? Nairobi, Kenya: IST-Africa Week

Conference (IST-Africa).

Jiménez, C. (2011). *Dipolo Impreso para Aplicaciones Wi-Fi y Caracterización de la Ganancia*

por Medio de la Celda TEM. Barcelona: Universidad Autonoma de Barcelona.

Kasampalis, S., Lazaridis, P., & Zaharis, Z. (2015). *Longley-Rice model prediction inaccuracies*

in the UHF and VHF TV bands in mountainous terrain. Ghent: IEEE International

Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting.

Krom, A. (2016). *Colombia apuesta a los espacios en blanco para extender Internet en las zonas*

rurales. Obtenido de Telesemana:

<https://www.telesemana.com/blog/2016/09/05/colombia-apuesta-a-los-espacios-en-blanco-para-extender-internet-en-las-zonas-rurales/>

Lameda, O., & Durante, C. (2007). *Cálculo del Parámetro de Radio Atenuación Troposférica*. Venezuela: Universidad Rafael Bellosó Chacín.

Lamola, M., Johnson, D., & Densmore, M. (2019). *Performance Analysis of Dual 5 GHz WiFi and UHF TV White Space Network Links*. Pretoria, South Africa: IEEE 2nd Wireless Africa Conference (WAC).

Lysko, A., Burger, C., & Hagopian, E. (2019). *Comparison of the Modelled Maximum Wireless Link Distance for TVWS and Wi-Fi within South African Regulatory Constraints: Which Technology Wins and in Which Scenarios?* Pretoria, South Africa: IEEE 2nd Wireless Africa Conference (WAC).

Maps. (2020). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps>

Martínez, J. (13 de Julio de 2018). *Zonas de Fresnel en un radioenlace*. Obtenido de prored.es: <https://www.prored.es/zonas-de-fresnel-en-un-radioenlace/>

Mercado Libre. (2020). *Cable Coaxial Chipa Rg6 X 50 Mts Blanco Con Conectores*. Obtenido de mercadolibre: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-474839033-cable-coaxial-chipa-rg6-x-50-mts-blanco-con-conectores-_JM?quantity=1#position=5&type=item&tracking_id=afc6ee43-faa9-4964-adb9-98f73a37bc40

Ministerio de educación. (2020). *Articulo*. Obtenido de minedu.gov.co:

https://www.minedu.gov.co/1759/articles-321649_recurso_1.pdf

Mizutani, K. (2015). *IEEE 802.11af Indoor Experiment in UK Ofcom TVWS Trial Pilot Program*. Glasgow: IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring).

NaiQian, Z., XiaoShuang, R., & LiBiao, J. (2018). *A Spectrum Allocation Algorithm Based on Maximum System Capacity in TVWS*. Beijing: 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC).

Ndlovu, K., Mbero, Z., Kovarik, C., & Patel, A. (2017). *Network performance analysis of the television white space (TVWS) connectivity for telemedicine: A case for Botswana*. Cape Town: IEEE AFRICON.

Niño, R., & Díaz, J. (2017). *Espacios en blanco, una nueva alternativa de conectividad para Colombia*. Obtenido de portalanterior.ane.gov.co:
http://portalanterior.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Espacios_en_Blanco_TV/Presentaciones_Eventos/20181026_ANE_USANTOTOMAS_ESPACIOS_EN_BLANCO_COL.pdf

Pautacio, L. (2016). *Las bandas de uso libre tienen que estar en cada rango de frecuencias porque son un motor para la innovación*. Obtenido de Telesemana:
<https://www.telesemana.com/blog/2016/11/21/las-bandas-de-uso-libre-tienen-que-estar-en-cada-rango-de-frecuencias-porque-son-un-motor-para-la-innovacion/>

- Peña, O., Delgado, J., & Guerrero, L. (2017). *TV White Spaces. A case study in Ecuador*. St. Petersburg: IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).
- Pietrosemoli, E., & Zennaro, M. (2013). *Tv White Spaces a pragmatic approach*. ICTP-The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics.
- Pineda, D., & Hernandez, C. (2019). *Cognitive radio for TVWS usage*. TELKOMNIKA.
- Pinifolo, J., Rimer, S., & Paul, B. (2015). *Design of a low cost television White Space Z antenna*. Lilongwe: IST-Africa Conference.
- Radio Mobile. (2020). *Radio Mobile Version 11.6.6*.
- Rahman, N., & Jamlos, M. (2016). *A Wideband Log Periodic Antenna with Fractal Koch Geometry and Rectangular Stub*. Kuala Lumpur: International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE).
- Ramos, F. (2013). *Cálculo de la atenuación por vegetación en un radioenlace*. Obtenido de radioenlaces.es: <http://www.radioenlaces.es/articulos/calculo-de-la-atenuacion-por-vegetacion-en-un-radioenlace/>
- Ramos, F. (s.f.). *Diseño de Radioenlaces*. España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Redline Communications. (2017). *RDL-3000 ELLIPPSE*. Obtenido de Datasheet: <https://rdlcom.com/tv-white-space/>
- Rojas, E., Sanchez, C., & Gomez, N. (1998). *Teoria de modelos y diseño de una antena Log-Periodica*. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.

- Rubén, A. (14 de Julio de 2018). *Cómo elegir el mejor cable de Ethernet para tu router en casa*. Obtenido de computerhoy: <https://computerhoy.com/reportajes/tecnologia/como-elegir-mejor-cable-ethernet-tu-router-casa-276105>
- Sarkar, B., Shankar, S., & Singh, A. (2016). *Utilization of television white space for high speed Wi-Fi application TVWS usage*. Noida: th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering (Confluence).
- Sun, C., & Guo, X. (2017). *Reducing Complexity of TVWS Operation: Complying with European Regulations*. IEEE Vehicular Technology Magazine.
- tp-link. (2020). *Proveedor global de dispositivos y accesorios de redes confiables*. Obtenido de <https://www.tp-link.com/co/home-networking/wifi-router/>
- Tran, M., Dang, T., & Hoang, V. (2014). *A study on Television White Space technology and its applicability in Vietnam*. Hanoi: International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014).
- Treviño, J. (2003). *Modelos de Propagación*. Puebla-Mexico: Universidad de las Américas Puebla.
- Trujillo, R. (2012). *Diseño y construcción de antenas planares de banda ancha con aplicaciones en sistemas de telecomunicaciones*. Baja California . Mexico: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- USAID. (2019). *Diseño y despliegue de infraestructura TVWS para la mejora de servicios de conectividad y aplicaciones con Internet de las Cosas*. San Miguel, El Salvador.

Vásquez, D. (2018). *Análisis y Propuesta Técnica para el Despliegue e Implementación de Tv White Space en Ecuador*. Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas.

Xirio. (2020). *Simulación profesional de cobertura radioeléctrica online*. Obtenido de <https://www.xirio-online.com/>: <https://www.xirio-online.com/web/Main.aspx>

Yassini, R. (2014). *Television White Spaces: Assessing TVWS for Rural Broadband Access*. University of New Hampshire.

zcmayoristas. (2020). *MIKROTIK ANTENA SECTORIAL 19 DBI 120G 5GHZ*. Obtenido de zcmayoristas: <https://zcmayoristas.com/zcwebstore/radios-enlaces/148-antena-sectorial-19-dbi-120g-5ghz.html>

Anexos

Anexo A. Contacto con Proveedores de dispositivos para TVWS.

A continuación, se presentan capturas de pantalla con fragmentos de las conversaciones entabladas con cada una de las empresas fabricantes de dispositivos para TVWS seleccionadas en la investigación.

Figura 57.

Conversación con personal de 6Harmonics.

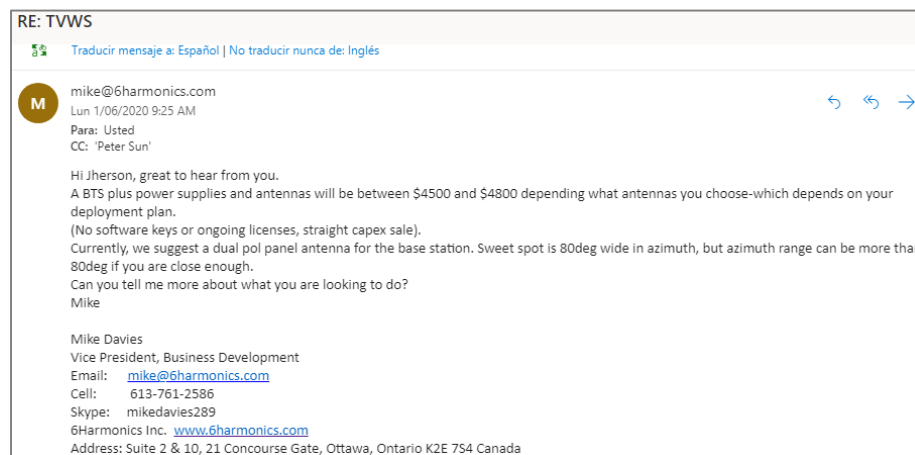
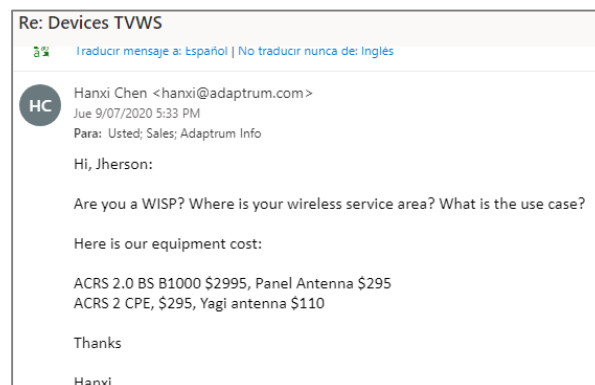


Figura 58.

Conversación con personal de Adaptrum.



La siguiente figura muestra la cotización presentada por la empresa Winncom Technologies, con los equipos necesarios para el sistema de transmisión de datos. En ella hizo falta agregar las dos antenas necesarias (estación base y CPE), el personal recalco esto y posteriormente envió el precio de cada una de las antenas, estos precios se pueden encontrar en la matriz de infraestructura tecnológica o en el APU presentado en el Anexo B.

Figura 59.

Conversación con personal de Winncom Technologies

RE: Cotización TVWS

From: Santiago Bravo Vidal
 Sent: Wednesday, December 2, 2020 4:38 PM
 To: jherson_caceres@hotmail.com
 Cc: 'German Guerrero' <gguerrero@rdlcom.com>
 Subject: Cotización TVWS


Hola Jherson,

A continuación te paso la cotización que teníamos pendiente en tecnología TVWS, da una revisada y lo podemos conversar:

COTIZACIÓN - DDP Bogotá					
#	Part Number	Description	Q	Unit price	Extended Price
Products					USD 3,632.43
1	3K-GPS-ANT	Antenna GPS Kit - 3978D GPS Ant TNC(f) Coax LMR195 2xTNC(m) 20ft(6m) Pole Mount Hardware	1	USD 114.51	USD 114.51
2	PPT-8	Cable Assembly POE Power Cord 6ft (1.8m) Shielded - North America	2	USD 7.23	USD 14.46
3	3K-LW-MNT-SS-02	Mounting Kit - Pole 1.0-4.25in(25-105mm) Lightweight 2x16in(406mm) Coax LMR240 2xN(m) 90-deg Cables	1	USD 54.24	USD 54.24
4	OPK-3K-ELLIPSE-PMP10-G1	Options Key RDL3000 XP Ellipse PMP up to 10 Remotes Max Mbps. Included in price	1		
5	PS-ACDC-POE-30W-02	Power Supply POE AC 100-240VAC 30W 802.3at Shelf-Wall GigE 2xRJ45	1	USD 42.19	USD 42.19
6	3K-SC-RF470698-GPS-04	RDL3000 Ellipse 0470-698MHz Base Station UHF TVWS RF-2xN(f) GPS-1XTNC(f) Eth-1xRJ45 100Base-T Gland	1	USD 2,406.62	USD 2,406.62
7	LP-POE-DIN-IND-01	Surge Arrestor Ethernet GigE PoE-Compatible In-Cabinet DIN-mount Industrial 2xRJ45 (PD-9001GR/AC)	1	USD 36.16	USD 36.16
8	OPK-3K-CPE-UNLMBPS-D1	Options Key RDL3000 XP Enterprise PMP Remote Unlimited Mbps	1		
9	ENT-CPE-470698RF-D1	RDL3000 Enterprise 0470-698MHz UHF TVWS 2xN(f) Eth-RJ45 AC-POE (AT) Gland MNT	1	USD 922.07	USD 922.07
10	LP-POE-COMM-GBE-01	Surge Arrestor Ethernet GigE PoE-Compatible Outdoor Wall Mount 2xRJ45 Jacks	1	USD 42.19	USD 42.19
Support					USD 415.84
12	RC-3000-SEC-SW-12	RedCare Software & Support Protection Plan - RDL-3000 Sector Controller - 12 Months - Per radio	1	USD 332.67	USD 332.67
13	RC-3000-ENT-SW-12	RedCare Software & Support Protection Plan - RDL-3000 Enterprise - 12 Months - Per radio	1	USD 83.17	USD 83.17
14					
SUB TOTAL					USD 4,048.27
IVA					USD 769.17
TOTAL					USD 4,817.44

Quedo atento,

Saludos,



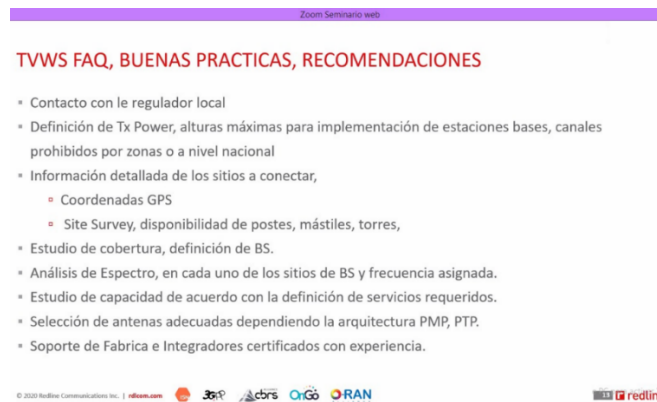
Santiago Bravo Vidal
 Regional Sales Manager
 Andean Region
 Winncom Technologies Corp.

- Mobil: (+57) 304-2876722
- Email: s.bravo@winncom.com
- Site: www.winncom.com/es
- Address: Calle 119 # 7-21 Torre A, Piso 1101 Bogotá, Colombia

La siguiente figura presenta un captura de pantalla de uno de los Webinars asistidos, dados por Redline y Winncom, donde se muestran las recomendaciones dadas, a partir de la experiencia que han recolectado después de numerosos proyectos en diferentes partes del mundo.

Figura 60.

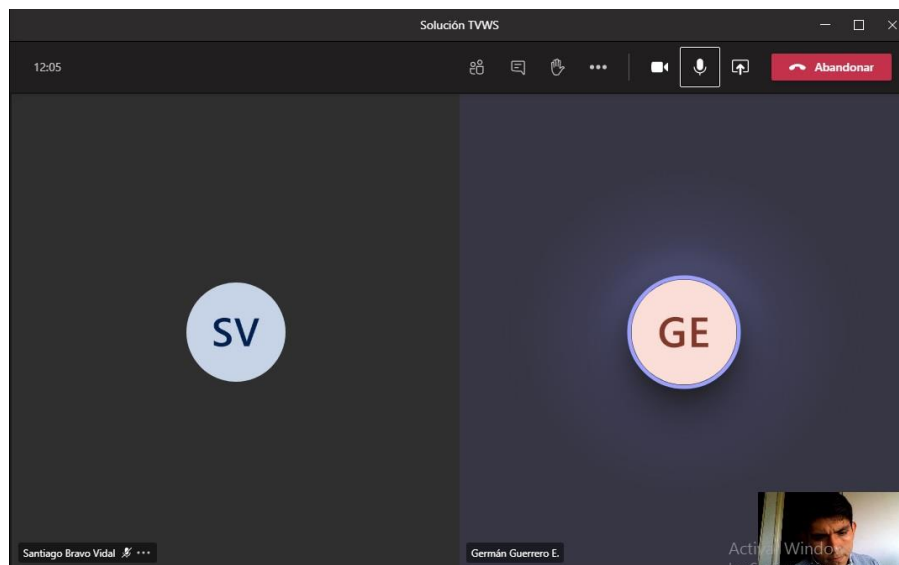
Webinar dado por Redline Communications.



La siguiente figura muestra una captura de pantalla de la reunión virtual realizada con personal de Redline Communications y Winncom Technologies.

Figura 61.

Reunión virtual con personal de Redline y Winncom Technologies.



Anexo B. Análisis de Precios Unitarios (APU).

En la siguiente tabla se presenta el Análisis de Precios Unitarios donde se encuentra detallado, junto a sus precios, todos los equipos, herramientas y personal necesario para la implementación de un sistema de transmisión de datos utilizando la tecnología TVWS. De esta tabla sale la información pertinente para elaborar el presupuesto presentado en el capítulo 6.

Tabla 20.*Análisis de Precios Unitarios*

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
INSTALACIONES Y EQUIPOS					
SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE EMPOTRADO PARA MÁSTIL TELESCÓPICO					
Descripción	Cantidad	Unidad	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Cemento	2	KG	\$ 1.150	\$ 2.300	
Arena	0,3	M3	\$ 95.019	\$ 28.506	
					\$ 30.806
SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE MÁSTIL TELESCÓPICO					
Descripción	Cantidad	Unidad	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Mástil telescópico seccionado 21 metros	1	UND	\$ 723.020	\$ 723.020	
Bracket sujeción de retenida	1	UND	\$ 39.627	\$ 39.627	
Base de mástil	1	UND	\$ 239.319	\$ 239.319	
Ancla tipo T para piso	3	UND	\$ 6.008	\$ 18.024	
Cable retenida 3/16"	45	M	\$ 3.119	\$ 140.355	
Abrazadera tipo nudo cable 3/16"	12	UND	\$ 700	\$ 8.400	

Rozadera para cable 3/16"	6	UND	\$ 982	\$ 5.892
Abrazadera tipo nudo cable 3/16"	12	UND	\$ 700	\$ 8.400
Tornillería	1	GBL	\$ 45.000	\$ 45.000
				\$ 1'228.037

SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Electrodo de 45 A	1	UND	\$ 31.666	\$ 31.666	
Mejorador de suelo	1	SACO	\$ 120.784	\$ 120.784	
Conector de bornes	2	UND	\$ 58.315	\$ 116.630	
Barra de unión con aisladores	1	UND	\$ 190.175	\$ 190.175	
Conector de varilla	2	UND	\$ 5.018	\$ 10.036	
Cable de cobre recubierto 4 AWG	5	M	\$ 32.878	\$ 164.390	
Tornillería	1	GBL	\$ 45.000	\$ 45.000	
				\$ 678.681	

SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE SISTEMA DE PARARRAYOS

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Punta pararrayos con mástil 1.2 metros	1	UND	\$ 290.540	\$ 290.540	
Electrodo de 45 A	1	UND	\$ 31.666	\$ 31.666	
Conector de bronce	3	UND	\$ 58.315	\$ 174.945	
Conector de varilla	2	UND	\$ 5.018	\$ 10.036	
Registro para electrodo	1	UND	\$ 77.350	\$ 77.350	

Cable de cobre	25	M	\$ 28.206	\$ 705.150
recubierto 10 AWG				
Herraje adaptador	2	UND	\$ 71.813	\$ 143.626
mástil				
Contador de descargas	1	UND	\$ 692.001	\$ 692.000
atmosféricas				
Aislador para cable de bajada	6	UND	\$ 41.357	\$ 248.142
Mejorador de suelo	1	SACO	\$ 120.784	\$ 120.784
Tornillería	1	GBL	\$ 45.000	\$ 45.000
				\$ 2'539.239

SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE RADIO Y ANTENA DE TRANSMISIÓN

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Antena GPS kit	1	UND	\$ 412.236	\$ 412.236	
Cable de alimentación	1	UND	\$ 26.028	\$ 26.028	
PoE 6ft (1.8m)					
Kit de montaje: poste	1	UND	\$ 195.264	\$ 195.264	
Fuente de alimentación	1	UND	\$ 151.884	\$ 151.884	
PoE AC 100-240VAC 30W					
Base Station UHF	1	UND	\$ 8'661.600	\$ 8'661.600	
TVWS					
Supresor de sobretensiones	1	UND	\$ 130.176	\$ 130.176	
Ethernet, Compatible con PoE, Montaje en gabinete					

Antena Log-Periodic	1	UND	\$ 342.000	\$ 342.000	
UHF					
					\$ 9'919.188

SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE RADIO Y ANTENA DE RECEPCIÓN

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Cable de alimentación	1	UND	\$ 26.028	\$ 26.028	
PoE 6ft (1.8m)					
Supresor de	1	UND	\$ 151.884	\$ 151.884	
sobretensiones					
Ethernet, Compatible					
con PoE, Montaje en					
pared para exteriores					
CPE UHF TVWS	1	UND	\$ 2'754.000	\$ 2'754.000	
Antena Log-Periodic	1	UND	\$ 342.000	\$ 342.000	
UHF					
					\$ 3'273.912

HERRAMIENTAS

Descripción	Cantidad	Rendimiento	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Destornillador estrella	1	0,1	\$ 3.900	\$ 390	
Destornillador pala	1	0,1	\$ 3.900	\$ 390	
Llave inglesa	1	0,2	\$ 19.900	\$ 3.980	
Juego llaves	1	0,2	\$ 49.900	\$ 9.980	
milimetricas					
Flexometro	1	0,01	\$ 16.900	\$ 169	
Nivel laser	1	0,03	\$ 34.990	\$ 1.050	
Taladro	1	0,1	\$ 85.900	\$ 8.590	
Juego de brocas	1	0,5	\$ 70.000	\$ 35.000	

Pulidora	1	0,1	\$ 138.800	\$ 13.880
Disco de corte 4"	1	1	\$ 2.900	\$ 2.900
Disco de pulir 4"	1	1	\$ 32.900	\$ 32.900
Segueta 12"	1	0,1	\$ 41.500	\$ 4.150
Cinzel	1	0,01	\$ 9.600	\$ 96
Almadana	1	0,01	\$ 81.900	\$ 819
Pala	1	0,05	\$ 21.700	\$ 1.085
Pala cavadora	1	0,05	\$ 40.972	\$ 2.049
Cinta aislante	2	1	\$ 16.000	\$ 32.000
Pica	1	0,05	\$ 32.900	\$ 1.645
				\$ 151.160

TRANSPORTE

Descripción	Cantidad	Rendimiento	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Transporte de equipos y materiales	2	1	\$ 200.000	\$ 400.000	
					\$ 400.000

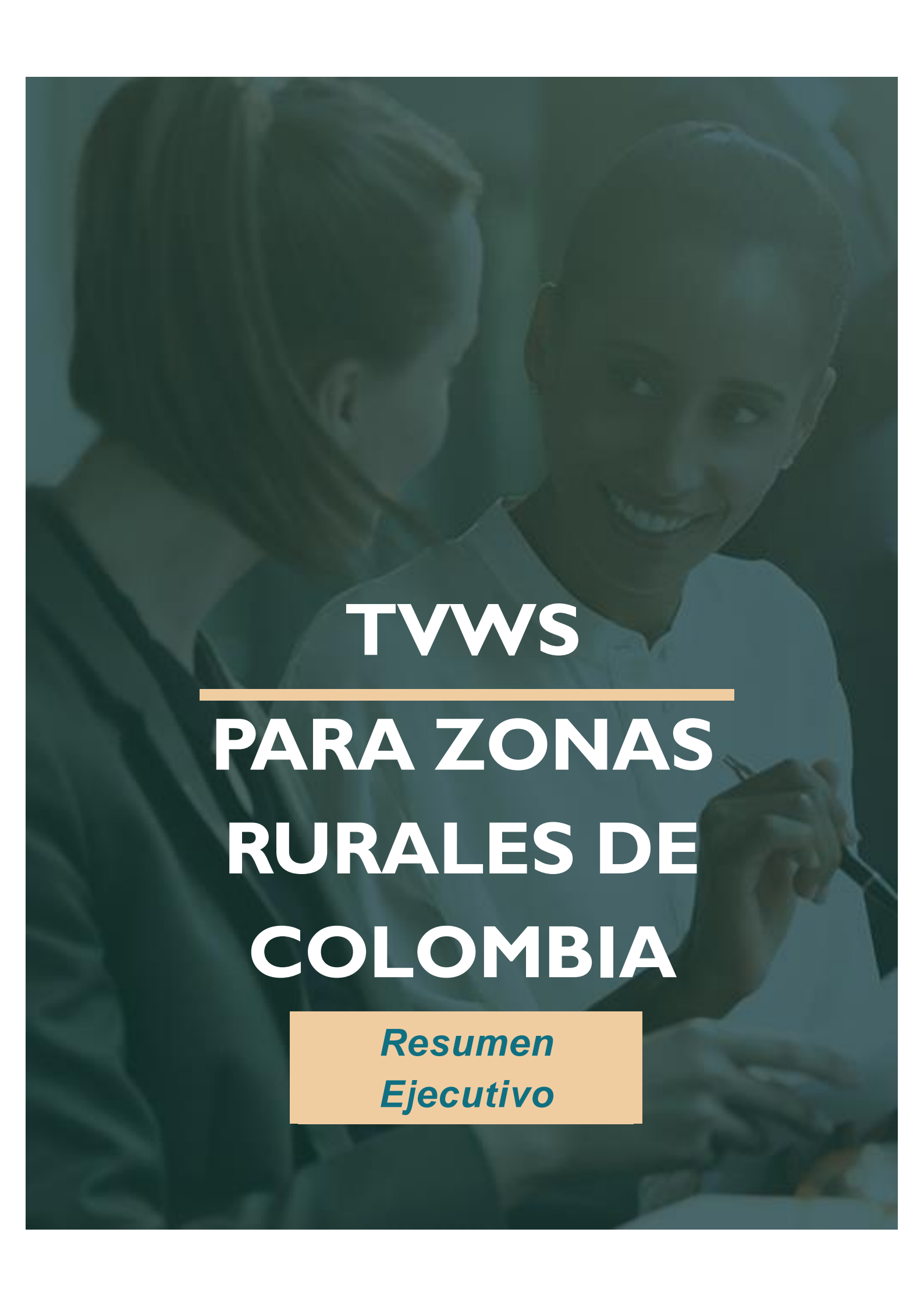
MANO DE OBRA

Descripción	Cantidad	Rendimiento	Valor parcial	Valor total	Subtotal
Ingeniero en telecomunicaciones	1	3	\$ 85.000	\$ 255.000	
Técnico en telecomunicaciones	1	3	\$ 35.000	\$ 105.000	
Obrero	1	3	\$ 31.000	\$ 93.000	
					\$ 453.000

COSTO DIRECTO \$ 18'674.023

Anexo C. Resumen Ejecutivo.

A continuación, se presenta el resumen ejecutivo desarrollado para el presente trabajo de investigación, el cual resume de forma eficiente el proyecto. En él se reflejan las secciones más importantes, ya que abarca los puntos clave, resultados a obtener y las acciones más fundamentales; esto con el fin de encontrar posibles inversores o patrocinadores, y como se menciona en el capítulo de trabajo futuro, poder así llevar a cabo su implementación.



TVWS

**PARA ZONAS
RURALES DE
COLOMBIA**

*Resumen
Ejecutivo*



TABLA DE CONTENIDO

1. Marco de referencia y naturaleza del proyecto
2. Definición del problema a solucionar
3. Definición del alcance del proyecto
4. Descripción del servicio que se brindará
5. Objetivos
 - 5.1 Objetivo General
 - 5.2 Objetivos Específicos
6. Identificación del cliente
7. Identificación del sector al que pertenece el proyecto
 - 7.1 Situación actual del sector
 - 7.2 Obstáculos y beneficios
8. Metodología
9. Inversión
10. Fuentes de financiamiento
11. Interesados del proyecto

1. MARCO DE REFERENCIA Y NATURALEZA DEL PROYECTO

La idea del presente proyecto es minimizar la brecha digital que hay entre el sector urbano y el sector rural en Colombia, proporcionando un servicio de internet a estas zonas remotas donde por diferentes razones no tienen acceso a este servicio. Para tal fin utilizaremos la tecnología TVWS (Espacios blancos de Televisión); Esta tecnología ya ha sido usada antes en el país por cuenta de la ANE (Agencia Nacional del Espectro) en asociación con el Ministerio de Educación, el Mintic, la Administración Nacional de TV (ANTV) y las empresas Azteca y Microsoft, entre otros, donde se desarrollaron tres pruebas piloto en diferentes zonas rurales del país, dejando resultados positivos en el uso de TVWS para este fin.

Pilotos desplegados: **Aguadas - Caldas**

Esta prueba piloto se desarrolló en la Institución Educativa Rioarriba. Esta escuela tiene un total de 137 estudiantes y la distancia del enlace es 8,5km. Fue la primera escuela conectada con esta tecnología en Colombia.

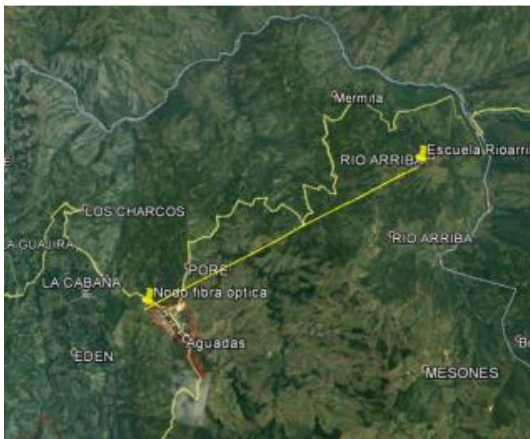


Figura 1. Ubicación del enlace TVWS – Aguadas, Caldas.



Figura 2. Video llamada del presidente con profesora de la Escuela Rioarriba.

Dibulla - La Guajira

Este piloto se ubicó en la Escuela La Punta de los Remedios, la distancia del enlace es de 5,5km y contaban con 56 estudiantes.

TVWS PARA ZONAS NO CONECTADAS

Resumen Ejecutivo



Figura 3. Fotos de la instalación de los radios y antenas del enlace TVWS Dibulla.

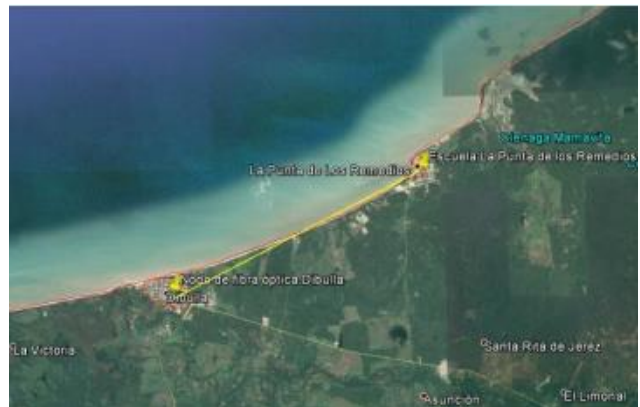


Figura 4. Ubicación del enlace TVWS - Dibulla, La Guajira.

Pamplonita – Norte de Santander

Se desarrolló en el Centro Educativo Sede El Páramo. La distancia del enlace fue de 4km y la cantidad de estudiantes que tenían era de 64 alumnos.

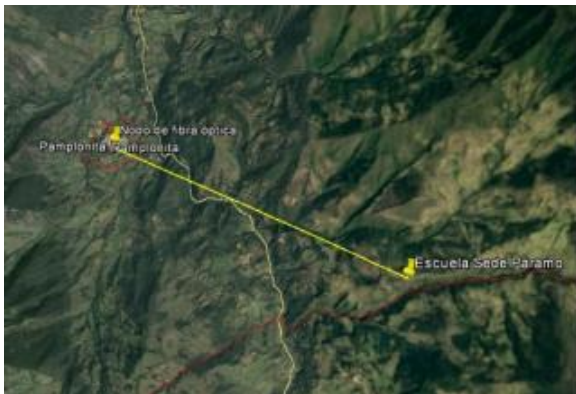


Figura 5. Ubicación del enlace TVWS-Pamplonita, Norte de Santander.



Figura 6. Estudiantes con tabletas en la escuela El páramo.

Los resultados de las pruebas pilotos a nivel de conectividad y uso del espectro, fueron satisfactorios, llevando internet de banda ancha a escuelas que anteriormente no contaban con este servicio.

Imágenes tomadas de:

http://portalanterior.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Espacios_en_Blanco_TV/Presentaciones_Eventos/20170209_3.%20TVWS%20Intro.pdf

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA A SOLUCIONAR

Actualmente, en Colombia gran parte de las comunidades rurales no tienen facilidad para un servicio fijo o estable de internet, en el país unos 20 millones de colombianos no cuentan con acceso a este servicio, lo que dificulta en gran medida que realicen sus procesos productivos, especialmente en las zonas remotas del país (Iván Mantilla-viceministro de Conectividad y Digitalización, 2019). Esto restringe el desarrollo de la población generando una brecha entre el sector rural y urbano.

Esta situación está directamente relacionada con la complejidad geográfica del país la cual impide que las facilidades de la era digital lleguen a todas las regiones. La digitalización es fundamental para impulsar el crecimiento económico, reducir la pobreza y mejorar las condiciones de vida de los colombianos.

Un estudio del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), reveló que solo el 9,4 por ciento de los hogares rurales tenían acceso a Internet hacia 2012. La reducción de la brecha digital obliga a analizar tecnologías distintas a la fibra, el móvil y los satélites, cuya implementación resulta demasiado costosa.



Figura 7. Problemática a solucionar.

Tomada de:

http://portalanterior.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Espacios_en_Blanco_TV/Presentaciones_Eventos/20170209_3.%20TVWS%20Intro.pdf

3. DEFINICIÓN DEL ALCANCE DEL PROYECTO

El espectro radioeléctrico es un recurso limitado el cual debe usarse de forma racional, eficaz y económica. No obstante, en la actualidad hay frecuencias que no están siendo usadas en todos los sitios de país. Específicamente, el espectro empleado para el servicio de radiodifusión de televisión (TV abierta analógica y Televisión Digital Terrestre – TDT), tiene una cantidad considerable de frecuencias que no están siendo utilizadas por los operadores de este servicio, ya que en el 99% de municipios del país sólo están siendo usadas cerca del 20% del total de frecuencias asignadas para los servicios de televisión.

Considerando lo anterior, en nuestro proyecto se utilizarán dispositivos que aprovechen los Espacios en Blanco de televisión (TVWS); estos radios son reconfigurables y se pueden asignar los canales de acuerdo con la necesidad del área donde se desea operar, para brindar otros servicios de telecomunicaciones diferentes a la televisión sin afectar a los canales de televisión en operación. Es importante resaltar que las frecuencias empleadas por estos dispositivos tienen la misma forma de propagación de las señales de televisión (son de mayor cobertura que los radioenlaces tradicionales de internet), TVWS permite conexiones inalámbricas de hasta 15km de distancia con tasas de transmisión de hasta 10Mbps sin tener línea de vista entre los dos puntos.

Nuestro proyecto busca realizar el despliegue de TVWS a un punto rural que no cuente con el servicio de internet, soportado en un estudio técnico sobre la zona a implementar, la regulación actual del país para TVWS, equipos requeridos y costos para su implementación, dejando así un servicio estable de conexión a internet con velocidad de hasta 10Mbps.

4. DESCRIPCIÓN DEL SERVICIO QUE SE BRINDARÁ

Hemos trazado el objetivo de aprovechar los canales libres de televisión (usar las frecuencias 470 – 698 MHz) en la banda UHF de televisión que no han sido asignadas, o que no están siendo utilizadas por los operadores, para así poder realizar transmisiones de datos. Con el objetivo de proveer Internet a lugares remotos, se usaran dispositivos de espacios en blanco que cumplen con los requisitos de bajo costo de despliegue y operación, amplia cobertura y buena velocidad de datos. Según reportes de la ANE (Agencia Nacional del Espectro), el 99 por ciento de las zonas rurales colombianas apenas se usan diez de los 48 canales disponibles.

A continuación se presenta un esquema de la infraestructura de la red a montar para llevar a cabo el presente proyecto.



Figura 7. Infraestructura de una red TVWS.

Fuente:

http://portalanterior.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Espacios_en_Blanco_TV/Presentaciones_Eventos/20181026_ANE_USAN_TOTOMAS_ESPACIOS_EN_BLANCO_COL.pdf

En resumen, el sistema consta de una estación base (Dispositivo maestro) la cual va a generar la señal que lleva los datos para la conexión a internet, esta señal va a ser transmitida por una antena; al otro lado del sistema (punto rural) va a estar una antena de recepción junto con el CPE (Equipo local de cliente o Dispositivo esclavo). Además, en ambos puntos es necesario el uso de conmutadores de red los cuales son los encargados de interconectar los dispositivos de TVWS con la red para el enlace de datos, y en el punto

TVWS PARA ZONAS NO CONECTADAS

Resumen Ejecutivo

del cliente, se debe instalar un ROUTER para la conexión inalámbrica de los dispositivos (celulares, computadores, tabletas) de los beneficiarios del proyecto (usuario final).

Por otro lado, la ANE ha elaborado la regulación para el uso de la tecnología TVWS mediante la RESOLUCIÓN 181 DE 30 DE ABRIL DE 2019, donde aparecen las normativas a seguir para el correcto uso de esta tecnología. En la siguiente figura se presentan algunas de las características que debe cumplir el sistema para que se permita su uso.

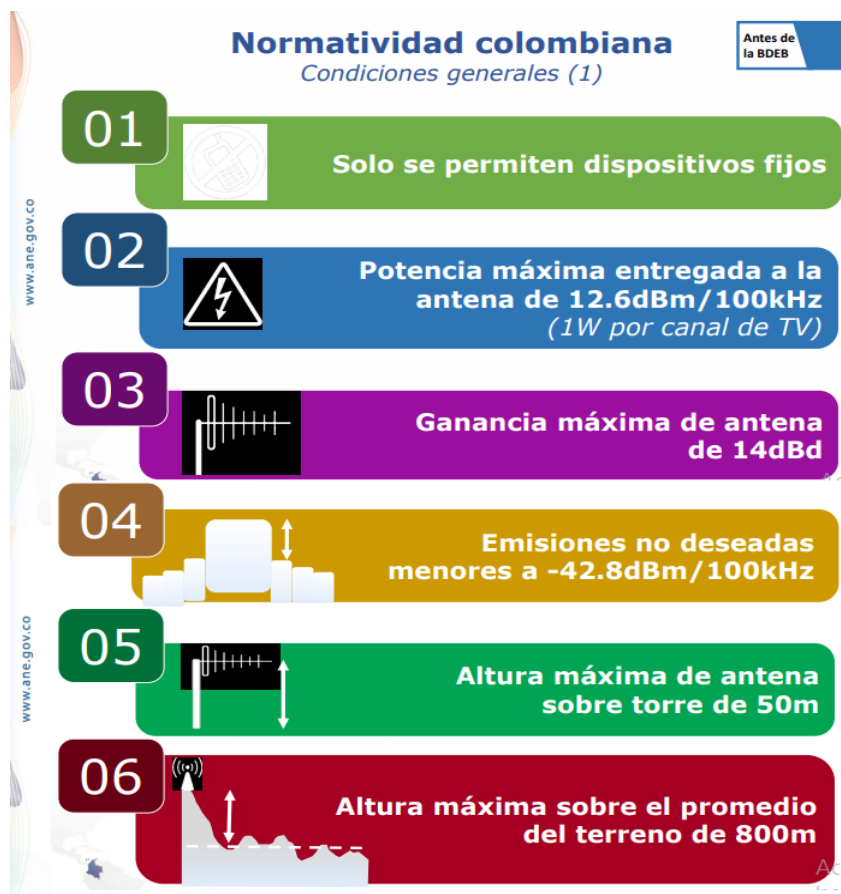


Figura 8. Normativa colombiana para el uso de TVWS.

Tomada de: https://www.itu.int/en/ITU-R/seminars/rrs/RRS-17-Americas/Documents/Forum/4_ANE%20Carolina%20Daza%20TVWS.pdf

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Implementación de un sistema de transmisión de datos para el despliegue de la tecnología TVWS en zonas rurales de Colombia.

5.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la cobertura en la zona de implementación, entre la estación base y el cliente (receptora), para comprobar la factibilidad del proyecto.
- Aplicar el marco regulatorio de TVWS en Colombia para un óptimo despliegue del sistema.
- Instalar y configurar el enlace entre la estación base y receptora para proveer el servicio de internet al punto rural.

6. IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Para la implementación de este proyecto la zona rural destinada debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- No se debe contar con servicio de internet.
- Se debe contar con computadores o tabletas.
- El cliente o punto al que se lleva el servicio, debe estar a menos de 15km de distancia de la estación base o nodo de fibra óptica disponible para el proyecto.
- La zona debe estar en un municipio que tenga frecuencias de televisión disponibles (ESPACIOS BLANCOS DE TELEVISIÓN).
- El camino en línea recta entre el receptor y la estación base (o lugar con acceso a internet) no debe tener obstáculos naturales significativos que obstruyan la comunicación.

7. IDENTIFICACIÓN DEL SECTOR AL QUE PERTENECE EL PROYECTO

7.1 Situación actual del sector

El acceso a Internet está diversificado con diferentes tecnologías, como los son 3G, 4G, xDSL, Cable Módem, USB módem, por medio de fibra óptica o satélites, lo que hace posible un excelente servicio en el sector urbano, sin embargo, los altos costos de implementación y la ubicación geográfica de las zonas rurales, son impedimentos que dan como resultado un servicio de baja calidad o en la mayoría de los casos nulo, para las comunidades remotas del país.

7.2 Obstáculos y beneficios

El mayor obstáculo para el despliegue de cobertura en Colombia ha sido la geografía del país, lo cual dificulta las comunicaciones por radioenlace.

Los beneficios en la implementación de TVWS para llevar internet son los bajos costos de despliegue y operación, amplia cobertura y una velocidad de datos aceptable. Dentro de los beneficios conexos, se impulsará al avance tecnológico, económico e intelectual, al proveer de conexión a internet a las zonas rurales del país.

8. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto, se iniciará el estudio de la zona donde se va a implementar, para evaluar la factibilidad del proyecto en ese punto geográfico en específico. Teniendo en cuenta la geografía de nuestro país, hay demasiadas montañas de gran altura lo que genera el riesgo de que la conectividad no sea eficiente.

Para tomar un ejemplo, se muestra una zona rural (Vereda de Bocas – Girón) seleccionada para esbozar la viabilidad del proyecto ya que dicha zona no cuenta con una conexión a internet y se encuentra dentro del radio establecido de 15 km a partir de una posible estación base (en este caso la UIS) para un correcto funcionamiento.

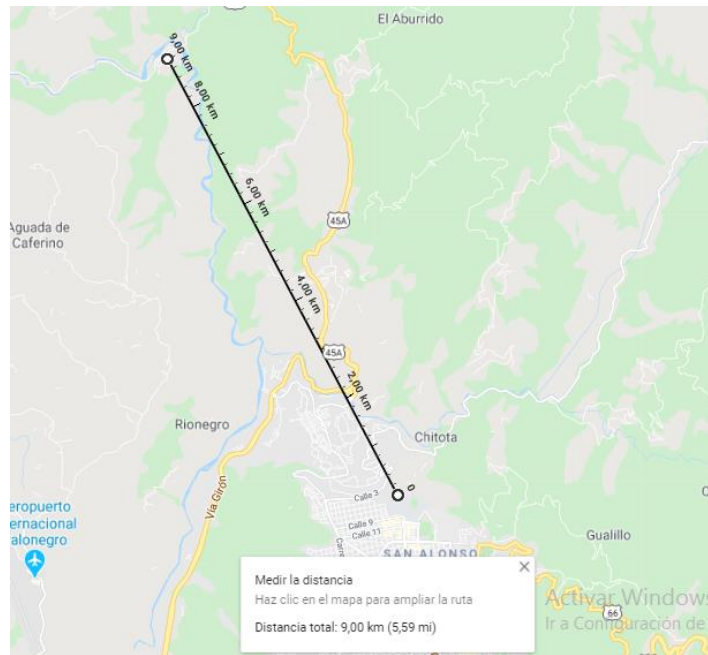


Figura 9. Vereda de Bocas-Girón a 9 km de la estación base (UIS).

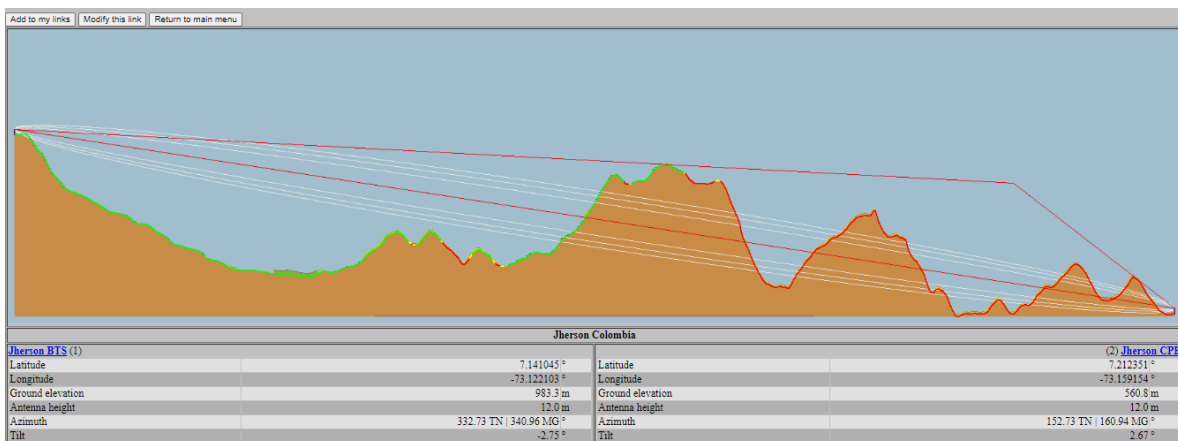


Figura 10. Simulación del radioenlace mediante el software Radio Mobile.

TVWS PARA ZONAS NO CONECTADAS

Resumen Ejecutivo

Como se observa en la Figura 10, la zona rural seleccionada no es apta para implementar un radioenlace, ya que mediante una herramienta de simulación (Software Radio Mobile), se pudo verificar que por la geografía montañosa no existe línea de vista entre el transmisor y receptor, por tal motivo se descarta el lugar, pues esto no permitiría que se diera una comunicación exitosa entre estación base y cliente.

Por otro lado, se comprobará los canales disponibles de Televisión en la zona. Los canales de radiofrecuencia de televisión (RF) de ancho de banda de 6 MHz que pueden usarse para WSD son:

Tabla 1. Lista de canales utilizables para TVWS en Colombia

Channel number	Low limit MHz	Central Frequency MHz	Up limit MHz
14	470	473	476
15	476	479	482
16	482	485	488
17	488	491	494
18	494	497	500
19	500	503	506
20	506	509	512
21	512	515	518
22	518	521	524
23	524	527	530
24	530	533	536
25	536	539	542
26	542	545	548
27	548	551	554
28	554	557	560
29	560	563	566
30	566	569	572
31	572	575	578
32	578	581	584
33	584	587	590
34	590	593	596
35	596	599	602
36	602	605	608
38	614	617	620
39	620	623	626
40	626	629	632
41	632	635	638
42	638	641	644
43	644	647	650
44	650	653	656
45	656	659	662
46	662	665	668
47	668	671	674
48	674	677	680
49	680	683	686
50	686	689	692
51	692	695	698

Tomada de:

http://portalanterior.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Espacios_en_Blanco_TV/Presentaciones_Eventos/ColombiaANE_TVWS_DB_spec.pdf

Luego de comprobar si la zona es idónea para la implementación, procedemos a la compra de dispositivos que conforman la infraestructura del sistema de transmisión de datos, los cuales, como lo vimos en la Figura 7, consta de: un dispositivo maestro (es el radio para la estación base, es decir la que va a proveer el internet), un dispositivo esclavo (el radio CPE o dispositivo de recepción),

Por último se hace montaje de la infraestructura, instalación de equipos y pruebas de funcionamiento.

9. INVERSIÓN

Para poner en marcha este proyecto se requiere de cerca de 17 millones de pesos que se van a utilizar para la compra de dispositivos TVWS y demás elementos necesarios para la infraestructura y correcto funcionamiento del sistema de transmisión de datos. En este presupuesto no se incluye los valores de mano de obra, ni de infraestructura mecánica necesaria (estos valores dependerán del análisis de sitio).

Tabla 2. Listado de Elementos y Precios.

Elemento	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo total
Radio estación base	1	UND	\$8'661.600	\$8'661.600
Radio CPE (cliente)	1	UND	\$ 2'754.000	\$ 2'754.000
Antenas	2	UND	\$350.000	\$700.000
Ethernet Switch	2	UND	\$ 235.000	\$470.000
Router	1	UND	\$129.900	\$129.900
Cable De Red UTP 10 metros	1	M	\$19.900	\$19.900
Cable Coaxial Con Conectores 50 metros	1	M	\$35.000	\$35.000
TOTAL			\$12'770.400	

10. FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Las principales fuentes de financiamiento que se pueden encontrar son los programas del gobierno como el PLAN NACIONAL DE CONECTIVIDAD RURAL que incentivan a la elaboración de proyectos que ayuden a minimizar la brecha digital en el país.

Iván Mantilla, viceministro de Conectividad y Digitalización, también recordó las propuestas presentadas por el Gobierno en el proyecto de ley de modernización del sector TIC que, según el funcionario, beneficiará especialmente a la población que no vive en ciudades capitales.

"El objetivo de otorgar el espectro en un plazo más amplio (20 años) no será recaudatorio, sino que se utilizarán las capacidades de la industria para aumentar la cobertura y así llegar a más lugares del país donde no hay conectividad", recordó.

El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) anunció los avances del proyecto de conectividad rural Centros Digitales, con el que busca llevar internet y tecnología a 10.000 comunidades de todo el país.

De acuerdo con la entidad, gracias a este proyecto los colombianos que viven en zonas rurales y apartadas del país podrán conectarse gratuitamente a internet y acceder a aplicaciones para la gestión de procesos agrícolas y pecuarios, cursos virtuales, trámites, ideas de emprendimiento, entre otros.

Para poner en marcha estos Centros Digitales, que prestarán el servicio de internet principalmente a escuelas, comunidades indígenas, parques naturales, puestos de salud y sus poblaciones aledañas, el Gobierno invertirá más de \$2 billones.

11. INTERESADOS DEL PROYECTO

Los interesados principales son Jherson Cáceres Chanagá estudiante de Ingeniería Electrónica de la UIS, Efrén Acevedo Cárdenas como Director del proyecto y Julián Rodríguez Ferreira como Codirector, quienes serán los responsables de ejecutar el proyecto de la mejor forma posible. Por otro lado este proyecto es de interés para los entes gubernamentales que deben velar por la calidad de vida de las personas sabiendo la importancia del internet en estos días.

Como conclusión se puede decir que el resultado esperado de este proyecto es obtener una transmisión de datos estable, dejando así la zona rural escogida con una conexión a internet con velocidad de 10 Mbps, y por tanto ayudar a la comunidad a unirse al progreso que trae la era digital, impulsando el crecimiento económico e intelectual y mejorando las condiciones de vida de sus habitantes.

ANEXOS: FABRICANTES DE EQUIPOS PARA TVWS

Hay que resaltar que en la prueba piloto realizada en Aguadas – Caldas, se utilizaron los dispositivos del fabricante Adaptrum, y estos tienen posteo el proyecto en su página web.

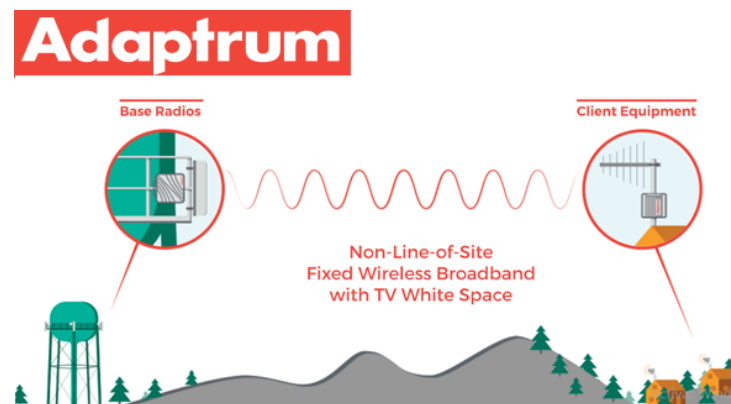


Figura 11. Fabricante Adaptrum.

Aguadas, Colombia

Fecha del proyecto: 2016

[Lee mas](#)

En las montañas de Colombia, Adaptrum y Microsoft lanzaron un proyecto de TV White Spaces para llevar Internet a las partes más remotas del país. Mucho más allá de donde la fibra puede desplegarse económicamente, el proyecto inicialmente proporciona conectividad a escuelas remotas en el pueblo de Río Arriba en el municipio de Aguadas, Caldas. Para los 135 estudiantes allí, la solución TV White Space permite el acceso a nuevos contenidos y la capacidad de conectarse con otros estudiantes; para los docentes, les permite aprovechar las nuevas herramientas e ideas en línea. Apodada "Internet de bambú" por el poste de bambú de seis metros de altura donde se montan las antenas, la nueva conexión a Internet de espacio en blanco de TV ya está ayudando a mejorar las experiencias de clase en Colombia.

Tomadas de: <https://www.adaptrum.com>

Otra posible opción de fabricante es Redline Communications, la ventaja de ellos es que tienen un punto de distribución en Bogotá-Colombia, por tanto sería más fácil el contacto con ellos.

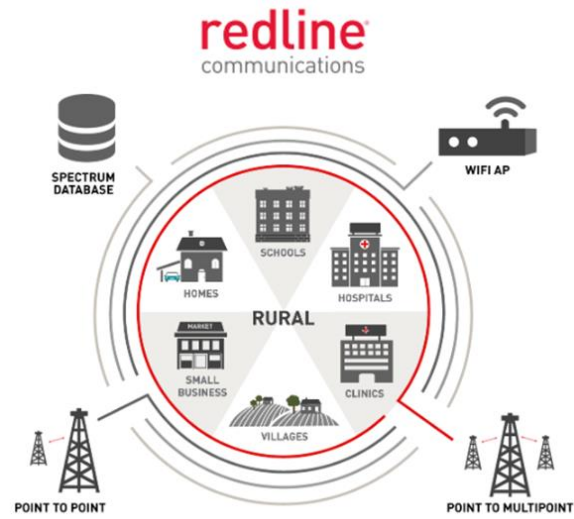


Figura 12. Fabricante Redline Communications.

Tomadas de: <https://www.rdlcom.com>

Otros fabricantes:



Figura 13. Fabricante 6Harmonics.

Tomadas de: <https://www.6harmonics.com>

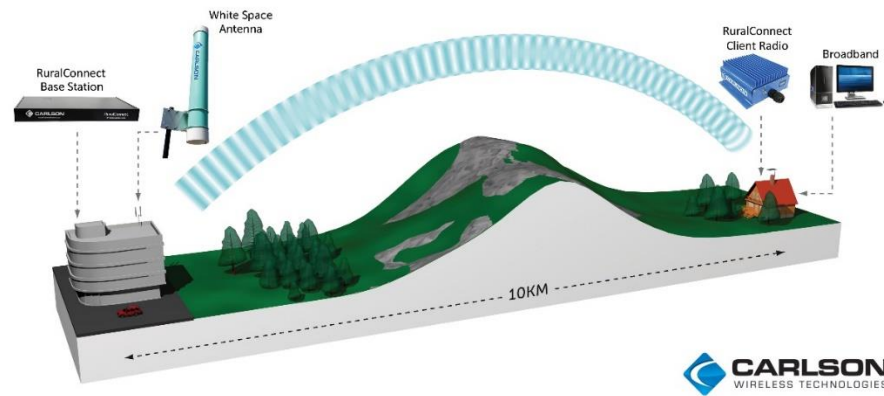


Figura 14. Fabricante Carlson Wireless Technologies.

Tomadas de: <https://www.carlsonwireless.com>

Otros elementos:

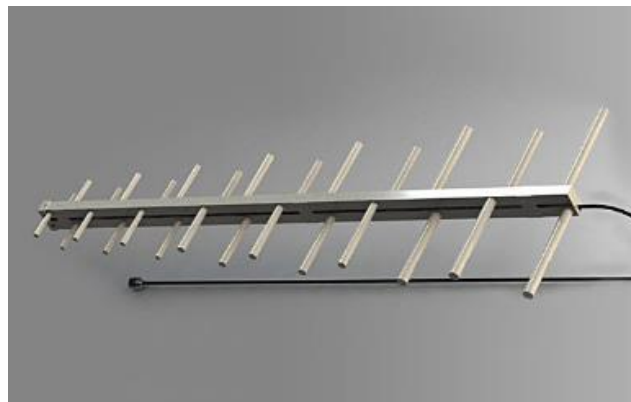


Figura 15. Antena TVWS (470-698 MHZ).



Figura 16. Router y Switch Ethernet.