



1859

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y
LOS RECURSOS NATURALES NO
RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

ANÁLISIS TÉCNICO DEL ESTÁNDAR 802.11af
COMO TECNOLOGÍA PARA APLICACIONES
IOT Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA
Y ECONÓMICA DENTRO DE LA FACULTAD
DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES.

TESIS DE GRADO PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES.

Autora:

Angelica Vanessa Chamba Cañar

Director:

Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.

Loja - Ecuador

2020

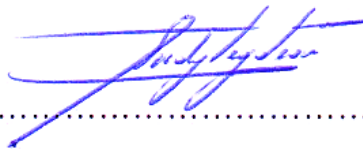
CERTIFICACIÓN

Ing. Andy Vega León, Mg. Sc.
DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación, cuyo tema versa en “**ANÁLISIS TÉCNICO DEL ESTÁNDAR 802.11af COMO TECNOLOGÍA PARA APLICACIONES IOT Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DENTRO DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES**” previa a la obtención del título de Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones, realizado por la señorita: **ANGELICA VANESSA CHAMBA CAÑAR**, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 07 de febrero de 2020



.....
Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc
DIRECTOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo, **ANGELICA VANESSA CHAMBA CAÑAR**, declaro ser autora del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cedula: 1106032491

Fecha: 06/03/2020

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LA AUTORA, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo, ANGELICA VANESSA CHAMBA CAÑAR, declaro ser la autora de la tesis titulada: “ANÁLISIS TÉCNICO DEL ESTÁNDAR 802.11af COMO TECNOLOGÍA PARA APLICACIONES IOT Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DENTRO DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES”, como requisito para optar al grado de: **INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja a los seis días del mes de marzo del dos mil veinte

Firma:



Autora: Angelica Vanessa Chamba Cañar

Cédula: 1106032491

Dirección: Loja - San José Bajo (Rvdo. Bailón y Manuel Vivanco)

Correo Electrónico: avchambac@unl.edu.ec

Teléfono: (+593) (7) 2563504 / (+593) (7) 3024644 **Celular:** (+593) 986366159

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc

Tribunal de Grado: Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, Mg. Sc.

Ing. John Jossimar Tucker Yépez, Mg. Sc

Ing. Franklin Gustavo Jiménez Peralta, Mg. Sc.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de tesis a las personas más importantes en mi vida, quienes son mi principal motivación, mis padres Jacobo Chamba y Carmen Cañar; por estar junto a mi desde el primer momento, por inculcarme buenos valores para la vida, por ser mi ejemplo a seguir, por enseñarme que con esfuerzo y sacrificio las cosas que uno se propone se pueden lograr, por estar siempre ahí con palabras de aliento que me han ayudado a ir cumpliendo cada uno de mis sueños, por apoyarme en cualquier circunstancia, es por ustedes sin duda que anhelo alcanzar esta meta.

A mi tía Idita Chamba, mi ángel eterno; quien me acompaña diariamente.

Por ese amor, apoyo incondicional y sobre todos por sus bendiciones que todos días de mi vida me acompañan infinitas gracias. Realmente Uds. son una verdadera inspiración para mí.

Angelica Vanessa Chamba Cañar

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Santísima Virgen del Cisne

Por darme el don de la vida, la salud y por la familia que me ha regalado, por guiarme a cada paso, por las innumerables bendiciones y favores recibidos.

A mis padres

Jacobo y Carmen, personas realmente admirables y maravillosas quienes con su esfuerzo, trabajo y sacrificio diario me han brindado siempre lo mejor para que no me falte nada; acompañándome durante el transcurso de mi vida y en cada etapa estudiantil; sin duda ustedes son mi pilar fundamental y ejemplo a seguir. Agradezco tanto a Dios por tenerlos conmigo.

A mi hermano

Diego, mi compañero y amigo desde la niñez, gracias por tantos momentos compartidos, por creer en mí y motivarme día tras día para que pueda superarme, alentándome a seguir adelante en mi carrera profesional.

A la Universidad Nacional de Loja y a la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

A ustedes mi total agradecimiento; en especial a los docentes que formaron parte de mi vida universitaria, gracias por su ayuda y enseñanzas impartidas.

Al Ing. Andy Vega León

Un especial agradecimiento por su compromiso con el presente proyecto de tesis; gracias por la paciencia, por el tiempo dedicado y sus conocimientos compartidos de manera desinteresada, sin duda Ud. fue una guía fundamental en la realización de la presente investigación desde un inicio hasta su finalización.

A toda mi familia

De manera especial a mis tíos Segundo Chamba, Patricia Orellana, a mis primos Michael y Daniel Chamba, a mi abuelita Lolita, gracias por haber estado presentes y pendientes en mi proceso de formación como profesional, apoyándome y brindándome sus acertados consejos.

Finalmente

Agradezco a todos mis buenos amigos que conocí durante el transcurso de mi formación académica, gracias por los momentos compartidos, por su amistad incondicional, por siempre darme ánimos y por haberme brindado su apoyo en todos estos años de carrera.

Angelica Vanessa Chamba Cañar

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	II
AUTORÍA	III
CARTA DE AUTORIZACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
1. TEMA:	1
2. RESUMEN	2
3. INTRODUCCIÓN	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1 REDES INALÁMBRICAS.	6
4.1.1 Introducción	6
4.1.2 Concepto General de Redes Inalámbricas.....	6
4.1.3 WLAN (Red de Área Local Inalámbrica).....	6
4.1.3.1 Bandas de frecuencia	7
4.1.4 Estándar IEEE 802.11	7
4.1.4.1 Arquitectura WLAN IEEE 802.11.	8
4.1.4.2 Modos de configuración de la arquitectura de red inalámbrica.	10
4.1.4.3 Pila de protocolos 802.11	11
4.1.4.4 Familia de Estándares IEEE 802.11	12
4.2 TV WHITE SPACES (TVWS).....	16
4.2.1 Introducción	16
4.2.2 Espacios en blanco de televisión.	16
4.2.3 Características de los TV White Space.	17
4.2.4 Técnicas para la identificación de Espacios en blanco	17
4.2.4.1 Detección del Espectro	17
4.2.4.2 Geolocalización	18
4.2.5 Dispositivos de espacios en blanco (WSD, White Space Device).....	18
4.3 INTERNET DE LAS COSAS	19
4.3.1 Introducción	19
4.3.2 Internet de las cosas (IoT, Internet of Things)	19

4.3.3 Requisitos de IoT	20
4.3.4 Aplicaciones y servicios IoT.....	21
4.3.4.1 Aplicaciones de IoT.....	21
4.3.4.2 Servicios de IoT.....	22
4.3.5 Smart Campus	23
4.3.5.1 Ciudades Inteligentes o Smart Cities.....	23
4.3.5.2 Smart Campus o Campus Inteligente.	24
4.3.5.3 Eficiencia Energética.....	24
5. MATERIALES Y MÉTODOS.	27
5.1 Materiales:	27
5.2 Metodología.....	27
5.2.1 Métodos Aplicados.....	27
5.2.2 Análisis Técnico Del Estándar IEEE 802.11af White-fi.....	29
5.2.2.1 Introducción e historia al Estándar IEEE 802.11af	29
5.2.2.2 Funcionamiento	29
5.2.2.3 Componentes de la Arquitectura del estándar IEEE 802.11 af	30
5.2.2.4 Fundamentos Técnicos	32
5.2.2.5 Capa MAC (Control de Acceso al Medio).....	33
5.2.2.6 Capa Física	36
5.2.2.7 Evaluación del canal libre (CCA-Clear Channel Assessment)	42
5.2.2.8 Sensibilidad Mínima del Receptor	43
5.2.2.9 Análisis de aplicación de IEEE 802.11af White-fi en IoT.	43
5.2.2.10 Dispositivos basados en el estándar IEEE 802.11af.....	46
6. RESULTADOS	51
6.1 Espectro.	51
6.1.2 Evaluación Espectral: entorno de la FEIRNNR.....	51
6.1.2.1 Ocupación del Espectro Radioeléctrico en el entorno de la FEIRNNR.	51
6.2 Cobertura en transmisión.	53
6.3 Latencia.....	54
6.4 Penetración de obstáculos.....	55

6.5 Propuesta para la implementación de una Red con tecnología IEEE 802.11af White-fi.	55
6.5.1 Descripción de la zona de estudio.	55
6.5.2 Consideraciones Generales	56
6.5.3 Propuesta Técnica IoT utilizando IEEE 802.11af White-fi en la FEIRNNR.	56
6.5.3.1 Esquema de diseño de la red basado en IEEE 802.11af.	60
6.5.4 Factibilidad económica para la implementación de Smart Metering con tecnología TVWS.	64
7. DISCUSIÓN	65
8. CONCLUSIONES	73
9. RECOMENDACIONES	77
10. BIBLIOGRAFÍA	78
11. ANEXOS	84
11.1 ANEXO 1: Análisis de precios unitarios para la aplicación IoT utilizando la tecnología de radio cognitiva.	84
11.2 ANEXO 2: Especificaciones técnicas de equipos	89
11.2.1 Especificaciones técnicas Antena OMNI 0470WSS07-N	89
11.2.2 Especificaciones técnicas Antena MA-WA580-DP8.	90
11.2.3 Especificaciones Técnicas de TVWS Gateway	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red WLAN (Redes de Área Local Inalámbrica).....	7
Figura 2. Arquitectura IEEE 802.11.	8
Figura 3. Conjunto de Servicios Básicos (Basic Service Set- BSS).	9
Figura 4. Sistema de Distribución (Distribution System-DS).....	9
Figura 5. Conjunto extendido de servicios (Extended Service Set- ESS).....	10
Figura 6. Esquema de una red ad-hoc.	10
Figura 7. Esquema de una red en modo infraestructura.	11
Figura 8. Estructura del modelo en capas IEEE 802.....	11
Figura 9. Evolución de los protocolos WLAN IEEE 802.11 hasta la versión 802.11af.	12
Figura 10. Área de cobertura de los estándares 802.11.....	12
Figura 11. Espacios en Blanco.....	16
Figura 12. La nueva dimensión que introduce Internet de las Cosas (IoT).	19
Figura 13. Casos de uso de IoT.....	23
Figura 14. Smart City.....	24
Figura 15. Ventajas de la eficiencia energética.....	25
Figura 16. Esquema de un sistema de medición inteligente.	25
Figura 17. Estructuras de comunicación en una Red Eléctrica Inteligente.	26
Figura 18. Arquitectura del estándar 802.11af.....	30
Figura 19. Resumen de los principales mecanismos de la capa MAC especificados en 802.11af. .	35
Figura 20. Configuración de IEEE 802.11af.....	36
Figura 21. Formato de la trama para IEEE 802.11af TVHT PHY.....	38
Figura 22. Asignación de subportadoras OFDM en un canal de 6 MHz.	40
Figura 23. Modos de canalización del estándar 802.11af.	41
Figura 24. Aplicaciones para el uso de TVWS.....	44
Figura 25. Factores considerados para IoT.	44
Figura 26. Estándares de redes WLAN para IoT.	45
Figura 27. WhizNano Node.	46
Figura 28. WHizNano Gateway.....	47
Figura 29. Esquema de conexión de los dispositivos WhizNano Node y WhizNano Gateway.	48
Figura 30. TVWS Gateway.....	48
Figura 31. TVWS Gateway Portable.	49
Figura 32. Esquema de conexión y aplicaciones de los dispositivos TVWS Gateway.....	50

Figura 33. Porcentaje de espectro disponible en cada banda analizada en el entorno de la FEIRNNR.....	53
Figura 34. Comparación del alcance (metros) entre 802.11af (TVWS) e IEEE 802.11 tradicional (2.4 y 5GHz).	54
Figura 35. Vista aérea FEIRNNR.	56
Figura 36. Ubicación de los medidores y la estación Base en la F.E.I.R.N.N.R.	58
Figura 37. Antena Directiva MA-WA580-DP8.	59
Figura 38. Antena MA-WO-UMB.....	60
Figura 39. Red de comunicaciones topología en estrella.	61
Figura 40. Diagrama de distribución de los dispositivos TVWS.....	63
Figura 41. Porcentaje de eficiencia de los diferentes estándares IEEE 802.11.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de mecanismos de control de la GDD (Entidad Dependiente de la Base de Datos de Geolocalización).....	36
Tabla 2. Parámetros del IEEE 802.11af y esquemas de modulación correspondientes a la capa PHY para el modo NON_HT.....	39
Tabla 3. Parámetros de PHY de 802.11af para un canal de 6 MHz.....	39
Tabla 4. Niveles de sensibilidad mínimos para Recepción.....	43
Tabla 5. Comparación de diversas soluciones tecnológicas para IoT.....	45
Tabla 6. Características técnicas de WhizNano Node.....	47
Tabla 7. Características técnicas de WhizNano Gateway.....	47
Tabla 8. Características Técnicas de TVWS Gateway.....	48
Tabla 9. Características Técnicas de TVWS Gateway.....	49
Tabla 10. Comparación de los dispositivos TVWS para IoT frente al estándar 802.11af.....	50
Tabla 11. Bandas de frecuencias asignadas para el servicio de radiodifusión de televisión abierta. [48].....	51
Tabla 12. Resultados de ocupación espectral sub-bandas destinadas al servicio de Televisión.....	52
Tabla 13. Valores porcentuales de ancha de banda ocupado y disponible en cada sub-banda.....	52
Tabla 14. Atenuación (dB) de la señal frente a diversos materiales.....	55
Tabla 15. Ubicación y tipo de medidores existentes.....	57
Tabla 16. Distancias desde la estación base hacia los diferentes medidores.....	58
Tabla 17. Especificaciones técnicas de la Antena Directiva MA-WA580-DP8.....	59
Tabla 18. Especificaciones técnicas de la Antena de la Antena MA-WO-UMB.....	60
Tabla 19. Requerimiento para una red Smart Grid.....	62
Tabla 20. Características de un canal de 6 MHz.....	62
Tabla 21. Costos referenciales de equipos para implementación de una red TVWS.....	65
Tabla 22. Características técnicas de los estándares principales anteriores a la versión 802.11af...	66
Tabla 23. Escala de valoración de Likert.....	67
Tabla 24. Valoración del nivel de incidencia de cada uno de los estándares 802.11.....	67
Tabla 25. Ponderación de la eficiencia de cada estándar 802.11.....	68

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

WLAN	Red Inalámbrica de Área Local (<i>Wireless Local Area Network</i>)
LAN	Red de Área Local (<i>Local Area Network</i>)
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
ISM	Banda Industrial, Científica y Médica (<i>Industrial, Scientific and Medical</i>)
UNII	Infraestructura Nacional de Información sin Licencia (<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>)
Wi-Fi	Fidelidad Inalámbrica (<i>Wireless Fidelity</i>)
STA	Estación (<i>Station, abbreviated as STA</i>)
AP	Punto De Acceso Inalámbrico (<i>Access Point abbreviated as AP</i>)
BSS	Conjunto De Servicios Básicos (<i>Basic Service Set</i>)
IBSS	Conjunto Independiente De Servicios Básicos (<i>Independent Basic Service Set</i>)
DS	Red De Distribución (<i>Distribution System</i>)
ESS	Conjunto De Servicios Extendidos (<i>Extended Service Set</i>)
MAC	Control de Acceso al Medio (<i>Media Access Control</i>)
OSI	Interconexión De Sistemas Abiertos (<i>Open System Interconnection</i>)
LLC	Control Lógico de Enlace (<i>Logical Link Control</i>)
FHSS	Espectro Ensanchado Por Salto De Frecuencia (<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>)
DSSS	Espectro ensanchado por secuencia directa (<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>)
SISO	Entrada Única, Salida Única (<i>Single Input - Single Output</i>)
BPSK	Modulación por desplazamiento de fase binaria (<i>Binary Phase Shift Keying</i>)
QPSK	modulación por desplazamiento cuadrifásica (<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>)
QAM	modulación de amplitud en cuadratura (<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>)
OFDM	Multiplexación por división de Frecuencias Ortogonales (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>)
CCK	Codificación De Código Complementaria (<i>Complementary Code Keying</i>)

MIMO	Múltiple Entrada múltiple salida (<i>Multiple Input – Multiple Output</i>)
MU-MIMO	MIMO multiusuario (<i>Multi-user MIMO</i>)
VHF	Muy Alta Frecuencia (<i>Very High Frequency</i>)
UHF	Ultra Alta Frecuencia (<i>Ultra High Frequency</i>)
TVWS	Espacios En Blanco De Televisión (<i>TV White Spaces</i>)
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones (<i>International Telecommunication Union</i>)
WSD	Dispositivo De Espacio En Blanco (<i>White Space Devices</i>)
FCC	Comisión Federal de Comunicaciones (<i>Federal Communications Commission</i>)
IoT	Internet de las Cosas (<i>Internet of Things</i>)
UIT-T	Sector de Radiocomunicaciones
TIC	Tecnologías de la información y la comunicación (<i>Information and Communication Technology</i>)
AMI	Infraestructura de medición Avanzada (<i>Advanced Metering Infrastructure</i>)
HAN	Red para el hogar (<i>Home Area Network</i>)
NAN	Redes de área de vecindario (<i>Neighborhood Area Network</i>)
WAN	Redes de área amplia (<i>Wide Area Network</i>)
PU	Usuarios primarios (<i>Primary User</i>)
GDB	Base de datos de geolocalización (<i>Geolocation Database</i>)
RLSS	Servidor seguro de registros de ubicación (<i>Registered Location Secure Server</i>)
GDD	Dependientes de la base de datos de geolocalización (<i>Geolocation Database Dependent Entities</i>)
RLQP	Protocolo de consulta de registro de localización (<i>Registered Location Query Protocol</i>)
CSMA/CA	Acceso múltiple con escucha de portadora y detección de colisiones (<i>Carrier Sense Multiple Access / Collision detection</i>)
WSM	Mapa de espacios en blanco (<i>White Space Map</i>)
CVS	Señal de verificación de contacto (<i>Contact Verification Signal</i>)
CAQ	Consulta de disponibilidad de canal (<i>Channel Availability Query</i>)

CSM	Gestión de la programación del canal (<i>Channel Schedule Management</i>)
NCC	Control de canal de la red (<i>Network Channel Control</i>)
PHY	Capa física (<i>Physical Layer</i>)
PLCP	Procedimiento de Convergencia de la Capa Física (<i>Physical Layer Convergence Procedure</i>)
PPDUs	Unidades de datos del protocolo físico (<i>Physical Protocol Data Units</i>)
MPDUs	Unidades de datos del protocolo mac (<i>MAC Protocol Data Unit</i>)
PMD	Subnivel inferior del medio físico (<i>Physical Media Dependent</i>)
TVHT PHY	Televisión de muy alto rendimiento PHY (<i>Television Very High Throughput PHY</i>)
OFDM	Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>)
L-STF	Campo de entrenamiento heredado-corto (<i>Legacy-Short Training Field</i>)
L-LTF	Campo de entrenamiento heredado-largo (<i>Legacy-Long Training Field</i>)
TVHT-SIG-A	TVHT señal A (<i>TVHT Signal A</i>)
TVHT-SIG-B	TVHT señal B (<i>TVHT Signal B</i>)
MCS	Esquema de Modulación y Codificación (<i>Modulation and Coding Schemes</i>)
TVHT-STF	Campo de entrenamiento corto-TVHT (<i>TVHT Short Training Field</i>)
TVHT-LTF	Campo de entrenamiento largo- TVHT (<i>TVHT-Long Training Field</i>)
AGC	Control automático de ganancia (<i>Automatic Gain Control</i>)
PSDU	Unidad de datos de servicio PHY (<i>PLCP Service Data Unit</i>)
BCU	Unidad de canal básico (<i>Basic Channel Unit</i>)
CCA	Evaluación del canal libre (<i>Clear Channel Assessment</i>)
PER	Número de paquetes errados
M2M	Máquina a máquina (<i>Machine-to-Machine</i>)
WSN	Redes inalámbricas de sensores (<i>Wireless sensor networks</i>)
IoE	Internet de Todo (<i>Internet of Everything</i>)
FSK	Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (<i>Frequency Shift Keying</i>)
GFSK	Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gausiana (<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>)

DSSS	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>)
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>)
ADPC	Convertidor analógico a digital (<i>Analog-to-Digital Converter</i>)
PWM	Modulación por Ancho de Pulsos (<i>Pulse-Width Modulation</i>)
MQTT	Protocolo de red abierto
TCP	Protocolo de control de transmisión (<i>Transmission Control Protocol</i>)
IP	Protocolo de internet (<i>Internet Protocol</i>)
DHCP	Protocolo de configuración dinámica de host (<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>)
HTTPS	Protocolo seguro de transferencia de hipertexto (<i>Hypertext Transfer Protocol Secure</i>)
PoE	Alimentación a través de Ethernet (<i>Power over Ethernet</i>)
DC	Corriente directa
FEIRNNR	Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables
ANE	Agencia Nacional del Espectro
PIRE	Máxima potencia de transmisión

1. TEMA:

**“ANÁLISIS TÉCNICO DEL ESTÁNDAR 802.11af COMO
TECNOLOGÍA PARA APLICACIONES IOT Y ESTUDIO DE
FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DENTRO DE LA
FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES.”**

2. RESUMEN

Las comunicaciones inalámbricas desde sus inicios han presentado un crecimiento dinámico en el campo de las telecomunicaciones por la facilidad de transmitir información de un punto a otro sin la necesidad de utilizar medios físicos, sino propagando la señal a través del espacio. En el presente trabajo se realiza un análisis técnico del estándar IEEE 802.11af como tecnología para aplicaciones IoT y estudio de factibilidad técnica y económica dentro de la Facultad de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables. Para lograr cumplir con los objetivos planteados en esta tesis se realiza un estudio retrospectivo tomando información de documentos disímiles que contengan información necesaria acerca de la familia de estándares 802.11x y del estándar de interés IEEE 802.11af haciendo principal énfasis en su arquitectura, funcionamiento, capa MAC y PHY, características que permiten establecer si esta tecnología inalámbrica puede servir como soporte para Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Adicionalmente se indaga sobre la existencia de equipos diseñados para trabajar en los TVWS bajo la tecnología 802.11af, esto sirve como base para enfocarnos en una aplicación en particular (eficiencia energética) que se la pueda acoplar en el entorno de la FEIRNNR. Los resultados obtenidos en este documento se centran en factores como la disponibilidad de espectro en las bandas VHF y UHF en el rango de (54-698Mhz), el área de cobertura del estándar, la tasa de datos ofrecida y disponibilidad de equipos desarrollados bajo 802.11af. Al finalizar este trabajo se puede afirmar que el estándar 802.11af permite aprovechar el uso del espectro radioeléctrico de una manera óptima mediante un uso dinámico del mismo, buscando trabajar en frecuencias libres (VHF y UHF) asignadas para el servicio de televisión, ofrece tasas de transmisión aceptables en el rango de los Mbps, logra operar en condiciones en las que no es posible trabajar a altas frecuencias o con redes cableadas, llegando así a cubrir grandes distancias sin línea de vista, lo que resulta viable para el despliegue de redes inalámbricas de bajo costo.

PALABRAS CLAVE: IEEE 802.11af, TVWS, VHF, UHF, IoT.

ABSTRACT

Since its inception, wireless communications have shown dynamic growth in the field of telecommunications because of the ease of transmitting information from one point to another without the use of physical means, but rather by propagating the signal through space. In the present work, a technical analysis of the IEEE 802.11af standard as a technology for IoT applications and a technical and economic feasibility study is carried out within the Faculty of Energy, Industries and Non-Renewable Natural Resources. In order to achieve the objectives set out in this thesis, a retrospective study is carried out taking information from dissimilar documents containing necessary information about the 802.11x family of standards and the IEEE 802.11af standard of interest, making main emphasis on its architecture, operation, MAC and PHY layer, features that allow to establish if this wireless technology can serve as support for Internet of Things (IoT). Additionally, we investigate the existence of equipment designed to work in TVWS under 802.11af technology, this serves as a basis to focus on a particular application (energy efficiency) that can be coupled in the environment of the FEIRNNR. The results obtained in this document focus on factors such as spectrum availability in the VHF and UHF bands in the range of (54-698Mhz), the coverage area of the standard, the data rate offered and availability of equipment developed under 802.11af. At the end of this work we can say that the 802.11af standard allows to take advantage of the use of the radioelectric spectrum in an optimal way by means of a dynamic use of it, looking for working in free frequencies (VHF and UHF) assigned for the television service, it offers acceptable transmission rates in the range of the Mbps, it manages to operate in conditions in which it is not possible to work to high frequencies or with wired networks, getting to cover great distances without line of sight, which is viable for the deployment of wireless networks of low cost.

KEY WORDS: IEEE 802.11af, TVWS, VHF, UHF, IoT.

3. INTRODUCCIÓN

El espectro radioeléctrico constituye un recurso natural, limitado y utilizado como un medio de comunicación por diferentes tecnologías inalámbricas para enviar y recibir datos por medio de ondas electromagnéticas a determinadas frecuencias, se divide en sub-bandas las cuales están asignadas para operar bajo diversos servicios causando un uso excesivo en determinados rangos o sub-utilizándolo en otros. Las comunicaciones inalámbricas presentan un crecimiento dinámico exigiendo una mayor demanda de recursos (espectro radioeléctrico) para el despliegue de nuevas tecnologías de telecomunicaciones que permitan un servicio eficiente de conectividad a un sinnúmero de usuarios. A nivel nacional el espectro radioeléctrico es regulado por entes gubernamentales y se asigna porciones del mismo a usuarios con licencia los que se denominan usuarios primarios, por otro lado, existen frecuencias de uso libre que se utilizan en gran demanda, dejando en evidencia que su uso no es eficiente ni homogéneo.

Para optimizar el uso de este recurso surgen nuevas tecnologías con la capacidad de utilizar dinámicamente el espectro haciendo un uso óptimo del mismo, como es el caso del estándar de estudio IEEE 802.11af White-fi, tecnología inalámbrica basada en radio cognitiva la cual propone utilizar los espacios en blanco (TVWS¹) disponibles en las bandas VHF² y UHF³ asignadas para el servicio de radiodifusión; siempre y cuando el rango de frecuencias a ocupar no esté siendo utilizado por los usuarios primarios para evitar así interferencias perjudiciales. La tecnología inalámbrica White-fi al utilizar frecuencias bajas del espectro logrando cubrir amplias áreas en las que la señal puede viajar a través de obstáculos como: vegetación, terrenos irregulares, edificaciones, etc; estas características atractivas pueden presentar a 802.11af como una tecnología adecuada para una variedad de usos; conectividad de banda ancha rurales; entrega de conectividad inalámbrica en campus, la conexión de dispositivos IoT⁴ (Internet de las cosas, por significado en español), entre otras.

¹ **TVWS:** bandas blancas o espacios en blanco, se refiere a los canales de TV no utilizados dentro del espectro en VHF y UHF.

² **VHF:** Muy Alta Frecuencia; gama de frecuencias en el rango de 30 a 300 MHz, con una longitud de onda de 1 a 10 metros. Su uso típico es en enlaces de radio a cortas distancias, emisión de señales de radio en frecuencia modulada y televisión.

³ **UHF:** Ultra alta frecuencia; gama de frecuencias de 300 a 3000MHz, con una longitud de onda de 10 centímetros a 1 metro. Su uso típico es enlaces de radio, radar, ayuda a la navegación aérea, televisión.

⁴ **IoT:** Internet de las Cosas; se define en la Recomendación UIT- T Y. 2060 como una infraestructura global para la sociedad de la información, que permite servicios avanzados mediante la interconexión de cosas (físicas y virtuales).

Con esta investigación se da a conocer el estándar IEEE 802.11af, identificando sus principales características funcionales y técnicas, se busca establecer si este estándar inalámbrico puede servir como soporte para Internet de las cosas (IoT), posteriormente se indaga acerca la existencia de equipos diseñados para trabajar en los TVWS desarrollados bajo la tecnología 802.11af; esto sirve como base para enfocarnos en una aplicación en particular (eficiencia energética – Smart metering) que se la pueda acoplar en el entorno de la FEIRNNR.

Para realizar un correcto desarrollo del presente proyecto de titulación se han establecido los siguientes objetivos:

Objetivo General

- Realizar un análisis técnico del estándar IEEE 802.11af como tecnología para aplicaciones IoT, así como el estudio de su factibilidad técnica y económica dentro de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables.

Objetivos Específicos

- Investigar la funcionalidad del estándar 802.11x en sus versiones anteriores.
- Estudiar los aspectos técnicos y funcionales del estándar IEEE802.11af y además evaluar técnicamente su posible aplicación en sistemas y servicios de IoT.
- Analizar la factibilidad económica del estándar IEEE 802.11af para una aplicación IoT (eficiencia energética) usando como referencia el entorno de infraestructura de la Facultad de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 REDES INALÁMBRICAS

4.1.1 Introducción

La necesidad de tener más movilidad en un determinado entorno evitando utilizar cables de diferentes tipos para mantener la conexión entre dispositivos permitió el desarrollo de las redes inalámbricas, las cuales surgen para sustituir en parte a las redes cableadas.

Las redes inalámbricas permiten intercambiar información entre dispositivos utilizando como interfaz el aire eliminado así la propagación mediante el uso de un medio físico sustituyendo este por enlaces, los cuales que permiten conectar diferentes puntos. Los dispositivos que usan este tipo de redes van desde teléfonos móviles, tablets, ordenadores portátiles, dispositivos localizadores, entre otros [1]. En la actualidad el uso de redes tanto cableadas como inalámbricas se utilizan a la par, complementándose entre sí con las ventajas y desventajas que posee cada una.

En este capítulo se describe la teoría fundamental de redes inalámbricas, ventajas y desventajas, arquitectura y modos de configuración. Se realiza también un recorrido por los diferentes estándares de la familia 802.11 que han presentado mayor trascendencia hasta nuestra versión de interés 802.11af.

4.1.2 Concepto General de Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas (Wireless Network, en inglés) proporcionan un mecanismo de transporte entre dispositivos y redes alámbricas tradicionales. Las redes inalámbricas utilizan transmisiones de radiofrecuencia como medio para transmitir datos, permitiendo que uno o más dispositivos se comuniquen sin conexiones físicas evitando la necesidad de utilizar cables de red. Adicionalmente ofrecen mayor flexibilidad, reduciendo el tiempo y recursos necesarios para establecer nuevas redes. [2]

4.1.3 WLAN (Red de Área Local Inalámbrica)

Las redes de área local inalámbricas (Wireless Local Area Network, por su significado en inglés) son grupos de nodos de redes inalámbricas que abarcan un área geográfica limitada, como un edificio o un campus, son capaces de comunicarse por medios de ondas de radiofrecuencia. Las redes WLAN suelen aplicarse como extensiones de las redes de área local (LANS) cableadas existentes para proporcionar una mayor movilidad al usuario y un

mayor acceso a la red. [3] Las WLAN más populares en el mercado corresponden a la tecnología IEEE 802.11.



Figura 1. Red WLAN (Redes de Área Local Inalámbrica).

Fuente. [Autor]

4.1.3.1 Bandas de frecuencia

Las WLANs utilizan dos bandas dentro del espectro de frecuencias que son las bandas: ISM (Ciencia Médica Industrial, del inglés Industrial Scientific and Medical) y UNII (Infraestructura Nacional de Información sin Licencia, del inglés Unlicensed National Information Infrastructure Bands), las cuales no necesitan licencia para su uso. [4] [5]

Las bandas ISM Y UNII están subdivididas en rangos, pero los más utilizados dentro de 802.11 son 2.4 GHz (ISM) y 5 GHz (UNII). A continuación, se detalla estas bandas de frecuencia:

- 2.4000-2.500 MHz (100 MHz ancho de banda).
- 5.15-5.25 GHz (100 MHz ancho de banda).
- 5.25-5.35 GHz (100 MHz ancho de banda).
- 5.470-5.725 GHz (255 MHz ancho de banda).
- 5.725-5.825 GHz (100 MHz ancho de banda). [6]

4.1.4 Estándar IEEE 802.11

El IEEE (por su significado en español, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, es un organismo internacional que crea y mantiene los estándares técnicos utilizados en las redes WLAN. Las normas para la WLAN 802.11 son típicamente desarrolladas por el IEEE donde se mueven a través de grupos de trabajo y finalmente son ratificadas como una norma. Una vez que un estándar es ratificado, un fabricante puede presentar un dispositivo que apoye un determinado estándar a la Alianza Wi-Fi para su certificación. La Alianza Wi-Fi es una organización sin fines de lucro que prueba los dispositivos 802.11 de los fabricantes para el cumplimiento de las normas del IEEE. [7]

4.1.4.1 Arquitectura WLAN IEEE 802.11

La arquitectura lógica del estándar IEEE 802.11 contiene varios componentes principales: la estación (STA), el punto de acceso inalámbrico (AP), el conjunto independiente de servicios básicos (IBSS), el conjunto de servicios básicos (BSS), la red de distribución (DS), y el conjunto de servicios extendidos (ESS). La figura 2, ilustra el modelo desarrollado por el grupo de trabajo del IEEE.

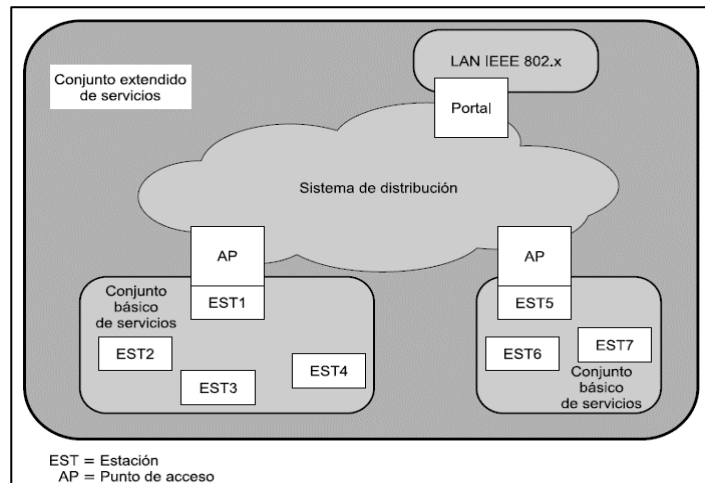


Figura 2. Arquitectura IEEE 802.11. [8]

A continuación, se ira describiendo de forma detallada cada uno de los componentes que conforman la arquitectura de IEEE 802.11.

- **Estación (Station-STA)**, puede ser un ordenador portátil, un PDA (Asistente Digital Personal), un teléfono o cualquier dispositivo que tenga capacidad de inferir en el medio inalámbrico. Esta estación se puede identificar como el usuario final. [1]
- **Punto de Acceso (Access Point - AP)**, denominado estación base (BS) es un dispositivo que permite a los terminales inalámbricos conectarse a una red cableada. [1]
- **Conjunto de Servicios Básicos (Basic Service Set- BSS)**, componente elemental de una red LAN inalámbrica, consiste en un punto de acceso (AP) junto con todas las estaciones asociadas, el cual actúa como un maestro para controlar las estaciones dentro del BSS. [1] Un BSS puede funcionar aisladamente o estar conectado a un sistema troncal de distribución (DS, Distribution System) a través de un punto de acceso que ejecuta las funciones de puente. Además, la asociación entre una estación

y un BSS es dinámica, puesto que una estación puede apagarse, salirse de la distancia máxima permitida o incorporarse de nuevo. [8]

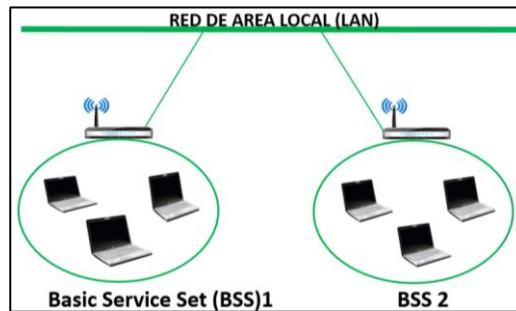


Figura 3. Conjunto de Servicios Básicos (Basic Service Set- BSS).

Fuente. [Autor]

- **Conjunto de Servicios Básicos Independiente (Independent Basic Service Set, IBSS)**, surge cuando todas las estaciones en el conjunto de servicios básicos son estaciones móviles y no hay conexión a una red cableada. [1]
- **Sistema de Distribución (Distribution System-DS)**, mecanismo por el cual diferentes puntos intercambian tramas entre sí o con redes cableadas, si las hubiera. El estándar IEEE 802.11 no especifica ninguna tecnología en particular para el DS. En casi todos los productos comerciales se utiliza Ethernet por cable como tecnología de red troncal. [1]

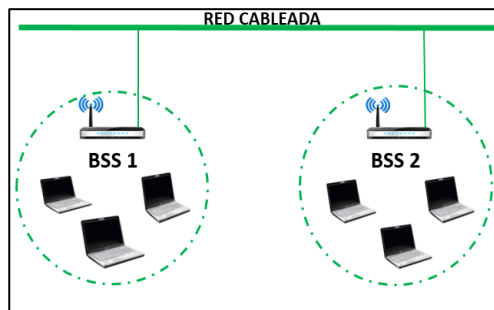


Figura 4. Sistema de Distribución (Distribution System-DS).

Fuente. [Autor]

- **Conjunto extendido de servicios (Extended Service Set- ESS)**, es la unión de dos o más conjuntos interconectados de servicios Básicos (BSS) mediante un sistema de distribución. [1] El conjunto extendido de servicios aparece a nivel de control de enlace lógico (LLC Logical Link Control, por su significado en inglés) como una única red LAN lógica. Es posible que dos BSS se solapen, pero solo en términos de

su área de cobertura, pero con una configuración de canal que no produzca interferencia. [9]

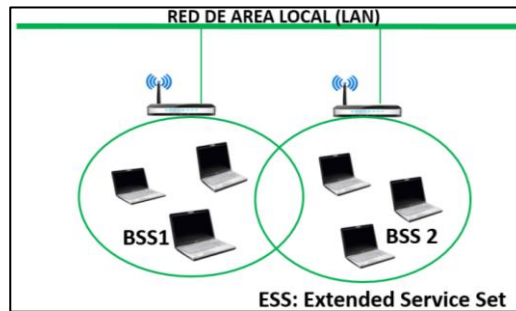


Figura 5. Conjunto extendido de servicios (Extended Service Set- ESS).

Fuente. [Autor]

4.1.4.2 Modos de configuración de la arquitectura de red inalámbrica.

- **Modo Ad hoc.**

Permite que todos los dispositivos de una red inalámbrica se comuniquen directamente entre sí, de igual a igual. Esta configuración de red no tiene ninguna estructura o puntos fijos, es decir no se requiere ningún punto de acceso para la comunicación entre dispositivos. El modo ad hoc es el más adecuado para un pequeño grupo de dispositivos que se encuentran presentes físicamente en estrecha proximidad entre sí. El rendimiento de la red se ve afectado si el número de dispositivos aumenta. [1]



Figura 6. Esquema de una red ad-hoc.

Fuente. [Autor]

- **Modo Infraestructura.**

En este modo los dispositivos se conectan a la red inalámbrica con la ayuda de un punto de acceso (AP). Los puntos de acceso inalámbricos son generalmente routers o switches que pasan los datos de la red inalámbrica a una red Ethernet cableada. El

modo de infraestructura ofrece mayor seguridad, facilidad de gestión, movilidad, escalabilidad, ente otras. [1]

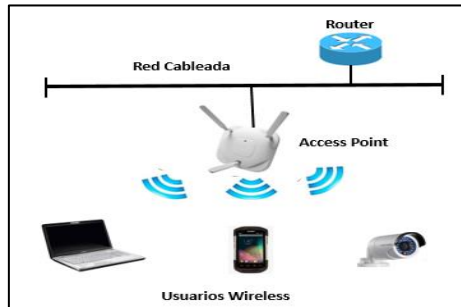


Figura 7. Esquema de una red en modo infraestructura.

Fuente. [Autor]

4.1.4.3 Pila de protocolos 802.11

La pila de protocolos del modelo OSI⁵ guarda relación entre los diversos componentes de la familia 802. Las especificaciones de 802 se centran en las dos capas inferiores del modelo OSI; la capa de enlace de datos se divide en dos o más subcapas. Todas las redes 802 tienen un componente MAC (Control de Acceso al Medio) y un componente físico (PHY).

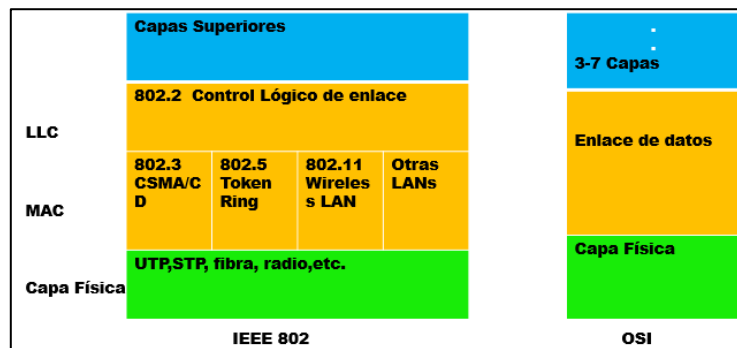


Figura 8. Estructura del modelo en capas IEEE 802. [10]

El estándar 802.11 contiene tres niveles:

- **Control Lógico de Enlace (LLC, Logical Link Control)**, gestiona los enlaces lógicos y proporciona una interfaz común para el nivel de red, ocultando diferencias respecto a topología y técnicas de acceso al canal. [10]

⁵ **OSI (Open System Interconnection)**, modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos, creado por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO). Es un marco de referencia para la definición de arquitecturas en la interconexión de los sistemas de comunicaciones. Se constituye por siete capas: física, de enlace de datos, de red, de transporte, de sesión, de presentación y de aplicación, las cuales definen las diferentes fases por las que deben pasar los datos para viajar de un dispositivo a otro sobre una red de comunicaciones.

- **Control de acceso al medio (MAC, Medium Access Control)**, se encarga de controlar y administrar el acceso al medio físico, [10] mediante tres aspectos funcionales: la entrega fiable de datos, el control del acceso y la seguridad.
- **Físico (PHY)**, esta capa sirve como interfaz entre las estaciones con el medio de propagación (codificación/decodificación de los bits transmitidos/recibidos, etc.). [10]

4.1.4.4 Familia de Estándares IEEE 802.11

La familia de estándares 802.11 corresponden a un conjunto de normas de implementación de redes inalámbricas de área local (WLAN), que ha venido evolucionando desde los años 90 hasta la actualidad.

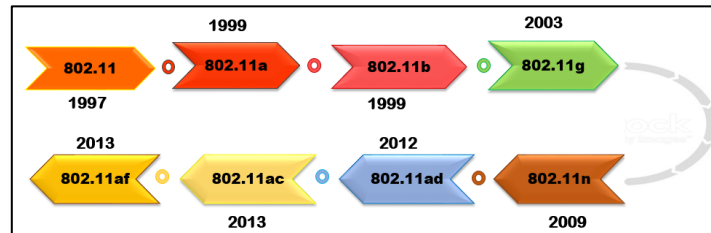


Figura 9. Evolución de los protocolos WLAN IEEE 802.11 hasta la versión 802.11af.

Fuente. [Autor]

En la figura 10 se indica la cobertura de diferentes miembros de la familia IEEE 802.11. Estos se ordenan desde cobertura de pequeño a grande, los estándares 802.11a y 802.11ac se desarrollan en la banda de 5 GHz, los estándares 802.11b / g / n operan en la banda de 2.4 GHz, 802.11ah está diseñado para la banda de 900 MHz y 802.11af opera en la banda de 54-790 MHz.

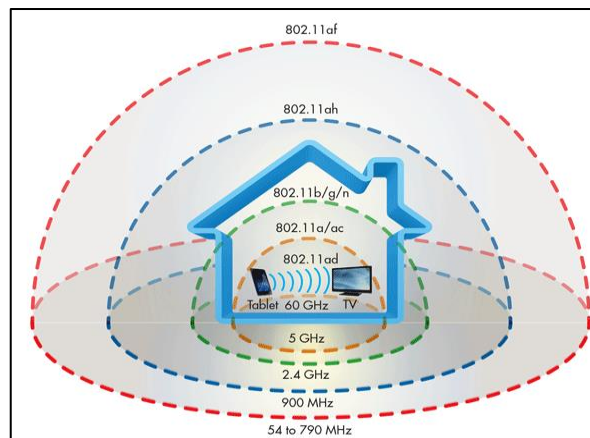


Figura 10. Área de cobertura de los estándares 802.11. [11]

- **IEEE 802.11 (1997)**

El estándar IEEE 802.11 se encuentra operando en la banda de 2.4 GHz, ofrece tasas de transmisión de datos de 1 y 2 Mbps, hace uso del esquema de modulación es FHSS⁶(Frequency Hopping Spread Spectrum) y DSSS⁷ (Direct Sequence Spread Spectrum) con arquitectura de radio es SISO⁸ (Single Input - Single Output); ofrece un alcance aproximado de cobertura de 100m. Actualmente se encuentra en desuso. [12] [13]

- **IEEE 802.11a (1999)**

El estándar IEEE 802.11a trabaja en la banda de 5 GHz su velocidad máxima de transmisión es de 54 Mbps. Utiliza como técnica de modulación OFDM⁹ (Multiplexación por división de Frecuencias Ortogonales) y diferentes técnicas de modulación: BPSK, QPSK y QAM¹⁰ para obtener diferentes velocidades; contiene 64 subportadoras, 48 se usan para la transmisión de datos, 4 están reservadas para símbolos piloto y 12 se usan como nulas. El radio de cobertura es de 120m con arquitectura de radio SISO. En la actualidad no es utilizado en ningún sistema de comunicación inalámbrico. [12] [13]

- **IEEE 802.11b (1999)**

⁶ **FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)**, espectro ensanchado por salto de frecuencia es una técnica de modulación donde se toma la señal de transmisión y se modula una señal portadora que salta de frecuencia en frecuencia dentro del ancho de la banda asignado, en función del tiempo.

⁷ **DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)**, espectro ensanchado por secuencia directa es una técnica de modulación que consiste en una combinación de la señal a transmitir en una secuencia de bits a mayor velocidad de transmisión. A esta secuencia se la conoce como chipping code.

⁸ **SISO (single input, single output)**, entrada única, salida única es la tecnología de antena más simple. Se refiere a un sistema de comunicaciones inalámbricas en el que se usa una antena en el transmisor y una antena en el receptor.

⁹ **OFDM (orthogonal frequency division multiplexing)**, multiplexación por división de frecuencias ortogonales es una técnica de modulación utilizada ampliamente para sistemas de comunicación de banda ancha porque permite evitar la interferencia intersimbólica (ISI). Se caracteriza por símbolos largos con amplias separaciones entre sí y para evitar el que se mezclen unos con otros.

¹⁰ **BPSK (Binary Phase Shift Keying)**, modulación por desplazamiento de fase binaria, consiste en variar la fase de la señal portadora entre un número determinado de valores discretos emplea solo 2 símbolos, con 1 bit de información cada uno.

QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), modulación por desplazamiento cuadrifásica Con cuatro fases, QPSK puede codificar dos bits por cada símbolo, donde la onda portadora se somete a cuatro cambios de fase correspondientes.

QAM (Quadrature Amplitude Modulation), modulación de amplitud en cuadratura es una forma de modulación digital cuya información está contenida tanto en la fase como en la amplitud de la portadora transmitida.

IEEE 802.11b hace uso de la técnica de modulación DSSS ofreciendo una velocidad máxima de transmisión que va desde los 5.5 a 11 Mbps, se encuentra operando en la banda de 2.4 GHz, tiene un alcance teórico hasta 140m, y en ambientes internos de 30 a 5 metros con un bajo nivel de ruido. Este estándar utilizaba adicionalmente CCK¹¹ (Complementary Code Keying) como esquema de modulación de mayor eficiencia espectral, con un ancho de banda de 20 MHz y configuración de antenas 1x1 SISO. [12] [13]

- **IEEE 802.11g (2003)**

El estándar IEEE 802.11g corresponde a la tercera enmienda del estándar 802.11, funciona en la misma banda de frecuencias que 802.11b ofrece una velocidad máxima de transmisión de hasta 54 Mbps, hace uso de las técnicas de modulación DSSS y OFDM. El radio de cobertura estimado es de 140m y su configuración es SISO. [12] [13]

- **IEEE 802.11n (2009)**

Este estándar se desarrolla sobre los estándares anteriores haciendo uso de las bandas de 2.4 y 5GHz añadiendo técnicas MIMO¹² (Multiple Input – Multiple Output) permitiendo una configuración de antenas 4x4 para alcanzar velocidades de datos significativamente altas que van desde los 65 hasta 600 Mbps, con anchos de banda de 20 y 40 MHz. Utiliza la técnica de modulación OFDM, determinando 64 subportadoras para el modo de ancho de banda de 20 MHz insertando 4 símbolos piloto en las subportadoras y se determinan 128 subportadoras para el modo de ancho de banda de 40 MHz insertando 6 símbolos piloto en las subportadoras. El radio de cobertura ofrecido es de hasta 250 m. Actualmente es utilizado en varias redes de acceso inalámbrico tanto a nivel corporativo como doméstico. [12] [13]

- **IEEE 802.11ad (2012)**

¹¹ **CCK (Complementary Code Keying)**, es una modulación por código complementario de múltiples fases, como la técnica de modulación en WLANs por 802.11b y 802.11g. La técnica CCK puede empaquetar y transmitir múltiples bits en un símbolo dando como resultado una mayor velocidad de transmisión.

¹² **MIMO (Multiple Input Multiple Output)**, es una tecnología que se refiere específicamente al uso de múltiples señales que viajan simultáneamente a la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia, y que aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral en un sistema de comunicaciones inalámbrico.

IEEE 802.11ad se conoce con el nombre de WiGig, permite la operación en la banda de 60GHz y ofrece velocidades de transmisión superiores a 1 Gbps hasta 6.76 Gbps utiliza modulación OFDM, hace uso de arreglo de antenas superior a 8x8 MU-MIMO¹³ (Multiuser MIMO). Proporciona un radio de cobertura de 1-10m. [9] [14]

- **IEEE 802.11ac (2013)**

IEEE 802.11ac se desarrolló para ser totalmente compatible con los estándares anteriores esto asegura que 802.11ac sea el sucesor de 802.11n. Trabaja en la frecuencia de 5.8 GHz, ofrece velocidades de transmisión que van desde 433 Mbps hasta los 6.93 Gbps utilizando canales que tienen anchos de banda de 20, 40 y 80 MHz y de 160 MHz para modo opcional. Utiliza modulación OFDM y permite el uso de arreglos de múltiples antenas superior a 8x8 MU-MIMO. [12] [13] [14]

- **IEEE 802.11af (2013)**

Denominado también White-Fi, opera utilizando las bandas VHF (Muy Alta Frecuencia) y UHF (Ultra alta Frecuencia) en el rango de 54 y 790 MHz en el espectro desocupado de televisión para hacer un uso más eficiente del espectro. [15] Utiliza técnicas de radio cognitiva que permiten obtener información acerca de la disponibilidad de frecuencias. Proporciona velocidades de transmisión teóricas que van desde los 12 Mbps. [9] Esta descripción permite tener una idea acerca de 802.11af, recalcando que posteriormente se va a profundizar el estudio de esta tecnología inalámbrica; tema de interés principal en este trabajo de investigación.

¹³ **MU-MIMO (Multiuser MIMO)**, MIMO multiusuario es una forma mejorada de la tecnología MIMO que permite que múltiples usuarios accedan simultáneamente a mismo canal proporcionando ganancias de rendimiento significativas sobre la tecnología MIMO original.

4.2 TV WHITE SPACES (TVWS)

4.2.1 Introducción

Dentro del espectro radioeléctrico existen porciones que se encuentran libres o desocupadas denominadas espacios en blanco. Puntualmente los canales libres dentro de las bandas de Muy Alta Frecuencia (VHF) y Ultra Alta Frecuencia (UHF) se los ha denominado espacios en blanco de televisión conocidos por sus siglas en inglés como TVWS (TV White Spaces).

Los TVWS tienen características de propagación favorables frente a otras bandas del espectro, lo cual daría como resultado una opción amigable como tecnología mejorando las comunicaciones a larga distancia, presentado mayor resistencia a interferencias y obstáculos en áreas densas. La importancia de usar partes desocupadas del espectro de una forma inteligente permitirá hacer un uso más eficiente y evitar la subutilización del mismo.

4.2.2 Espacios en blanco de televisión.

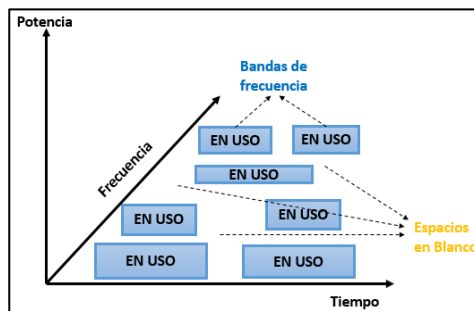


Figura 11. Espacios en Blanco.

Fuente. [Autor]

Según la UIT¹⁴ (Unión Internacional de Telecomunicaciones), los espacios en blanco de televisión (TVWS) son partes del espectro que no se utilizan en la transmisión, conocidas también como espectro intercalado o entrelazado, [16] y un dispositivo que trabaja sobre estos espacios sin causar ningún tipo de interferencia es conocido como dispositivo de espacio en blanco WSD (White Space Devices, por sus siglas en inglés). [17]

¹⁴ **UIT** (Unión Internacional de Telecomunicaciones), en inglés ITU (International Telecommunication Union) es una organización intergubernamental de la familia de las Naciones Unidas a cargo de la reglamentación, normalización y desarrollo de las telecomunicaciones en todo el mundo.

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC¹⁵, por sus siglas en inglés) emitió un fallo, que permite el uso de dispositivos sin licencia en los espacios en blanco. La FCC impuso requisitos importantes para que los dispositivos que operen en estos espacios en blanco: [18]

- Capacidad de geolocalización: antes de intentar utilizar los canales libres, se debe acceder a una base de datos de la disponibilidad de los mismos.
- Los WDS deben asegurarse que no interfieran en la transmisión, para la cual está destinado el canal originalmente.

4.2.3 Características de los TV White Space.

- Fácil de implementarse pueden instalar en cualquier lugar.
- Sin costo de espectro, se puede acceder a espacios en blanco del espectro sin la necesidad de una licencia.
- Menos interferencias.
- Latencia inferior a 15ms. [19]

4.2.4 Técnicas para la identificación de Espacios en blanco

4.2.4.1 Detección del Espectro

Consiste en realizar medidas dentro de un canal determinado para conocer si existe la presencia de algún servicio, y conocer si el canal está vacante u ocupado. Si se determina que el canal está vacante, el proceso de detección se lo realiza a los canales adyacentes para poder determinar qué tipo de restricciones puede haber en la potencia de transmisión. [20] La detección del espectro posee una ventaja relevante debido a que no se basa en ninguna infraestructura.

Parámetros clave para la detección del espectro:

- Umbral de detección.
- Monitoreo periódico de los canales que han sido detectados como vacantes.
- Duración del muestreo. [20]

Los métodos de detección pueden ser divididos en:

4.2.4.1.1 Detección de Energía:

Consiste en detectar la potencia de la señal de un determinado canal. El detector puede ser de banda estrecha con la finalidad que se pueda deslizar a través del canal que coincida con

¹⁵ FCC (Federal Communications Commission), Comisión Federal de Comunicaciones es una agencia gubernamental independiente que regula las comunicaciones por radio, televisión, teléfono, satélite y cable.

el ancho de banda de la señal. Una ventaja del detector de energía es que es independiente del sistema de radio a detectar, adaptándose de esta forma a cualquier sistema introducido en la banda. [20]

4.2.4.2 Geolocalización

En esta técnica, cada usuario secundario mide su ubicación y consulta con una base de datos de geolocalización, para fijar las frecuencias que pueden ser utilizadas por el usuario en ese lugar. Esta base de datos contiene la información de los espacios libres del espectro en una zona determinada. Mientras los usuarios secundarios no obtengan información proporcionada por la base de datos de la existencia de algún canal libre en su ubicación, estos no tienen permitido transmitir. Por esta razón, es necesario que el acceso inicial a la base de datos se haga por algún otro medio usando frecuencias libres. [20]

4.2.5 Dispositivos de espacios en blanco (WSD, White Space Device).

Permiten trabajar dentro del espectro desocupado; rigen su funcionamiento a la información obtenida de la base de datos, además poseen características que varían en función de la ubicación, frecuencia de trabajo, ancho de canal; este dispositivo estará sujeto a políticas y a entes reguladores de una región o país [21]. Según la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) se han establecido cuatro tipos de dispositivos WSD:

- **WSD Fijos:** denominados de tipo estacionario, por lo general utilizan una antena externa y mayor potencia logrando mayor cobertura. [17]
- **WSD Portátil:** denominados también computadores portátiles, por tener una potencia baja de funcionamiento y un menor alcance; existen también los denominados micrófonos inalámbricos que son estaciones de baja potencia. Estos dispositivos operan en la banda UHF de 512 a 608 MHz. [17]
- **WSD de censo:** puede ser fijo o móvil, posee la capacidad de detectar la ocupación que existe en el espectro, como son señales de televisión y de micrófonos inalámbricos. [17]

4.3 INTERNET DE LAS COSAS

4.3.1 Introducción

El avance de la tecnología es imparable, cada día se presentan al mundo nuevas innovaciones tecnológicas que llevan consigo múltiples efectos. Con el advenimiento de internet surgieron nuevos caminos, desde la interconexión de una red de computadores hasta interconectar una red de elementos distintos, logrando así combinar datos con procesos, personas y objetos; de esta manera internet ha ido revolucionando el día a día y modelando la forma de vida de cada individuo.

La interconexión de varios dispositivos a través de internet y la interacción de manera independiente entre ellos o con un individuo es lo que conocemos hoy en día como internet de las cosas (IoT); la aplicación de productos y servicios de IoT impregnará cada sector e industria, desde hogares inteligentes y ciudades inteligentes, educación, salud, manufactura, minería, petróleo y gas, energía, servicios públicos, comercio, transporte, vigilancia, gestión de infraestructura, etc. En general, las oportunidades que presenta IoT son infinitas y su potencial completo se realizará en un futuro próximo con cada vez más dispositivos conectados a Internet. [22]

4.3.2 Internet de las cosas (IoT, Internet of Things)

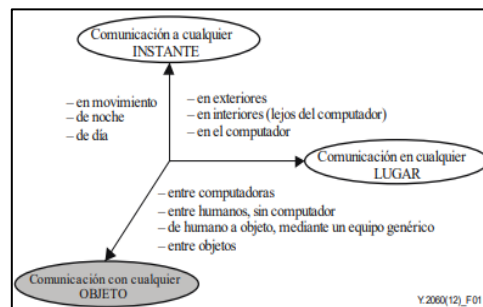


Figura 12. La nueva dimensión que introduce Internet de las Cosas (IoT). [23]

La UIT define el término IoT en la Recomendación UIT-T Y.2060 como: “*una infraestructura global de la sociedad de la información, que permite ofrecer servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperatividad de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) presentes y futuras*”. Internet de las cosas añade la dimensión de "Comunicación con cualquier objeto" a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), debido a que busca ofrecer la

comunicación en todo instante y en cualquier lugar; esta nueva dimensión se representa en la figura 12. [23]

4.3.3 Requisitos de IoT

La mayoría de aplicaciones de IoT involucran sensores que transmiten datos mínimos desde ubicaciones remotas en distancias cortas. Algunos de los requerimientos de IoT se detallan a continuación:

- **Soporte de un numero masivo de dispositivos**

Según estudios realizados por la UIT, junto a los fabricantes de Cisco y Nokia, pronostican que el crecimiento de dispositivos u objetos conectados está aumentando de forma exponencial en los últimos años. [24] Cada día, el número de objetos conectados a Internet aumenta varias veces y se espera que la penetración de objetos conectados en el mundo total alcance el 2,7% en 2020 desde el 0,6% en 2012. [22]

- **Baja tasa de Transmisión**

Debido al tipo de aplicaciones que contempla IoT, se espera que los dispositivos empleen modos de funcionamiento a ráfagas con reportes periódicos a intervalos regulares, con poca información por reporte, por lo que las tasas de bit que se manejarán serán bajas. [24]

- **Complejidad Reducida**

Teniendo en cuenta que se considera una implantación masiva de dispositivos IoT, se busca tener dispositivos baratos cuya complejidad sea lo menor posible con un funcionamiento sencillo y que reduzcan tanto el despliegue como el mantenimiento de estos. [24]

- **Eficiencia Energética**

Dentro de las diversas aplicaciones y escenarios de IoT, destaca el uso de sensores remotos o dispositivos aislados como pueden ser alarmas distribuidas por un edificio, sensores meteorológicos en zonas rurales, entre otros usos. Estos dispositivos se espera que tengan una larga vida útil, del orden de hasta 10 años, existiendo la posibilidad en algunos casos de pasar largos periodos de tiempo en modo reposo sin transmitir. En tales situaciones la eficiencia y la vida útil de las baterías juegan un papel decisivo. [24]

- **Latencia Limitada**

Los requisitos de respuesta deben cumplir con criterios de latencia razonables, siendo muy estrictos en aquellas aplicaciones que lo requieran, como es el caso de alarmas cuyo tiempo de respuesta tiene que cumplir un perfil concreto. En general, cuando no sea crítico, se consideran retardado de hasta 10 segundos en subida (uplink). [24]

- **Cobertura extendida y de interiores**

Muchas aplicaciones y dispositivos IoT tendrán como escenario de funcionamiento zonas interiores como viviendas, edificios, o en alturas próximas a nivel del suelo, lo que implica que la cobertura en interiores deba ser posible y robusta frente a errores. [24]

4.3.4 Aplicaciones y servicios IoT

4.3.4.1 Aplicaciones de IoT

En IoT existen diversos tipos de aplicaciones, los que se ubican en categorías de la siguiente manera:

- **Información y análisis**

Las redes vinculan los datos de los productos o el entorno operativo, los datos resultantes generan información que permite llegar a una toma de decisiones. A continuación, se irán describiendo los tipos de aplicaciones de esta categoría.

- **Comportamiento de seguimiento:** implica el proceso de monitorear el comportamiento de persona, cosas o datos a través del espacio y tiempo. [25]
- **Conciencia situacional mejorada:** los datos recopilados mediante sensores cuando se despliegan en una infraestructura como edificios pueden dar a los tomadores de decisiones una mayor conciencia de los eventos en tiempo real, especial cuando los sensores se utilizan con tecnologías de visualización avanzada. [25]

- **Automatización y Control**

Lograr que los datos sean la base de la automatización y el control implica convertir los datos y el análisis recopilado en instrucciones que se transmiten por medio de la red a actuadores que a su vez modifican procesos. Al cerrar el bucle de datos a aplicaciones automatizadas, los sistemas pueden ajustarse automáticamente a situaciones complejas y hacer innecesarias intervenciones humanas. [25]

- **Sistemas complejos autónomos:** el uso exigente de IoT implica la detección rápida de condiciones impredecibles y respuestas instantáneas guiadas mediante sistemas automatizados, imitando reacciones humanas a través de niveles de rendimientos mejorados [25]
- **Optimización de procesos:** IoT abre nuevas fronteras para mejorar procesos, esta instrumentación mejorada permite reducciones importantes de residuos, los costos de energía y la intervención humana. [25]
- **Consumo optimizado de recursos:** los sensores en red y los mecanismos automatizados de retroalimentación permiten cambiar patrones de uso de los escasos recursos, incluyendo la energía y el agua. [25]

4.3.4.2 Servicios de IoT

Los servicios en IoT se encuentran orientados a determinadas situaciones, se construyen y se componen de forma automática en tiempo de ejecución, responden a necesidades específicas de los usuarios, se adaptan al contexto del usuario y los apoyan en actividades diarias. [25]

- **AAL (Ambiente de vida asistida):** conforme cambian las características demográficas de las sociedades: envejecimiento poblacional, extensión de la vida; el edificio moderno tendrá que apoyar la vida independiente en edades avanzadas. Utilizando sensores, controladores e inteligencia los edificios inteligentes brindan asistencia técnica a adultos mayores, permitiendo una vida asistida en un entorno determinado. [25]
- **Utilidad:** los centros de medición inteligentes pueden informar automáticamente sobre el uso de energía a través de redes, ahorrando tiempo y costos, permitiendo a las empresas optimiza el consumo en respuesta a las condiciones del suministro. Proporciona ahorro energético para los propietarios de viviendas. [25]
- **Atención de salud:** en el sector salud las tecnologías IoT pueden encontrar diversas aplicaciones, ejemplo de esto son los sensores médicos que permiten monitorizar parámetros como temperatura corporal, presión sanguínea, actividad respiratoria. [25]
- **Hogares / edificios inteligentes:** el equipamiento de mobiliario como edificios, hogares con tecnología IoT puede ayudar a reducir el consumo de recursos como

energía y también mejorar el nivel de confort de sus ocupantes proporcionando sistemas controlados de iluminación, seguridad, etc.; en este rol juegan un papel fundamental los sensores y actuadores, utilizados para monitorear, detectar y responder de forma eficiente a los usuarios. [25]

- **Ciudad Inteligente:** los servicios IoT avanzados permiten optimizar el uso de las infraestructuras físicas de una ciudad y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. [25]



Figura 13. Casos de uso de IoT. [26]

4.3.5 Smart Campus

IoT engloba diversas aplicaciones, en este tema de investigación puntualmente se hace alusión a eficiencia energética (Smart energy), una temática más dentro de IoT que busca manejar de forma sustentable los recursos energéticos mediante procesos que permiten optimizar y monitorizar el consumo energético, en este caso en un entorno universitario (Smart Campus). Antes de describir el concepto de este término, iniciaremos por detallar el concepto de ciudad inteligente.

4.3.5.1 Ciudades Inteligentes o Smart Cities

En la literatura se encuentra diversas definiciones de Smart Cities, entre esta variedad de conceptos se ha tomado el siguiente: *las Smart Cities utilizan las TICs (Tecnologías de la Información y la Comunicación) para ser más inteligentes y eficientes en el uso de recursos, reduciendo costes, ahorrando energía, mejorando los servicios proporcionados, la calidad de vida, y reduciendo la huella medioambiental.* [27] Entonces una ciudad para ser considerada inteligente ira de la mano con la tecnología, englobará varios servicios y hará uso de infraestructura que esté disponible.

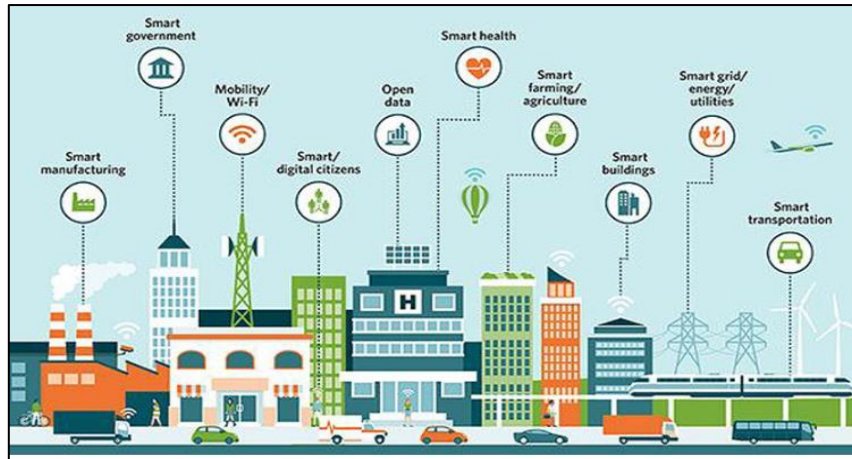


Figura 14. Smart City. [28]

4.3.5.2 Smart Campus o Campus Inteligente.

Las áreas que conforman una Smart City pueden acoplarse a varios entornos, en el caso de este proyecto investigativo se buscara adaptar el concepto ciudad inteligente a un entorno universitario, el cual se va a considerar como una ciudad a pequeña escala e independiente, donde se desarrollan diversas actividades, conformada por diferentes usuarios, redes de comunicación, dispositivos electrónicos, entre otros aspectos.

Smart campus es un entorno corresponde a un entorno donde se hace uso de las TICs para brindar un ambiente inteligente y lograr optimizar recursos, todo esto a beneficio de los distintos usuarios. Los servicios que se buscan brindar en un campus con un entorno inteligente son los siguientes: [24]

- Wifi y facilidades de internet inalámbrico.
- Smart aulas y salas.
- Aprendizaje desde cualquier hora y lugar.
- Monitoreo del campus: estudiantes, personal, equipos, bienes.
- Crear un campus amigable al medio ambiente, etc. [29]

4.3.5.3 Eficiencia Energética

Eficiencia energética se refiere a la capacidad de utilizar menos energía y producir la misma cantidad de iluminación, calor u otros servicios energéticos; la cual abarca un conjunto de acciones que permiten emplear la energía de una manera más óptima, incrementando así la competitividad de las empresas, mejorando la calidad de vida, reduciendo costos y al mismo

tiempo limitando la producción de gases de efecto invernadero. [30] En la figura 15, se detallan algunas ventajas de la eficiencia energética.



Figura 15. Ventajas de la eficiencia energética. [31]

Dentro de la aplicación para optimizar el consumo de energía eléctrica se encuentra AMI (Infraestructura de Medición Avanzada, por sus siglas en español) la cual muestra la adopción de IoT en servicios públicos; este término se asocia con internet de las cosas en varios pilares como conectar, recopilar, calcular y crear.

- **Infraestructura de medición Avanzada (AMI)**

AMI se define como un sistema capaz de recolectar información de medición cada cierto periodo, con el fin de transmitirla en un canal de comunicaciones para su adecuada recepción en un sistema de recolección y análisis de datos. [32] La figura 16 muestra la arquitectura general de AMI.

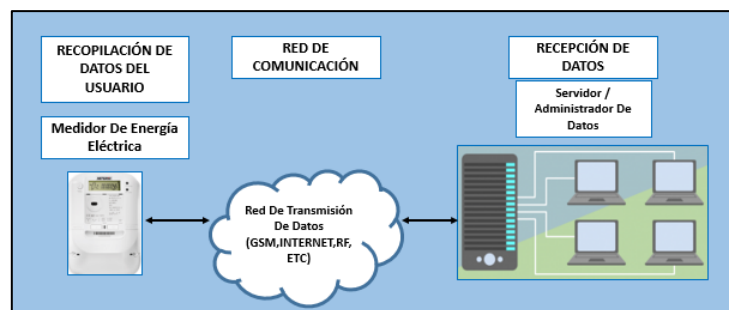


Figura 16. Esquema de un sistema de medición inteligente. [33]

En la figura 16, se observa tres niveles que conforman un esquema de medición inteligente, a continuación, se describirá cada uno de ellos.

- **Nivel 1:** Corresponde al centro de gestión de datos; en este nivel se recolecta la información de los medidores para su respectivo análisis, procesamiento y almacenamiento. [32]

- **Nivel 2:** es la capa de acceso, este nivel se encuentran los canales de comunicación que hacen posible la comunicación entre el centro de gestión y los medidores inteligentes. [32]
- **Nivel 3:** Corresponde a los medidores inteligentes encargados del registro de variables asociadas al consumo eléctrico. [32]

▪ **Estructuras de comunicación de una red AMI**

La figura 17, permite apreciar el alcance de las tres estructuras de comunicación jerárquicas.

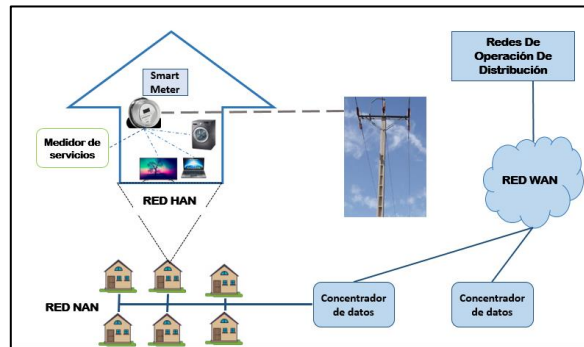


Figura 17. Estructuras de comunicación en una Red Eléctrica Inteligente. [35]

La medición inteligente de energía eléctrica; se puede asociar a lo que se conoce como Smart Grid (Red Eléctrica inteligente, por su significado en español), conocida también como red eléctrica de próxima generación; diseñada para gestionar el suministro y el consumo de energía de una manera eficiente e inteligente al proporcionar una red de comunicación confiable y segura entre proveedores y clientes de energía. Para abordar las comunicaciones de Smart Grid se adopta un marco jerárquico que consiste en redes de área domestica (HAN, por sus siglas en inglés), se forma en un área pequeña como residencial, comercial e industrial que abarca va de 1 m a 100 m, soporta las funciones básicas de vigilar y controlar los dispositivos inteligentes. Las redes de área de vecindario (NAN, por sus siglas en inglés), necesitan cubrir unos pocos kilómetros cuadrados, conectan miles de sensores y actuadores, incluyendo medidores inteligentes, la NAN en una red de acceso se requiere para proporcionar una gran cobertura con una densidad de usuarios relativamente alta. Según la distribución geográfica y el número de dispositivos, cada red de área tiene diferentes requisitos de comunicación y se adoptara cualquiera de las jerarquías correspondientes. [34]

5. MATERIALES Y MÉTODOS.

5.1 Materiales:

En el presente proyecto se utilizó investigación bibliográfica, donde se realizó una recolección de información de libros en formato digital, artículos científicos, publicaciones de revistas, repositorios de universidades, publicaciones en internet de trabajos de investigación realizados; todo esto con el propósito de sustentar, profundizar las temáticas afines para el desarrollo del presente proyecto de investigación.

5.2 Metodología

5.2.1 Métodos Aplicados

- **Método Científico**

La aplicación de este método se lo realizó a través de la recopilación información bibliográfica retrospectiva que permite construir el desarrollo del presente tema de investigación; los datos recopilados permiten conocer las características del estándar IEEE 802.11x en sus versiones más sobresalientes, haciendo mayor énfasis en 802.11af: su arquitectura, funcionalidad y características técnicas esto permite relacionar al estándar como tecnología para IoT en algunos sistemas y servicios centrándose en el tema referente a eficiencia energética; se indagó acerca de la existencia de dispositivos IoT desarrollados bajo el estándar 802.11af. Además, este método sirvió para la recolección de datos técnicos de distintos artículos científicos que aportan al desarrollo del presente proyecto.

- **Método Descriptivo**

Este método permite realizar la descripción técnica de la información bibliográfica recolectada, con el conocimiento de los aspectos generales del estándar IEEE 802.11af y sus principales características.

- **Método Deductivo**

Este método infiere para determinar una posible relación del estándar IEEE 802.11af con IoT a través de sus características técnicas logrando una interpretación precisa de la información que permita conocer si esta tecnología puede satisfacer los requisitos para servir como base en servicios y aplicaciones para IoT. El método deductivo también posibilita la selección del dispositivo IoT para la aplicación específica (eficiencia energética).

- **Método Analítico**

Da cumplimiento a la fase de análisis de los aspectos técnicos y funcionales del estándar 802.11af que permitan compararlo con versiones anteriores. Realizado el estudio de la tecnología se logrará realizar un diseño tentativo de una red IoT para una aplicación específica (Eficiencia energética). Finalmente, en base a los datos mercantiles recopilados de los dispositivos se realizará la factibilidad económica para una aplicación IoT, esto con finalidad de conocer si desplegar una red utilizando 802.11af es viable en el entorno de la FEIRNNR.

5.2.2 Análisis Técnico Del Estándar IEEE 802.11af White-fi

5.2.2.1 Introducción e historia al Estándar IEEE 802.11af

En el año 2009 la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones), emite resoluciones reglamentarias para la reutilización del espectro correspondiente a los espacios en blanco de televisión (TVWS). En respuesta a esta petición el Instituto de Ingenieros Eléctricos Electrónicos (IEEE), forma un grupo de trabajo en enero del 2010 para iniciar un estudio de este tema; años más tarde en septiembre del 2012 se lanza el primer borrador correspondiente al estándar IEEE 802.11af definiendo modificaciones sobre las capas de control de acceso al medio (MAC) y física (PHY) del estándar 802.11 con el propósito de cumplir aspectos técnicos para poder acceder y convivir sobre los espacios en blanco disponibles. Un año más tarde en octubre del 2013 logra su estandarización.

El estándar IEEE 802.11af conocido como White-Fi o Super-Wi-Fi se trata de una norma que busca utilizar espacios en blanco dentro del espectro radioeléctrico disponibles en las bandas: VHF (Muy Alta Frecuencia) en el rango entre 54 a 216 MHz y UHF (Ultra alta frecuencia) entre 470 a 698 MHz, asignadas a diversos usuarios con licencia, denominados usuarios primarios (PU) para el servicio de televisión o radiodifusión.

5.2.2.2 Funcionamiento

White-fi IEEE 802.11af presenta variantes en su funcionalidad con respecto al resto de estándares de la familia 802.11. El funcionamiento de un sistema que utilice White-fi como tecnología inalámbrica emplea técnicas de Radio cognitiva¹⁶ para acceder al espectro; una forma es mediante geolocalización que consiste en tener una base de datos geográficos para conocer qué canales y el tiempo que están disponibles en una determinada área. La segunda forma es mediante la detección de energía en la cual se sensa el espectro determinando los rangos de frecuencia disponibles.

¹⁶ **Radio Cognitiva**, corresponde a un sistema de comunicación inalámbrica inteligente que conoce su entorno circundante y utiliza una metodología de entendimiento para aprender del medio ambiente y así adaptar sus estados internos haciendo los correspondiente cambios en determinados parámetros de funcionamiento (potencia de transmisión, frecuencia portadora, modulación) en tiempo real, con el fin de cumplir dos objetivos principales; el primero tener una comunicación altamente confiable cuando y donde sea necesario, y el segundo, utilizar de forma eficiente el espectro radioeléctrico.

5.2.2.3 Componentes de la Arquitectura del estándar IEEE 802.11 af

El esquema de la figura 18, indica los componentes del estándar 802.11af y la forma como un dispositivo puede acceder a ocupar los TVWS. Los componentes principales son: Base de Datos de Geolocalización (GDB), Servidor Seguro de Registros de Ubicación (RLSS), entidades GDD (Dependientes de la Base de Datos de Geolocalización) que se dividen en GDD-habilitadoras y GDD-dependientes, estas se encuentran registradas por la GDB y se comunican con está utilizando el protocolo RLQP (Protocolo de consulta de registro de localización).

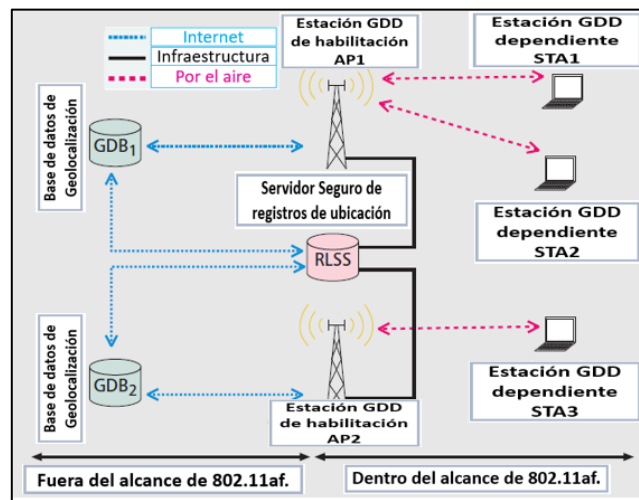


Figura 18. Arquitectura del estándar 802.11af. [15]

A continuación, se ira describiendo de forma detallada cada uno de los componentes que conforman la arquitectura de IEEE 802.11af utilizando la técnica de detección del espectro mediante geolocalización.

- **Base de datos de Geolocalización (GDB, Geolocation Database)**

Corresponde a una base de datos que permite sensar el espectro, almacenar la ubicación geográfica exacta de frecuencias donde existe disponibilidad de espacios en blanco en las bandas VHF y UHF para lograr que un dispositivo WSD pueda operar. Esta base de datos estará certificada por el ente regulador del país o región donde se hará uso de los espacios en blanco. La figura 18, nos indica dos formas de comunicación establecidas hacia la GDB. En el primer escenario, la GDB se comunica con el servidor seguro de registros de ubicación (RLSS); la segunda indica una comunicación con la estación GDD habilitadora, estas formas de comunicación se realizan de forma bidireccional mediante acceso a internet. [17]

- **Servidor Seguro de registros de ubicación (RLSS, Registered Location Secure Server)**

Es una base de datos local, aloja información de la GDB para un grupo de estaciones asociadas como una subred. Este servidor se encarga de distribuir toda la información obtenida de la GDB e informarle a esta sobre los canales que se están en uso por las GDD-habilitadoras que se comunican con ella. Su operación está sujeta al cumplimiento de las regulaciones de cada región o país. Un RLSS se comunica mediante acceso a internet con la GDB; también se puede entablar comunicación con otros RLSS o con otras GDBs con la finalidad de realizar consultas, actualizar otras GDBs y así evitar las duplicaciones de información. [17]

- **Entidades Dependientes de la Base de Datos de Geolocalización (GDD-Geolocation Database Dependent Entities)**

Las entidades GDD se encuentran controladas por las GDBs o RLSS y están sujetas a requisitos de regulación; a su vez estas entidades se clasifican en habilitadoras y dependientes, como se detalla a continuación:

- **Estación GDD de habilitación (GDD-enabling Station)**

Una estación GDD de habilitación corresponde a un Punto de acceso (AP) en la familia 802.11, esta estación se encarga de controlar el funcionamiento de las estaciones inalámbricas (STAs) bajo su servicio, permitiéndoles acceder de forma segura a la GDB o al RLSS para obtener información acerca de las frecuencias operativas y parámetros de funcionamiento permitidos en su región de cobertura. [17] La información que otorgan estas entidades se representa mediante un mapa de espacios en blanco (WSM, White Space Map), esta estación asegura una entrega fiable de los WSM a cada estación STA. Para garantizar fiabilidad en la entrega, la estación habilitadora crea y transmite una señal de verificación de contacto (CVS, Contact verification signal) a todas las estaciones que se encuentran dentro de la subred. [17] [36]

- **Estación GDD dependiente (GDD- Dependet Station)**

Dentro de la arquitectura BSS, esta se identifica como una estación o un usuario final. Sin embargo, el estándar 802.11af especifica que la operación de la estación GDD-dependiente estará controlada por la GDD- habilitadora,

de la cual obtiene las frecuencias operativas y los parámetros permitidos en un mapa de espacios en blanco. [17] [36].

- **Protocolo de consulta de registro de localización (RLQP, Registered Location Query Protocol)**

Este protocolo permite la funcionalidad de los principales mecanismos de 802.11af, se utiliza para entablar una comunicación entre las estaciones GDD (habilitantes y dependientes), para poder compartir los mapas de espacio en blanco y el uso del canal, mediante esta comunicación las estaciones pueden seleccionar el espectro, potencia, y el ancho de banda permitido, según el dominio de regulación. [17]

- **Mapa de Espacios en blanco (WSM, White Space Map)**

Este mapa es obtenido por la GDB, y consiste en una lista de canales con las frecuencias que están disponibles y sus limitaciones en potencia. Los WSM variarán en base a la ubicación y estarán sujetos a los dominios regulatorios. [15]

5.2.2.4 Fundamentos Técnicos

IEEE 802.11af proporciona parámetros técnicos que permiten a los fabricantes de dispositivos de tecnologías de RF introducir al mercado nuevos equipos, estos parámetros son la topología de la red, la capacidad del sistema y la cobertura.

- **Topología del sistema:** El estándar IEEE 802.11af especifica una interfaz inalámbrica punto a punto y punto a multipunto, donde intervienen diferentes dispositivos. En esta topología la estación base permite el acceso a la red principal y transmite datos en enlace descendente y recibe información en un canal ascendente de los usuarios o dispositivos finales. Además, controla el acceso al medio sujetándose a diferentes aspectos de radio cognitiva que le permitan seguir en funcionamiento bajo diversas condiciones espectrales variables.
- **Área de cobertura:** El área de cobertura del estándar IEEE 802.11af es notablemente mayor al ofrecido por las versiones anteriores de los estándares 802.11. Con 802.11af una estación base puede cubrir un rango desde los 100m a 1km en condiciones ideales.
- **Capacidad del sistema:** La capacidad de un canal de 6 MHz va desde los 2 Mbps utilizando BPSK a 26.7 Mbps con 256 QAM.

5.2.2.5 Capa MAC (Control de Acceso al Medio)

La capa MAC se encarga de lograr una interacción fiable con el medio físico, definiendo procedimientos que permiten que diferentes dispositivos compartan el espectro radioeléctrico.

En el esquema de la figura 18, se observa que la comunicación entre la base de datos de geolocalización GDB, el servidor seguro de registros de ubicación RLSS y la estación de habilitación GDD se da en forma bidireccional por medio del servicio de internet, sin embargo, esta comunicación queda fuera del alcance del estándar 802.11af, en la cual no prestara importancia al protocolo y la infraestructura usada para entablar la comunicación. El alcance del estándar abarca la comunicación que se realiza entre el RLSS, las GDD habilitadora y dependiente, la cuales usan el aire como medio físico de transmisión cuando existe espectro libre. El servidor RLSS proporciona información obtenida de la GDB, acerca de la disponibilidad de espectro a la estación GDD habilitadora, esta realiza actualizaciones de ubicación geográfica cada 60 segundos. Si una estación GDD habilitadora presenta variaciones en su posición llegando a alcanzar un radio máximo de 100 metros desde su última consulta, necesitara realizar una actualización de datos, intercambiando mensajes de manera constante para verificar si aún existe disponibilidad en el espectro. [17] La capa MAC 802.11af utiliza el protocolo de acceso múltiple con escucha de portadora y detección de colisiones (CSMA/CA), esto implica que 802.11af necesita escuchar el medio antes de realizar una transmisión. [37]

Para la comunicación entre estaciones y brindar una garantía de fiabilidad 802.11af proporciona varios mecanismos de control, que se detallan a continuación.

- **Consulta de disponibilidad de canal (CAQ, Channel Availability Query)**

Procedimiento realizado por las estaciones hacia el RLSS para obtener un mapa de espacios en blanco WSM con las frecuencias disponibles que les permitirá operar en una ubicación determinada o en un área delimitada por un radio definido. Como se ha mencionado antes el RLSS funciona como una base de datos local, sin embargo, en algunos procesos de consulta CAQ, se deberá acceder a la GDB, esto dependerá de los dominios de regulación. El procedimiento de consulta de canal se lo realiza en tres diferentes casos: [15]

1. Al expirar el estado de habilitación, para permitir que la GDD continúe en estado activo.
 2. Cuando la estación indica un cambio en la disponibilidad del canal, mediante una señal CVS.
 3. Cuando la estación se traslada fuera del área permitida. [15] [21]
- **Gestión de la Programación del Canal (CSM, Channel Schedule Management)**
Es una solicitud realizada exclusivamente por una estación GDD habilitadora (Punto de acceso), hacia el RLSS u otras estaciones GDD habilitadas para obtener información acerca de la programación de los espacios en blanco. [15] [17] [21]
 - **Señal de Verificación de Contacto (CVS, Contact Verification Signal)**
Se envía de forma exclusiva por las estaciones GDD habilitantes, con la finalidad de cumplir dos propósitos; el primero conocer que estaciones se encuentran dentro del rango de recepción y el segundo garantizar la fiabilidad del WSM obtenido. Esta señal se envía en forma unicast, a cada estación GDD dependiente en un intervalo de 60 segundos. [15] [17]
 - **Habilitación de GDD**
Este procedimiento otorga la capacidad de que una estación GDD de habilitación logre formar una red con varios GDD dependientes, esta red estará sujeta al control de una GDB. [15]
Las estaciones dependientes de GDD tienen tres estados de habilitación:
 1. **No habilitadas;** cuando una estación GDD dependiente no recibe una señal de habilitación y por ende no puede emitir ninguna señal. [15]
 2. **Intento de habilitación GDD;** la estación GDD dependiente explora los canales en busca una señal de activación. [15]
 3. **Estación habilitada;** en este caso se logra recibir una señal de habilitación exitosa y la estación dependiente ingresa a una red correspondiente a una GDD habilitadora. [15]
 - **Control del canal de la red (NCC, Network Channel Control)**
El control de canal es un procedimiento que permite controlar el uso de las frecuencias libres en las bandas de televisión, en base a mensajes mediante los cuales

se consultara el uso de frecuencias que contenidas en los mapas WSM, para conocer si las frecuencias solicitadas se encuentran disponibles. [15]

- **Resumen de los mecanismos de control y tiempos**

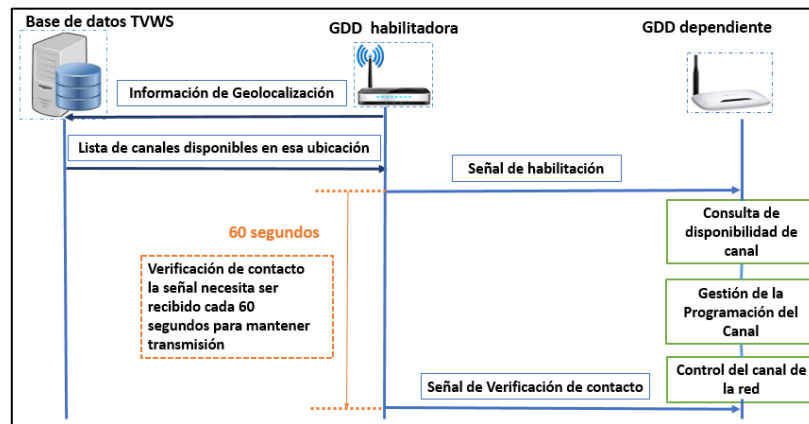


Figura 19. Resumen de los principales mecanismos de la capa MAC especificados en 802.11af. [17]

La figura 19, corresponde al resumen de los mecanismos realizados en la capa MAC, para explicarla se inicia desde la estación GDD dependiente la cual se encuentra inhabilitada, mientras que la estación GDD habilitadora busca acceder a la base de datos de geolocalización para registrarse, solicitar información necesaria, obtener una lista valida de canales que se encuentran disponibles y el WSM.

La base de datos TVWS realiza un análisis técnico de la información solicitada para realizar la asignación de recursos del espectro y poder emitir una respuesta a la GDD habilitadora; en base a esta respuesta esta estación inicia un escaneo pasivo de verificación de los parámetros recibidos para posteriormente enviar una señal CVS hacia la estación GDD dependiente. Recibida esta señal la estación inicia un proceso de habilitación, pero aún no es capaz de emitir ningún tipo de señal, sin embargo, realiza consultas de CAQ, CSM y NCC a la estación GDD habilitadora, a la espera de una respuesta de confirmación que indicara la habilitación o no de esta, si es habilitada la estación esta apta para transmitir y siempre estará regida en base a los mecanismos de control. [17]

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los tiempos que se ejecutan los mecanismos de control de GDD.

Tabla 1. Resumen de mecanismos de control de la GDD (Entidad Dependiente de la Base de Datos de Geolocalización). [15] [16]

MECANISMO	CONSULTA		Respuesta en minutos
	Cada hora	Diaria	
CAQ (Consulta de disponibilidad de canales)	Informativo	Informativo	No aplica
CSM (Gestor de programación de canales)	Informativo	Informativo	No aplica
CVS (Señal de verificación de contacto)	Informativo	Informativo	La pérdida de señales consecutivas requiere acción
GDD habilitadora	Requerido	Requerido	Requerido
NCC (Control de canal de la red)	Informativo	Informativo	No aplica
WSM (Mapa de Espacios en blanco)	Requerido por la estación GDD habilitadora, puede ser utilizado para la GDD dependiente		

5.2.2.6 Capa Física

La capa física (PHY) se encuentra entre la capa MAC y el medio inalámbrico, esta capa a su vez está dividida en dos subcapas, PLCP (Physical Layer Converge Procedure), cercana a la capa MAC que permite asociar los PPDU (Physical Protocol Data Units) de la MAC a un formato adecuado para la transmisión y recepción de datos entre las estaciones inalámbricas que utilizan una capa de subnivel inferior del medio físico (PMD) asociada, esta capa agrega campos a los MPDU (MAC Protocol Data Unit) requeridos por los transmisores y receptores; la subcapa PMD define las características y el método de transmitir o recibir los datos de usuario interactuando con el medio inalámbrico bajo la dirección de la capa de convergencia del medio físico.

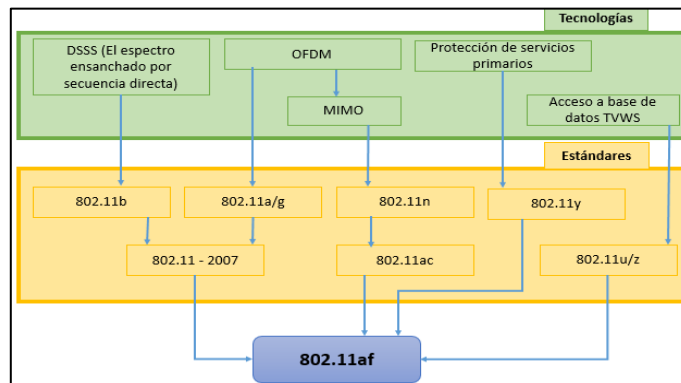


Figura 20. Configuración de IEEE 802.11af. [38]

La PHY del estándar 802.11af se hereda de sus antecesores 802.11n y su evolución 802.11ac, esta capa se denomina de muy alto rendimiento para TV (TVHT PHY, por sus siglas en inglés) capaz de trabajar en el ancho de banda asignado para un canal de televisión analógica es de 6 MHz, se basa en multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), técnica que actualmente es la más utilizada por sistemas de comunicación inalámbricos para tratar de solucionar las interferencias entre símbolos, causada por la propagación en diferentes trayectos, además del uso de técnicas MIMO (Múltiples Entradas Múltiples Salidas), soportando hasta cuatro corrientes. El número de subportadoras usadas por el estándar 802.11af es de 144, ocupando canales de con un ancho de banda de 6,7 y 8 MHz. El ancho de banda de los canales dependerá de lo dominios regulatorios de cada país, en EE. UU se permiten canales de 6 MHz, en las frecuencias de 54 a 698 MHz, para Europa canales de 8 MHz, en las frecuencias de 470 a 790 MHz, en Ecuador según la Arcotel se opera en el rango de frecuencias desde 54 a 698 MHz, divididas en 44 canales de 6 MHz cada uno. [17] La velocidad de transferencia de datos presenta algunas variantes; para canales de 6 y 7 MHz la velocidad de datos puede llegar hasta los 26.7 Mbps, para canales de 8 MHz hasta 35,6 Mbps, utilizando un solo flujo espacial; si se utilizan hasta cuatro flujos espaciales la velocidad de transferencia máxima para canales de 6 o 7 MHz es de 426,7 Mbps, para canales de 8 MHz de 568,9 Mbps. [15] La trama de la capa física TVHT PHY, posee un diseño robusto que busca ser compatible con las versiones anteriores de los estándares 802.11.

La figura 21, muestra un esquemático del formato de la trama TVHT PHY, la cual consta de campos que se denominan heredados y se denotan con la letra L (L, legacy), el campo TVHT (TV de muy alto rendimiento) y la carga útil que incluye la PSDU (Unidad de datos de servicio PLCP. [39] Todos ellos poseen un formato NON_HT, este formato permite compatibilidad con los dispositivos que cumplan con el estándar lo que permite que sean compatibles y puedan heredar tramas de otros estándares de la familia 802.11. [17] El campo legacy incluye: L-STF (Legacy-Short Training Field) campo de Entrenamiento heredado-Corto, L-LTF (Legacy-Long Training Field) campo de entrenamiento heredado-Largo; corresponden a secuencias de símbolos OFDM heredados con diferentes longitudes y con un tiempo de duración de 60µseg, estos símbolos se usan para sincronización de temporizadores e indican el inicio en las transmisiones; L-SIG (Legacy- Signal field) campo de señal heredado, indica la duración de la información. El campo TVHT incluye: TVHT-SIG-A

(TVHT Signal A), TVHT señal A, la cual incluye información requerida para la demodulación, el número de agregación de canales, número de multiplexación espacial, el tipo de intervalo de guarda y el tipo de esquema de codificación de canales; TVHT-SIG-B (TVHT Signal B) señal B, incluye información acerca del nivel de esquema de modulación y codificación (MCS) y la longitud de la carga útil para cada flujo espacial, los campos SIG-A Y SIG-B tienen una duración de 60 y 30 μ seg respectivamente. TVHT-STF (TVHT Short training field) Campo de entrenamiento corto-TVHT, identifica parámetros de control para que la información no se repita, tiene una duración de 30 μ seg, TVHT-LTF (TVHT-Long training field) Campo de entrenamiento largo- TVHT, se usa para estimación de canal y demodulación la carga útil. [39]

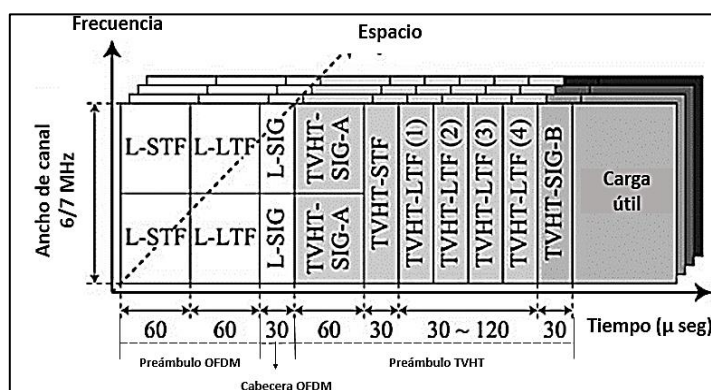


Figura 21. Formato de la trama para IEEE 802.11af TVHT PHY. [17]

En resumen, el preámbulo, situado al inicio de la trama, consta de símbolos de entrenamiento cortos y largos que tienen por objeto adquirir la señal OFDM entrante y sincronizar el demodulador desde el lado del receptor. Diez de los símbolos de entrenamiento cortos tienen por objeto establecer el control automático de ganancia (AGC) y estimar la frecuencia de la señal portadora; los símbolos de entrenamiento largos se utilizan para la estimación del canal y la sintonización de la frecuencia en el receptor. La información sobre la velocidad y la longitud de la unidad de datos de servicio PHY (PSDU, PLCP Service Data Unit) está incluida en el campo de la señal. [34] El tiempo de ranura para el TVHT PHY será 24 μ s para las unidades de canal de 6 y 7 MHz y 20 μ s para las unidades de canal de 8 MHz. [39] En la tabla 2, se recogen los parámetros generales del estándar IEEE 802.11af.

Tabla 2. Parámetros del IEEE 802.11af y esquemas de modulación correspondientes a la capa PHY para el modo NON_HT. [17] [39]

Parámetros	Especificaciones de la capa Física (PHY).							
Área de cobertura y retardo de propagación	interior: hasta los 100m < 1μseg; exterior: mayor a 1 km a 10μseg.							
Tamaño de FFT (Transformada rápida de Fourier)	64,128,144,256; opcional: 512 y 1024							
Ancho de banda (MHz)	6,10,20,40,80,160 (80+80)							
Interfaz de aire	OFDM							
Método de acceso	CSMA-CA (Acceso múltiple por detección de portadora evitando colisiones)							
Modulaciones de carga útil	BPSK	BPSK	QPSK	QPSK	16-QAM	16-QAM	64-QAM	64-QAM
Tasa de codificación (R)	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
Bits codificados por subportadora (N_{BPSK})	1	1	2	2	4	4	6	6
Bits codificados por símbolo OFDM (N_{CBPS})	48	48	96	96	192	192	288	288
Bits de datos por cada símbolo OFDM (N_{DBPS})	24	36	48	72	96	144	192	216

La tabla 3, muestran algunos parámetros correspondientes a la capa PHY para un solo canal simple TVWS.

Tabla 3. Parámetros de PHY de 802.11af para un canal de 6 MHz. [17] [39]

Parámetros	Valor
NT: Total subportadoras	144
NC: Subportadoras usadas	114
NSD: Número de subportadoras (carga útil)	108 (-58 a -2, +2 a +58)
NSP: Número de subportadoras piloto	6 (-53,-25,-11, +11, +25, +53)
Δf: Espaciamiento de frecuencia subportadoras (MHz)	Espacio de canal/ Tamaño de la FFT= 6MHz/144
Tamaño de transformada de Fourier	144/6MHz = 24μseg
IG: Intervalo de Guarda	Largo: 1/4, corto: 1/8
Duración de intervalo de guarda	24μseg/4 = 6μseg
Duración de intervalo de guarda corto	24μseg/8 = 3μseg

Esquemas de modulación y codificación (MCS) para un canal de 6 MHz.				
Índice MCS	Modulación	Tasa de Código	Tasa de datos (Mbps)	
			Intervalo de Guarda Largo: 1/4	Intervalo de Guarda Corto: 1/8
0	BPSK	1/2	1.8	2.0
1	QPSK	1/2	3.6	4.0
2	QPSK	3/4	5.4	6.0
3	16-QAM	1/2	7.2	8.0
4	16-QAM	3/4	10.8	12.0
5	64-QAM	2/3	14.4	16.0
6	64-QAM	3/4	16.2	18.0
7	64-QAM	5/6	18.0	20.0
8 (Opcional)	256-QAM	3/4	21.6	24.0
9 (Opcional)	256-QAM	5/6	24.0	26.7

En lo que corresponde a canalización en el estándar permite el uso de un solo de canal o de varios canales contiguos libres de ser el caso, en TVWS se tiene cinco modos de operación para cualquier ancho de canal (6,7 y 8 MHz). Para un canal disponible de 6 MHz el ancho de banda total será de 5 MHz centrado en la frecuencia central de la banda de TV correspondiente; si se trabaja con dos canales contiguos disponibles el ancho total del canal será de 10 MHz, y para cuatro canales consecutivos, será de 20 MHz. En la figura 22, se muestra un esquema sobre la asignación de subportadoras para un canal de 6 MHz, tomando en cuenta los valores mostrados en la tabla 3, donde se tiene un total de 144 subportadoras.

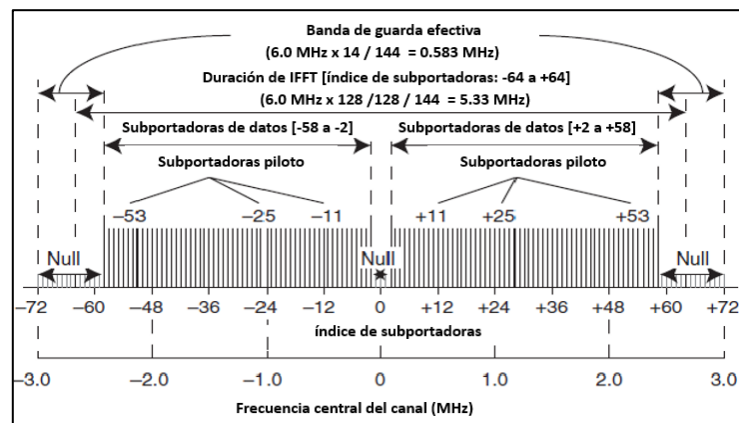


Figura 22. Asignación de subportadoras OFDM en un canal de 6 MHz. [17]

En la figura 23, se indica los modos de canalización que un dispositivo de alto rendimiento TVHT tiene la capacidad de realizar; como se ha mencionado la transmisión de datos de

White-fi se basa en OFDM, donde los sistemas se denominan unidades de canal básico (BCU) y tienen anchos de banda de 6 MHz, 7 MHz u 8 MHz, dependiendo del dominio regulador. [17] Los TVWS para el estándar consideran frecuencias desde 54 -790 MHz; para un ancho de banda BCU de 6 MHz, en Ecuador hay 44 BCU no superpuestas (54 – 72 MHz, 76 – 88 MHz, 174 – 216 MHz, 470 – 482 MHz, 512 – 608 MHz, 614- 644 MHz y 644 – 698 MHz) las cuales pueden estar libres u ocupadas.

Si bien los dispositivos basados en IEEE 802.11af tienen que admitir el modo de transmisión obligatorio de una BCU (representada con TVHT Modo-1), los modos de transmisión opcionales utilizan múltiples BCU y pueden alcanzar velocidades de datos más altas.

Mientras aumenta el número de canales libres aumentara de forma lineal la tasa de transmisión y con el ello el ancho de banda. Para llegar a utilizar anchos de canales más amplios se debe iniciar desde el ancho de canal de modo simple, luego será escalado de modo en modo hasta llegar al deseado [17].

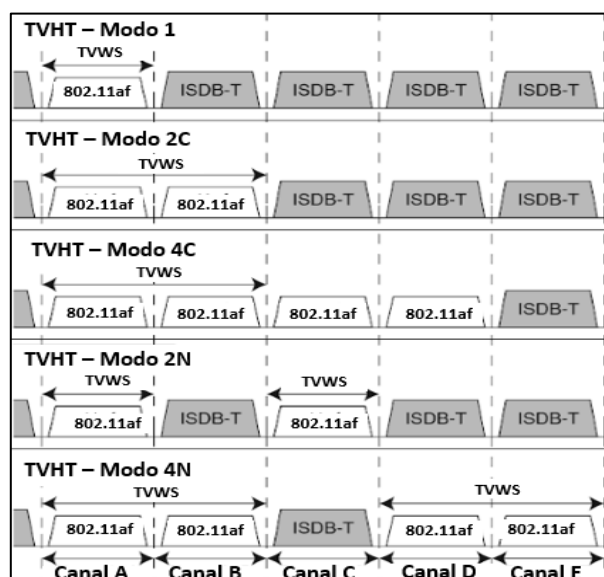


Figura 23. Modos de canalización del estándar 802.11af. [17]

En 802.11af un dispositivo de alto rendimiento TVHT en una red debe ser capaz de operar en cualquiera de los modos ilustrados en la figura 23, pero al momento de transmitir una trama debe hacerlo con el formato que especifica el protocolo PPDU en base al ancho del canal, cambiando la nomenclatura y estableciéndola como se especifica a continuación:

- **TVHT_mode_1:** en el tipo PPDU es TVHT_W.

- **TVHT_mode_2C:** en el tipo PPDU es TVHT_2W.
- **TVHT_mode_2N:** en el tipo PPDU es TVHT_W+W.
- **TVHT_mode_4C:** en el tipo PPDU es TVHT_4W.
- **TVHT_mode_4N:** en el tipo PPDU es TVHT_2W+2W.

5.2.2.7 Evaluación del canal libre (CCA-Clear Channel Assessment)

Mediante a operación de detección de canal libre los estándares de la familia 802.11 pueden detectar el estado actual del medio inalámbrico que se va a utilizar, este proceso es parte de la capa física, pero otorga información a la capa MAC acerca del estado del canal que va a utilizar si está libre u ocupado. En 802.11af la evaluación de un canal se realiza mediante la detección de energía basándose en parámetros establecidos por la GDB de acuerdo a los dominios reguladores. En un receptor basado en este estándar, y en cualquiera de modos de canalización descritos anteriormente será de -88dBm, con una probabilidad mayor al 90% y en un tiempo menor a los 15µseg [17].

El receptor también está en la capacidad de emitir una señal que indique si el canal se encuentra ocupado, esto sucederá cuando detecta un umbral de potencia de 20 dBm sobre el valor indicado antes, es decir $-88\text{dBm} + 20\text{ dBm} = -68\text{dBm}$, en el tiempo anterior (menor 15µseg) luego de que la señal llegue al receptor [17].

Si se tiene una señal que no ocupa el canal primario, se debe tomar en cuenta el tipo de señal utilizado y el modo de canalización ocupado, para esto se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Para una señal cualquiera que se encuentre ocupando un canal secundario, el valor de energía será de -68 dBm y el tiempo de espera será menor a 15µseg.
- Para una señal TVHT_W NON_HT, el umbral de energía estará por encima de -81dBm con un tiempo de espera menor a los 94µseg, con una probabilidad del 90% [17].

Como se indicó en la figura 23, existen 5 modos de canalización y tomando en cuenta que los canales primarios no se encuentran ocupados se emitirá una señal CCA ocupada para los siguientes casos:

- Para una señal que se encuentra en un canal secundario TVHT_2C (12MHz) con energía por encima de los -65 dBm y un tiempo menor a los 15µseg.

- Para una señal TVHT_W duplicado detectado en un canal secundario TVHT_2W con un umbral de -81dBm, un periodo menor a 94 μ seg y una probabilidad mayor al 90%.
- Para una señal TVHT_2W duplicado detectado en un canal secundario TVHT_2W con un umbral de -78dBm, un periodo menor a 94 μ seg y una probabilidad mayor al 90% [17].

5.2.2.8 Sensibilidad Mínima del Receptor

En IEEE 802.11af el número de paquetes errados (PER) debe ser menor al 10% para una longitud de 4096 octetos. Los niveles de sensibilidad dependen de la tasa de código aplicada a cada una de las modulaciones y los diferentes modos de canalización. [39]

Tabla 4. Niveles de sensibilidad mínimos para Recepción. [39]

Modulación	Rate (R)	Sensibilidad mínima (dBm)		
		6 MHz		
		TVHT_MODE_1	TVHT_MODE_2C	TVHT_MODE_4C
BPSK	1/2	-88	-85	-82
QPSK	1/2	-85	-82	-9
	3/4	-83	-80	-77
16-QAM	1/2	-80	-77	-74
	3/4	-76	-73	-70
64-QAM	2/3	-72	-69	-66
	3/4	-71	-68	-65
	5/6	-70	-67	-64
256-QAM	3/4	-65	-62	-59
	5/6	-63	-60	-57

5.2.2.9 Análisis de aplicación de IEEE 802.11af White-fi en IoT.

El análisis del estándar IEEE 802.11af realizado nos permite conocer más a detalle sus características funcionales y técnicas, con esta información buscaremos encontrar si existe algún vínculo que determine si esta tecnología puede servir como soporte para Internet de las cosas, el cual abarca diversos servicios.

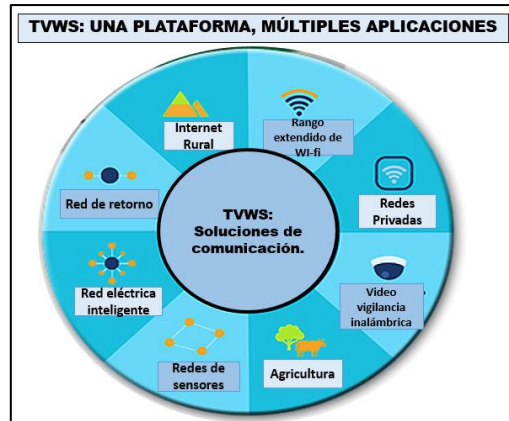


Figura 24. Aplicaciones para el uso de TVWS. [40]

White-fi hace uso de los espacios en blanco del espectro denominados TVWS los cuales presentan ventajas significativas como: mayor penetración de la señal en obstáculos, mayor rango de cobertura, transmisiones sin línea de vista; estas variantes permiten tener idea más clara de los beneficios que traería consigo el uso de White-fi frente a una red tradicional WLAN que opera en la banda de los GHz. En la figura 24, se observa algunas aplicaciones que ven como una tecnología alentadora el uso de TVWS.

En la actualidad diversos mercados de telecomunicaciones IoT y M2M, solicitan redes inalámbricas que operen en bandas de frecuencias bajas presentando características destacables como operación a baja potencia y larga distancia de cobertura. [41] Sin embargo, existen diversos factores que se deben considerar en IoT, estos se detallan en la figura 25.

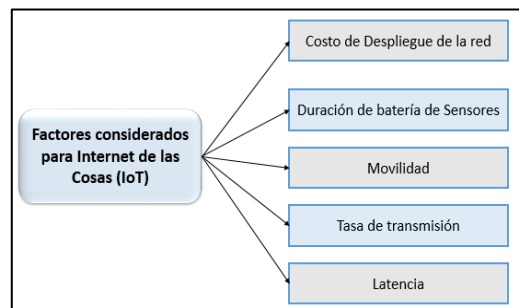


Figura 25. Factores considerados para IoT.

Fuente: [Autor]

En un caso ideal un solo estándar sería capaz de dar cumplimiento globalmente a todos estos factores, sin embargo, dentro de la familia 802.11 existen diversos estándares que han sido seleccionados para hacer frente al despliegue de redes IoT como se indica en la figura 26, donde cada uno de estos presentan diferentes características técnicas y comerciales.

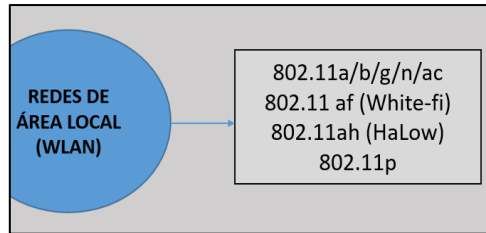


Figura 26. Estándares de redes WLAN para IoT.

Fuente: [Autor]

En este grupo encontramos al estándar 802.11af como posible solución tecnológica que puede cumplir con parte de los requisitos mencionados y ser utilizado para diferentes aplicaciones; por ejemplo, redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés), monitoreo de energía para instalaciones compartidas (ejemplo: luces en un pasillo, ascensores.), lecturas de datos de medidores inteligentes, ambientales, sistemas de ubicación, donde los diferentes sensores o dispositivos podrían comunicarse de manera menos costosa.

- **Comparación del estándar 802.11af frente a otras tecnologías desarrolladas para IoT**

A continuación, se muestra un cuadro comparativo en cuanto a parámetros de las diversas tecnologías tomadas en cuenta para el despliegue de redes IoT.

Tabla 5. Comparación de diversas soluciones tecnológicas para IoT. [40]

PARÁMETROS	TECNOLOGÍAS			
	TVWS	Celular	Wi-fi	ZigBee
Costo	Bajo	Recurrente	Bajo	Bajo
Cobertura	Amplia	Amplia	Pequeña	Pequeña
Latencia	Baja	Mayor	Baja	Media
Consumo de energía	Medio	Mayor	Mayor	Baja

Internet de las cosas puede beneficiarse al usar las tecnologías emergentes que permitan un uso más eficiente del espectro radioeléctrico. Con el desarrollo de diferentes aplicaciones para IoT, las demandas de recursos espectrales serán cada vez mayores lo que resultan en hacinamiento en las bandas ISM, mientras que las mediciones de utilización del espectro a lo largo de los años han indicado muchas bandas con licencia no utilizadas o subutilizadas en diferentes espacios y tiempos, por ejemplo, bandas de espectro para la transmisión de TV consideradas por el estándar 802.11af lo que resulta en desperdicio de espectro considerable. [22]

5.2.2.10 Dispositivos basados en el estándar IEEE 802.11af

Un aspecto importante en la adopción de cualquier tecnología es el desarrollo de equipos acordes a los requerimientos de esta, capaces de satisfacer sus características y las de nuevas aplicaciones en el mercado. La aplicación de mayor interés para trabajar dentro de TVWS es brindar servicio de banda ancha rural a zonas alejadas; esta razón a llevado a los desarrolladores de tecnología TVWS a prestar más interés en dispositivos que puedan contribuir con este servicio. Las compañías más interesadas con esto son: Aviacomm, Adaptrum, Carlson Wireless Technologies, Alphabet, Key Bridge LLC, KTS Wireless, Microsoft Corp., MELD Technology, Metric Systems Corp., Shared Spectrum, Telcordia Technologies, ATDI S.A; de origen estadounidense y francés respectivamente. Por otro lado, existen otras compañías de origen asiático que han interesado en desarrollar tecnología de TVWS enfocándose en tres segmentos: Smart Rural, Ciudades inteligentes (Smart Cities) e Industria 4.0. Las aplicaciones que buscan habilitar con su tecnología son: Internet remota, agricultura inteligente, video vigilancia, gestión de instalaciones, energía inteligente, construcción inteligente, red de respaldo, fábricas conectadas, entre otras. De estas compañías que ha tomado 2 como referencia, las cuales puntualmente desarrollan tecnología para trabajar sobre los TVWS, estas son: Whizpace con sede en Singapur y INNONET con sede en Seúl.

- **WhizNano Node**

Diseñado para aplicaciones de bajo costo, baja velocidad de datos, factor de forma pequeño y bajo consumo de energía para Internet de las cosas (IoT) e intranet de las cosas (IoE). Las aplicaciones potenciales incluyen medición inteligente, iluminación inteligente de calles, sensores ambientales, atención médica, y otras redes de sensores inalámbricos, etc.

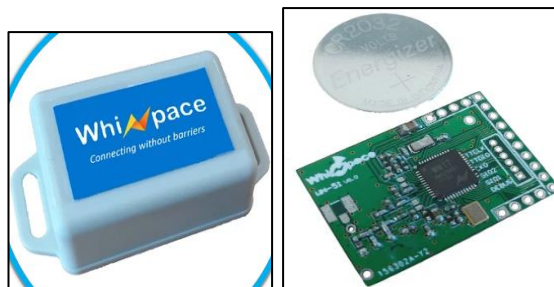


Figura 27. WhizNano Node. [42] [43]

Tabla 6. Características técnicas de WhizNano Node. [42] [43]

WhizNano Node	
Frecuencia de trabajo	300 MHz – 1GHz
Cobertura	2 km, sin línea de vista
Tasas de datos	250 kbps o 65 Mbps
Modulación	FSK (Modulación por Desplazamiento de Frecuencia), GFSK (Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana), DSSS (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa)
Potencia de transmisión	280mW (24.5 dBm)
Potencia en modo de reposo	6.6μW.
Interfaces de comunicación	UART (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal), SERIAL, ADPC (Convertidor analógico a digital), PWM (Modulación por Ancho de Pulsos)

▪ **WhizNano Gateway**

Es la primera puerta de enlace IoT del mundo en bandas ISM y TVWS por debajo de GHz. WhizNano Gateway ofrece un rendimiento sin igual en la adquisición de datos en tiempo real.

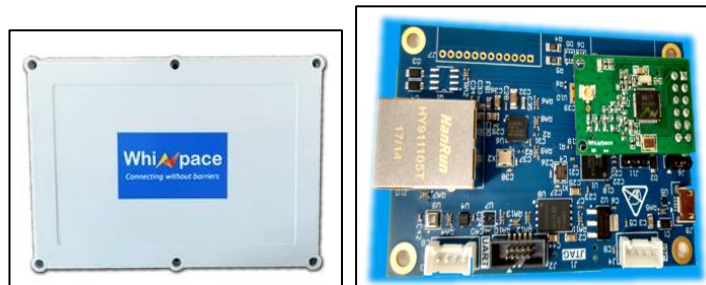


Figura 28. WhizNano Gateway. [42] [43]

Tabla 7. Características técnicas de WhizNano Gateway. [42] [43]

WhizNano Gateway	
Cobertura	500 m (antena pequeña) a 2km (dependiendo de la ganancia de la antena)
Tasas de datos	10 kbps o 250kbps con modulación FSK y GFSK 2 a 30 kbps con modulación DSSS
Potencia de transmisión	600mW (27.9 dBm)
Potencia en modo de reposo	6.6μW.
Interfaces de comunicación	Ethernet, USB 2.0, I2C, UART, RS232 dual.
Modos de encriptación	AES, 3DES, SHA
Microcontrolador	ARM de 32 bits, núcleo 120 MHz
Numero de nodos	8,000 nodos WhizNano simultáneamente
Respuestas en tiempo real	Si
Protocolos soportados	MQTT, TCP / IP, DHCP, y HTTPS.

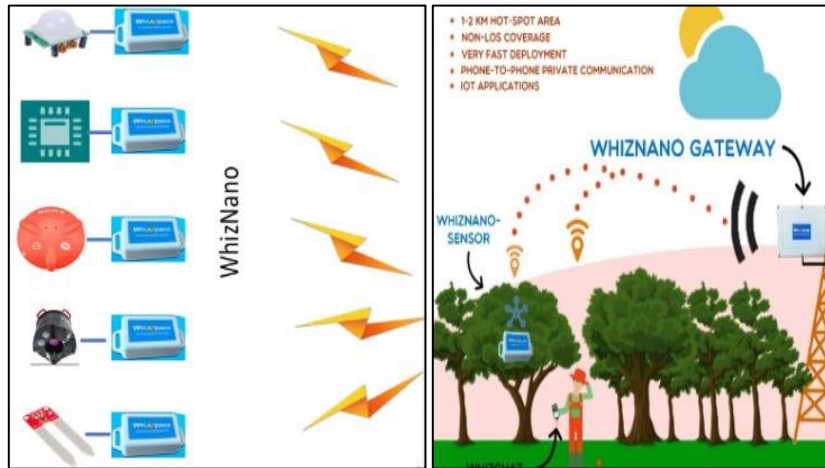


Figura 29. Esquema de conexión de los dispositivos WhizNano Node y WhizNano Gateway. [44] [45]

A continuación, detallaremos 2 dispositivos TVWS desarrollados por la empresa INNONET.

- **TVWS Gateway**

TVWS Gateway es una puerta de enlace desarrollada para aplicaciones de Internet de las cosas.



Figura 30. TVWS Gateway. [46]

Tabla 8. Características Técnicas de TVWS Gateway. [46]

TVWS Gateway	
Estándar TVWS	IEEE 802.11af
Frecuencia de trabajo	174-216 MHz y 470-698 MHz
Potencia de Transmisión	27 dBm ± 2dB
Sensibilidad RX	Especificaciones de IEEE 802.11af
Ancho de banda RF	6 y 8 MHz
Conector para Antena TVWS	Tipo-N
Cobertura	Depende de la ganancia de la antena
Modulación/Demodulación	QPSK, xQAM
Interfaz de servicio	Wi-fi, LAN, RS-85, BLE.
Alimentación	PoE o DC
Montaje	Montaje en pared o poste

- **Puerta de enlace portable TVWS**

TVWS Gateway es una puerta de enlace desarrollada para aplicaciones de Internet de las cosas.



Figura 31. TVWS Gateway Portable. [46]

Tabla 9. Características Técnicas de TVWS Gateway. [46]

TVWS Gateway	
Estándar TVWS	IEEE 802.11af
Frecuencia de trabajo	174-216 MHz y 470-698 MHz
Potencia de Transmisión	18 dBm \pm 2dB
Sensibilidad RX	Especificaciones de IEEE 802.11af
Ancho de banda RF	6 y 8 MHz
Conector para Antena TVWS	Tipo-N
Cobertura	Depende de la ganancia de la antena
Modulación/Demodulación	QPSK, xQAM.
Interfaz de servicio	Wi-fi, LAN, RS-485, BLE.
Alimentación	PoE o DC
Montaje	Montaje en pared o poste

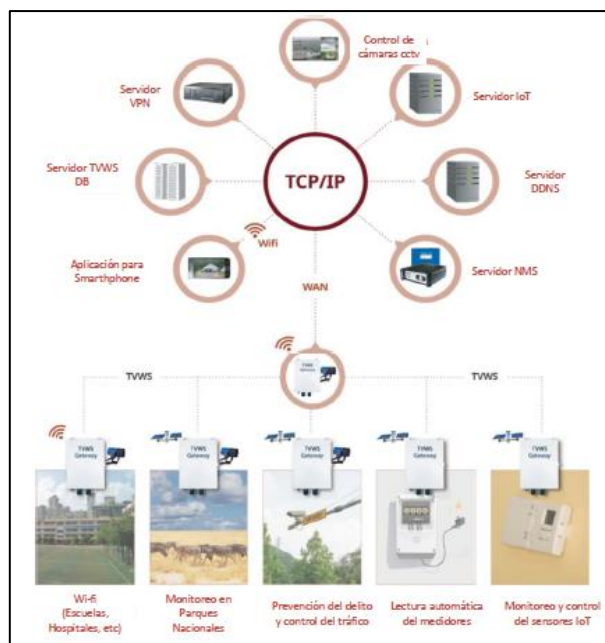


Figura 32. Esquema de conexión y aplicaciones de los dispositivos TVWS Gateway. [46]

- **Comparación de los dispositivos WhizNano Gateway y TVWS Gateway frente al estándar IEEE 802.11af**

Tabla 10. Comparación de los dispositivos TVWS para IoT frente al estándar 802.11af.

Fuente: [Autor]

Parámetros	IEEE 802.11af	WhizNano	TVWS Gateway
Frecuencia (MHz)	174-216; 470 -698	300 – 1000	174 - 216; 470 – 698
Cobertura	>1km	Hasta 2 km	>2km
Modulación	BPSK, QPSK, xQAM	FSK, GFSK, DSSS	QPSK, 16-QAM, 64QAM, 256-QAM.
Tasa de datos	12 a 26.7 Mbps	250 kbps o 65Mbps	Velocidad fijada en el estándar 802.11af
Potencia	100mW (20 dBm)	280 mW (24.5 dBm)	500 mW (27 dBm)
Comunicación:			
Punto a multipunto	Si	Si	Si
Sin línea de vista	Si	Si	Si

En la comparación realizada con los dispositivos TWS para IoT frente al estándar IEEE 802.11af constatamos que ambos presentan similitudes técnicas relacionadas directamente con en el estándar 802.11af; sin embargo, los dispositivos WhizNano trabajan utilizando una modulación diferente a la especificada en el estándar 802.11af.

6. RESULTADOS

Investigadas las especificaciones técnicas y funcionales de 802.11af y habiendo constatado o evidenciado la posibilidad de integración con los sistemas o tecnologías IoT (Internet de las cosas); para desarrollar este apartado se ira considerando características necesarias dentro de White-fi, para posteriormente presentar una propuesta de diseño referido en el entorno de la facultad de la FEIRNNR y lograr establecer la factibilidad económica de una red basada en esta tecnología.

6.1 Espectro

El entorno a analizar para conocer la disponibilidad de espectro e identificar los TVWS corresponde al campus universitario denominado Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables (FEIRNNR).

6.1.2 Evaluación Espectral: entorno de la FEIRNNR

Con el fin de conocer el estado actual del uso del espectro radioeléctrico en el entorno de la FEIRNNR, se ha recopilado la información necesaria de [47], donde se ha realizado mediciones a las frecuencias comprendidas en el rango de 54 – 960 MHz en diferentes intervalos de tiempo con 1500 muestras. Para el análisis de cada sub-banda la métrica utilizada es el método de detección de energía, el cual permite descubrir la emisión de señales radioeléctricas correspondientes a usuarios primarios y lograr determinar los espacios en blanco. Para este tema se tomó datos correspondientes a las bandas de frecuencia asignadas para el servicio de radiodifusión de televisión abierta aprobadas por el Plan Nacional de Frecuencias; en la tabla 11 se detallan estos intervalos.

Tabla 11. Bandas de frecuencias asignadas para el servicio de radiodifusión de televisión abierta. [48]

VHF	
Banda I	De 54 – 72 MHz y de 76 – 88 MHz
Banda III	174 – 216 MHz
UHF	
Banda IV	470 – 482 MHz, 512 – 608 MHz y 614 – 644 MHz
Banda V	644 – 698 MHz

6.1.2.1 Ocupación del Espectro Radioeléctrico en el entorno de la FEIRNNR

El análisis de cada sub-banda permitió determinar la ocupación espectral, conocer el estado actual en las bandas de interés con la finalidad de identificar los TVWS disponibles y las

bandas más apropiadas para una posible implementación de redes con tecnología de radio cognitiva. Esta información se detalla a continuación en las siguientes tablas.

Tabla 12. Resultados de ocupación espectral sub-bandas destinadas al servicio de Televisión.

Fuente: [Autor]

Análisis de Sub-bandas para el servicio de Televisión				
Sub-bandas	Nro. Canales		Ancho de Banda (MHz) Aproximado	
	Concesionados	Ocupados	Utilizado aprox.	Disponible aprox.
Banda I (AB= 30 MHz)	3	2	12	18
Banda III (AB= 42 MHz)	4	4	24	18
Banda IV y V (AB= 192 MHz)	10	10	60	132
TOTAL			96	168

Tabla 13. Valores porcentuales de ancho de banda ocupado y disponible en cada sub-banda.

Fuente: [Autor]

Disponibilidad Total de ancho de banda		
Sub-bandas (MHz)	Ancho de Banda (MHz)	
	Ocupado aprox.	Disponible aprox.
Banda I	60%	40%
Banda III	57.14%	42.86%
Banda IV Banda V	31.25%	68.75%

En la tabla 13 se indica un resumen general del ancho de banda utilizado y disponible en cada sub-banda. La mayor parte de ancho de banda disponible se centra en UHF con un total de 132 MHz correspondiente al 68.75% de disponibilidad del espectro, entonces se puede decir esta banda sería la más favorable para hacer uso de tecnologías de radio cognitiva.

El porcentaje de espectro disponible en cada sub-banda se aprecia a detalle en la figura 33.

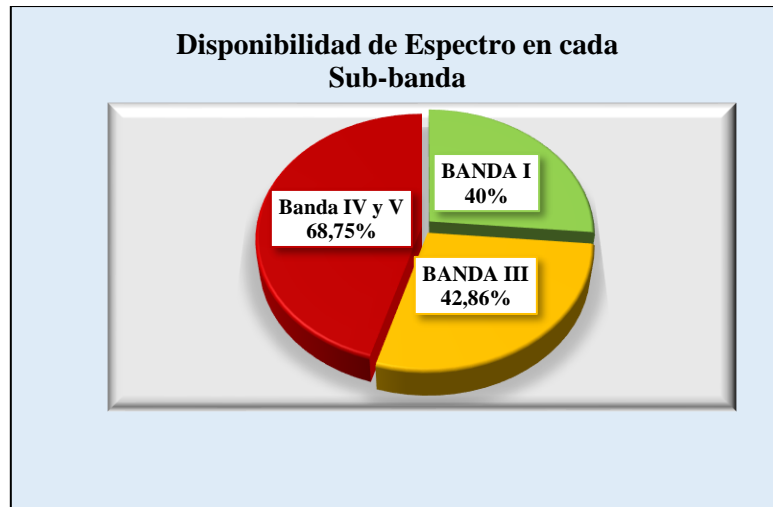


Figura 33. Porcentaje de espectro disponible en cada banda analizada en el entorno de la FEIRNNR.

Fuente: [Autor]

Pese a que en el Ecuador no existe una reforma a la normativa del Plan Nacional de Frecuencias donde se administre o gestione el uso de los TVWS; un dato importante tomado de la Agencia Nacional del Espectro (ANE-Colombia) permite ayudar a determinar una sub-banda de interés como posible candidata para implementar redes con tecnología de radio cognitiva en la que se indica: *los dispositivos de espacios en blanco sólo podrán hacer uso de los segmentos de la banda 470 MHz a 698 MHz que se encuentren disponibles.* [49]

6.2 Cobertura en transmisión

El alcance ideal de una red White-fi presenta variaciones en torno al ambiente donde se la desplegué, para uso en interiores será de hasta los 100m y en ambientes exteriores el área de cobertura es más favorable alcanzando una distancia mayor a 1 km, recalcando que estos valores son ideales en el caso teórico.

En el documento [15] elaborado por Flores, Guerra y Knightly se presentan resultados de los cálculos realizados considerando la propagación de la señal en el espacio libre permitiendo establecer una comparación entre la capacidad (Mb/s) versus distancia realizando una comparación entre WLAN tradicional que opera en las frecuencias de 2.4 y 5 GHz y Súper Wi-fi 802.11af. Los parámetros tomados en cuenta son los siguientes: para dispositivos TWVS fijos se toma una frecuencia de 192 MHz, ancho de banda de 5.33 MHz y potencia de 4000mW (36 dBm); para dispositivos TVWS móviles se ha considerado la frecuencia de 518 MHz, conservando el mismo ancho de canal, pero variando la potencia a 40 mW (16

dBm), para las frecuencias de 2.4 y 5 GHz el ancho de canal considerado es de 20 y 80 MHz respectivamente y la potencia es de 40 mW. El resultado de esta comparación favorece a la tecnología 802.11af la cual presenta una mejor propagación de la señal ya sea utilizando dispositivos TVWS fijos o móviles, sin embargo, en cuanto a capacidad 802.11 WLAN tradicional presentará características más deseables rezagando en este aspecto a Súper Wi-fi.

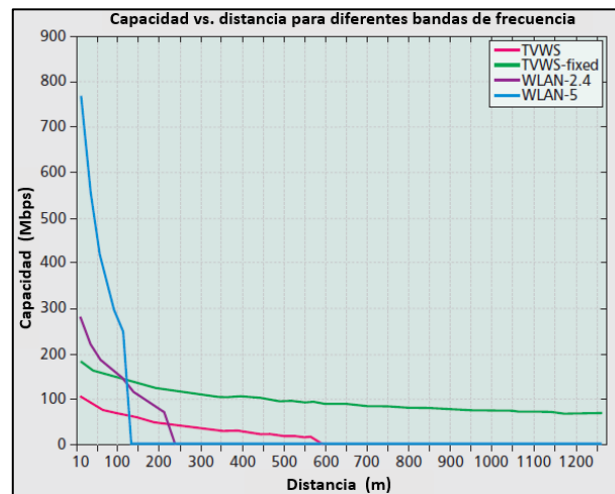


Figura 34. Comparación del alcance (metros) entre 802.11af (TVWS) e IEEE 802.11 tradicional (2.4 y 5GHz). [15]

Trabajar a bajas frecuencias permite cubrir un rango de cobertura amplio, como se evidencia en la figura 34, usando TVWS se puede llegar a cubrir varios kilómetros esta particular característica puede ser aprovechada para desplegar redes que deben cubrir grandes distancias y manejar bajos flujos de datos.

Los límites de alcance de una red también van a depender de parámetros como: máxima potencia de transmisión (PIRE), pérdidas en propagación, sensibilidad en recepción, trayectorias múltiples de transmisión, superficies terrestres irregulares, condiciones meteorológicas, etc.

6.3 Latencia

En una implementación de redes de sensores a gran escala existirán múltiples saltos que se pueden evitar en una estructura de un solo salto. El salto único a su vez da como resultado una latencia de comunicación de extremo a extremo más corta al evitar el enrutamiento de múltiples saltos [50]. Al utilizar White-fi, se trabaja con frecuencias que tienen alcances mayores, de esta forma se puede evitar múltiples rutas de comunicación para llegar a un nodo destino.

6.4 Penetración de obstáculos

Operar en TVWS presentan una ventaja que al trabajar en frecuencias ISM que utilizan bandas en el orden de los GHz, debido a que al propagarse la señal se enfrentará a la absorción de algunos obstáculos los cuales representan un problema al trabajar a altas frecuencias. En la tabla 14 recopilada del documento [15] se detalla la atenuación de la señal en diferentes rangos de frecuencia frente a diversos materiales.

Tabla 14. Atenuación (dB) de la señal frente a diversos materiales. [15]

Materiales	Frecuencia		
	570 MHz	2 GHz	5.7 GHz
	Pérdidas en dB		
Ladrillo 10 cm	-1.5	-5.4	-15
Ladrillo 28 cm	-4.8	-10.5	-38
Ladrillo compuesto de 9 cm/ Muro de hormigón 10.2 cm	-12	-18	-42
Ladrillo compuesto de 9 cm/ Muro de hormigón 20.3 cm	-21.5	-33	-71.5
Vidrio 0.6cm	-0.4	-14	-1.1
Vidrio 0.9 cm	-2.5	-3.9	-0.4
Hormigón armado 20.3 cm / 1% acero	-23.5	-31	-56.6
Hormigón armado 20.3 cm / 2% de acero	-27.5	-36.5	-60

6.5 Propuesta para la implementación de una Red con tecnología IEEE 802.11af White-fi

6.5.1 Descripción de la zona de estudio

El entorno de interés para el diseño de la red inalámbrica con tecnología IEEE 802.11af White-fi, corresponde a la Universidad Nacional de Loja ubicada al sur de la ciudad exactamente en el sector denominado la Argelia, el campus universitario está conformado por diversas facultades asociadas en espacios y bloques diferentes, separados por espacios verdes, caminos, parqueaderos, etc. Dentro del campus universitario el lugar de interés es la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables (FEIRNNR), integrada por cinco carreras universitarias con infraestructura y mobiliario adecuado a cada una de ellas. Este entorno se indica en la figura 35.



Figura 35. Vista aérea FEIRNNR.
Fuente: [Autor]

6.5.2 Consideraciones Generales

La tecnología de radio cognitiva IEEE 802.11af busca un mejor uso y aprovechamiento del espectro especialmente en las bandas de VHF y UHF asignadas para el servicio de radiodifusión de televisión, de esta manera se pretende complementar a las tecnologías ya existentes ampliando el rango de cobertura y logrando cubrir extensas áreas que poseen diferentes condiciones geográficas. Un escenario en el que se desea implementar tecnología TVWS deberá adaptarse a las necesidades que presenta este nuevo tipo de red.

6.5.3 Propuesta Técnica IoT utilizando IEEE 802.11af White-fi en la FEIRNNR

Los espacios en blanco de televisión TVWS particularmente se han visto como la oportunidad para brindar servicios de banda ancha rural pero el uso de los mismo puede ir más allá de este servicio, como servir de soporte para aplicaciones de IoT o M2M. Una aplicación IoT como Smart metering o medidores inteligentes es un ejemplo de cómo los TVWS se pueden utilizar de manera eficiente.

Los medidores inteligentes envían ráfagas de información cortas; paquetes de información bastante pequeños y pueden ser susceptible a retrasos, es decir la información enviada no va a requerir que se entregue a una hora o minuto exacto. Esta característica se adapta a la disponibilidad del espectro debido de que unas veces estará disponible y otras no ya sea porque el canal vuelve a ser utilizado por el usuario primario.

Para integrar White-fi e IoT la aplicación de interés es eficiencia energética para abarcar este tema se ha considerado que actualmente una de las alternativas que permite mejorar la eficiencia en el uso de la energía es la medición inteligente de energía eléctrica. El desarrollo

de sistemas energéticos inteligentes permite desarrollar e implementar nuevas estrategias de ahorro y eficiencia energética permitiendo tener un mayor control sobre el consumo energético mediante la monitorización de variables eléctricas que aporten a un control adecuado del consumo. Lo antes mencionado corresponde a un sistema AMI (Infraestructura de Medición Avanzada), que permite recopilar los datos de los medidores y dirigirlos hacia un centro de gestión; además permite desplegar nuevas aplicaciones como detección de fallas, conexión y desconexión del sistema, y administración de energía. Recordando que un sistema AMI consta de 3 niveles: un centro de gestión de la información (nivel 1), red de comunicaciones (nivel 2) y medidores inteligentes (nivel 3). [51]

La propuesta de eficiencia energética consiste en monitorear el consumo energético (Kw/h) por medio de los medidores de energía inteligentes que posean módulos de comunicación RF y enviar esta información a una estación central (servidor de datos) utilizando como medio de comunicación la tecnología inalámbrica de espacios en blanco TVWS existentes, entonces dentro del nivel 2 de la infraestructura AMI se centra el aporte con el estándar de estudio 802.11af.

- **Medidor inteligente**

Smart meter o medidor inteligente es un elemento principal dentro de la arquitectura de medición inteligente; se encargan de medir variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia activa y reactiva, factor de potencia, entre otras. Calculando así el consumo de energía de una forma más detallada que los medidores tradicionales, se caracterizan porque permiten transmitir información a través de la red hasta otros medidores o centros de control para su almacenamiento y gestión. [33] [52] [51]

La FEIRNNR cuenta con tres medidores de energía eléctrica, a continuación, se detalla la ubicación de los mismos.

Tabla 15. Ubicación y tipo de medidores existentes.

Fuente: [Autor]

N. medidor	Tipo de medidor	Ubicación
1	Trifásico	Detrás del edificio de Laboratorios FEIRNNR
2	Bifásico	Casa Autosustentable
3	Polifásico	Administración de la FEIRNNR

Los smart meters deben estar equipados con módulos que soporten comunicación RF y características técnicas que se acoplen a cada instalación eléctrica además deberán cumplir con la reglamentación que rige en cada país y cumplir con las características necesarias dependiendo del tipo de conexión. Para la recolección de datos de cada medidor se utilizará el módulo de comunicación inalámbrica basado en el estándar 802.11af el cual a modo de diseño se ubicará en cada medidor y en centro de recolección de datos.

En la figura 36, se tiene una vista aérea el campus universitario; señalando en rojo la ubicación de cada uno de los medidores y la ubicación de la base de datos (Centro de gestión) se marca de color verde. La ubicación de la base de datos se debe a que en el edificio de laboratorios de la FEIRNNR se encuentra el laboratorio de telecomunicaciones, además se enmarcaría como un punto central que permite una comunicación con los puntos de medida.



Figura 36. Ubicación de los medidores y la estación Base en la F.E.I.R.N.N.R.

Fuente: [Autor]

La tabla 16 nos muestra las distancias de la estación base hacia cada medidor de energía.

Tabla 16. Distancias desde la estación base hacia los diferentes medidores.

Fuente: [Autor]

	Distancia (m)
BS – Medidor 1	34.47
BS – Medidor 2	203
BS – Medidor 3	241.42

- **Sistemas Radiantes**

Las antenas se encargan de la transmitir o recibir de ondas de radiofrecuencia, para el presente tema de estudio se ha tomado en cuenta antenas que permita operar en los TVWS y sean compatibles con el dispositivo TVWS Gateway. La antena elegida para los nodos corresponde a MARS ANTENNAS el modelo es MA-WA580-DP8 es una antena direccional de doble polarización y doble inclinación que cubre 470-698 MHz y proporciona un rendimiento de ganancia estable y eficiente; adecuada para el rango de 600 MHz, así como para aplicaciones de TV White Space (TVWS). Su instalación es sencilla la convierte en una solución logística discreta y altamente recomendada para instalaciones al aire libre, así como para instalaciones en edificios



Figura 37. Antena Directiva MA-WA580-DP8. [53]

Tabla 17. Especificaciones técnicas de la Antena Directiva MA-WA580-DP8. [53]

Parámetro	Valor	Unidades
Categoría de antena	Antena de TVWS	
Tipo de antena	Directiva	
Rango de frecuencia	470-698	MHz
VSWR, máximo	<2.0:1	Proporción
Polarización	Vertical / Horizontal	
Ganancia	7.5 ± 0.5	dBi
Potencia de entrada	20	W
Impedancia	50	Ohmios
Tipo de conector RF	N hembra	
Color	Blanco	
Montaje	Pared, MNT-22.	
Peso del producto	1.3	Kg
Altura del producto	12.20" /310	pulgadas/mm
Diámetro del producto	12.20" /310	pulgadas/mm
Ancho del producto	4.84" /123	pulgadas/mm

La antena de estación base corresponde a MARS ANTENNAS el modelo es MA-WO-UMB es una antena direccional OMNI que cubre bandas desde 138 MHz hasta

6 GHz. Proporciona una correspondencia perfecta en todas las bandas con un plano de tierra pequeño y una excelente cobertura direccional OMNI. Soporta aplicaciones: TV White-Space, LoRa, LTE, GSM, WiFi, WLAN, entre otras más. [54]

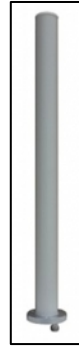


Figura 38. Antena MA-WO-UMB. [54]

Tabla 18. Especificaciones técnicas de la Antena de la Antena MA-WO-UMB. [54]

Parámetro	Valor	Unidades
Categoría de antena	Antena de TVWS	
Rango de frecuencia	470-698	MHz
VSWR, máximo	3:5:1	Proporción
Polarización	Lineal, Vertical	
Ganancia	5	dBi
Potencia de entrada Máxima	50	W
Impedancia	50	Ohmios
Ancho de haz horizontal (AZ)	360	Grados
Modelo	Omni direccional	
Tipo de conector RF	N hembra	
Color	Blanco	
Montaje	Montaje en poste	
Peso	350	Gramos
Altura del producto	21/ 540	pulgadas/mm
Diámetro del producto	2.83/72	Pulgadas/mm

6.5.3.1 Esquema de diseño de la red basado en IEEE 802.11af

En la figura 39, se muestra un bosquejo del sistema de comunicaciones indicando los lugares de la ubicación de los sistemas radiantes.

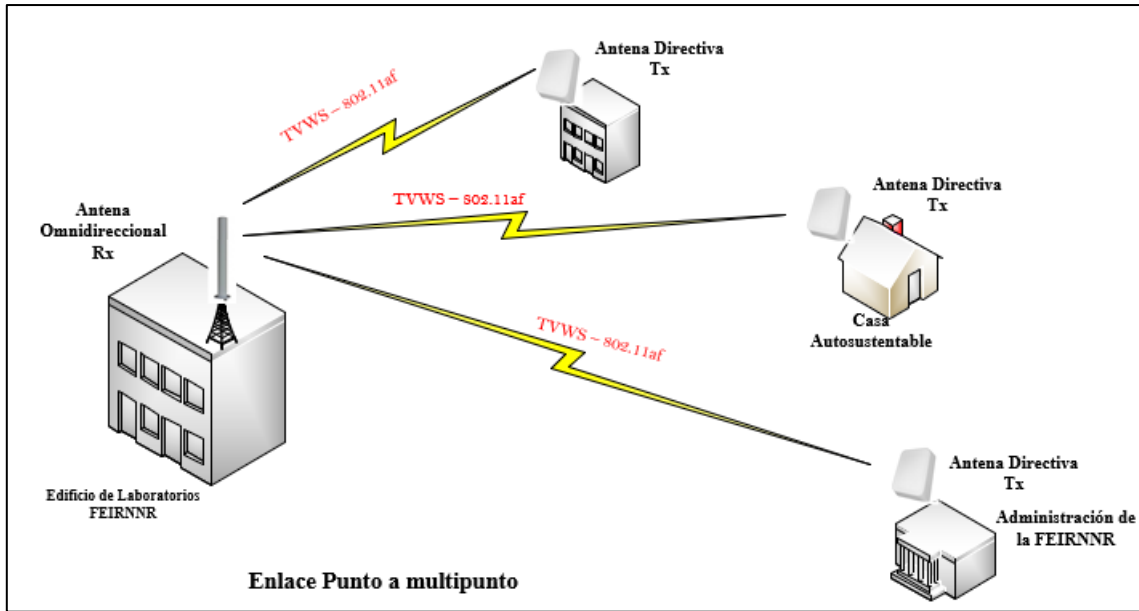


Figura 39. Red de comunicaciones topología en estrella.

Fuente: [Autor]

Tomando en cuenta la ubicación de los medidores la topología elegida es estrella, en la que los puntos de medida se conectarán directamente a un punto central dentro de su área de cobertura. Esta topología es elegida por características como: facilidad de implementación, escalabilidad de la red, mayor velocidad de comunicación de los nodos con la estación base. En este caso el nodo central se ubica en el edificio de laboratorios de la FEIRNNR y los nodos finales se ubican en cada medidor de energía.

EL sistema IEEE 802.11af utiliza Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), enviando un conjunto de ondas subportadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información la cual es modulada en PSK o QAM. Las técnicas de modulación empleada van desde QPSK para puntos distantes a la estación base con una eficiencia espectral de 0.3bits/s/ Hz o 256 QAM para los más cercanos, con una eficiencia espectral de hasta 4.5bits/s /Hz, lo que resulta en un rendimiento máximo de 26.7 Mbps sobre un canal de 6 MHz.

Los requisitos clave de comunicación para una red de distribución de bajo voltaje son: buena cobertura geográfica, una tasa de datos adecuada y un retraso ilimitado. Estos requerimientos se presentan a continuación. [34]

Tabla 19. Requerimiento para una red Smart Grid. [34]

Requerimientos	Rango
Ancho de banda	10-100 kbps /nodo
Latencia	2-15 seg
Confiabilidad	99% - 99.99%

En el documento realizado por Huamiao Hu, Dritan Kaleshi, y otros [34], mencionan: para aplicaciones AMI la latencia de la medición en tiempo real debería ser de unos 12-20 ms y la información típica de la lectura del medidor (mejor esfuerzo) que se transmite de manera periódica posee un tamaño de 125 bytes. [34]

Como se ha mencionado el medio de comunicación entre los medidores y la estación base es la tecnología inalámbrica, en este caso se hará uso de los TVWS disponibles en la facultad, para esto se ha seleccionado el canal libre en la banda de frecuencia UHF correspondiente a la sub-banda V.

Tabla 20. Características de un canal de 6 MHz.

Fuente: [Autor]

Frecuencia	644-650 MHz
Ancho de Banda	5.33 MHz
Velocidad	
BPSK	2 Mbps
QPSK	4 Mbps
16 QAM	8 Mbps
64 QAM	16 Mbps

Como se observa en la tabla 20, se puede dejar en constancia que el estándar 802.11af cumple con el requisito de velocidad requerido para transmitir la información de cada medidor inteligente.

En la figura 40, se muestra un diagrama completo de la red de Smart metering ubicados los módulos de comunicación TVWS, los sistemas radiantes en cada medidor para el envío de datos; indicando de forma similar la ubicación de la estación base.

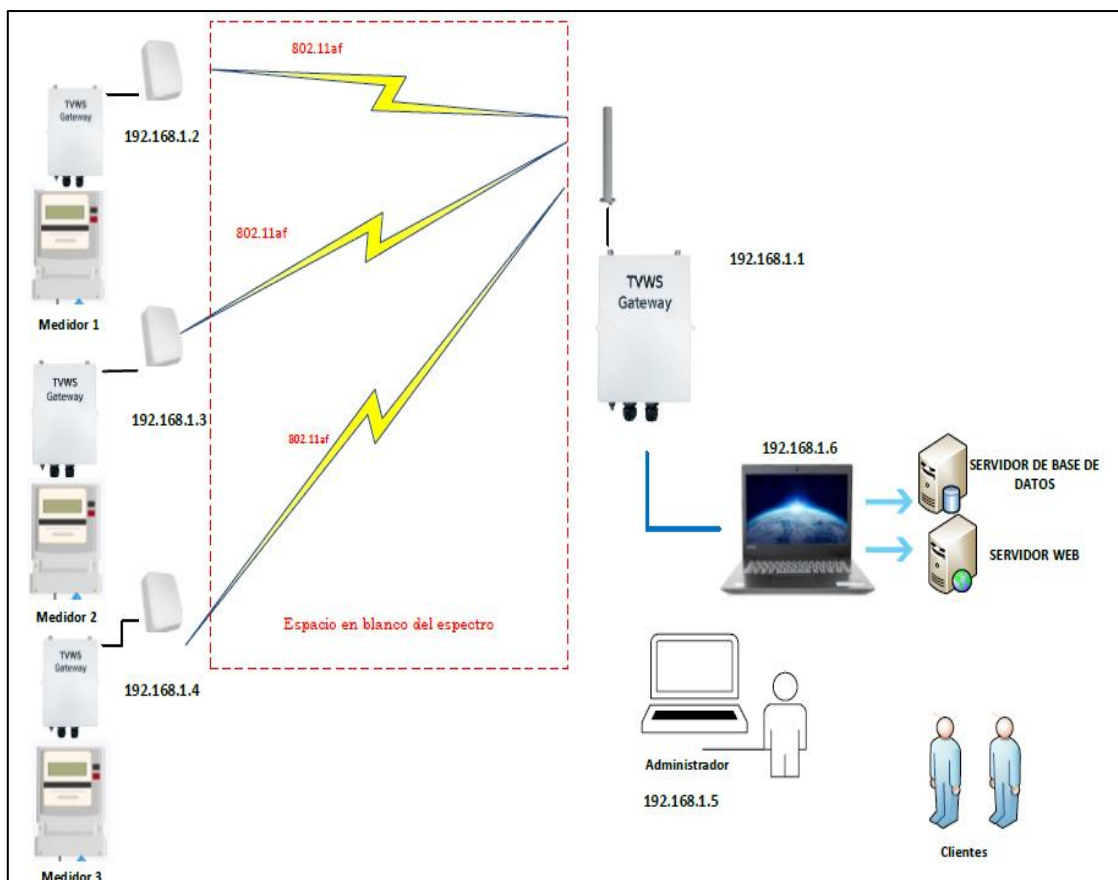


Figura 40. Diagrama de distribución de los dispositivos TVWS.

Fuente: [Autor]

En el esquema de diseño de la red hace uso del módulo de comunicación TVWS Gateway en transmisión como en recepción de datos, sobrevalorando el diseño de la red y dejando de aprovechar todas las características del equipo; el cual ha sido diseñado para trabajar en aplicaciones que requieran grandes distancias de cobertura a nivel de kilómetros. Sin embargo, se justifica el uso del mismo en el presente diseño debido a la falta de dispositivos que trabajen en los TVWS y estén disponibles en el mercado para trabajar bajo el estándar IEEE 802.11af. La forma de operación TVWS Gateway será en la jerarquía maestro-esclavo, en la cual los dispositivos ubicados en cada medidor serán esclavos, encargados de enviar información de cada medidor y el equipo ubicado en la estación base será el maestro, el cual solo recogerá la información enviada de los diferentes esclavos; posteriormente esta información recolectada se almacena en un servidor de datos.

A modo de ejemplo en cuanto al direccionamiento de la red se realizó lo siguiente: se tomó una dirección de red de clase C (192.168.1.0), la cual se la segmentó para aprovechar de

mejor manera el direccionamiento IPv4, distribuida solamente para los hosts necesarios en este diseño dando como resultado una red con un rango desde 192.168.1.1 a 192.168.1.14 con máscara de subred 255.255.255.240/28. El dispositivo TVWS Gateway central actuará como router siendo el encargado de dar las direcciones IP a los equipos que conforman la LAN. Los equipos a excepción de los clientes tienen direccionamiento estático.

6.5.4 Factibilidad económica para la implementación de Smart Metering con tecnología TVWS

Para determinar la factibilidad económica de una posible implementación de un esquema de red IoT (Smart metering) bajo la tecnología de radio cognitiva 802.11af en la Facultad de la energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, se realizó el análisis de precios unitarios de los rubros que se ven involucrados en la misma. En la tabla 21 se presenta el costo unitario final de cada rubro el cual corresponde al resultado del análisis de precios unitarios (Anexo 1) en los que se incluye: mano de obra, materiales y recursos necesarios. En lo que se refiere a mano de obra se recogió información referente a los salarios sectoriales que rigen actualmente en el Ecuador.

La instalación de Antena Directiva TVWS modelo MA-WA580-DP8, considera el precio de instalación desde la colocación de la antena en un montaje en pared hasta la conexión con el terminal que corresponde al dispositivo TVWS Gateway. El segundo rubro corresponde a la Instalación de la Antena Directiva TVWS modelo MA-WO-UMB, donde de forma similar considera su instalación en un mástil para antena de 6m hasta la conexión con el terminal TVWS Gateway. Los precios de los dispositivos TVWS Gateway, patch cord de cable UTP cat.6 y computador con monitor teclado, mouse, CPU, consideran la instalación en los puntos determinados que se presentaron en la figura 36.

La tabla 21, detalla los precios de cada uno de los rubros, dando como resultado un total de \$ 3744.77 como presupuesto referencial.

Tabla 21. Costos referenciales de equipos para implementación de una red TVWS.

Fuente: [Autor]

PRESUPUESTO REFERENCIAL				
PROYECTO: ANÁLISIS TÉCNICO DEL ESTANDAR 802.11af COMO TECNOLOGIA PARA APLICACIONES IoT Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONOMICA DENTRO DE LA FACULTAD DE LA ENERGIA LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES				
N°	RUBRO	PRECIO TOTAL DEL RUBRO		
		Material (\$)	Mano de obra (\$)	Precio total del rubro (\$)
R_01	Instalación de Antena Directiva TVWS modelo MA-WA580-DP8	940,61	18,81	959,42
R_02	Instalación de Antena Directiva TVWS modelo MA-WO-UMB	1301,3	26,65	1327,95
R_03	Instalación de patch Cord 4m cable UTP cat.6	11	0,84	11,84
R_04	Instalación de Dispositivo IoT TVWS GATEWAY	616	12,94	628,94
R_05	Colocación e instalación de computador con monitor teclado, mouse, CPU para almacenamiento de información.	800	16,62	816,62
PRESUPUESTO REFERENCIAL TOTAL EN DOLARES (\$)		3668,91	75,86	3744,77

7. DISCUSIÓN

El presente proyecto tuvo como propósito realizar un análisis técnico del estándar 802.11af White-fi o Super Wi-fi como tecnología para aplicaciones de Internet de las cosas, así como estudiar la factibilidad técnica y económica del uso de esta tecnología en el entorno de la facultad de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables.

Para dar cumplimiento a este proyecto se efectuaron los objetivos planteado

OBJETIVO 1: Investigar la funcionalidad del estándar 802.11x en sus versiones anteriores.

Para desarrollar este objetivo se recopiló información de varias fuentes bibliográficas. Para construir este apartado se procedió a realizar un análisis comparativo donde se considera las principales características de cada uno de los estándares más sobresalientes anteriores a IEEE 802.11af correspondiente a la versión de estudio. En la tabla 22 se detalla las características de cada estándar de manera individual.

Tabla 22. Características técnicas de los estándares principales anteriores a la versión 802.11af.

Fuente [Autor]

Estándares	Frecuencia de trabajo	Ancho de Banda	Tasa de Transferencia	Configuración de antenas	Acceso al Medio	Cobertura
802.11	2.4 GHz	20 MHz	1,2 Mbps	1x1 SISO	DSSS, FHSS	20-100m
802.11a	2.4 GHz	20 MHz	6,9,12,18,24,36,48,54 Mbps	1x1 SISO	OFDM	35-120m
802.11b	5 GHz	20 MHz	1,2,5.5,11 Mbps	1x1 SISO	DSSS	35-140m
802.11g	2.4 GHz	20 MHz	6,9,12,18,24,36,48,54 Mbps	1x1 SISO	DSSS/OFDM	38-140m
802.11n	2.4 y 5 GHz	20, 40 MHz	65 - 600 Mbps	4x4 MIMO	OFDM	70-250m
802.11ac	5 GHz	20,40,80 160 MHz	78 Mbps - 3.2Gbps	4x4 MIMO	OFDM	35m-100m
802.11ad	60 GHz	2.16GHz	1 - 6.7Gbps	8x8- MU- MIMO	OFDM	1 – 30m
802.11af	54 – 790 MHz	6,7 y 8 MHz	12 - 26.7 Mbps (dependiendo del canal)	4x4 MIMO	OFDM	100m a 1km

Para evaluar cada estándar se utiliza la escala de Likert que corresponde a un tipo de escala de medición utilizada principalmente en investigación, es de nivel ordinal y realiza una estimación numérica en el rango de 1 – 5. Dentro de este rango se ira estableciendo una ponderación que permita medir el nivel de eficiencia de cada estándar en base a las características de cada tecnología de comunicación. La escala de valoración se indica en la tabla 23.

Tabla 23. Escala de valoración de Likert. [55]

Valoración	1	2	3	4	5
Resultado	Ineficiente	Nada eficiente	Poco eficiente	Eficiente	Muy eficiente
Porcentaje	0%	1 – 25%	26 – 60%	51 – 75%	76 – 100%

Para conocer la eficiencia final de cada estándar se calcula la ponderación de cada tecnología inalámbrica evaluada; para conocer la eficiencia final de cada una se utiliza la siguiente formula:

$$P = \frac{\sum Ni}{Ti} * 100\%$$

Donde:

P = ponderación de cada tecnología.

Ni = Nivel de incidencia de las características evaluadas.

Ti = Total de las incidencias de la tecnología al 100% de eficiencia.

En la tabla 24 se indica la valoración de cada estándar en base a las características que presentan las tecnologías evaluadas.

Tabla 24. Valoración del nivel de incidencia de cada uno de los estándares 802.11.

Fuente: [Autor]

Est.	Frecuencia de trabajo	Ancho de Banda	Tasa de Transferencia	Configuración de antenas	Acceso al Medio	Cobertura
802.11	3	3	1	1	3	2
802.11a	3	3	2	1	5	2
802.11b	4	3	1	1	3	3
802.11g	3	3	4	1	5	3
802.11n	4	5	5	4	5	4
802.11ac	5	5	5	4	5	4
802.11ad	5	5	5	5	5	3
802.11af	5	4	3	4	5	5

La tabla 25 nos indica la eficiencia resultante de cada estándar.

Tabla 25. Ponderación de la eficiencia de cada estándar 802.11.

Fuente: [Autor]

Estándares	Total, de incidencias	Porcentaje de eficiencia
802.11	13	43.33%
802.11a	16	53.33%
802.11b	15	50%
802.11g	20	66.67%
802.11n	27	90%
802.11ac	28	93.33%
802.11ad	28	93.33%
802.11af	26	86.67%

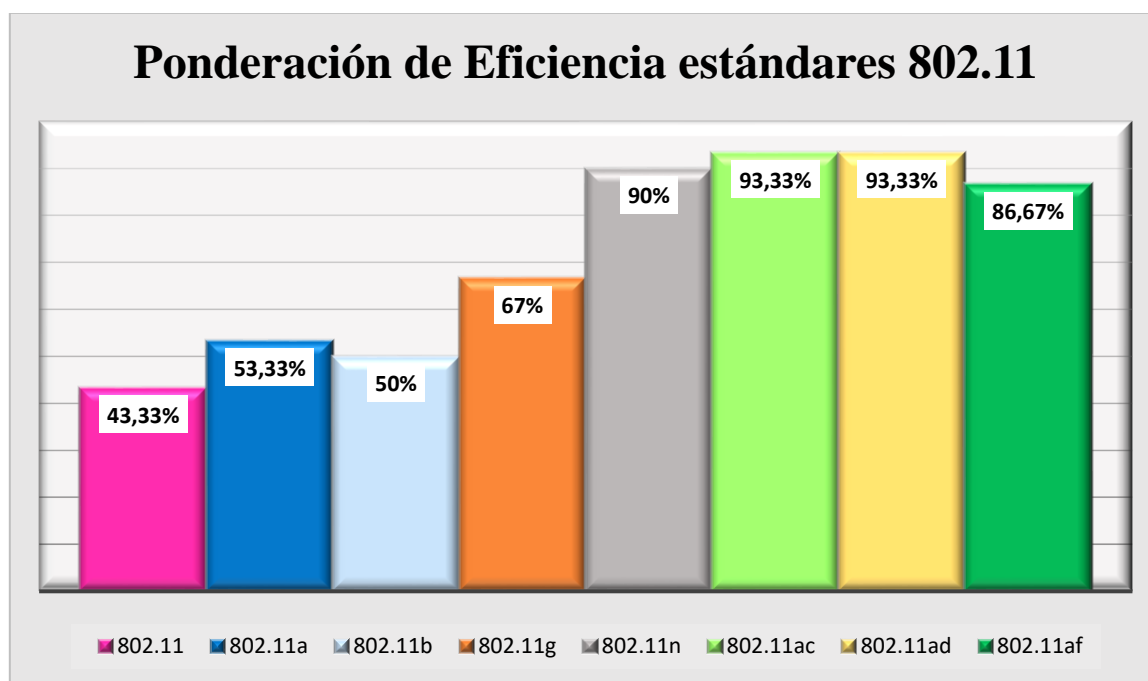


Figura 41. Porcentaje de eficiencia de los diferentes estándares IEEE 802.11.

Fuente: [Autor]

De acuerdo con las características de cada uno de los estándares presentados en la tabla 22 y en base a la ponderación de eficiencia mostrada en la tabla 25, se puede decir que a medida que se han ido desarrollando nuevos estándares cada versión ha ido quedando rezagada, evidenciando que los estándares de mayor incidencia son desde la versión 802.11n en adelante. Sin embargo, nuestro tema de estudio se limita solo hasta el análisis de IEEE

802.11af, del cual se puede evidenciar una excelente funcionalidad en torno a la familia 802.11.

OBJETIVO 2: Estudiar los aspectos técnicos y funcionales del estándar IEEE 802.11af y además evaluar técnicamente su posible aplicación en sistemas y servicios de IoT.

Para dar cumplimiento a este objetivo se inició por recopilar información técnica del estándar IEEE 802.11af, que nos permita resaltar la información de sus características funcionales y técnicas.

El estándar 802.11af opera haciendo uso de los espacios en blanco del espectro designado para emitir las señales de TV, para la detección de estos espacios puede hacer uso de técnicas que permitan identificar los TVWS; los métodos de detección del espectro utilizados por 802.11af pueden ser mediante el uso de una base de datos de geolocalización o bien utilizando técnicas de detección de energía que permitan censar el espectro. La base de datos de geolocalización permite entregar información de una localización geográfica a la estación base, mediante este procedimiento se entregará una base de datos que contiene un listado de canales disponibles dentro de la localidad determinada esta información se procesa y se determina el canal apropiado donde puedan operar los dispositivos de espacios en blanco (WSD) evitando así interferencias perjudiciales, tanto las estaciones base como los WSD deben confirmar su ubicación cada 60 segundos.

El método de detección de energía consiste en censar el espectro en una ubicación determinada, logrando detectar la potencia de las señales que se emiten en un determinado intervalo de frecuencias logrando así identificar los TVWS; una ventaja del detector de energía es que es independiente del sistema de radio a detectar, adaptándose de esta forma a cualquier sistema.

Cualquiera de estos métodos es válido para lograr identificar los TVWS porque la forma de determinar los recursos de espectro disponible queda fuera del alcance de 802.11af.

Las capas de interés de la familia 802.11 se centran específicamente en las 2 capas inferiores del modelo OSI: la capa física y la capa de control de acceso al medio.

En la capa de control de acceso al medio (MAC) 802.11af utiliza el protocolo de acceso múltiple con escucha de portadora y detección de colisiones (CSMA/CA), esto implica que 802.11af necesita escuchar el medio antes de realizar una transmisión. Adicionalmente

White-fi proporciona un rango de cobertura mayor que sus versiones anteriores lo que lo hace ideal para aplicaciones en zonas alejadas.

A nivel de la capa física hace uso de la técnica de transmisión OFDM junto con la modulación adaptativa que puede ser QPSK o QAM. La cobertura de 802.11af a nivel teórico en interiores es de 100m y en exteriores hasta 1 km con un retardo en propagación de 1 a 10 μ seg y una tasa de transferencia de datos que va desde los 12 a los 26.7 Mbps, dependiendo de la técnica de modulación utilizada, ancho del canal y técnicas MIMO utilizadas.

La aplicación de IEEE 802.11af White-fi en sistemas y servicios de IoT pretende brindar mejoras significativas al usarse como tecnología de comunicación inalámbrica. Recalcando que internet de las Cosas requiere una conectividad altamente escalable, confiable y disponible para conectar un sinnúmero de dispositivos a internet.

Las aplicaciones de IoT se ubican en categorías que son: información, análisis, automatización y control; estas categorías engloban diferentes aplicaciones destinadas a brindar diversos servicios que van desde solucionar necesidades específicas de los usuarios hasta cubrir entornos determinados; IoT automatiza operaciones mediante la conexión de redes de objetos físicos los cuales recopilarán información y la utilizarán para supervisar estados, controlar y optimizar procesos; logrando mejorar el uso de recursos y la toma de decisiones.

OBJETIVO 3: Analizar la factibilidad económica del estándar IEEE 802.11af para una aplicación IoT (eficiencia energética) usando como referencia el entorno de infraestructura de la Facultad de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables.

Para cumplir este objetivo primero se indagó acerca de la existencia de equipos disponibles en el mercado que se han desarrollado bajo el estándar IEEE 802.11af, tomando en cuenta lo mencionado se investigó acerca de dispositivos desarrollados para operar en los espacios en blanco en las frecuencias de interés que van desde 470 a 698 MHz, algunos de estos no trabajan únicamente en el rango de las frecuencias antes mencionadas sino que se han desarrollado para poder lograr operar en las bandas libres de ISM, por tal razón no se los tomó en cuenta para adherirlos al presente documento porque lo que se pretende es conocer acerca del desarrollo de tecnología sujeta directamente al estándar de estudio; para lograr comparar equipos desarrollados que operen en los TVWS se eligió dos dispositivos, los primeros se indican en las figuras 27 y 28 los que corresponden a tecnología desarrollada por

la empresa Whizspace los cuales presentan características fiables, abarcan una frecuencia de trabajo que va desde los 300 MHz hasta 1 GHz y se han presentado como una opción tecnológica para trabajar en diversas aplicaciones de IoT, sin embargo se los descartó debido a que la modulación empleada discrepa con especificada en 802.11af. Por otro lado, el equipo desarrollado por la empresa INNONET denominado TVWS Gateway presentado en la figura 31, basa su funcionamiento en el estándar 802.11af y está diseñado para cumplir con varias aplicaciones de internet de las cosas como monitoreo en parques de áreas amplias, monitoreo y control de sensores IoT, lectura automática de medidores inteligentes, entre otras; presentándolo de esta manera como una opción viable para ser elegida.

La aplicación catalogada de interés en este objetivo es eficiencia energética dentro de este campo se ha seleccionado Smart metering o lectura inteligente de medidores en este caso de energía eléctrica, como se observó en la figura 32 el dispositivo TVWS Gateway puede complementarse con esta aplicación específica. Determinado el equipo que trabaja con la tecnología 802.11af se procede a realizar un listado de los elementos necesarios para desplegar una red TVWS como se indicó en la tabla 21, el resultado nos da un valor económico de \$ 3744.77 dólares, el cual se presenta como un valor viable para el despliegue de una pequeña red en un escenario sencillo asegurando de esta manera que es factible económicamente desplegar una red bajo el estándar 802.11af. Es importante recalcar que a nivel nacional no se han desarrollado ni desplegado sistemas basados en esta tecnología convirtiéndose la presente investigación en un elemento que brinda información técnica y económica en una primera revisión; por lo tanto la adquisición de esta tecnología a nivel nacional aun es irrisoria y por otro lado únicamente se puede hablar de adquisición de tecnología a nivel internacional para ser más exactos en países asiáticos se desarrolla tecnología White-fi en bandas blancas y por tanto la demanda de este tipo de tecnologías es creciente.

Para afianzar más la factibilidad económica y lograr cumplir correctamente este objetivo se resalta que invertir en nuevas tecnologías que presenten características técnicas favorables, además de la optimización de recursos va a ser factible. El aprovechamiento de los TVWS promueve utilizar al máximo el espectro radioeléctrico mediante un uso dinámico del mismo buscando trabajar en frecuencias bajas de canales vacíos (VHF y UHF) a velocidades aceptables presentando así a White-fi como una tecnología innovadora que busca

descongestionar las frecuencias de uso libre actualmente subutilizadas aprovechando las frecuencias en desuso; esta tecnología puede operar en condiciones en las que no es posible trabajar a altas frecuencias o con redes cableadas, por ejemplo puede operar fácilmente a grandes distancias sin línea de vista, en ambientes con densa vegetación, o en terrenos irregulares, brindando un alto nivel de escalabilidad en las redes, añadiendo a esto el nivel de cobertura lo cual apoyaría al despliegue de redes inalámbricas de bajo costo.

Para concluir el análisis de este estándar se recalca que en base de la demanda que tiene una tecnología los fabricantes de dispositivos presentaran interés o no por desarrollar equipos que trabajen en base a esta, influyendo así en la factibilidad económica la cual va a radicar en lo accesible que sea adquirir un dispositivo, es decir que sea económico para que pueda ser utilizado como una solución tecnológica dentro de cualquier aplicación. Por otro lado, de una manera global se puede aseverar que la tecnología que consiga más interoperabilidad entre estándares va a presentar mayor demanda en la industria tecnológica, a modo de ejemplo podemos citar la tecnología 802.11 que opera en bandas ISM la cual a nivel de mercado tiene un crecimiento exponencial en el desarrollo de equipos.

8. CONCLUSIONES

- La descripción teórica de los estándares IEEE 802.11 más sobresalientes hasta la versión de estudio permitió establecer una comparación en base a sus características más destacadas donde se evidencia que el desarrollo de una nueva versión va rezagando a la anterior presentando diferencias notables, en cuanto tasas de transmisión, ancho de banda, técnicas de comunicación, de acceso al medio y cobertura; en nuestro caso se dejó en constancia que desde la versión IEEE 802.11n en adelante siguen vigentes y están en uso.
- La tecnología IEEE 802.11af abre la posibilidad de trabajar en bandas limpias del espectro como son VHF (Muy Alta Frecuencia) y UHF (Ultra Alta Frecuencia), buscando ocupar los espacios en blanco (TVWS) en estos rangos y optimizando el uso del espectro; las interferencias que se tendrá al trabajar a estas frecuencias será poca logrando tener una señal más limpia y cubriendo mayores distancias: en ambientes interiores distancias de 100 m y exteriores distancias mayores a un 1km rezagando en esta característica a la tecnología WLAN con la tecnología tradicional 802.11 en sus diferentes versiones.
- El estándar 802.11af trabaja en el espectro asignado para el servicio de radiodifusión de televisión ocupando solamente canales libres, los cuales en su defecto poseen un ancho de banda de 6 MHz brindando velocidades teóricas que van desde los 12 Mbps hasta los 26.7 Mbps, dependiendo esta velocidad directamente del tipo de modulación ocupada; si existe la disponibilidad de canales libres continuos aumentara el ancho de banda influyendo directamente en la velocidad (Mbps). Esta velocidad de transmisión ofertada por White-fi se vería rezagada frente al resto de estándares desde 802.11n en adelante, porque estos trabajan ocupando mayores anchos de bandas brindando así velocidades mayores que van desde el orden de los Mbps hasta los Gbps.
- El funcionamiento de IEEE 802.11af está ligado a la tecnología de radio cognitiva, para lograr determinar los espacios libres en las bandas de interés se utiliza técnicas como detección del espectro mediante el sensado del mismo o bien tomando información de bases de datos de geolocalización. En este tema se tomó datos de [47], donde se utilizó la primera técnica para analizar el entorno de la FEIRNNR dejando

como resultado una disponibilidad de 168 MHz en las frecuencias de VHF y UHF logrando evidenciar que existe una subutilización del espectro. La segunda técnica no fue tomada como una opción viable porque tanto a nivel local como nacional no se posee esta información por parte de ninguna entidad encargada de la gestión del espectro y de las telecomunicaciones.

- Trabajar en espacios en blanco del espectro como lo hace la tecnología 802.11af se presenta como un desafío notando una clara diferencia al trabajar en bandas ISM porque acceder al espectro representa variaciones en espacio y tiempo; al trabajar en largas distancias debemos estar seguros si la frecuencia utilizada en el nodo origen estará disponible en el nodo destino, por otro lado, un segmento del espectro puede estar disponible solamente por lapsos de tiempo variables y volver a ser utilizado por el usuario primario.
- El estándar IEEE 802.11af incluye modificaciones a nivel de la capa de control de acceso al medio (MAC) y capa física (PHY) para poder acceder y convivir dentro de las porciones de espectro designadas para el servicio de televisión. La capa PHY se hereda de sus antecesores 802.11n y 802.11ac denominándose para este estándar como TVHT PHY (Capa física de muy alto rendimiento PHY) la cual es capaz de trabajar en el ancho de banda asignado para un canal de 6MHz.
- Relacionar el extenso mundo de internet de las cosas con la tecnología de radio cognitiva a través del estándar IEEE 802.11af permite evidenciar que esta tecnología puede aportar en aplicaciones y servicios donde se requiere trabajar en entornos densos o cubrir grandes distancias porque al trabajar a bajas frecuencias la señal sufrirá menos interferencias siendo más resistente a obstáculos; al aumentar el rango de cobertura se logrará también reducir el número de nodos para cubrir una determinada área evitando así múltiples rutas de comunicación para llegar a un nodo destino.
- Explotar bandas libres y utilizarlas en aplicaciones IoT donde se requiera bajas tasas de transmisión, poco consumo de potencia puede abrir un horizonte para desplegar redes de sensores a grandes escalas, redes eléctricas inteligentes, brindar un rango extendido de Wi-fi para lograr brindar banda ancha rural, entre otras aplicaciones

logrando aportar directamente a áreas como la agricultura, la salud, la energía, transporte, etc.

- El desarrollo de tecnología para trabajar en aplicaciones IoT bajo el estándar IEEE 802.11af a nivel local y nacional es nulo; sin embargo, a nivel mundial se han venido desarrollando estudios y tecnología bajo este estándar dando luz alentadora al despliegue de redes de radio cognitiva para aplicaciones internet de las cosas.
- Países Asiáticos, de América del Norte, de Reino Unido han despertado interés por desarrollar tecnología para operar en bandas libres del espectro centrándose en brindar servicio de banda ancha rural a zonas alejadas. Sin embargo, en países asiáticos se viene desarrollando tecnología para ofrecer el servicio antes mencionado y para trabajar en nuevas aplicaciones reutilizando el espectro, como es el caso de la empresa coreana INNONET la cual se interesó en desarrollar un dispositivo IoT denominado TVWS Gateway diseñado específicamente para trabajar bajo las características de 802.11af ocupando las bandas de VHF y UHF.
- A nivel de América Latina el país que ha presentado mayor interés en la reutilización del espectro es Colombia, el cual ha incluido dentro de su normativa para la gestión del espectro que los dispositivos de espacio en blanco pueden trabajar solamente en los segmentos de espectro que se encuentren disponibles en las frecuencias de UHF; abriendo un canal de interés y discusión para que otros países puedan acoger dentro de su marco regulatorio este tipo de consideraciones.
- La aplicación IoT de interés en el tema desarrollado es eficiencia energética dentro de esta aplicación se seleccionó un tema correspondiente a la medición inteligente de energía eléctrica. Para esta aplicación se estableció un presupuesto referencial logrando determinar un análisis de precios unitarios, donde se incluye: equipos, mano de obra, materiales y recursos necesarios para la ejecución de la aplicación esto da como resultado un valor referencial aproximado de \$ 3744.77 dólares el cual se presenta como un valor viable para el despliegue de una pequeña red mencionado así que sería la factible económicamente la implementación de una red con tecnología White-fi.

- Para consolidar la factibilidad económica se resalta que invertir en nuevas tecnologías que hagan un uso más eficiente del espectro optimizando recursos y que logren disminuir el número de equipos para cubrir una determinada área de trabajo siempre va a ser factible económicamente porque se lograra desplegar redes inalámbricas de bajo costo y alto nivel de escalabilidad.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda revisar bibliografía detallada para tener conocimiento previo acerca de la tecnología de radio cognitiva que permita tener una idea precisa acerca de los escenarios en los que se puede desplegar y las bandas en las que se puede operar con esta tecnología.
- En la actualidad a nivel nacional los entes encargados del manejo y control de las telecomunicaciones no han prestado mayor interés en la regulación de bandas desocupadas denominadas espacios en blanco TVWS, por lo que no existen información acerca de bases de datos de geolocalización GDB que permitan identificar los TVWS de manera pública, rezagando así oportunidades de implementar nuevas tecnologías inalámbricas lo cual no contribuirá al interés de empresarios de telecomunicaciones y personas en general para trabajar con nuevas tecnologías; por esta razón se recomienda que los entes gubernamentales encargados de la regulación del espectro implementen una normativa para controlar el uso de los espacios en blanco, así mismo que se recopile información en una base de datos que sobre de los TVWS en las bandas de VHF y UHF la misma que este disponible para personas interesadas.
- Se recomienda tomar este documento como fuente de información para que en un trabajo futuro se puede realizar un análisis del desempeño del estándar 802.11af utilizando equipos y un software adecuado; esto con la finalidad evaluar el desempeño del estándar más allá de un nivel teórico que muestra un rendimiento óptimo al presentar valores ideales.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Salazar, «Redes Inalambricas,» 2016. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/100918>.
- [2] M. Dahiya, «Evolution of Wireless LAN in Wireless Networks,» International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE), vol. 9, nº 03, p. 5, 2017.
- [3] S. R. Vallabhaneni, Wiley CIAexcel Exam Review 2018; Part 3: Internal Audit Knowledge, New Jersey: John Wilet & Sons, Inc., 2018.
- [4] G. Barragan, «BANDAS ISM,» 29 Junio 2013. [En línea]. Available: <http://bandasism.blogspot.com/search?updated-min=2013-01-01T00:00:00-08:00&updated-max=2014-01-01T00:00:00-08:00&max-results=1>.
- [5] D. W. David Coleman, CWNA Certified Wireless Network Administrator Study Guide:, Canada.
- [6] M. F. B. León, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO DE RED WIRELESS MESH BASADA EN DE RED WIRELESS MESH BASADA EN 802.11 EN EL A.E.I.R.N.N.R. DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.,» 2018.
- [7] M. o. Education, School Wireless LAN Guidelines - Building and Maintaining a Wireless Network, New Zealand, 2015.
- [8] W. Stallings, Comunicaciones y Redes de Computadores, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN,, 2044.
- [9] S. P. Karina Narvaez, «Estudio de QoS basado en el estándar IEEE 802.11e y alternativas de seguridad para las redes locales inalámbricas aplicado en la WLAN de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi.,» Quito, 2015.
- [10] M. B. Akil, «Validación de modelos de propagación radio en interiores de vehiculos ferroviarios a 5GHz.».
- [11] C. Alcocer, «Ingenieria de las Telecomunicaciones,» Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://blog.telecom.pucp.edu.pe/index.php/2016/09/14/cual-es-la-diferencia-entre-los-estandares-ieee-802-11ah-y-802-11af/>.

- [12] W. MAGGI SILVA , «Análisis de factibilidad técnica en la implementación de una red WRAN (IEEE 802.22) en escuelas y colegios fiscales de sectores rurales y urbanos marginales de la Provincia del Guayas,» Guayaquil, 2014.
- [13] J. E. M. Q. Andrés Felipe Llangari Arizo, «ESTUDIO, PRUEBAS Y SIMULACION DEL ESTANDAR IEEE 802.11AC BASANDOSE EN MU-MIMO (MIMO MULTIUSER),» Quito, 2016.
- [14] M. C. Macit, «Performace of IEEE 802.11af systems under realistic channel conditions.,» Mayo 2016. [En línea]. Available: <http://academicrepository.khas.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12469/2295/0097633MustafaCanMacit.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [15] A. B. Flores, R. E. Guerra, E. W. Knightly, P. Ecclesine y S. Pandey., «IEEE 802.11af: a standard for TV white space spectrum sharing.,» IEEE Communications Magazine, vol. 51, pp. 92-100, 2013.
- [16] R. B. I. Cristian Gomez, «TV WHITE SPACES: MANAGING SPACES OR BETTER MANAGING INEFFICIENCIES?,» 2013.
- [17] J. V. J. Moposita, «Análisis y Evaluación del espectro radioelectrico en las bandas VHF y UHF mediante un algoritmo realizado en radio USRP para uso potencial del estandar 802.11af en la zona urbana del cantón Ambato.,» Octubre 2017. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/7406/1/20T00905.pdf>.
- [18] K. S. Nanavati, «CHANNEL BONDING/LOADING FOR TV WHITE SPACES IN IEEE,» 2012.
- [19] S. N. R. Divya Sara George, «IEEE Xplore Digital Lbrary,» 2017. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8524142>.
- [20] J. C. L. Gutiérrez, «Diseño e implementación de una metodología para representar White Spaces con una herramienta de planificación de radiofrecuencia.,» 2012.
- [21] L. L. Beltran, «Diseño, simulación y analisis de redes wifi que operan en los espacios en blanco de television utilizando radio cognitiva.,» 2016.
- [22] K. D. M. PriyankaRawat, «Cognitive radio for M2M and Internet of Things: A survey,» de Computer Communications, 2016, p. 29.

- [23] UIT-T, «Y.2060 : Overview of the Internet of things,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>.
- [24] K. L. Muñoz, «USO POTENCIAL DE LA BANDA DE UHF PARA INTERNET OF THINGS: ESPECTRO COMPARTIDO ENTRE SERVICIOS DE TDT E IOT,» Valencia, 2016.
- [25] A. A. Avila, «Estudio y análisis del Internet de las cosas en aplicaciones de redes de sensores inalámbricos sobre sistemas de infraestructura inteligente.,» 2018.
- [26] A. Everlet, «Introducción a Internet de las cosas,» [En línea]. Available: https://www.altairsmartworks.com/newFrontend/img-carriots/press_room/Construyendo_un_proyecto_de_IOT.pdf.
- [27] R. Estévez, «ECO Inteligencia,» XTRAD, Julio 2013. [En línea]. Available: <http://www.ecointeligencia.com/2013/07/que-servicios-ofrece-una-smart-city-a-sus-ciudadanos-1/>.
- [28] P. Cornieles, «Smart Cities: desafío urbano presente y futuro.,» 2018. [En línea]. Available: <https://ia-latam.com/2018/12/06/smart-cities-desafio-urbano-presente-y-futuro-en-latinoamerica/>.
- [29] M. A. O. A. Natali Paola Maza Figueroa, «Modelo de Gestión estratégica para el desarrollo de un campus inteligente basado en conceptos de Smart City en la Universidad de Cartagena - Campus Piedra de Bolívar.,» 2017.
- [30] «OLADE,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.olade.org/eficiencia-energetica/>.
- [31] N. Soliclima, «Día Mundial de la Eficiencia Energética: una prioridad y oportunidad de ahorro,» Soliclima, Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://news.soliclima.com/noticias/ahorro-energetico/dia-mundial-de-la-eficiencia-energetica-una-prioridad-y-oportunidad-de-ahorro>.
- [32] G. A. R. Álvaro José Cervelion, «Diseño y evaluación de desempeño de la infraestructura ami para la microrred de la Universidad de Nariño.,» Revista Ingeniería Solidaria, vol. 14, p. 16, 2018.
- [33] P. D. T. Iñiguez, «Diseño y construcción de una interfaz y plataforma de comunicación para monitoreo y control de un medidor Smart de energía eléctrica en la ciudad de

- Loja.,» 2019. [En línea]. Available: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22441/1/Toledo%20I%c3%bliguez%2c%20Pablo%20David..pdf>.
- [34] D. K. A. D. L. L. Huamiao Hu, «Performance Analysis of IEEE 802.11af Standard based Neighbourhood Area Network for Smart Grid Applications.».
- [35] E. V. R. Héctor Kaschel Cárcamo, «Desarrollo de protocolo de comunicaciones para redes HAN en SmartGrids.» 2017. [En línea]. Available: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052017000100015.
- [36] B. S. A. Bawazeer, WiFi-WhiteFi Handover: Signaling and Performance, JEDDAH, 2015.
- [37] L. G. J. H. Yuan Luo, «Standardization Efforts by IEEE,» de Economics of Database-Assisted Spectrum Sharing, Springer, 2016, p. 85.
- [38] H. Harada, «White Space Communication Systems: An Overview of regulation, Standardization and Trial.,» IEICE Transactions on Communications, Vols. %1 de %2E97-B, n° 2, 2014.
- [39] I.-S. Standards, «Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 5: Television White Spaces (TVWS) Operation.,» IEEE Computer Society, p. 198, 2013.
- [40] P. Sharma, «TV White Space: Trends and Opportunities for Smart City development,» [En línea]. Available: <http://sdf.hkeic.org.hk/en/enewsletters/keypoint/12/upload/files/1/file/57d920416845e.pdf>.
- [41] J. Alcocer, «Análisis de desempeño del estandar IEEE 802.11AF en TVWS mediante la implementacion en una plataforma de radio definida por software.,» Sangolqui, 2019.
- [42] N. S. P. PTE, «Wireless Communication,» [En línea]. Available: <https://www.osp.sg/tep/products?categoryId=2>.

- [43] Whizpace, «Connecting Without barriers.,» [En línea]. Available: <https://www.whizpace.com/>.
- [44] S/N, «Tutorial TVWS.,» [En línea]. Available: <http://www.3pl.id/tvws/>.
- [45] A. T. & W. P. LTD., «ConnecTechAsia 2019,» [En línea]. Available: <https://exhibitors.informamarkets-info.com/ConnecTechAsia2019/en-US/exhibitor/181943/ayecka-technologies---whizpace-pte--ltd->.
- [46] INNONET, «GLOBAL TVWS TECHNOLOGY,» [En línea]. Available: <http://innonet.net/en/>.
- [47] A. K. G. Morocho, «Implementación de un enlace de comunicaciones basado en principios de sistemas de radio cognitiva en la facultad de la energía, las industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja través de SDR.,» 2019.
- [48] ARCOTEL, «CUADRO NACIONAL DE ATRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DEL PNF,» [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/consulta-plan-nacional-de-frecuencias/>.
- [49] ANE, «Agencia Nacional del Espectro,» Abril 2019. [En línea]. Available: http://legal.legis.com.co/document/Index?obra=legcol&document=legcol_f2db4816f9df4c4ca049bb4bfac79744.
- [50] M. R. D. I. C. L. R. C. J. L. Abusayeed Saifullah, «SNOW: Sensor Network over White Spaces,» [En línea]. Available: <https://www.cs.virginia.edu/~bjc8c/class/cs6501-f17/saifullah16snow.pdf>.
- [51] G. A. R. Álvaro Cervelion, «Diseño y evaluación de desempeño de la infraestructura ami para la microrred de la Universidad de Nariño.,» Ingeniería Solidaria, vol. 14, n° 26, p. 16, 2018.
- [52] C. d. I. T. y. A. a. I. G. d. I. P. I. (CIGEPI), «Medición y Gestión inteligente de consumo eléctrico.,» 2016. [En línea]. Available: https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/pdf/medicion_energia.pdf.

- [53] M. A. & R. S. LTD., «MA-WA580-DP8,» [En línea]. Available: https://www.winncom.com/pdf/MARS_MA_WA580_DP8/MARS_MA-WA580-DP8.pdf.
- [54] M. A. y. R. S. LTD., «MA-WO-UWB,» [En línea]. Available: <https://mars-antennas.com/wp-content/uploads/2018/04/MA-WO-UWB-1.pdf>.
- [55] A. R. A. J. Gail M. Sullivan, «Análisis e interpretación de datos de escalas tipo Likert.,» 2013.
- [56] J. A. Gómez, Servicios en Red, 1ra ed., M. Sanchez, Ed., Editex, S.A.
- [57] F. A. Izaskun Pellejero, Fundamentos y aplicaciones de seguridad en redes WLAN, Barcelona: MARCOCOMBO, 2006.
- [58] J. L. Camargo Olivares, «Modelo de Cobertura para Redes Inalámbricas de Interiores».

11. ANEXOS

11.1 ANEXO 1: Análisis de precios unitarios para la aplicación IoT utilizando la tecnología de radio cognitiva.

RUBRO					
Instalación de Antena Directiva TVWS modelo MA-WA580-DP8				UNIDAD	u
DETALLE:					
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor (5% M.O)	1	1,40	1,40	0,06667	0,093
Seguridad Industrial (2% M.O)					0,010
				SUBTOTAL	0,104
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro electrónico especializado	1	4,05	4,05	0,06667	0,270
Ayudante electricista	1	3,58	3,58	0,06667	0,239
				SUBTOTAL	0,509
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Antena Directiva TVWS MA-WA580-DP8	u	3	262	786,00	
Cable coaxial Rg6 / 30m	m	30	0,30	9	
Conector tipo N-hembra para cable Rg6	u	2	0,50	1	
Montaje para Antena MNT-22 para pared	m	6	24,00	144	
				SUBTOTAL	940,00
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Estos precios no incluyen IVA					0
				SUBTOTAL	0
	TOTAL COSTO DIRECTO				940,61
	INDIRECTOS			22,00%	18,81
	UTILIDAD			0,00%	0
COSTO TOTAL DEL RUBRO				959,42	

RUBRO					
Instalación de Antena Directiva TVWS modelo MA-WO-UMB				UNIDAD	u
DETALLE:					
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor (5% M.O)	1	1,40	1,40	0,06667	0,093
Seguridad Industrial (2% M.O)					0,010
SUBTOTAL					0,104
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro electrónico especializado	1	4,05	4,05	0,06667	0,270
Ayudante electricista	1	3,58	3,58	0,06667	0,239
SUBTOTAL					0,509
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Antena Directiva TVWS modelo MA-WO-UMB	u	3	262	786,00	
Cable coaxial Rg6 / 10m	m	10	0,30	3	
Conector tipo N-hembra para cable Rg6	u	2	0,40	0,8	
Mástil para Antena 6m Ø 1 1/2" ac. galv.	m	6	24,00	144	
Bracket para sujecion de retenida del mástil 2"	u	2	33,50	67	
Base del mástil 1 1/2"	u	1	60,00	60	
Cable de acero galvanizado para vientos	m	50	1,30	65	
Kit de sujecion para Mastil	u	1	15,00	15	
Ancla "T" para Piso	u	3	53,5	160,5	
SUBTOTAL					1301,30
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Estos precios no incluyen IVA					0
	SUBTOTAL				0
	TOTAL COSTO DIRECTO				1301,912
	INDIRECTOS				22,00%
	UTILIDAD				0,00%
COSTO TOTAL DEL RUBRO				1327,95	


RUBRO					
Instalación de patch cord 4m cable UTP cat.6				UNIDAD	u
DETALLE:					
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor (5% M.O)	1	1,40	1,40	0,06667	0,093
Seguridad Industrial (2% M.O)					0,010
SUBTOTAL					0,104
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro electrónico especializado	1	4,05	4,05	0,06667	0,270
Ayudante electricista	1	3,58	3,58	0,06667	0,239
SUBTOTAL					0,509
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Cable de red UTP Cat. 6 /3m	u	1	11	11,00	
SUBTOTAL					11,00
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Estos precios no incluyen IVA					0
	SUBTOTAL				0
	TOTAL COSTO DIRECTO				11,612
	INDIRECTOS				0,232
	UTILIDAD				0
COSTO TOTAL DEL RUBRO				11,84	

RUBRO					
Instalación del dispositivo TVWS Gateway				UNIDAD	u
DETALLE:					
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor (5% M.O)	1	1,40	1,40	0,06667	0,093
Seguridad Industrial (2% M.O)					0,010
SUBTOTAL					0,104
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro electrónico especializado	1	4,05	4,05	0,06667	0,270
Ayudante electricista	1	3,58	3,58	0,06667	0,239
SUBTOTAL					0,509
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Instalación de Dispositivo TVWS Gateway	u	4	154	616,00	
SUBTOTAL					616,00
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Estos precios no incluyen IVA				0	
				SUBTOTAL	
				0	
				TOTAL COSTO DIRECTO	
				616,612	
			22,00%	INDIRECTOS	
				12,332	
			0,00%	UTILIDAD	
				0	
				COSTO TOTAL DEL RUBRO	
				628,94	


RUBRO					
Colocación e instalación de computador con monitor teclado, mouse, CPU para almacenamiento de información.				UNIDAD	u
DETALLE:					
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor (5% M.O)	1	1,40	1,40	0,06667	0,093
Seguridad Industrial (2% M.O)					0,010
				SUBTOTAL	0,104
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro electrónico especializado	1	4,05	4,05	0,06667	0,270
Ayudante electricista	1	3,58	3,58	0,06667	0,239
				SUBTOTAL	0,509
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Computador de escritorio + teclado + mouse y CPU con procesador i5, Memoria RAM 20 Gb, disco duro 1 Tb, Tarjeta Grafica de 4GB	u	1	800	800,00	
				SUBTOTAL	800,00
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Estos precios no incluyen IVA					0
	SUBTOTAL				0
	TOTAL COSTO DIRECTO				800,612
	INDIRECTOS			22,00%	16,012
	UTILIDAD			0,00%	0
COSTO TOTAL DEL RUBRO				816,62	




11.2 ANEXO 2: Especificaciones técnicas de equipos

11.2.1 Especificaciones técnicas Antena OMNI 0470WSS07-N

138-6000 MHz Ultra Wide Band OMNI Directional Antenna			
<p>MARS MA-WO-UMB is an Ultra Wide Band OMNI Directional Antenna covering continuously all the bands from 138 MHz up to 6 GHz in a single antenna radome.</p> <p>Perfect matching in all bands with small ground plane.</p> <p>Excellent OMNI Directional coverage.</p> <p>The antenna is PIM certified, thus making it suitable for all multi-carrier systems.</p>			
			
Specifications			
<i>Electrical</i>			
Frequency Range	Gain, typ.	Optimum Ground Plane Size	VSWR
138-174 MHz	3dBi	400x400 mm, 15.7"x15.7"	1.5:1 typ. (3:1 max)
380-450 MHz	4dBi	370x370 mm, 14.56"x14.56"	1.5:1 typ. (2.5:1 max)
406-512 MHz	5dBi	165x165 mm, 6.5"x6.5"	1.5:1 typ. (2.8:1 max)
698-746 MHz	6dBi	165x165 mm, 6.5"x6.5"	1.5:1 typ. (2.5:1 max)
746-806 MHz	7dBi	165x165 mm, 6.5"x6.5"	1.5:1 typ. (2.5:1 max)
806-960 MHz	7dBi	165x165 mm, 6.5"x6.5"	1.7:1 typ. (2.5:1 max)
1200-2700 MHz	8dBi	Not Required	1.3:1 typ. (2.0:1 max)
3300-3800 MHz	10dBi	Not Required	1.3:1 typ. (1.7:1 max)
4100-6000 MHz	11dBi	Not Required	1.5:1 typ. (2.0:1 max)
Polarization	Linear, Vertical		
Pattern	OMNI Directional		
PIM, 3rd order, 2X20W	<-155 dBc		
Input Power, max	50 Watts		
Input Impedance	50 Ohm		
<i>Mechanical</i>			
Dimensions (DxH)	40mm diameter (base diameter 72mm) x 540mm height 1.57" diameter (base diameter 2.8") x 21" height		
Weight	350 gr.		
Connector	N-Type, Female		
Mounting	2" Pole Mount		
Radom	UV Protected Plastic		
Ground Plane	See Ordering Options		
<i>Environmental</i>			
Operating Temp. Range	-40°C to +70°C		
Vibration	According to IEC 60721-3-4		
Wind Load	200 Km/h (Survival)		
Flammability	UL94		
Water Proofing	IP-65		
Humidity	ETS 300 019-1-4, EN 302 085 (Annex A.1.1)		
Salt Fog	According to IEC 68-2-11		

11.2.2 Especificaciones técnicas Antena MA-WA580-DP8




MA-WA580-DP8

470-698 MHz Dual-Pol/Dual-Slant Directional Antenna

MARS MA-WA580-DP8 is a Dual Polarization and Dual Slant Directional Antenna covering 470-698 MHz providing a stable and efficient gain performance.

The antenna is aesthetic small and has an unobtrusive profile that blends easily with any environment.

The antenna is easy-installed and is highly recommended as unobtrusive logistic solution for Outdoor installations as well as In-Building Installations.



Specifications

<i>Electrical</i>	
Frequency range	470-698 MHz
Gain, typ.	7.5 ± 0.5 dBi
VSWR, Max. Typ.	2.0 : 1 1.8 : 1
Polarization	Dual Pole Dual Slant (opt.)
	Linear, Vertical & Horizontal ±45° (diamond shape)
3 dB Beam-Width, E-Plane, typ.	70°
3 dB Beam-Width, H-Plane, typ.	78°
Cross Polarization, typ.	-30 dB
Port to Port Isolation, min.	-26 dB
Input power, max	20 Watt
Lightning Protection	DC Grounded
Input Impedance	50 Ohm
<i>Mechanical</i>	
Dimensions (HxWxD)	310 x 310 x 126 mm (12.2" x 12.2" x 4.96")
Connector	2 x N-Type, Female
Weight	1.3 kg
Back Plane	Aluminum; protected through chemical passivation
Radome	UV Protected Plastic
Mounting	MNT-22
<i>Environmental</i>	
Operating Temperature Range	-40°C to +65°C
Vibration	According to IEC 60721-3-4
Wind Load	200 km/h (survival)
Flammability	UL94
Water Proofing	IP-65
Humidity	ETS 300 019-1-4, EN 302 085 (annex A.1.1)
Salt Fog	According to IEC 68-2-11
Ice and Snow	25mm radial (survival)

11.2.3 Especificaciones Técnicas de TVWS Gateway



Item	Specification
TVWS Standard	IEEE802.11af
Frequency	174~216MHz, 470~698MHz
TX Output Power	27dBm \pm 2dB
CH BW	6MHz, 8MHz
RX Sensitivity	IEEE802.11af Spec.
Modulation/Demodulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Service Interface	Wi-Fi, LAN, BLE, RS-485
TVWS Antenna Connector	Type-N
Ethernet	10/100Base-T, RJ-45
Electric Power	PoE or DC
Mounting	Wall or Pole Mount
Operating Temperature	-30°C ~ 50°C
Packaging	Outdoor, Waterproof