UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERIA TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"PROPUESTA DEL USO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO MEDIANTE TECNOLOGÍA DE RADIO COGNITIVA PARA EL CANAL DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

VALLEJO ALMELA JESSENIA LIZBETH

DIRECTOR:

MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA

Ibarra, Ecuador, 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	VALLEJO ALMELA JESSENIA LIZBETH

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"PROPUESTA DEL USO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO MEDIANTE TECNOLOGÍA DE RADIO COGNITIVA PARA EL CANAL DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE"
AUTOR (ES):	VALLEJO ALMELA JESSENIA LIZBETH
FECHA: DD/MM/AAAA	04/09/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR /ASESOR:	MSC.CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA. MSC.HENRY PATRICIO FARINANGO ENDARA

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 04 días del mes septiembre de 2026

EL AUTOR:



(Firma)……
Nombre: Vallejo Almela Jessenia Lizbeth

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, de 04 de septiembre de 2026

MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
CARLOS ALBERTO VASQUEZ AYALA

f) ……

MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA.

C.C.:1002424982



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Para mi hijo David Arevalo, quien es el motor principal de mi vida y razón de cada esfuerzo. Cada desvelo, cada página y cada meta alcanzada llevan tu nombre; tú me enseñaste que el amor más grande es también la fuerza más grande.

De igual manera a mi hermano, por su compañía y su apoyo constante a lo largo de este camino; gracias por estar cuando más lo necesité. A mis padres, por hacer posible que hoy culmine mi carrera.

Con especial cariño, a Alejandro Erazo, por acompañarme con paciencia en la culminación de esta etapa de mi vida, por creer en mí cuando yo dudaba y por recordarme que siempre valía la pena continuar.

Y, finalmente, a mis amigas, por estar en los momentos buenos y también en los difíciles, por cada palabra de aliento y por hacer más ligero este camino; gracias por caminar conmigo hasta el final de esta etapa.

Vallejo Almela Jessenia Lizbeth



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios, por darme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta etapa; por sostenerme en cada dificultad y por permitirme llegar hasta este momento tan importante.

De manera especial, a mi hijo David, por ser mi mayor motivación y mi refugio en los días más difíciles; gracias por tu paciencia, por tu compañía y por regalarme una sonrisa y un abrazo cada vez que la fuerza me faltaba.

Asimismo, a mi director de trabajo de grado, MSc. Carlos Vásquez, y a mi asesor, MSc. Henry Farinango, quienes dejaron una huella profunda en mi formación. Gracias por su generosidad al compartir sus conocimientos, por la paciencia con la que corrigieron cada detalle y por acompañarme en todo el proceso hasta ver culminado este trabajo. Su ejemplo y su confianza fueron la mejor guía en este camino.

También, a Alejandro Erazo, por su apoyo incondicional durante toda esta etapa, por creer en mí cuando yo dudaba y por acompañarme con paciencia hasta alcanzar esta meta.

De igual forma, a la Ing. Paola Tirira, por compartir generosamente todos sus conocimientos y por guiarme con dedicación en cada etapa hasta lograr llegar a la meta.

Finalmente, al Canal de la Universidad Técnica del Norte, por abrirme sus puertas y brindarme todas las facilidades para desarrollar este trabajo.

Vallejo Almela Jessenia Lizbeth

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

RESUMEN

La radio cognitiva es una tecnología innovadora la cual permite optimizar el uso del espectro radioeléctrico a través de la detección dinámica de frecuencias disponibles, disminuyendo interferencias y mejorando la calidad de las transmisiones. El presente estudio genera una propuesta para una posible implementación en el canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte (UTV), considerando la viabilidad técnica, operativa, económica y regulatoria de la adopción. Se realizó un diagnóstico técnico del canal UTV, identificando la infraestructura actual que consta de transmisores TDT, enlaces de microondas SAF Tehnika Phoenix G2 y CFIP Phoenix con interfaces IP, compatibles con la integración de módulos SDR, que no afectarían la transmisión principal. Se diseñó un plan de implementación, el cual tendría una inversión estimada de USD $9.180 para la fase piloto y USD $22.220 para la implementación total en los cuatro sitios de la red. Pese a estos, el estudio concluye que la implementación operativa de la radio cognitiva en Ecuador no es viable debido a las condiciones actuales de las normativas del país, ya que no existe un marco regulatorio específico. La Ley Orgánica de Telecomunicaciones, las resoluciones de ARCOTEL y el Plan Nacional de Frecuencias no consideran la figura del usuario secundario ni el acceso dinámico al espectro, lo que genera un vacío legal estructural que impide de forma legal la adopción de esta tecnología, para lo cual se plantean recomendaciones específicas como hoja de ruta para superar esta limitación.

Palabras clave: radio cognitiva, espectro radioeléctrico, TDT, gestión dinámica del espectro, ARCOTEL.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ABSTRACT

Cognitive radio is an innovative technology that optimizes the use of the radio spectrum through the dynamic detection of available frequencies, reducing interference and improving transmission quality. This study proposes a possible implementation of cognitive radio on the television channel of the Universidad Técnica del Norte (UTV), considering the technical, operational, economic, and regulatory feasibility of its adoption. A technical assessment of the UTV channel was conducted, identifying the current infrastructure, which consists of DTT transmitters, SAF Tehnika Phoenix G2 microwave links, and CFIP Phoenix with IP interfaces compatible with the integration of SDR modules, which would not affect the main transmission. An implementation plan was designed, with an estimated investment of USD $9,180 for the pilot phase and USD $22,220 for full implementation across the four network sites. Despite this, the study concludes that the operational implementation of cognitive radio in Ecuador is not viable due to the country's current regulations, as there is no specific regulatory framework. The Organic Telecommunications Law, ARCOTEL resolutions, and the National Frequency Plan do not consider the figure of the secondary user or dynamic access to the spectrum, which creates a structural legal vacuum that legally prevents the adoption of this technology, for which specific recommendations are proposed as a roadmap to overcome this limitation.

Keywords: cognitive radio, radio spectrum, DTT, dynamic spectrum management, ARCOTEL.

LISTA DE CONTENIDOS

1. Capítulo I: Antecedentes....1

1.1 Tema....1

1.2 Problema....1

1.3 Objetivos....3

1.3.1. Objetivo General....3

1.3.2. Objetivos Específicos....4

1.4 Alcance....4

1.5 Justificación....7

2. Capítulo II: Marco Teórico....9

2.1 Espectro Radioeléctrico....9

2.1.1. Definición del espectro radioeléctrico....9

2.1.2. Importancia del espectro en las transmisiones....9

2.1.3. Bandas de frecuencia utilizadas por la televisión analógica y digital....10

2.1.4. Aplicabilidad de la radio cognitiva en el espectro televisivo en la gestión dinámica 12

2.1.5. Bandas UHF baja y alta: 470–698 MHz....13

2.2 Radio cognitiva....15

2.2.1. Concepto y principios de la radio cognitiva....15

2.2.2. Arquitectura de la radio cognitiva en transmisiones....18

2.2.3. Beneficios de la radio cognitiva en la gestión del espectro 19

2.2.4. Limitaciones y desafíos de implementación 20

2.3 Técnicas de gestión dinámica del espectro mediante radio cognitiva.....21

2.3.1. Detección y monitoreo de bandas disponibles 21

2.3.1.1. Frecuencia y Tiempo.....22

2.3.1.2. Espacio geográfico 22

2.3.1.3. Código.....23

2.3.1.4. Ángulo 23

2.3.2. Algoritmos de toma de decisiones en radio cognitiva.....24

2.3.2.1. Decisión Espectral.....24

2.3.2.2. Aprendizaje automático 26

2.3.2.3. Algoritmos bioinspirados.....26

2.3.2.4. Teoría de juegos.....27

2.3.2.5. Algoritmos No Consensos 28

2.3.3. Acceso dinámico al espectro en canales.....28

2.4 Normativa para la gestión del espectro en Ecuador.....29

2.4.1. Regulación del espectro para televisión digital terrestre en Ecuador.....29

2.4.2. Limitaciones legales para la reutilización del espectro en canales institucionales 30

2.4.3. Estado actual de la normativa sobre la tecnología radio cognitiva 31

2.4.4. Consideraciones regulatorias para la incorporación de radio cognitiva 31

2.5 Experiencias previas de radio cognitiva 32

2.5.1. Casos de estudio internacionales.....32

2.5.2. Proyectos nacionales relacionados con optimización del espectro 33

2.5.3. Estado actual de la radio cognitiva en Ecuador 34

3. Capítulo III: Evaluación 36

3.1 Diagnóstico técnico y operativo del canal universitario 36

3.1.1. Proceso de recopilación de la información técnica 36

3.1.2. Análisis de la infraestructura actual del canal.....37

3.1.3. Identificación de bandas y frecuencias utilizadas 41

3.1.4. Identificación de capacidades tecnológicas 41

3.1.4.1. Análisis de Compatibilidad de los Equipos 42

3.1.5. Evaluación de problemas operativos y uso del espectro 46

3.2 Identificación de requerimientos técnicos, operativos y regulatorios 46

3.2.1. Requerimientos Técnicos.....46

3.2.1.1. Sensado del Espectro (Spectrum Sensing).....47

3.2.1.2. Gestión Dinámica del Espectro (Dynamic Spectrum Management – DSM) 48

3.2.1.3. Acceso Dinámico al Espectro (Dynamic Spectrum Access – DSA).....48

3.2.1.4. Parámetros técnicos para la radio cognitiva.....48

3.2.1.5. Compatibilidad de los Equipos 51
3.2.2. Requerimientos Operativos.....52
3.2.2.1. Monitoreo continuo y automatizado.....52
3.2.2.2. Integración con la infraestructura existente 53
3.2.2.3. Coordinación y seguridad espectral.....53
3.2.3. Parámetros Regulatorios según la Normativa Ecuatoriana 53
3.2.3.1. Título habilitante y concesión de frecuencias 54
3.2.3.2. Modificación de parámetros técnicos 54
3.2.3.3. Cumplimiento del Plan Nacional de Frecuencias.....54
3.3 Diseño del plan de implementación de la radio cognitiva.....56
3.3.1. Arquitectura del Sistema de Radio Cognitiva.....57
3.3.1.1. Capa de Percepción del Espectro (Spectrum Sensing Layer) 57
3.3.1.2. Capa de Gestión y Decisión Cognitiva (Cognitive Engine Layer) 59
3.3.1.3. Capa de Adaptación y Ejecución (Reconfigurable Radio Layer).....60
3.3.1.4. Capa de Supervisión, Control y Cumplimiento Regulatorio 61
3.3.2. Fases del Proceso de Implementación de la Radio Cognitiva 62
3.3.2.1. Fase 1: Levantamiento de información y planificación técnica.....63
3.3.2.2. Fase 2: Diseño lógico y funcional del sistema cognitivo.....63
3.3.2.3. Fase 3: Implementación piloto del sistema de radio cognitiva 64
3.3.2.4. Fase 4: Evaluación técnica, operativa y regulatoria 64

3.3.2.5. Fase 5: Ajustes, optimización y escalamiento 65
3.3.2.6. Fase 6: Operación continua y mantenimiento 65
3.3.3. Análisis de Viabilidad Técnica, Operativa y Económica 65
3.3.3.1. Viabilidad Técnica 66
3.3.3.2. Acople de Impedancias 69
3.3.3.3. Protocolos de comunicación por capa arquitectónica 72
3.3.3.4. Definición de Frecuencias 73
3.3.3.5. Viabilidad Operativa 75
3.3.3.6. Viabilidad Económica 76
3.3.4. Viabilidad Global del Proyecto 83
4. Capítulo IV: Análisis de Resultados 84
4.1 Evaluación de la propuesta de radio cognitiva 84
4.2 Análisis de viabilidad de implementación 86
4.2.1. Viabilidad técnica 86
4.2.2. Viabilidad operativa 87
4.2.3. Viabilidad económica 88
4.3 Revisión del marco regulatorio aplicable 88
4.4 Recomendaciones regulatorias para la radio cognitiva 90
Conclusiones y Recomendaciones 96
Conclusiones 96

Recomendaciones 97

Bibliografía 98

Anexos 104

Anexo1: Entrevista realizada 104

Anexo2: Evidencia fotográfica del diagnóstico técnico 107

Anexo3: Fichas técnicas de los equipos referenciados 110

USRP B210 (Ettus Research) – módulo SDR de sensado 110

USRP X410 con daughterboard ZBX (Ettus Research/NI) – módulo SDR de banda ancha complementario 111

SAF Tehnika PhoeniX G2 – enlace de microondas (IDU) 111

CFIP Phoenix (SAF Tehnika) – enlace de microondas híbrido (IDU) 112

Raspberry Pi 5 – nodo embebido (host del SDR) 112

Cable coaxial LMR-400 (Times Microwave Systems) – interconexión RF 112

Anexo4: Resolución de los ejercicios de cálculo de compatibilidad de impedancias 113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de Canales y Bandas 10

Tabla 2. Distribución de Frecuencias UHF en Ecuador 14

Tabla 3. Distribución de Canales por Grupos 15

Tabla 4. Listado de equipos en cada etapa del sistema 39

Tabla 5. Análisis de capacidades de extracción lógica de los equipos SAF Tehnika en el contexto de la propuesta de Radio Cognitiva 45

Tabla 6. Parámetros Mínimos para el Sensado en Radio Cognitiva 47

Tabla 7. Parámetros Técnicos para la Implementación de Radio Cognitiva 49

Tabla 8. Potencia de Transmisión y Límite de Potencia 50

Tabla 9. Tiempos de Sensado y Monitoreo 50

Tabla 10. Probabilidad de Detección y Falsos Alarmas 51

Tabla 11. Requerimientos para Gestión del Espectro con Radio Cognitiva 54

Tabla 12. Fases del Proceso de Implementación 62

Tabla 13. Evaluación de Viabilidad Técnica de la Propuesta 67

Tabla 14. Impedancias nominales y conectores de los equipos propuestos 69

Tabla 15. Cálculo de compatibilidad de impedancias por interfaz de la cadena de RF ... 71

Tabla 16. Protocolos de comunicación por capa arquitectónica del sistema de radio cognitiva 72

Tabla 17. Frecuencias asignadas por ARCOTEL para la red UTV 74

Tabla 18. Evaluación de Viabilidad Operativa 76

Tabla 19. Estimación Cualitativa de Costos y Beneficios 77

Tabla 20. Estimación económica para la implementación de radio cognitiva 78

Tabla 21. Proyección económica de la implementación completa del sistema de Radio Cognitiva en los 4 sitios de la red UTV. 81

Tabla 22. Resumen técnico de parámetros por dimensión de viabilidad y su relación con el marco regulatorio 93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de problemas.....2

Figura 2. Diagrama de bloques para el plan de implementación de radio cognitiva. 5

Figura 3. Composición del Espectro Radioeléctrico 9

Figura 4. División del Espectro de Transmisión TDT.....12

Figura 5. Distribución de Bandas UHF en Inglaterra.....13

Figura 6. División General del Espectro UHF.....14

Figura 7. Características de Reconfiguración de CR.....16

Figura 8. Arquitectura de una CR.....18

Figura 9. Dimensiones para Detección del Espectro.....21

Figura 10. Transmisiones simultáneas por medio de una banda en común.....22

Figura 11. Uso espectral en la dimensión código.....23

Figura 12. Transmisiones simultáneas utilizando los ángulos de llegada de las señales 24

Figura 13. Estructura de decisión del espectro.....25

Figura 14. Ciclo cognitivo realizado por medio de aprendizaje por refuerzo 26

Figura 15. Esquema de Infraestructura del Sistema de Transmisión UTV.....38

Figura 16. Esquema de Arquitectura Piloto para el Sistema de Radio Cognitiva.....68

1. Capítulo I: Antecedentes

1.1 Tema

PROPUESTA DEL USO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO MEDIANTE TECNOLOGÍA DE RADIO COGNITIVA PARA EL CANAL DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.

1.2 Problema

El avance constante de las tecnologías inalámbricas ha incrementado significativamente la demanda del espectro radioeléctrico, considerado un recurso limitado y esencial para garantizar comunicaciones eficientes. A medida que surgen nuevos servicios digitales y plataformas de transmisión, se vuelve indispensable adoptar mecanismos de gestión más flexibles e inteligentes que superen el modelo tradicional de asignación estática, el cual resulta insuficiente frente a entornos dinámicos y de alta variabilidad (UIT, 2019).

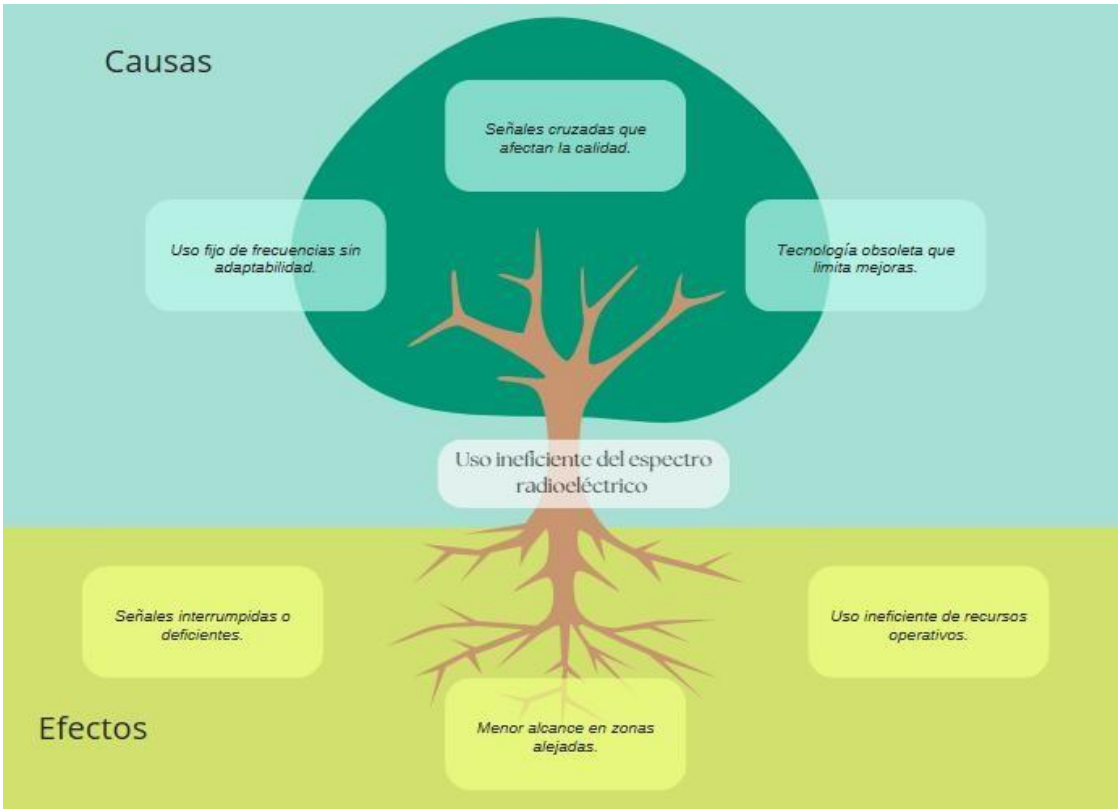
En este contexto, la tecnología de radio cognitiva emerge como una alternativa innovadora para gestionar el espectro de manera dinámica. Esta tecnología permite detectar y utilizar de forma temporal las bandas de frecuencia subutilizadas, adaptándose a las condiciones del entorno sin generar interferencias. Dicha capacidad de respuesta automatizada se alinea con las tendencias globales hacia redes inteligentes, conectividad ubicua y sostenibilidad en las telecomunicaciones. Según Chen et al. (2020), la radio cognitiva facilita la toma de decisiones autónoma, lo cual es crucial para atender la creciente demanda de servicios inalámbricos de alta calidad.

Uno de los principales desafíos es la dificultad de adaptación a un entorno espectral cambiante. Las condiciones técnicas, normativas y de consumo evolucionan constantemente, por lo que las plataformas de transmisión deben ser capaces de responder con agilidad. La implementación de tecnologías como la radio cognitiva permite a los sistemas adaptarse

automáticamente al uso del espectro, mejorando su eficiencia y garantizando la continuidad y calidad de los contenidos transmitidos (Chen et al., 2020).

Figura 1.

Árbol de problemas



Nota: los desafíos para el plan de implementación con sus posibles causas para la implementación de la tecnología Radio cognitiva

Mirando hacia el futuro, la visión del canal para 2025 de convertirse en un medio líder en contenidos científicos y culturales enfrenta riesgos si no se abordan estos desafíos. La programación actual, que incluye un 60% de contenido propio, requiere un soporte robusto en infraestructura y tecnología. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) subraya la importancia de los medios de comunicación en la educación y la cultura, sugiriendo que un canal bien gestionado puede ser un recurso valioso para el aprendizaje

y la cohesión social (UNESCO, 2024). Sin embargo, para cumplir con estas expectativas, es imperativo que el canal optimice su uso del espectro y mejore su calidad de transmisión.

El Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (Telecomunicaciones, 2022) ha desarrollado políticas orientadas a promover el uso compartido del espectro radioeléctrico como una estrategia para enfrentar la creciente demanda de servicios inalámbricos y optimizar el aprovechamiento de un recurso limitado (Telecomunicaciones, 2022). Estas políticas buscan facilitar la coexistencia entre usuarios primarios, que poseen derechos exclusivos sobre determinadas bandas, y usuarios secundarios, que podrían acceder al espectro de forma dinámica siempre que no generen interferencias (Martínez, 2019).

En este escenario, la radio cognitiva se perfila como una tecnología habilitante, ya que permite identificar automáticamente las bandas disponibles mediante técnicas de detección espectral y adaptación inteligente, asegurando una operación eficiente y conforme con la regulación (Haykin, 2005). La posibilidad de integrar este enfoque en contextos educativos, como los canales universitarios, representa una oportunidad para ampliar el acceso a medios de comunicación de calidad, fomentar la innovación tecnológica y fortalecer la misión institucional de democratizar el conocimiento, sin comprometer la integridad de los servicios existentes ni incurrir en altos costos de licenciamiento (Aguirre & Espinoza, 2023).

1.3 Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Proponer el uso del espectro radioeléctrico mediante la aplicación de tecnología de radio cognitiva en el canal de la Universidad Técnica del Norte, evaluando la viabilidad de gestión del espectro.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Recopilar información teórica sobre las características, funcionamiento y aplicaciones de la tecnología de radio cognitiva, estableciendo los parámetros de uso.
- Identificar los requerimientos de la gestión del espectro radioeléctrico de la tecnología radio cognitiva en el canal.
- Desarrollar un plan de implementación que contemple las fases necesarias para la adopción de la radio cognitiva.
- Establecer las recomendaciones marco regulatorias sobre una posible implementación de la radio cognitiva en el canal de la Universidad Técnica del Norte.

1.4 Alcance

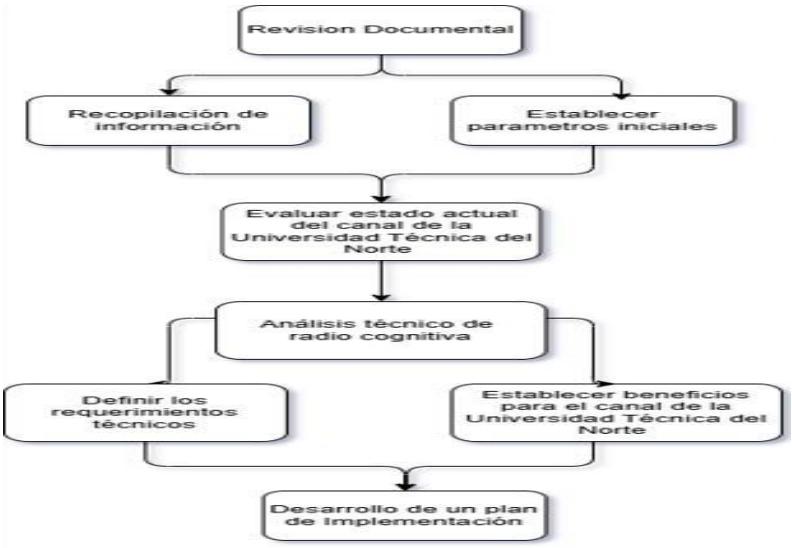
Este proyecto tiene como objetivo principal proponer el uso del espectro radioeléctrico en el canal de la Universidad Técnica del Norte mediante un plan de implementación de tecnología de radio cognitiva. Este estudio tiene como propósito explorar el uso del espectro radioeléctrico mediante la aplicación de tecnología de radio cognitiva, con el objetivo de estructurar una propuesta técnica aplicable a entornos institucionales. La investigación se orientará a identificar parámetros operativos, beneficios técnicos y requerimientos fundamentales que permitan valorar la viabilidad de gestión dinámica del espectro.

El enfoque de este estudio será exploratorio y técnico. Se comenzará con una revisión exhaustiva sobre las características y aplicaciones de la radio cognitiva. En paralelo, se realizará un análisis del estado actual del canal universitario, evaluando la infraestructura existente y determinando las necesidades para la adopción de esta tecnología. Es importante destacar que la viabilidad del plan de implementación de la radio cognitiva también dependerá del marco normativo vigente en Ecuador. Si bien este marco puede ofrecer algunas oportunidades, también

podría presentar limitaciones si las regulaciones actuales no se ajustan a la flexibilidad que requiere esta tecnología emergente. La evaluación se limitará a la Universidad Técnica del Norte, lo que permitirá un enfoque preciso, pero restringirá la posibilidad de generalizar los resultados a otras instituciones o contextos nacionales e internacionales. El proyecto se llevará a cabo en cuatro fases principales que permitirán una evaluación integral del plan de implementación de la radio cognitiva en el canal universitario.

Figura 2.

Diagrama de bloques para el plan de implementación de radio cognitiva.



Nota: Se muestra las fases metodológicas del proyecto, desde la revisión documental hasta el desarrollo de un plan de implementación, reflejando el flujo de procesos para el análisis de la implementación de la tecnología radio cognitiva en el canal de la Universidad Técnica del Norte.

En la primera fase, se realizará una revisión documental exhaustiva orientada a comprender los fundamentos técnicos, funcionales y arquitectónicos de la tecnología de radio cognitiva. La fase comprende el análisis de literatura científica, artículos especializados, normativas técnicas y documentos institucionales que aborden mecanismos de acceso dinámico al espectro. El objetivo de esta fase es establecer los principios operativos de esta tecnología, así como sus componentes clave, capacidades de detección espectral y procesos de toma de decisiones automatizadas en tiempo real. Esta base teórica será indispensable para orientar el análisis técnico posterior.

La segunda fase se centrará en identificar las condiciones normativas, técnicas y operativas relacionadas con el uso del espectro radioeléctrico en entornos institucionales. Para ello, se llevará a cabo un diagnóstico exhaustivo del entorno de transmisión, con énfasis en la gestión actual del espectro y sus implicaciones para la integración de tecnologías emergentes. Se examinarán documentos del marco legal vigente en Ecuador, incluyendo la normativa emitida por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, la Ley Orgánica de Telecomunicaciones y el Plan Nacional de Frecuencias. Este análisis permitirá comprender las restricciones y oportunidades legales que condicionan el uso dinámico del espectro, así como identificar los aspectos técnicos clave que podrían influir en la adopción de radio cognitiva. La información recopilada será esencial para definir parámetros regulatorios y operativos dentro de los cuales pueda estructurarse la propuesta de implementación.

La tercera fase del proyecto se dedicará al análisis técnico de la radio cognitiva y su aplicabilidad en el canal universitario. A través de esta fase, se estudiarán los requisitos técnicos necesarios para integrar esta tecnología en la infraestructura existente del canal. Se evaluarán las necesidades de hardware, software y capacidades de infraestructura para asegurar una transición exitosa hacia la radio cognitiva. Además, se realizará un análisis sobre los beneficios que esta

tecnología podría aportar al canal universitario, como la mejora en la gestión dinámica del espectro y la optimización de la calidad de la señal. También se tomarán en cuenta las necesidades de ancho de banda y las capacidades de adaptación de la infraestructura a esta nueva tecnología.

Finalmente, en la cuarta fase, se desarrollará un plan de implementación detallado para la adopción de la radio cognitiva en el canal universitario. Este plan incluirá las acciones necesarias para adquirir la tecnología. Se identificará y seleccionará el equipo adecuado para la implementación, asegurándose de que cumpla con los requisitos técnicos establecidos. Además, se evaluarán distintos proveedores para asegurar que los equipos seleccionados sean los más adecuados para maximizar la eficiencia operativa y optimizar el rendimiento de la radio cognitiva en el canal universitario.

1.5 Justificación

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 Educación de Calidad, busca garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, promoviendo oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos. En este contexto, la tecnología de radio cognitiva puede contribuir significativamente a mejorar la calidad educativa al optimizar la gestión del espectro radioeléctrico, lo cual es crucial para la calidad de las transmisiones educativas. Como señala la UNESCO (2024), la educación de calidad está intrínsecamente vinculada al acceso adecuado a la tecnología, especialmente en un mundo cada vez más digital.

La radio cognitiva permite una mejor asignación de frecuencias y reduce las interferencias, lo que mejora la calidad de las transmisiones educativas y facilita el acceso a la información en entornos de aprendizaje. Además, la adopción de tecnologías como la radio cognitiva permite que las universidades y otras instituciones educativas puedan ofrecer servicios educativos más efectivos y accesibles, incluso en zonas con limitaciones en infraestructura. Esto es fundamental

para alcanzar la meta 4.4 del ODS 4, que promueve el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación para todos, con el fin de mejorar las competencias y habilidades digitales de jóvenes y adultos (Naciones Unidas, 2015).

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 Industria, Innovación e Infraestructura, promueve la construcción de infraestructuras resilientes, la industrialización inclusiva y la innovación tecnológica. La implementación de la radio cognitiva en el canal universitario contribuye al desarrollo de una infraestructura de comunicaciones avanzada, lo cual es fundamental para garantizar el acceso equitativo a las tecnologías digitales y fomentar la innovación educativa. Según el Informe sobre la Ciencia, la Tecnología y la Innovación de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2018), la innovación tecnológica es esencial para modernizar las infraestructuras educativas y hacerlas más inclusivas y accesibles, especialmente en un mundo cada vez más dependiente de las tecnologías digitales.

La radio cognitiva, al optimizar el uso del espectro radioeléctrico, representa una solución innovadora que no solo mejora la calidad de las comunicaciones educativas, sino que también contribuye a la modernización de la infraestructura tecnológica de las universidades. Esta tecnología permite gestionar de manera eficiente el espectro radioeléctrico, lo que se alinea con la meta 9.5 del ODS 9, que busca mejorar la investigación y la innovación tecnológica en los sectores clave, contribuyendo a un desarrollo industrial sostenible e inclusivo (Naciones Unidas, 2015).

2. Capítulo II: Marco Teórico

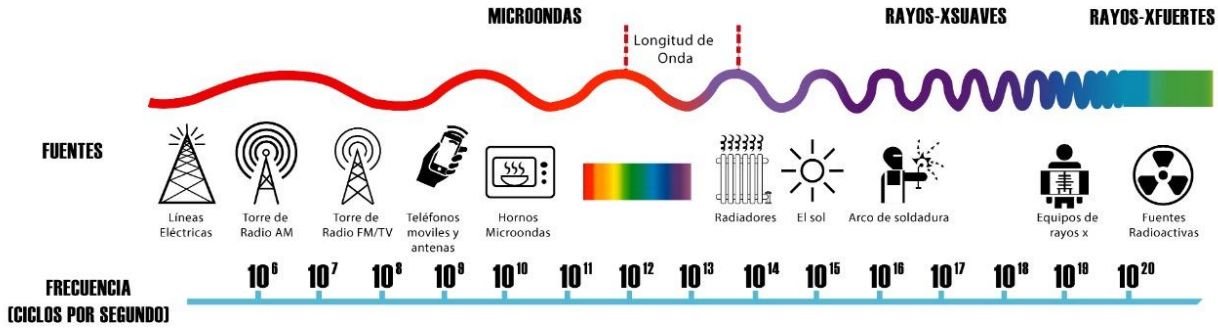
2.1 Espectro Radioeléctrico

2.1.1. *Definición del espectro radioeléctrico*

El espectro radioeléctrico u también conocidas como ondas radioeléctricas, se fija a una frecuencia menor a 3000 GHz y misma que puede propagarse por el espacio sin un medio guiado, lo cual es indispensable para los diversos servicios de telecomunicaciones. En un principio, el espectro radioeléctrico se formuló como una idea matemática que en la actualidad se ha transformado en un recurso natural limitado y medible por el cual se puede transportar energía o información de distinta procedencia a largas distancias considerando como medio de propagación el espacio (Llanos, 2013). En la **Figura 3** se muestra que este recurso es parte del espectro electromagnético, siendo su principal aplicación los servicios de telecomunicaciones.

Figura 3.

Composición del Espectro Radioeléctrico



Fuente: (CO, 2025)

2.1.2. *Importancia del espectro en las transmisiones*

Como se ha mencionado anteriormente, el espectro se considera como un recurso escaso o limitado, debido a que debe dividirse entre los diversos operadores para otorgar el acceso a los servicios como radio, televisión, telefonía e internet, pero sin dejar de lado a otros servicios como

la seguridad y defensa de cada país, lo cual identifica la importancia de la asignación uso controlado (Baque et al., 2022).

Cuando no se mantiene el control de este recurso, las emisoras pueden interferir con otros servicios lo cual generar pérdidas de señal, información alterada e interferencias. Esto puede incurrir en la pérdida definitiva del mensaje original, siendo un problema mayor en servicios primordiales como la telefonía, internet u otros medio de comunicación. Por esta razón, el espectro radioeléctrico se considera como un bien de dominio público, por lo que cada país es responsable de regular el uso eficiente mediante normas y leyes relacionadas con las telecomunicaciones, considera que los avances tecnológicos que cada vez son mayores requieren cambios o reformas económico políticos y sociales que se deben evaluar (Cadena et al., 2015).

2.1.3. *Bandas de frecuencia utilizadas por la televisión analógica y digital*

El espectro radioeléctrico se encuentra dividido en bandas de frecuencia, mismas que están asignadas por números enteros que van ascendiendo. Esta segmentación se la realiza de acuerdo con lo que menciona el Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (Albán & Cerezo, s.f.). Según la Norma Técnica para el Servicio de Televisión Analógica, el servicio de televisión abierta utiliza las bandas de frecuencias que se muestran en la **Tabla 1**, dividiéndose para 42 canales de 6 MHz de ancho de banda en cada caso.

Tabla 1.

Distribución de Canales y Bandas

Banda	Rango de Frecuencias (MHz)	Canal Nº	Portadora Video (MHz)	Portadora Audio (MHz)
I	54–60	2	55,25	59,75
I	60–66	3	61,25	65,75

I	66–72	4	67,25	71,75
I	76–82	5	77,25	81,75
I	82–88	6	83,25	87,75
III	174–180	7	175,25	179,75
III	180–186	8	181,25	185,75
III	186–192	9	187,25	191,75
III	192–198	10	193,25	197,75
III	198–204	11	199,25	203,75
III	204–210	12	205,25	209,75
III	210–216	13	211,25	215,75

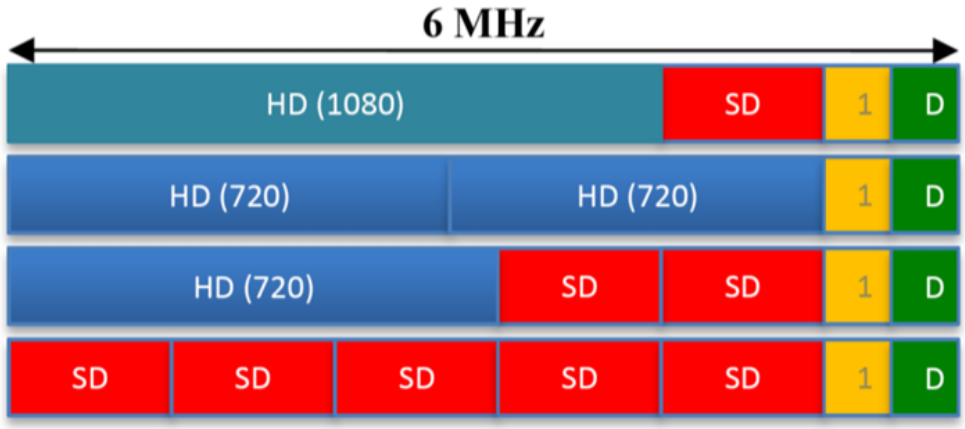
Nota: (Martínez, W., 2013)

Con respecto a la televisión digital terrestre (TDT), dentro del mismo ancho de banda correspondiente a 6 MHz, se puede transmitir información adicional como programaciones, cambios de calidad de estándar a alta definición, de manera general se envían más datos. Otro aspecto importante de la TDT es que en una misma área de cobertura ya no se necesita de un canal de guarda lo cual permite concesionar una mayor cantidad de canales adyacentes (Rodríguez, 2024).

Como se muestra en la **Figura 4** el espectro de transmisión se encuentra compuesto por 13 segmentos, en donde los segmentos 1 y 14 son las bandas de guarda. Para los 6 MHz que posee el ancho de banda de un canal, se ocupa 5.6 MHz, siendo para cada segmento 429 kHz de ancho de banda. Los segmentos se enumeran del 0 al 12, siendo utilizados cada uno de ellos para transmisiones de televisión (Dmitruk, 2023).

Figura 4.

División del Espectro de Transmisión TDT



Fuente: (Pineda, 2019)

2.1.4. *Aplicabilidad de la radio cognitiva en el espectro televisivo en la gestión dinámica*

La Federal Communications Commission (FCC) propuso una nueva tecnología conocida como Radio Cognitiva (Cognitive Radio, CR). De acuerdo con la FCC, un dispositivo de CR es un sistema de radiofrecuencia que tiene la capacidad de variar sus parámetros de transmisión de acuerdo con las condiciones de interacción del entorno donde se encuentra operando. Para poder mejorar la eficiencia en el uso del espectro disponible, esta entidad propuso abrir ciertas bandas designadas a televisión para que usuarios no licenciados puedan aplicar técnicas de compartición del espectro basado en la oportunidad (OSS).

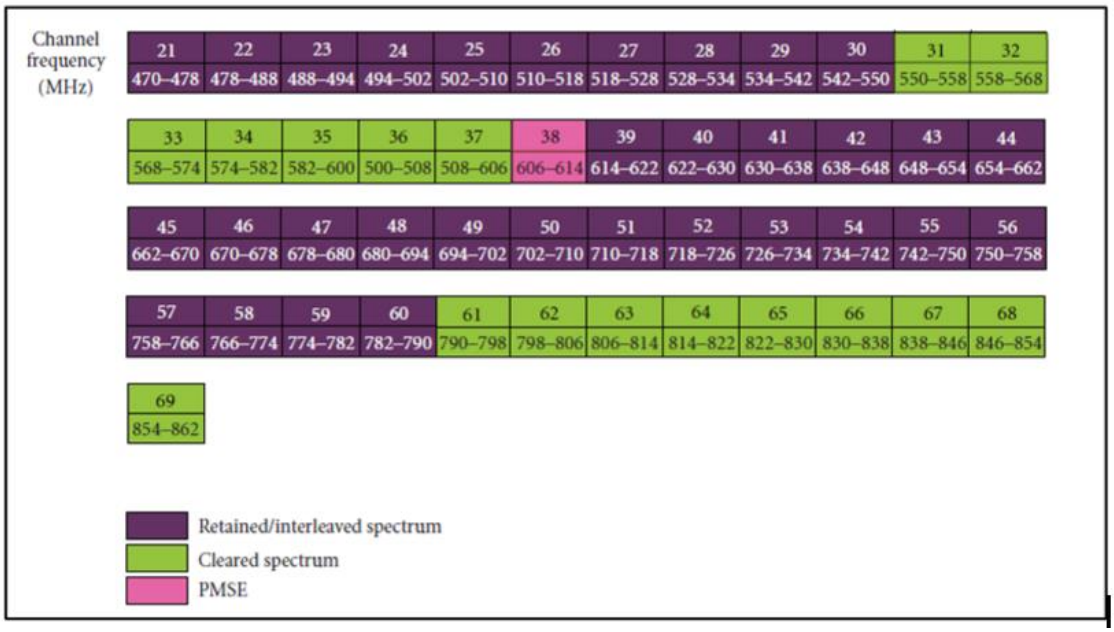
Una vez realizada la liberación del espectro debido a la transición hacia televisión digital existirán un número definido de canales por área geográfica que no serán utilizados por las estaciones de TV digital, esto debido a que no tendrán la capacidad de evitar las interferencias co – canal con respecto estaciones cercanas. Debido a esto se generan los conocidos como espacios en blanco TVWS generados porque un transmisor en un canal de TV vacante necesita operar a un nivel de potencia inferior para no producir interferencia. Esta característica permite que

dispositivos que posean una radiación baja de potencia puedan operar en canales designados a ubicaciones que no son utilizadas por las estaciones de TV (Alvarez & Bravo, 2021).

Para mejor esta características de los TVWS se considera a la radio cognitiva, la cual permite obtener información referente al espectro local previo a realizar una transmisión. En base a la información que recoge se pueden ajustar los parámetros del sistema de forma dinámica para su operación (Andrade et al., 2024). Estos cambios se los puede realizar por medio de una base de datos geoespacial. Esta aplicabilidad de la radio cognitiva se la puede evidenciar en la distribución de frecuencias en la banda de UHF en Inglaterra como se muestra en la **Figura 5**.

Figura 5.

Distribución de Bandas UHF en Inglaterra



Fuente: (Pineda, 2019)

2.1.5. *Bandas UHF baja y alta: 470–698 MHz*

Actualmente, la banda de frecuencias UHF que va desde los 470MHz a los 608 MHz posee dos segmentos principales:

- El primer segmento, desde los 470 – 512 MHz, en donde se encuentran los sistemas de radiodifusión de televisión y diversos sistemas para aplicaciones de radiocomunicación convencional, aplicaciones de radioenlaces fijos punto a punto (PaP) o punto a multipunto (PaM), servicio móvil de radiocomunicación especializada de flotillas (SMREF) y aplicaciones de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) (Barboza et al., 2023).
- El segundo segmento, que va desde los 512 – 608 MHz, se lo utiliza de manera específica para sistemas de radiodifusión de televisión como se muestra en la **Figura 6**.

Figura 6.

División General del Espectro UHF



Fuente: (IFT, 2017)

En el Ecuador de acuerdo con lo que menciona la Norma técnica para el servicio de televisión y plan de distribución de canales" se tiene el esquema de frecuencia de la banda UHF distribuido como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2.

Distribución de Frecuencias UHF en Ecuador

	Televisión UHF
Banda IV	De 500 a 608 MHz y de 614 a 644 MHz
Banda V	De 644 MHz a 686 MHz

Fuente: (Miño & Anzules, 2017)

La banda de frecuencia de televisión UHF está dividida para 33 canales cada uno con un ancho de banda de 6 MHz respectivamente. Como se muestra en la **Tabla 3**, se tienen un total de 4 grupos que están divididos para la distribución de canales. La agencia de regulación y control de las telecomunicaciones (ARCOTEL), para tratar de disminuir el impacto de la interferencia de canal adyacente y cocanal, aplicó una distribución de grupos pequeños de los 33 canales UHF en todo el país (Chere et al., 2022).

Tabla 3.

Distribución de Canales por Grupos

Grupo	Canales
G1	19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35
G2	20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36
G3	39, 41, 43, 45, 47, 49
G4	38, 40, 42, 44, 46, 48

Fuente: (Miño & Anzules, 2017)

2.2 Radio cognitiva

2.2.1. *Concepto y principios de la radio cognitiva*

La Cognitive Radio es un sistema SDR inteligente o cognitivo, cuyo concepto fue definido por Joseph Mitola III en el año 1999. La investigación describió el RKRL (Radio Knowledge Representation Language), y definía al dispositivo CR como una parte pequeña del mundo físico que tiene la capacidad de detectar el comportamiento del entorno de comunicación del usuario mediante la adquisición de información externa y disponer de ello para mejorar la transmisión de acuerdo con las necesidades específicas de cada usuario (Giral et al., 2022).

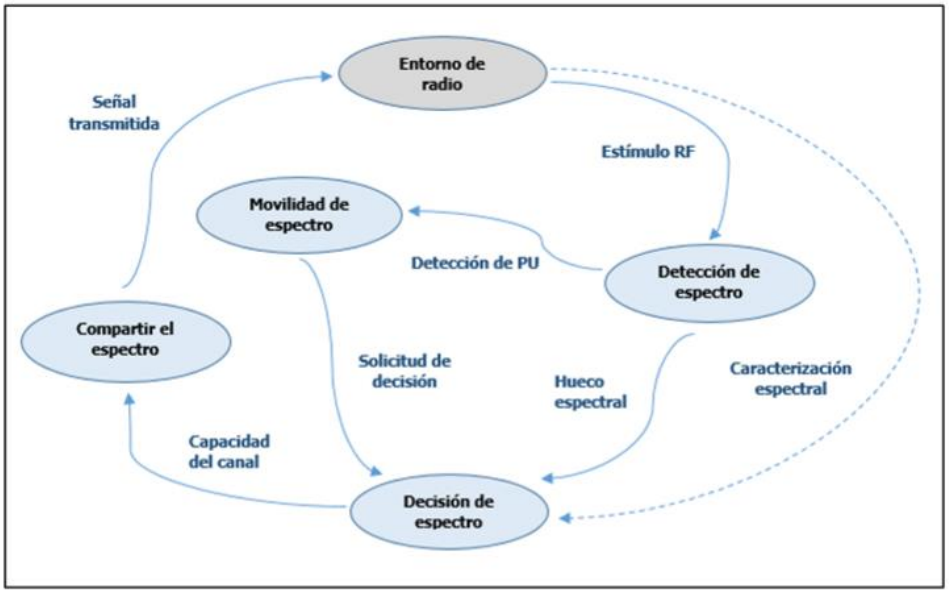
El Radio Definido por Software (SDR) sirve como una herramienta que permite integrar un sistema global excluyendo las irregularidades de cualquier condición geográfica de la región, estableciendo interfaces con otros estándares y sistemas estándares que provengan de servicios completos sin irregularidades. Entre las principales características que requiere un sistema de Radio Cognitiva son:

- Percibir el entorno de operación, por medio de técnicas como spectrum sensing.
- Tener conciencia del entorno, así como de sus capacidades y recursos disponibles.
- Alterar de forma inteligente sus parámetros tanto de recepción como de transmisión.
- Actuar de manera autónoma como transmisor o receptor (Guanoquiza & Ruíz, 2024).

Según lo que menciona la FCC, este dispositivo debe tener la capacidad de reconfigurar de manera dinámica los siguientes parámetros como se muestra en la **Figura 7**.

Figura 7.

Características de Reconfiguración de CR



Fuente: (Pineda, 2019)

- **Sistemas de comunicación:** trabajar mediante diferente sistemas de comunicación.

- **Modulación:** seleccionar cual modulación es la adecuada con respecto a las características del canal y necesidades del usuario.
- **Frecuencia Portadora:** capacidad de seleccionar la frecuencia de portadora más adecuada en base a las condiciones operativas del usuario y el espectro disponible.
- **Potencia transmitida:** el CR debe tener la capacidad de reducir la potencia transmitida hasta cierto nivel manteniendo la calidad de la transmisión mientras que las condiciones del medio lo permitan. Al mismo tiempo debe incrementar el número de usuarios que comparten es parte del espectro para disminuir la interferencia entre ellos (Martins, 2023).

De igual manera, existen otras características adicionales que puede incorporar un CR tales como:

- **Sensores de localización**, para implementar el spectrum sensing, por lo que se requiere un sistema GPS (Global Positioning System).
- **Algoritmos de inteligencia artificial**, debido a que el CR monitorea el entorno y puede aprender de el para la toma de decisiones.
- **Protocolos de comunicación**, minimizan las interferencias con los usuarios primarios o con otros dispositivos de CR (Hernández et al., 2022).

Cuando se tienen entornos donde varios CR quiere acceder a los mismos recursos se requiere de protocolos para negociar el acceso. Considerando esto, cierto autores mencionan la utilización de la teoría de juegos considerando lo siguiente:

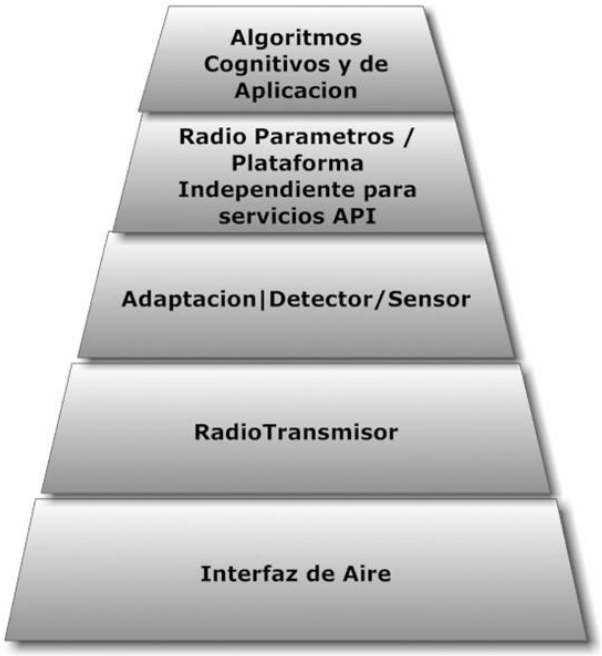
- Un juego es una representación matemática de una situación de decisión interactiva.
- El objetivo principal es crear un marco que procese la información necesaria de tal forma que sirva para el análisis.
- Diferentes situaciones se representan como diversos modelos de juego

2.2.2. *Arquitectura de la radio cognitiva en transmisiones*

La arquitectura del sistema CR está constituida como una plataforma independiente, la cual se encuentra determinada por diversos algoritmos mediante software, conocidos como motor cognitivo, mismo que posee una interfaz general de radio. Dentro de este elemento se tienen los módulos funcionales que se muestran en la **Figura 8** en donde se definen las capacidades cognitivas tales como razonamiento, conciencia, control adaptable del radio y creación de soluciones óptimas (Espinosa, 2021).

Figura 8.

Arquitectura de una CR



Fuente: (Aguilar & Navarro, 2011)

Una propuesta general del radio cognitivo se define en como el sistema de software puede trabajar con plataformas de radio reconfigurable para otorgarle una funcionalidad cognitiva. Este conjunto de software es el motor cognitivo en donde se tienen las reglas generales de aprendizaje y algoritmos de aplicaciones específicas, el cual puede ser utilizado en plataformas

de radio en base de hardware. Como se aprecia en la arquitectura, el motor cognitivo adapta la operación del radio y maneja los recursos para optimizar su funcionamiento.

El motor cognitivo se diseña y superpone dentro de una plataforma de hardware de radio. El CE es el encargado de manejar los recursos de la radio para ejecutar las funciones cognitivas, permitiendo la adaptación de los parámetros al entorno. Este elemento otorga a la radio las capacidades cognitivas realizando la combinación de procesos de aprendizaje de maquina con la radio operación (López, 2024).

2.2.3. *Beneficios de la radio cognitiva en la gestión del espectro*

Existen diversos beneficios de la aplicación de RC en sistemas de transmisión, de las cuales se han aplicado en casos de uso específicos lo que ha permitido un avance significativo en el entendimiento de las principales funcionalidades de estos sistemas. Un ejemplo de ello es que una RC puede razonar con respecto a las implicaciones que se relacionan con la solitud de radio de un taxi en base a una dirección fija, posteriormente el sistema le indica a la red como se va a trasladar hasta la ubicación. De esta manera, la red conoce que el usuario tiene una probabilidad alta de moverse a un sitio específico dentro de los próximos minutos. Si el usuario llega a un edificio que posee una mordaza móvil local, disminuirá la carga habitual que tenía cuando se estaba trasladando en el taxi. Estos intercambios pueden disminuir la incertidumbre de la carga requerida por la red, mejorando la eficiencia en el uso de los recursos de radio.

Actualmente, según está concebido el SDR no puede establecer un intercambio inteligente de información con la red debido a que no posee un modelo basado en razonamiento o capacidad de planificación. Como ejemplo, en Estados Unidos un SDR puede acceder a aplicaciones de RF, mediante la memoria y recursos de procesamiento que sirvan para operar en Suecia. Sin embargo, si no posee la compatibilidad del nivel de versión del proveedor de servicios, el equipo no

funcionará. Un SDR no puede alternar su composición interna con la red, para cambiar la configuración nuevamente y de esta manera descargar el software requerido para la aplicación. Por ello, la radio cognitiva, utiliza diversos modelos internos que son útiles para varios cuadros de aplicación. De igual manera considera modelos de espacio-tiempo del usuario, recursos de radio , red y servicios para mejorar y personalizar la experiencia del consumidor (Bordón & Montejo, 2015).

2.2.4. *Limitaciones y desafíos de implementación*

Dentro de las limitaciones que resultan desafiantes para la implementación de radio cognitiva es la variación del espacio en blanco a través del tiempo, esto debido a que los canales disponibles no son contiguos y varían de acuerdo con un sitio a otro. De igual manera, este espacio varía de un lugar a otro, considerando que los usuarios de la banda de TV detienen o iniciar la operación. Para solventar esto, se necesita de una arquitectura que distribuya de manera ágil la asignación de frecuencia optimizando el espacio en blanco que está disponible. Los requisitos resultan más complicados que para las redes FDD (división de frecuencia duplex), en donde se requiere de dos canales separados para su funcionamiento.

Particularmente, se presentan varios problemas relacionados con las redes de FDD en donde se incluye:

- Ajuste de forma independiente entre receptor y emisor.
- Proporcionar aislamiento de RF, alrededor de los 50 dB entre el transmisor de frecuencia variable y el receptor.
- Implementar receptores lineales para un amplio rango dinámico capaces de manejar en la banda alta transmisiones de televisión (López & Hernández, 2020).

2.3 Técnicas de gestión dinámica del espectro mediante radio cognitiva

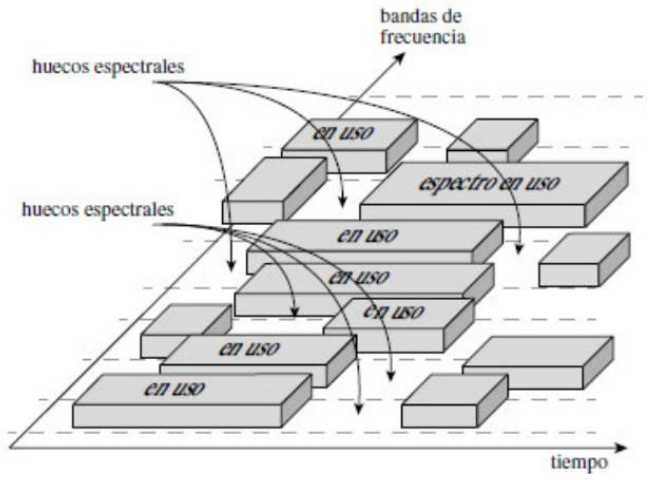
2.3.1. *Detección y monitoreo de bandas disponibles*

La detección de espectro se la define como la capacidad de medir los espacios de espectro disponible, mediante la determinación de la existencia de usuarios licenciados en una zona geográfica definida, siendo utilizado comúnmente en CR para detectar localmente el espectro. Un usuario en CR puede únicamente transmitirse por medio de frecuencias que no se estén utilizando en el espectro cercana. El usuario debe monitorear la disponibilidad de bandas y así captar la información para detectar en última instancia los huecos espectrales (Pedraza et al., 2012).

Existen diversas dimensiones que conformaron el modelo inicial que permitía analizar la subutilización del espectro, siendo estos optimizados posteriormente en base a aspectos como antenas inteligente y esquemas de codificación. Como se muestra en la **Figura 9** las bandas de frecuencia, tiempo, incluyendo el espacio geográfico, código y ángulo se conforman como las dimensiones analizadas para CR.

Figura 9.

Dimensiones para Detección del Espectro



Fuente: (Pedraza et al., 2012)

2.3.1.1. *Frecuencia y Tiempo*

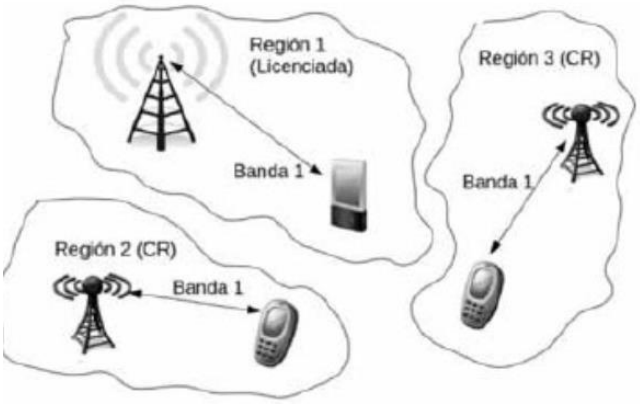
Las bandas del espectro disponible se las divide en segmentos más angostos en donde se observen oportunidades espectrales, esto debido a que no todas las bandas se usan de manera simultánea. Los huecos espectrales se conforman como una oportunidad para transmitir por medio de dispositivos de CR en las dimensiones de frecuencia y tiempo (Pedraza et al., 2012).

2.3.1.2. *Espacio geográfico*

En este aspecto, se consideran datos de ubicación como elevación, latitud, longitud y la distancia relacionada entre usuarios licenciados, pudiéndose evitar estas medidas considerando el nivel de interferencia. Como se muestra en la **Figura 10** pueden tres transmisiones al mismo tiempo ocupar la misma banda de frecuencia sin que se produzcan interferencias, esto se debe a que el rango entre cada transmisión es menor a la distancia geográfica entre las mismas. Esto se relaciona de manera directa con el concepto de *temperatura de interferencia* que menciona la FCC (Pedraza et al., 2012).

Figura 10.

Transmisiones simultáneas por medio de una banda en común



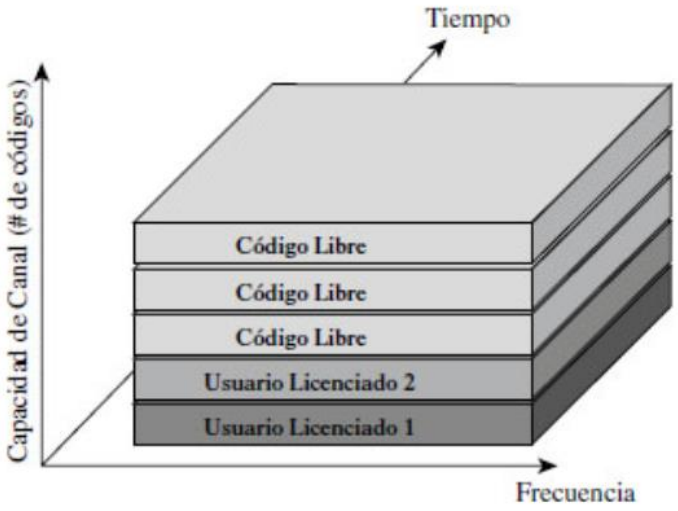
Fuente: (Pedraza et al., 2012)

2.3.1.3. *Código*

Esta dimensión pretende generar la detección de las secuencias de los códigos de espectro ensanchado, para los saltos en tiempo (TH) como para los saltos en frecuencia (FH) que utilizan los usuarios licenciados. De igual manera, busca información de sincronización para que los usuarios de CR puedan coordinar las transmisiones con respecto a los usuarios licenciados. Como se muestra en la **Figura 11** la estimación de la sincronización se puede evitar utilizando varios códigos aleatorios, sin embargo la interferencia parcial no se la puede evitar (Pedraza et al., 2012).

Figura 11.

Uso espectral en la dimensión código



Fuente: (Pedraza et al., 2012)

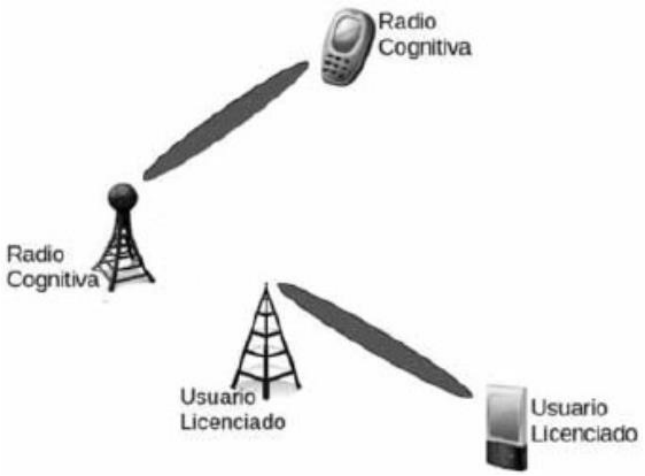
2.3.1.4. *Ángulo*

Finalmente, esta dimensión se encarga de detectar los lóbulos de radiación electromagnética, así como la ubicación de los usuarios licenciados. El conocer la posición y dirección de estos usuarios permite generar oportunidades de conocer los huecos espectrales con respecto a la dimensión ángulo. Como se muestra en la **Figura 12** pueden presentarse varias transmisiones simultáneas que utilicen la misma banda de frecuencia en un radio de alcance

similar. Debido a que las transmisiones tienen una dirección fija, la cantidad de interferencia provocada se disminuye notablemente (Pedraza et al., 2012).

Figura 12.

Transmisiones simultáneas utilizando los ángulos de llegada de las señales



Fuente: (Pedraza et al., 2012)

2.3.2. *Algoritmos de toma de decisiones en radio cognitiva*

La toma de decisiones de un espectro es una condición importante que aún no ha sido explorada en su totalidad comparado con otros elementos del ciclo cognitivo. Una vez realizada la detección del espectro, los usuarios no licenciados (SU) deben considerar cual es la mejor oportunidad espectral, haciendo referencia a los requisitos de calidad de servicio (QoS), así como a las acciones ejecutadas por otros usuarios. Estas decisiones deben ser tomadas de manera inteligente para poder optimizar la respuesta con respecto a las condiciones del entorno, lo cual se consigue mediante el motor de decisión cognitivo. Este elemento integra algoritmos de inteligencia artificial con respecto a los parámetros de radio, así como al proceso de aprendizaje de acuerdo a la experiencia (Giral et al., 2019).

2.3.2.1. *Decisión Espectral*

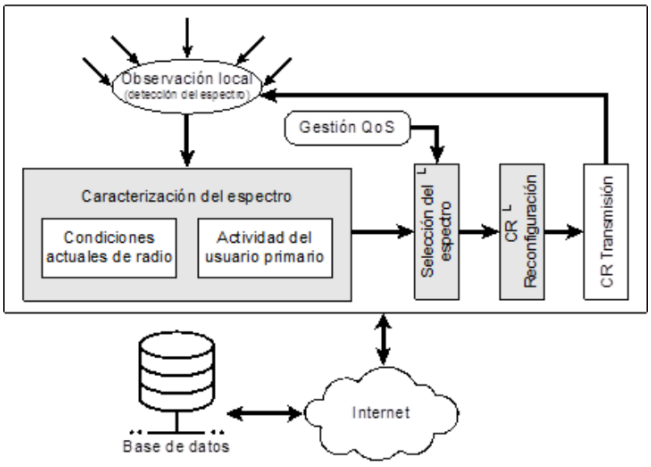
La decisión espectral debe integrar tres funciones principales las cuales son:

- **Caracterización del espectro:** en donde se identifican las bandas espectrales disponibles, conocidas como caracterización del PU
- **Selección del espectro o decisión del espectro:** selecciona la oportunidad espectral que mejor se adepte a las necesidades, considerando los requerimientos del usuario.
- **Reconfiguración del CR:** el CR debe tener la capacidad de reconfigurar los parámetros del transceptor para que pueda establecer la comunicación en la banda del espectro definida.

En la **Figura 13**, se muestran los canales identificados por medio de sensores o bases de datos, se caracteriza cada banda del espectro utilizando la base de observaciones locales, así como de la información estadística. Una vez terminada esta etapa, los SU seleccionan la banda espectral más adecuada, y reconfigura sus parámetros de transmisión para proceder al envío de datos (Giral et al., 2019).

Figura 13.

Estructura de decisión del espectro



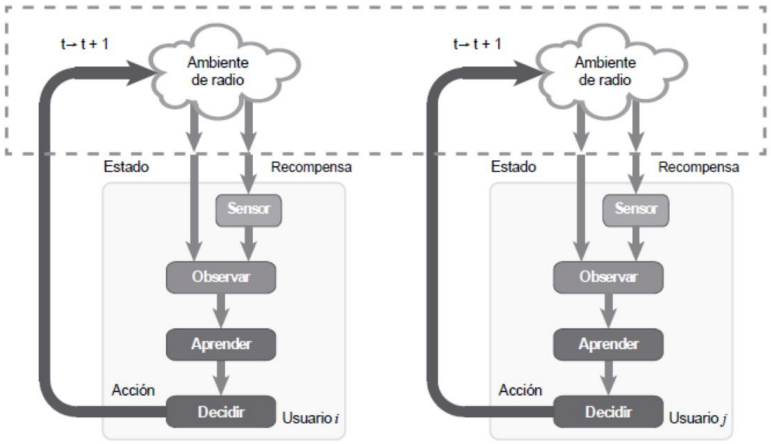
Fuente: (Giral et al., 2019)

2.3.2.2. *Aprendizaje automático*

Un ciclo cognitivo que está basado en aprendizaje por refuerzo se considera como un agente de múltiples variables que interactúan entre sí, dentro de un entorno similar como se muestra en la **Figura 14** sin estación base. Durante cada ciclo de aprendizaje, los usuarios reciben información parcial sobre cómo está la recompensa acumulada en el instante. Cuando se utiliza esta recompensa en conjunto con la observación del estado, el usuario puede actualizar la política dentro de la etapa de aprendizaje. Finalmente, en el proceso de la toma de decisiones, cada usuario selecciona las mejores acciones con respecto al conjunto de usuarios total.

Figura 14.

Ciclo cognitivo realizado por medio de aprendizaje por refuerzo



Fuente: (Giral et al., 2019)

2.3.2.3. *Algoritmos bioinspirados*

Existe diversos algoritmos como los basados en inteligencia de enjambre que se consideran flexibles y robustos, y los cuales poseen las siguientes ventajas:

- **Escalabilidad:** la cantidad de personas se puede adaptar al tamaño de la red.
- **Tolerancia a fallos:** debido a que el comportamiento de un enjambre no es controlado por un sistema centralizado, el perder algunos individuos no causa efectos catastróficos.

- **Adaptación:** el enjambre puede reaccionar a cambios en el ambiente ya que cada partícula puede adaptarse mejorando la flexibilidad.
- **Velocidad:** los cambios en la red se pueden definir rápidamente entre los ocupantes de la red.
- **Modularidad:** los usuarios actúan de forma independiente de otras capas de la red.
- **Autonomía:** no requiere ningún control humano, lo cual genera una velocidad de convergencia más rápida.
- **Paralelismo:** las operaciones de los usuarios son realizadas paralelamente (Giral et al., 2019).

2.3.2.4. *Teoría de juegos*

La teoría de juegos es conocida como una estrategia de análisis, la cual estudia las características de forma general de problemas competitivos que se presentan entre las interacciones estratégicas de jugadores racionales, lo cual puede ser modelado y analizado para tomar decisiones. Este modelo se compone por un número fijo de jugadores, comandos de acción y una función de utilidad que se encarga de seleccionar las acciones de cada jugador a un valor numérico. De igual forma, cada decisión entre los actores se distribuye y son autónomas, lo cual permite obtener una optimización autoorganizada.

Las estrategias basadas en juegos son perfectas para el modelado y análisis de los sistemas de comunicación. En aplicaciones como la CRN, los usuarios de la red toman decisiones inteligentes en base a la dinámica del espectro, así como a las acciones realizadas por otros usuarios (Giral et al., 2019).

2.3.2.5. *Algoritmos No Consensos*

Un problema de decisión puede clasificarse en una toma de decisión individual y una toma de decisión en grupo (TDG). La TDG se conoce como un problema en donde los expertos buscan conseguir una solución en común, considerando las opiniones o preferencias de todos los involucrados, pese a ello, ciertas decisiones seleccionadas no se aceptan como buenas por parte de algunos expertos.

Para evitar estos desacuerdos, se necesita de un proceso de consenso, en donde los expertos debaten y cambian sus preferencias hasta alcanzar un nivel de acuerdo previo a tomar una decisión. El consenso está definido como un acuerdo donde los expertos igualan sus posiciones para tomar una decisión. Este tipo de algoritmos son una combinación de consenso e inclusiones diferenciales que resuelven de manera precisa los juegos potenciales de forma exacta para una red de múltiples agentes (Giral et al., 2019).

2.3.3. *Acceso dinámico al espectro en canales*

Actualmente, la radio cognitiva está asociada a un sistema de radio comunicación que accede de forma dinámica al espectro de acuerdo con la observación del entorno radioeléctrico. Considerando las bandas de frecuencias utilizadas, se pueden definir dos modelos de acceso dinámico al espectro los cuales se describen a continuación.

- **Modelo de acceso libre:** este modelo hace referencia a la utilización de las bandas de libre acceso tales como las de uso Industrial, Científico y Médico. Dentro de estas bandas de frecuencias todos los usuarios adquieren los mismos derechos de uso del espectro y no se necesita de alguna licencia, siempre y cuando se sigan las debidas regulaciones establecidas, incluyendo los límites espectrales, frecuencias portadoras y máxima potencia de transmisión.

- **Modelo de acceso jerárquico**: este modelo ejecuta una diferenciación entre los usuarios primarios (PU) y usuarios secundarios (SU). Para que los SU tengan acceso al espectro asignado a los PU se pueden hacer mediante los paradigmas como interweave, underlay y overlay.

El acceso dinámico al espectro necesita de cuatro funcionalidades relacionadas directamente con el ciclo cognitivo y las cuales se detallan a continuación:

a) Identificar las oportunidades de acceso al espectro.
b) Seleccionar las bandas de frecuencia que se utilizarán.}
c) Coordinar el acceso al espectro con otros usuarios secundarios.
d) Desocupar los canales cuando son requeridos por los PU (Bordón & Montejo, 2015).

2.4 Normativa para la gestión del espectro en Ecuador

2.4.1. *Regulación del espectro para televisión digital terrestre en Ecuador*

En Ecuador, la regulación del espectro para la Televisión Digital Terrestre (TDT) está sustenta en la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT), en donde se considera al espectro radioeléctrico como un sector estratégico cuya administración, regulación y control son realizadas por Estado mediante la ARCOTEL. Esta regulación menciona los principios de uso eficiente, asignación transparente de frecuencias y la obligación de garantizar igualdad de condiciones en el acceso al espectro para servicios de radiodifusión sonora y de televisión abierta. De igual manera, se complementa por medio del Reglamento General a la LOT, en donde se mencionan los lineamientos para la concesión, uso y reversión de frecuencias del espectro radioeléctrico, en donde se incluyen los servicios de televisión abierta analógica y digital (ARCOTEL, 2016).

Ecuador adoptó el estándar ISDB-Tb y la regulación técnica se estableció en la Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión de Televisión Digital Terrestre, la cual fue aprobada en

la Resolución ARCOTEL-2015-0301 y posteriormente actualizada en la Resolución ARCOTEL-2019-0781, en donde se definen las condiciones técnicas, planificación de canales, parámetros de operación y coordinación con el Plan Nacional de Frecuencias. De igual forma, el Plan Maestro de Transición a la TDT 2018-2021 define la ruta para el apagón analógico, asignación de canales UHF, uso de canales 14 y 15, así como los criterios de canalización para TDT (MINTEL, 2018).

2.4.2. *Limitaciones legales para la reutilización del espectro en canales institucionales*

La Ley Orgánica de Telecomunicaciones y la Ley Orgánica de Comunicación (LOC) mencionan que las frecuencias del espectro radioeléctrico se consideran como bienes de dominio público, los cuales están regidos a títulos habilitantes que no pueden ser transferidos ni reutilizados de forma libre por los concesionarios. En el caso de canales institucionales, cualquier cambio de uso, cesión, arrendamiento o explotación comercial debe respetar el Plan Nacional de Frecuencias y las reglas de distribución desarrolladas a partir de la LOC y su reglamentación. Esto implica que la reutilización del espectro asignado a un canal institucional no puede hacerse de forma discreta, sino que necesita de autorizaciones formales y respeto al objetivo para lo que fue otorgada dicha frecuencia.

Por su parte, los procesos recientes de reversión de frecuencias han comprobado que la autoridad reguladora es un limitante y ente controlador del espectro cuando se consiguen detectar irregularidades o incumplimientos. ARCOTEL ha generado la disposición de revertir frecuencias temporales y de repetidoras cuando el uso está en contra de la aplicación para la que fue adjudicada, mora o algún incumplimiento a la normativa. Cuando se ha dispuesto la reversión de las frecuencias, se las debe reasignar por medio de concursos públicos, considerando los aspectos de las “Bases para la adjudicación de frecuencias del servicio de TV”, donde mencionan condiciones para la asignación, tarifas, obligaciones y criterios de elegibilidad, lo cual se presenta como una

limitación directa a la reutilización informal del espectro destinado a canales institucionales (ARCOTEL, 2024).

2.4.3. *Estado actual de la normativa sobre la tecnología radio cognitiva*

Actualmente, en el Ecuador, no existe una normativa específica en donde se detalle y regule el despliegue comercial de sistemas de radio cognitiva en bandas licenciadas como las de televisión VHF/UHF, sin embargo, se tiene el marco general de gestión del espectro en donde se establecen condiciones para futuras implementaciones. La mayoría de los documentos que se relacionan con la radio cognitiva en el contexto ecuatoriano son de carácter académico, tales como tesis y artículos los cuales hacen un análisis de su potencial, describen las arquitecturas y estudian casos de uso, comprobando que existe la ausencia de una normativa específica.

Un estudio en particular con respecto a esto es el realizado por Vega (2020) denominado "Revisión al Desarrollo de la Tecnología de Radio Cognitiva en Bandas VHF–UHF en el Ecuador para Smart Campus", en donde se realiza la revisión del estado de la RC en el país concluyendo que su aplicación se ha mantenido únicamente dentro del ámbito experimental y de investigación, sin despliegues regulados a gran escala. Por otro lado, la Revista Politécnica de la EPN en su artículo "Consideraciones para el Despliegue de Redes basadas en Radio Cognitiva: Ocupación y Regulación del Espectro", analiza experiencias regulatorias internacionales e identifica vacíos normativos en la región, lo cual está relacionado con el contexto ecuatoriano, indicando que el país aún se encuentra en una fase de estudio y discusión (Carro et al., 2019).

2.4.4. *Consideraciones regulatorias para la incorporación de radio cognitiva*

La inclusión de radio cognitiva en el sistema de radiodifusión tiene varios desafíos regulatorios centrales tales como la protección estricta de los usuarios primarios (emisoras licenciadas de TV), definición de niveles de potencia, máscaras de emisión, mecanismos de

detección de espectro y esquemas de acceso oportuno que traten de evitar las interferencias perjudiciales. Estudios sobre la RC en Ecuador y la región en general menciona que cualquier despliegue debería estar apoyado en el marco existente de gestión del espectro, añadiendo disposiciones para el uso dinámico de espacios en blanco de TV, así como para la operación de dispositivos secundarios. De igual manera, se debe considerar la regulación de aspectos como la certificación de equipos, coordinación internacional y la responsabilidad frente a interferencias, manteniendo los lineamientos y recomendaciones de la UIT (CEPAL, 2012).

Por otro lado, se debe analizar los modelos de autorización y licenciamiento para proyectos piloto y despliegues comerciales de radio cognitiva. En la literatura general se mencionan aspectos como las licencias experimentales, bandas de uso compartido con reglas de prioridad para de esta manera se pueda probar la tecnología sin comprometer la calidad de los servicios existentes. Dentro del contexto ecuatoriano, esto puede implicar en adaptar las resoluciones relacionadas con TDT, actualizar las bases de adjudicación de frecuencias y, posiblemente, emitir una norma técnica específica para sistemas de radio cognitiva, en donde se establezca el régimen de acceso oportuno al espectro, protección a canales institucionales y mecanismos de monitoreo por parte de ARCOTEL (ARCOTEL, 2024).

2.5 Experiencias previas de radio cognitiva

2.5.1. *Casos de estudio internacionales*

A nivel internacional, diversos estudios se han centrado en resolver problemas de la radio cognitiva desde un punto de vista de los algoritmos y diseño de sistemas. Un ejemplo es el estudio realizado por Erazo et al. (2021) sobre detección de espectro en banda ancha Sub-Nyquist para redes de radio cognitiva, donde se adapta el algoritmo IZMA-SV para realizar detección de espectro de banda ancha con muestreo por debajo de la tasa de Nyquist mediante técnicas de matrix

completion. Este enfoque reconstruye las señales por medio de un subconjunto de muestras, identificando si un canal está ocupado o libre y, por tanto, maximizando la eficiencia espectral a un menor costo de procesamiento y menor exigencia de hardware de adquisición de datos (Erazo et al., 2021).

Otro caso relevante es la revisión de la movilidad espectral en redes de radio cognitiva realizada por (2015), que analiza en profundidad el cambio de canal y sus clasificaciones, criterios de decisión y métricas de desempeño. En este trabajo entrega un marco conceptual completo para el diseño de algoritmos de movilidad espectral escalables, capaces de seleccionar de forma inteligente el nuevo canal objetivo considerando carga de tráfico, interferencia y tipo de aplicación, lo que es esencial para garantizar calidad de servicio a usuarios secundarios sin perjudicar a los usuarios primarios (Hemández et al., 2015).

Finalmente, investigaciones como la de Sandoval (2017) sobre modelado en VHDL de redes neuronales configurables aplicadas a la decodificación en radio cognitiva muestran el uso de redes neuronales y hardware reconfigurable para implementar codificadores/decodificadores adaptativos, alineados con la definición de radio cognitiva de reconfiguración dinámica y aprendizaje del entorno a nivel físico y de enlace (Sandoval, 2017).

2.5.2. *Proyectos nacionales relacionados con optimización del espectro*

En el contexto ecuatoriano, uno de los proyectos más representativos sobre optimización del espectro es el estudio realizado por Acurio (2024), el cual está orientado a la optimización del espectro electromagnético para comunicaciones móviles mediante tecnologías MIMO en redes 5G. Este trabajo se enfoca en escenarios de alta densidad de usuarios y utiliza tecnologías MIMO masivo y MIMO adaptativo, apoyándose en herramientas de simulación como MATLAB y 5G Toolbox para evaluar métricas de eficiencia espectral, capacidad de canal y calidad de servicio.

Los resultados muestran que el uso de múltiples antenas de transmisión y recepción permite incrementos significativos en la capacidad y el rendimiento espectral, evidenciando el potencial de estas arquitecturas como estrategia técnica nacional para aprovechar mejor el espectro asignado a servicios móviles de quinta generación.

De la misma forma, el artículo "Optimization of the use of the radio spectrum in Ecuador" analiza, desde una perspectiva cuantitativa y de campo, la percepción de profesionales de ARCONEL respecto al modelo vigente de asignación y uso del espectro radioeléctrico en el país. A partir de encuestas a expertos, el estudio concluye que, aunque el modelo actual satisface en términos generales las necesidades de comunicación de la población, es necesario optimizar la asignación y ampliar el espectro disponible para la implementación de 5G, con énfasis en servicios prioritarios como salud y educación. Estos resultados sitúan a la optimización del espectro como un tema estratégico para cerrar la brecha digital en Ecuador y orientan futuras políticas públicas hacia una gestión más flexible y eficiente del recurso radioeléctrico (Chere et al., 2022).

2.5.3. *Estado actual de la radio cognitiva en Ecuador*

El estado actual de la radio cognitiva en Ecuador se caracteriza por encontrarse principalmente en el ámbito académico y experimental, con muy pocas experiencias de despliegue real y sin un marco regulatorio específico. El trabajo "Revisión al Desarrollo de la Tecnología de Radio Cognitiva en Bandas VHF–UHF en el Ecuador para Smart Campus" realiza una revisión del estado del arte sobre el uso de RC sobre redes de sensores inalámbricos cognitivos (CWSN) en bandas VHF–UHF y concluye que, pese a la creciente presión por la sobreutilización y subutilización del espectro, no existen aún implementaciones concretas de redes de sensores cognitivos en el país, particularmente en el contexto del proyecto "Smart UNL". Esto deja en evidencia un amplio campo de oportunidad para aplicar radio cognitiva en aplicaciones como

control de luminarias, gestión energética y servicios inteligentes en campus universitarios (Vega, 2020).

Por otro lado, existen trabajos con un enfoque nacional que refuerzan la idea de que la radio cognitiva en Ecuador se encuentra en una fase de investigación y simulación, más que de despliegue operativo. La tesis doctoral sobre radios universitarias en Ecuador muestra el crecimiento de 14 a 30 emisoras universitarias y su papel como plataformas educomunicativas, pero sin integrar aún funcionalidades de radio cognitiva; no obstante, estas emisoras representan un entorno idóneo para futuros pilotos de RC dado su carácter experimental y educativo (Andrade, C., 2022).

Finalmente, se tiene la investigación “Diseño y evaluación de una red de radio cognitiva utilizando un modelo de Márkov para garantizar calidad de servicio en términos de probabilidad de bloqueo”, desarrollada en la UNACH, donde se modela una red de radio cognitiva con usuarios primarios y secundarios, evaluando métricas como probabilidad de bloqueo y throughput. Aunque se trata de simulaciones, este tipo de trabajos evidencia que en Ecuador ya se están ensayando modelos avanzados de RC, lo que podría facilitar su adopción futura cuando exista un marco normativo claro (Jinez & Macas, 2025).

3. Capítulo III: Evaluación

El presente capítulo es la propuesta de diseño y modelo conceptual para la integración de tecnología de Radio Cognitiva en el canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte. Debido a esto, todos los elementos descritos en estas secciones, incluyendo la arquitectura del sistema, fases de implementación, parámetros técnicos y estimación económica, corresponden a un escenario proyectado y condicionado a la existencia de un marco regulatorio habilitante por parte de ARCOTEL, así como a la disponibilidad presupuestaria de la institución. Esta propuesta no es un plan de intervención técnica, sino más bien una base referencial para la toma de decisiones futuras y para el desarrollo de políticas públicas relacionadas con la gestión dinámica del espectro radioeléctrico en el Ecuador.

3.1 Diagnóstico técnico y operativo del canal universitario

El diagnóstico técnico del canal de la Universidad Técnica del Norte (UTV) se desarrolló con el propósito de caracterizar el estado actual de la infraestructura de transmisión, el uso del espectro radioeléctrico y las capacidades tecnológicos que se posee, de tal forma que se pueda evaluar la factibilidad de implementar tecnologías avanzadas para la gestión del espectro, siendo especial énfasis en la radio cognitiva. Este diagnóstico es una etapa indispensable para el estudio, debido a que permite identificar limitaciones, oportunidades y las condiciones reales de operación sobre las que se buscará establecer la propuesta tecnológica planteada de radio cognitiva. A continuación se detallan los procedimientos para la recolección y análisis de la situación actual de la infraestructura de transmisión.

3.1.1. *Proceso de recopilación de la información técnica*

La recopilación de información está realizada en base a un enfoque mixto, en donde se combinaron técnicas cualitativas y análisis documental. Se utilizó como fuente primaria una

entrevista técnica semiestructurada la cual estuvo dirigida al personal encargado del área de transmisión del canal universitario, en donde se obtuvo información directa referente a la infraestructura instalada, frecuencias asignadas, procedimientos operativos y problemas recurrentes que están relacionados con el uso del espectro se puede ver el Anexo 1. Se complementó esta entrevista con la revisión documental interna del canal y esquemas de la arquitectura de red de transporte, los cuales sirvieron como validación para estructurar la información.

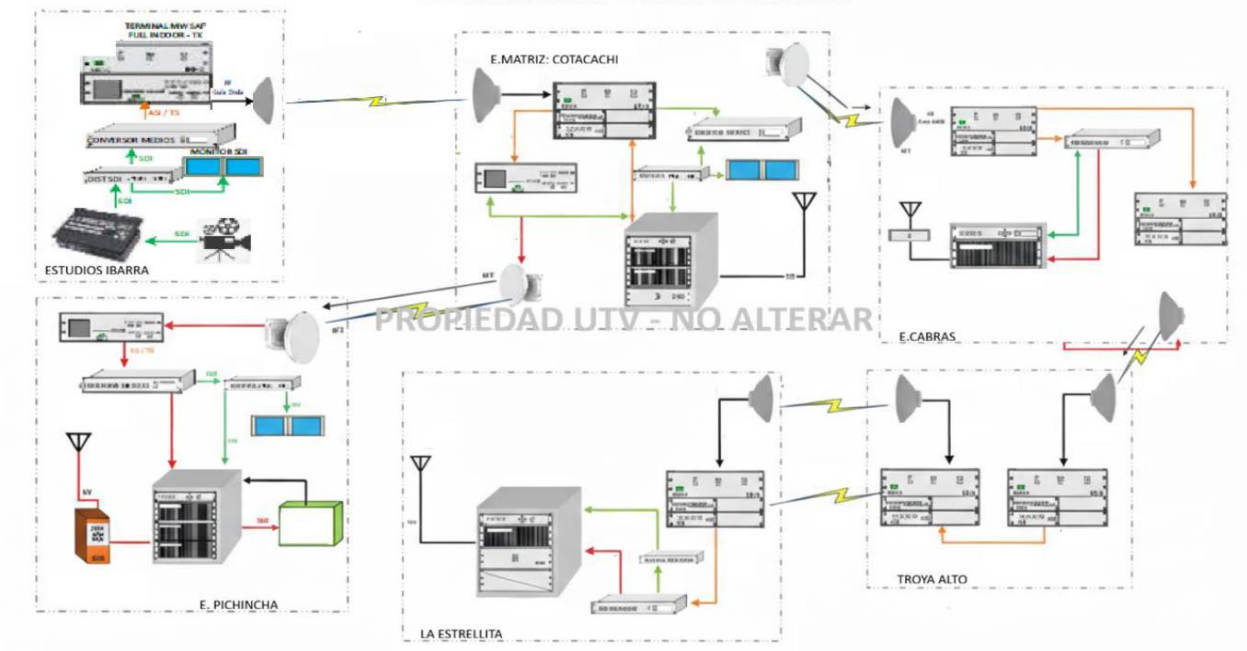
De igual forma, se realizó una revisión bibliográfica y normativa referente a los sistemas de transmisión televisiva, enlaces de microondas y gestión del espectro, lo que permitió contextualizar de forma técnica el levantamiento de información y de esta forma contrastarlo con estándares actuales.

3.1.2. *Análisis de la infraestructura actual del canal*

El canal de la Universidad Técnica del Norte posee una infraestructura de transmisión la cual se diseñó considerando una arquitectura jerárquica de red de transporte, en la cual se diferencian de forma clara el nodo de origen, estación matriz, nodos de distribución y puntos finales de emisión. Como se muestra en la **Figura 15**, el origen de la señal está ubicado en los estudios de Ibarra, en donde se realiza la generación del contenido audiovisual y su respectiva codificación inicial. Dentro de esta etapa se utilizan cámaras profesionales, switchers y codificadores, encargados de preparar la señal para el transporte hacia la estación matriz.

Figura 15.

Esquema de Infraestructura del Sistema de Transmisión UTV



Fuente: (P. Tirira, comunicación personal, 2026)

Posteriormente, desde los estudios, la señal se envía mediante un enlace de microondas tipo STL (Studio to Transmitter Link) hacia la estación matriz que se encuentra localizada dentro del Cerro Cotacachi, misma que se considera como el nodo central de la red. Este enlace trabaja en la banda de microondas, que se encuentra en los 6.8 GHz, y la cual se encarga del transporte de la señal principal con alta confiabilidad hacia el punto de distribución Cotacachi.

La estación matriz del Cerro Cotacachi cumple con un rol importante, debido a que es el nodo en el cual se realiza tanto la transmisión local para la zona de cobertura inmediata como la distribución de la señal hacia otros nodos remotos. Para realizar este proceso, el sistema posee transmisores de televisión Digital Ready, equipos de multiplexación y sistemas de gestión los cuales replican la señal en diversas rutas de backhaul.

Uno de los enlaces de distribución está dirigido hacia el Cerro Pichincha, sitio en el cual está un nodo final de una de las ramas de cobertura. Por su parte, otro enlace está situado hacia el Cerro Cabras, mismo que actúa como nodo de distribución secundaria. En este nodo, la señal es retransmitida hacia el Cerro Troya Alto, el cual trabaja como un repetidor pasivo, sin transmisión directa al usuario final, cuya única función es de salto técnico para superar obstáculos geográficos y mantener la continuidad del enlace.

Finalmente, la señal llega al Cerro La Estrellita, en donde se realiza la recepción final, decodificación y transmisión al aire para la audiencia de la zona definida. Esta arquitectura permite que el canal cubra distintas áreas geográficas combinando varios enlaces punto a punto y transmisiones locales, lo que optimiza la infraestructura disponible. En la **Tabla 4** se presentan los principales equipos que están establecidos en el sistema de comunicación analizado identificando sus características más importantes y la función dentro del proceso. La evidencia fotográfica correspondiente a la visita técnica realizada se presenta en el Anexo 2.

Tabla 4.

Listado de equipos en cada etapa del sistema

Etapa del sistema	Equipo principal	Función técnica	Características relevantes
Generación de contenido (Estudios Ibarra)	Cámaras de video profesionales	Captura de señal audiovisual	Sensores CMOS/CCD, salida SD/HD, interfaces SDI/HDMI
Producción	Switcher de video	Selección y mezcla de señales	Múltiples entradas, control digital

Codificación	Encoder de video/audio	Compresión y preparación de señal	MPEG-2/MPEG-4, soporte IP
Enlace STL	Transmisor de microondas	Transporte del contenido al sitio matriz	Banda 6 GHz, modulación digital, alta ganancia
Enlace STL	Receptor de microondas	Recepción del enlace principal	Alta sensibilidad, corrección de errores
Estación matriz (Cotacachi)	Transmisor de TV	Emisión de señal local	Analógico/digital, preparado para TDT
Distribución	Equipos de backhaul	Replicación de señal a otros nodos	Enlaces punto a punto Digital Ready
Nodo secundario (Cerro Cabras)	Transmisor de TV	Cobertura local secundaria	Configuración remota, operación continua
Repetidor pasivo (Troya Alto)	Relay de microondas	Salto técnico del enlace	Sin TX al aire, solo transporte
Punto final (La Estrellita)	Receptor + transmisor de TV	Emisión final al usuario	Decodificación y modulación
Gestión y mantenimiento	Analizador de espectro (Interno)	Monitoreo del espectro	Integrado dentro del Enlace Microondas
	Analizador de espectro (externo)	Monitoreo del espectro	Medición periódica, informes técnicos

3.1.3. *Identificación de bandas y frecuencias utilizadas*

De acuerdo con la información obtenida a través de la entrevista técnica, así como de los documentos de concesión, el canal UTV actualmente opera bajo una concesión de televisión analógica, aunque su infraestructura está preparada para una transición a televisión digital terrestre (TDT). Analizando los aspectos de radiodifusión, la frecuencia asignada para la señal de video corresponde a 531.25 MHz, mientras que la portadora de audio está ubicada en 535.75 MHz, ambas situadas dentro de la banda UHF, según menciona el Plan Nacional de Frecuencias.

Con respecto a la red de transporte, los enlaces de microondas que se utilizan para interconectar los diferentes nodos operan en la banda de 6 GHz, de forma específica cerca de los 6815 MHz, banda que es común para la implementación de enlaces STL y de backhaul debido a que posee un equilibrio entre capacidad, alcance y resistencia a interferencias. El ancho de banda estimado para canal es de aproximadamente 14 MHz, el cual se considera como un valor referencial basado en los requerimientos de transmisión analógica y con las capacidades de los equipos instalados.

De igual manera, se puede destacar que el canal ha implementado pruebas temporales de transmisión digital, en donde se incluye la habilitación de multiprogramación por medio de la gestión del flujo de transporte (Transport Stream) en el multiplexor del sistema digital, mostrando que el uso del espectro no es estático, sino que tiene un potencial de reconfiguración dinámica, lo cual es una característica importante para la aplicación de radio cognitiva.

3.1.4. *Identificación de capacidades tecnológicas*

El canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte posee un equipamiento ligeramente moderno, identificado por el personal entrevistado el cual menciona que es una solución de tipo “Digital Ready”, lo cual implica que los transmisores y sistemas de procesamiento

tienen la compatibilidad para realizar transmisión analógica como digital. Esta característica se presenta como una ventaja, debido a que permite que varios modos de operación trabajen al mismo tiempo, facilitando migraciones tecnológicas futuras sin requerir el reemplazo completo de la infraestructura.

Aunque el canal de televisión no posee internamente de un analizador de espectro permanente, sin embargo, el software propio del enlace microonda tiene incorporada la funcionalidad de analizar el especto, a su vez que también se incluye esta verificación durante el mantenimiento cuando se establece de un contrato anual mediante el cual se ejecutan al menos tres mantenimientos preventivos al año. En estos procesos, la empresa especializa realiza mediciones del espectro radioeléctrico, comprueba la correcta ocupación de las bandas asignadas y hace la validación para que los parámetros técnicos de operación se encuentren dentro de los límites establecidos por la autoridad reguladora. Después de esto se realizan informes técnicos los cuales sirven como base de información para la evaluación del comportamiento del espectro a lo largo del tiempo.

Dentro de la infraestructura también se incorporan interfaces IP en varios de sus equipos, lo cual da la posibilidad de integrar soluciones que se encuentren basadas en redes convergentes, monitoreo remoto y procesamiento inteligente de señales. Pese a que en la actualidad estas capacidades no se han aplicado en el ámbito televisivo, se consideran como un habilitador tecnológico para la implementación futura de sistemas de radio cognitiva, en donde se requiere la capacidad sensado, procesamiento y toma de decisiones en tiempo real.

3.1.4.1. *Análisis de Compatibilidad de los Equipos*

Un aspecto fundamental dentro del estudio para determinar la viabilidad técnica de la propuesta es determinar cómo los equipos de radioenlace existentes en la infraestructura del canal

se pueden integrar al sistema de radio cognitiva sin la necesidad de reemplazarlos completamente. En este contexto, se realiza un análisis específico de los modelos SAF Tehnika Phoenix G2 y CFIP Phoenix, que constituyen la plataforma de transmisión de microondas actualmente instalada en los nodos de la red.

El equipo SAF Tehnika Phoenix G2 es una radio de microondas de alta capacidad la cual está diseñada para operar en bandas de 6 a 38 GHz, con soporte para modulaciones adaptativas que van desde QPSK hasta 2048-QAM, capacidades de tráfico de hasta 1 Gbps (full dúplex) y compatibilidad con interfaces Ethernet (10/100/1000Base-T), E1/T1 y STM-1. Considerando los aspectos gestión y monitoreo, este equipo posee de manera nativa un conjunto de interfaces de acceso lógico que incluyen en donde se incluye el SNMP v1/v2c/v3, Telnet/SSH para acceso CLI, interfaces HTTP/HTTPS para gestión web y soporte para RADIUS/TACACS+ en ambientes con autenticación centralizada. Por medio de estas interfaces se puede recolectar en tiempo real sin la necesidad de incorporar otro equipo los siguientes parámetros operacionales para la implementación de radio cognitiva:

- Nivel de señal recibida (RSL / RSSI).
- Relación señal a ruido (SNR) en dB, indicador directo de la calidad del canal radioeléctrico.
- Tasa de error de bit (BER) antes y después de corrección de errores (FEC), como indicador de degradación del canal.
- Estado y nivel de modulación activa (Adaptive Modulation Status), que permite inferir las condiciones del espectro ocupado.
- Alarmas de umbral de señal y eventos de handover de modulación, exportables vía SNMP traps.
- Estadísticas de tráfico y disponibilidad del enlace.

La extracción de estos datos se puede realizar por medio de polling SNMP periódico desde el servidor del motor cognitivo, configurado en la estación matriz del Cerro Cotacachi, lo que convertiría al equipo Phoenix G2 en un sensor espectral indirecto de la capa de percepción sin requerir hardware externo para el nodo en el que se encuentra instalado, validando esta información en el manual técnico del equipo (SAF Tehnika, 2023).

Por otro lado, el modelo CFIP Phoenix posee la misma arquitectura de gestión que el Phoenix G2, ya que pertenece a la misma familia de plataformas SAF Tehnika. Este equipo, que está destinado a implementaciones de capacidad intermedia en bandas de 6 a 23 GHz, posee las también las interfaces SNMP, SSH y HTTP, así como soporte para modulación adaptativa hasta 256-QAM. La principal diferencia está en que posee una capacidad máxima de tráfico hasta 400 Mbps full dúplex y en opciones de agregación de portadoras.

En base a esta información, ambos modelos permiten la extracción de datos de forma nativa, sin requerir hardware adicional externo dedicado para la función de sensado en los nodos respectivos. Sin embargo, es importante indicar que estas métricas son indicadores indirectos del estado del espectro radioeléctrico, dado que los equipos Phoenix G2 y CFIP Phoenix monitorizan el canal de microondas (banda de 6.8 GHz) utilizado para el transporte de la señal entre nodos, y no a las bandas UHF de radiodifusión televisiva que corresponde a 531.25 MHz. Debido a esto, la arquitectura propuesta debería incorporar módulos SDR (Software Defined Radio) o analizadores de espectro dedicados para el monitoreo directo de las bandas UHF de interés.

Como se aprecia en la **Tabla 5**, se indica que los equipos Phoenix pueden entregar datos de calidad del enlace de transporte (backhaul), mientras que los módulos SDR permitirán generar datos de ocupación espectral en la banda de radiodifusión. Con estas fuentes de información complementarias, la capa de percepción del sistema de radio cognitiva tendrá una base importante

de datos para la decisión del motor cognitivo con parámetros tanto del canal de transporte como del canal de emisión.

Tabla 5.

Análisis de capacidades de extracción lógica de los equipos SAF Tehnika en el contexto de la propuesta de Radio Cognitiva

Parámetro	Phoenix G2	CFIP Phoenix	Uso en Radio Cognitiva
RSL / RSSI	Sí (±0.1 dB)	Sí (±0.1 dB)	Indicador de estado del canal de microondas
SNR	Sí	Sí	Calidad del canal de transporte
BER (pre/post FEC)	Sí	Sí	Degradación del enlace de backhaul
Modulación adaptativa	Hasta 2048-QAM	Hasta 256-QAM	Inferencia de condición espectral
Interfaces de extracción lógica	SNMP, SSH, HTTP	SNMP, SSH, HTTP	Polling desde motor cognitivo sin hardware externo
Monitoreo de banda UHF (531 MHz)	No (solo microondas)	No (solo microondas)	Requiere módulo SDR adicional

3.1.5. *Evaluación de problemas operativos y uso del espectro*

Durante el diagnóstico realizado se consiguió identificar la presencia de al menos un evento documentado de interferencia, el cual ocurrió en el transcurso del año anterior, en donde se manifiesta la presencia de pixelación y cortes esporádicos de la señal, principalmente en la zona Pichincha. Estos eventos encontrados muestran la vulnerabilidad del sistema frente a situaciones adversas del espectro, que pueden ser causadas por interferencias externas, saturación o uso ineficiente de las bandas disponibles.

Aunque estos eventos identificados no se presentan con frecuencia, el impacto sobre la calidad del servicio indica la necesidad de implementar mecanismos más avanzados de monitoreo y gestión del espectro.

3.2 Identificación de requerimientos técnicos, operativos y regulatorios

La gestión inteligente del espectro radioeléctrico utilizando tecnologías de Radio Cognitiva se considera como un cambio sustancial frente a los modelos tradicionales de asignación estática de frecuencias. Dentro de esta sección se identifican y desarrollan los requerimientos técnicos y operativos, así como las características regulatorias y técnicas requeridas para la implementación efectiva de radio cognitiva en el canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte.

3.2.1. *Requerimientos Técnicos*

Los requerimientos técnicos establecen las capacidades mínimas que requieren los sistemas y dispositivos para implementar de manera correcta un esquema de radio cognitiva. Estos permiten que los equipos transmitan, reciban y detecten el entorno espectral, tomando decisiones informadas y adaptando su operación en tiempo real. Los principales elementos técnicos que se deben considerar son los que se detallan a continuación.

3.2.1.1. *Sensado del Espectro (Spectrum Sensing)*

El sensado del espectro se conoce como la capacidad que tienen los dispositivos de radio cognitiva para monitorear de forma continua la ocupación del espectro identificando intervalos de frecuencias no utilizados por usuarios primarios. Esta característica es fundamental, ya que sin ella no se podría aplicar dinámicamente recursos espectrales sin interferencia perjudicial a servicios con licencia. Sus principales funciones son:

- **Identificación de huecos espectrales (*spectrum holes*)**: Detectar bandas libres dentro de las bandas licenciadas identificando oportunidades de usabilidad.
- **Detección de actividad del usuario primario**: Reconocer el momento que un usuario licenciado regresa y libera la frecuencia de forma automática.
- **Estimación de la calidad del canal de televisión**: Evalúa parámetros como potencia de señal, ruido, interferencia y nivel de ocupación.

Este proceso se puede realizar utilizando técnicas tales como detección de energía, detección basada en características, o filtros adaptativos, lo cual dependerá de la complejidad del sistema y los requerimientos de precisión. Este parámetro define el nivel mínimo de potencia el cual la radio cognitiva debe detectar para tomar decisiones si una frecuencia se encuentra ocupada por un usuario primario sin causarle interferencia. En la **Tabla 6** se muestran los rangos de detección utilizados en aplicaciones de Radio Cognitiva que deben cumplirse.

Tabla 6.

Parámetros Mínimos para el Sensado en Radio Cognitiva

Servicio primario	Umbral de detección mínimo típico
Señales de TV Digital (DTT)	≈ −114 dBm sobre 6 MHz (FCC/802.22)
Radio Microfónica de baja potencia	≈ −107 dBm sobre 200 kHz

Señales analógicas antiguas	≈ −114 dBm
Detección estricto en algunos países	≈ −120 dBm (Ofcom UK)

3.2.1.2. *Gestión Dinámica del Espectro (Dynamic Spectrum Management – DSM)*

La gestión dinámica del espectro se considera como el núcleo de la tecnología cognitiva, debido a que cuando es detectado un canal libre, el sistema decide si lo utiliza y de qué forma lo realiza, dando prioridad a no interferir con los usuarios licenciados. Esta característica combina varias funciones como:

- Análisis del espectro disponible el cual selecciona las bandas óptimas.
- Toma de decisiones automatizadas basadas en algoritmos tales como inteligencia artificial, lógica difusa o reglas expertas.
- Ajuste automático de parámetros de transmisión tales como potencia, frecuencia y ancho de banda de acuerdo con el entorno.

3.2.1.3. *Acceso Dinámico al Espectro (Dynamic Spectrum Access – DSA)*

El *DSA* se considera como la forma en que las radios cognitivas tienen acceso al espectro de forma fluida y flexible. Al no depender de asignaciones rígidas y exclusivas, los sistemas cognitivamente habilitados tienen las siguientes capacidades:

- Compartir canales con otros usuarios en el tiempo o espacio.
- Cambiar de canal de acuerdo con la disponibilidad.
- Optimizar recursos por medio de técnicas como TDMA, FDMA o acceso oportunista.

3.2.1.4. *Parámetros técnicos para la radio cognitiva*

En la **Tabla 7** se mencionan los parámetros considerados los más importantes para definir y evaluar el comportamiento técnico de un sistema de radio cognitiva.

Tabla 7.

Parámetros Técnicos para la Implementación de Radio Cognitiva

Parámetro	Descripción	Relevancia
Umbral de detección (Threshold)	Nivel mínimo en el que una señal se considera ocupada.	Define la sensibilidad del sensado y evita falsas detecciones.
Tasa de detección (% Detection Rate)	Porcentaje de veces que se detecta de forma correcta un usuario primario.	Mide eficacia del sensado.
Tiempo de sensado (Sensing Time)	Período en el cual la radio escucha el canal antes de tomar decisiones.	Afecta la velocidad de respuesta frente a cambios espectrales.
Ancho de banda sensado	Rango de frecuencias monitoreadas al mismo tiempo.	Influye en la cantidad de huecos espectrales que se pueden detectar.
Nivel de interferencia admisible	Cantidad máxima de ruido/interferencia tolerada sin perjudicar al usuario primario.	Garantiza el trabajo simultáneo con usuarios licenciados.
Algoritmo de decisión espectral	Método de selección de canales óptimos.	Determina eficiencia en acceso dinámico.

Con respecto a las regulaciones ecuatorianas, aún no están definidos ciertos valores específicos para utilizarse en radio cognitiva, para lo cual se utilizan estándares internacionales

con el objetivo de establecer rangos de potencia que evitan interferencia. En la **Tabla 8** se muestran los parámetros de más importantes de potencia para evitar interferencias.

Tabla 8.

Potencia de Transmisión y Límite de Potencia

Situación	Potencia emitida (Tx) típica	Descripción
Dispositivo fijo secundario TVWS	0 dBm a 16 dBm (≈ 1 mW – 40 mW)	Potencia promedio permitida para nodos secundarios (FCC)
Potencia adjunta permitida zona co-canal	hasta 30 dBm en 1º canal adyacente (FCC)	Límites si existe un canal primario en adyacencia
Densidad espectral de potencia (PSD) máximo	~ 0.7 – 0.83 mW/100 kHz	Establece la distribución e potencia por frecuencia para minimizar interferencia

Por su parte, en la **Tabla 9** se muestran los rangos de referencia relacionados con los tiempos de sensado y monitoreo con su respectiva descripción.

Tabla 9.

Tiempos de Sensado y Monitoreo

Parámetro	Valor / Rango de referencia	Descripción
Tiempo mínimo de sensado antes de iniciar la transmisión	≈ 30 segundos	Tiempo en el cual no se debería detectar la señal primaria para comenzar la operación en un canal asignado de forma dinámica.

Monitoreo en servicio	cada 60 segundos	El sistema verifica el canal cuando está operativo para liberarse si aparece un primario disponible.
Tiempo máximo de cesar transmisión tras detección primaria	< 2 s	Cuando ya se detecta un primario en uso, el secundario debería terminar la transmisión en ese canal.

Finalmente, en la **Tabla 10** se definen los parámetros referentes a la probabilidad de detección y falsos alarmas que indican la confiabilidad del sistema de sensado espectral.

Tabla 10.

Probabilidad de Detección y Falsos Alarmas

Parámetro	Valor Internacional recomendado
Probabilidad de Detección (*Pd*)	$\approx \geq 0.90 – 1.0$
Probabilidad de Falsa Detección (*Pf*)	≤ 0.10

3.2.1.5. *Compatibilidad de los Equipos*

Un aspecto fundamental para determinar la viabilidad de la propuesta está en definir el modo en que el sistema SDR interactuaría con los equipos SAF Tehnika Phoenix G2 y CFIP Phoenix que se encuentran actualmente instalados en la infraestructura del canal. Esta interacción puede realizar mediante un mecanismo técnicamente posible, cuya viabilidad es dependiente de la arquitectura de gestión propia de la plataforma SAF Tehnika.

La opción de menor complejidad de integración, es la extracción lógica de parámetros operacionales mediante el puerto de gestión IP, lo que permitiría aprovechar las interfaces nativas de los equipos Phoenix G2 y CFIP Phoenix. Los dos modelos poseen de forma nativa un soporte para SNMP v1/v2c/v3 (Simple Network Management Protocol), acceso CLI vía Telnet/SSH y gestión web a través de HTTP/HTTPS. Utilizando polling SNMP periódico configurado en el

servidor del motor cognitivo de la estación matriz del Cerro Cotacachi, se podría obtener en tiempo real parámetros tales como el RSL/RSSI, SNR, BER, estado de modulación adaptativa y alarmas de umbral de señal. Esta opción no necesitaría modificación física de ningún equipo existente y sería compatible con la arquitectura de gestión que SAF Tehnika implementa en toda la gama de equipos Phoenix (SAF Tehnika, 2023).

Esta consideración está fundamentada en que la arquitectura de gestión de SAF Tehnika es abierta en la capa de aplicación, que no necesita de hardware adicional ni modificaciones físicas a la infraestructura existente, y que los parámetros que se pueden obtener mediante esta vía son suficientes para alimentar la capa de percepción del motor cognitivo con indicadores indirectos del estado del canal de microondas. Pese a esto, al considerar que estos parámetros corresponden al canal de transporte en la banda de 6.8 GHz y no al canal de radiodifusión UHF de 531.25 MHz, la arquitectura debería completar esta fuente de datos con módulos SDR dedicados al monitoreo directo de las bandas UHF de interés.

3.2.2. *Requerimientos Operativos*

Los requerimientos operativos son las características de cómo debería responder la solución de radio cognitiva en una operación normal dentro de un canal de televisión. A continuación se detalla cada uno de estos elementos.

3.2.2.1. *Monitoreo continuo y automatizado*

Una solución de RC debería tener las siguientes capacidades:

- Sensado periódico o continuo: esta característica busca el espectro libre en intervalos de tiempo determinados.
- Reporte automático de condiciones espectrales: se registra el histórico y tendencias de uso.

- Gestión de eventos de interferencia: incluyendo alarmas y registros para acciones correctivas.

3.2.2.2. *Integración con la infraestructura existente*

El sistema de radio cognitiva tiene que operar sin requerir la reestructuración total de la red de transporte del canal, se integraría con:

- Transceptores existentes mediante interfaces IP o módulos SDR
- Equipos de transmisión TDT ya instalados,
- Gestores de red para monitorización.

3.2.2.3. *Coordinación y seguridad espectral*

El uso de radio cognitiva requiere poseer las siguientes características:

- Protocolos de desconexión instantánea al momento que un usuario primario es detectado.
- Mecanismos de cooperación cuando existen múltiples usuarios.
- Gestión de interferencia sin afectar servicios críticos.

3.2.3. *Parámetros Regulatorios según la Normativa Ecuatoriana*

Considerando el contexto ecuatoriano la gestión del espectro está regulada por las siguientes entidades:

- Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT) con sus respectivos reglamentos.
- ARCOTEL entidad encargada del otorgamiento, modificación y monitoreo del uso del espectro.
- Plan Nacional de Frecuencias (PNF) que establece la atribución y uso de bandas específicas.

Entre los principales requisitos solicitados están los títulos habilitantes, concesión de frecuencias y el cumplimiento respectivo del plan de frecuencias, lo cual se detalla a continuación.

3.2.3.1. *Título habilitante y concesión de frecuencias*

Para poder utilizar el espectro a nivel profesional, se requiere contar con un título habilitante otorgado por ARCOTEL, así como con un registro actualizado de frecuencias y parámetros técnicos aprobados.

3.2.3.2. *Modificación de parámetros técnicos*

Las modificaciones tales como cambios de potencia, ancho de banda o coordenadas de transmisión necesita la presentación ante ARCOTEL de formularios y justificaciones técnicas específicas, de acuerdo con lo que menciona la normativa técnica vigente.

3.2.3.3. *Cumplimiento del Plan Nacional de Frecuencias*

La utilización de cualquier banda espectral se debe ajustar estrictamente al PNF, sus parámetros técnicos y las respectivas directrices nacionales e internacionales, como lo son las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones – UIT, se integran en el PNF.

Como se menciona con anterioridad, en la **Tabla 11** se muestran los principales requerimientos tanto técnicos como operativos y de regulación necesarios para la implementación de la Radio Cognitiva.

Tabla 11.

Requerimientos para Gestión del Espectro con Radio Cognitiva

Área	Requerimiento	Descripción
Técnico	Sensado continuo del espectro	Detectar huecos y actividad primaria
	Gestión dinámica de canales	Asignación y reconfiguración automáticas

	Parámetros adaptativos de transmisión	Potencia, frecuencia, modulación
Operativo	Monitoreo automático	Alertas y registros en tiempo real
	Integración con infraestructura existente	Compatibilidad con equipos actuales
	Seguridad espectral	Protocolos de desconexión inmediata
Normativo	Títulos habilitantes vigentes	Concesión de uso de frecuencias
	Modificaciones técnicas autorizadas	Cambios aprobados por ARCOTEL
	Conformidad con PNF	Uso dentro de canales permitidos

Según menciona la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT) en su artículo 9 que el espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado de dominio público, cuya administración, regulación y control es exclusiva al Estado por medio de la ARCOTEL. En base a ello, el artículo 66 señala que la operación de cualquier sistema de radiocomunicación está condicionada a la obtención previa de un título habilitante, concesión o autorización en donde se indique específicamente las condiciones técnicas de uso, las bandas de frecuencia asignadas, los parámetros de emisión y las obligaciones del concesionario.

Considerando el marco normativo actual, es técnica y jurídicamente evidente que la implementación operativa de un sistema de Radio Cognitiva (RC) en bandas licenciadas de televisión como lo es la banda UHF (470 a 698 MHz) caería en infracciones si no se posee un instrumento habilitante específico en donde se autorice el acceso dinámico al espectro y el uso de técnicas de compartición de frecuencias. El título habilitante que posee actualmente el canal UTV no considera que exista usuarios secundarios o que se pueda acceder al espectro de forma dinámica, lo cual es el paradigma de este tipo de sistemas de radio cognitiva. Debido a ello, operar el sistema

propuesto sin una modificación formal de la concesión o sin una habilitación experimental emitida por ARCOTEL sería una infracción a los artículos 9 y 66 de la LOT, así como a las disposiciones del Plan Nacional de Frecuencias que se encuentra vigente.

Esta problemática identificada constituye un vacío legal de carácter estructural en el ordenamiento jurídico ecuatoriano debido a que no existe hasta la fecha de realización de este estudio una norma técnica específica, una resolución de ARCOTEL ni una disposición reglamentaria en donde se defina el régimen de autorización, las condiciones de operación, los mecanismos de protección al usuario primario, los límites de potencia para usuarios secundarios ni los procedimientos de certificación de equipos de radio cognitiva en bandas licenciadas. Esta ausencia una normativa específica ha sido identificada en estudios anteriores como el de Vega (2020) y Carro et al. (2019), en donde se menciona que esta tecnología actualmente en el Ecuador tiene un confinamiento únicamente para desarrollos experimentales debido a la ausencia de normativa para el despliegue comercial o institucional.

Las consecuencias prácticas de este vacío legal conllevan que ningún canal de televisión ya sea público o privado puede de forma legítima o regulada adoptar tecnología de radio cognitiva en sus bandas concesionadas de radiodifusión, pese a que se tenga la capacidad técnica para realizarlo. Esto conlleva que la propuesta desarrollada en la presente investigación, pese a que es técnica y económicamente viable, no puede ejecutarse en el corto plazo sin que previamente se desarrolle el marco regulatorio que lo autorice.

3.3 Diseño del plan de implementación de la radio cognitiva

El diseño del plan de implementación de la tecnología de radio cognitiva en el canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte necesita de una planificación estructurada la cual permita que se incorpore de forma progresiva, sin afectar la continuidad del servicio ni incumplir

el marco regulatorio vigente. La arquitectura propuesta se conforma como la base del plan de implementación, definiendo la forma en que los componentes cognitivos se integran con la infraestructura existente de transmisión, transporte y monitoreo del canal de televisión.

3.3.1. *Arquitectura del Sistema de Radio Cognitiva*

La arquitectura propuesta para la posible implementación de radio cognitiva en el canal de televisión UTV se basa en un modelo híbrido y escalable, el cual combina la infraestructura que se tiene actualmente para la radiodifusión con nuevos módulos cognitivos los cuales se encargarían de la gestión inteligente del espectro. En base a este enfoque se podrían introducir capacidades avanzadas de sensado, decisión y adaptación espectral sin necesitar la sustitución total de los equipos existentes, lo cual es fundamental para la viabilidad técnica y económica de la propuesta.

Considerando un punto de vista funcional, la arquitectura está estructurada en cuatro capas principales: capa de percepción, capa de gestión y decisión, capa de adaptación y ejecución, y capa de supervisión y control. Cada una de estas ejecuta funciones específicas dentro del ciclo cognitivo y se integra con los elementos actuales del canal de televisión. A continuación se detalla cada una de las capas definidas para esta propuesta.

3.3.1.1. *Capa de Percepción del Espectro (Spectrum Sensing Layer)*

La capa de percepción es el primer nivel de la arquitectura y tiene como función principal observar de forma continua el entorno radioeléctrico. De forma específica, en el canal de televisión UTV analizado, esta capa se implementaría con módulos de sensado espectral ubicados en los principales nodos de la red: estación matriz (Cerro Cotacachi), nodos de distribución (Cerro Cabras y Cerro Pichincha) y, como complemento, en el punto final de emisión (Cerro La Estrellita).

En el caso de los enlaces de microondas, que están conformados por el módem IDU, la unidad de radiofrecuencia IRFU y los módulos de la plataforma SAF Tehnika Phoenix G2, operan

con modulación digital adaptable y poseen funciones de gestión remota a través de interfaces como Ethernet, SNMP, SSH y CLI, lo cual ayuda a acceder a parámetros de monitoreo del enlace tales como RSSI, relación señal-ruido (SNR), tasa de error de bit (BER) y estado de modulación. Estas métricas se utilizarían como indicadores indirectos del estado del canal radioeléctrico, permitiendo implementar técnicas de detección de energía (energy detection) utilizadas en sistemas de radio cognitiva.

Estos módulos se implementarían por medio de radios definidas por software (SDR) o analizadores de espectro embebidos, conectados a las antenas existentes para el monitoreo. La función principal de estos equipos sería la medición de parámetros como nivel de potencia recibida, ocupación de canal, ruido, interferencia y disponibilidad espectral en las bandas utilizadas por el canal de televisión.

El sensado trabajaría bajo condiciones de periodicidad y continuas, con tiempos de muestreo establecidos en los parámetros técnicos observados en la sección anterior. Esta información recolectada se digitalizaría y se enviaría a la capa superior para su análisis, lo cual permitiría detectar tanto la presencia de usuarios primarios como eventos anómalos de interferencia.

En este contexto, para que se pueda viabilizar la adopción de esta tecnología en canales de televisión se debería contemplar mínimamente los siguientes elementos de política pública:

- Emisión por parte de ARCOTEL de una resolución en donde se defina el régimen de licencias experimentales para sistemas de radio cognitiva en bandas de radiodifusión.
- Elaboración de una norma técnica en donde se indiquen los parámetros máximos de emisión para usuarios secundarios en la banda UHF, mecanismos de detección de usuarios primarios y estándares de certificación de equipos SDR.

- Incorporación en el Plan Nacional de Frecuencias de una categoría de uso dinámico y secundario del espectro para entidades educativas e institucionales.
- Actualización del Reglamento General a la LOT para reconocer explícitamente la figura del usuario secundario en redes de radio cognitiva.

3.3.1.2. *Capa de Gestión y Decisión Cognitiva (Cognitive Engine Layer)*

La capa de gestión y decisión representa la parte central que da la inteligencia del sistema de radio cognitiva. En esta capa se procesarían los datos registrados por medio del módulo de sensado lo que permitiría analizar el estado del espectro y tomar decisiones sobre el uso óptimo de las frecuencias disponibles.

Este módulo se implementaría como un servidor centralizado, el cual debería ubicarse en la estación matriz del canal de televisión, o también se lo podría realizar como un sistema distribuido con nodos de decisión locales en cada sitio crítico. El motor cognitivo ejecutaría los algoritmos de decisión que se basan en los parámetros técnicas predeterminados y técnicas de inteligencia artificial, en donde se evaluarían las variables como disponibilidad de canales, niveles de interferencia, prioridad del servicio, requisitos de calidad y restricciones.

Este servidor debería poseer una infraestructura de procesamiento capaz de manejar grandes volúmenes de datos que provienen de los diferentes nodos de sensado y de los sistemas de monitoreo de la red. Con respecto al hardware, se requeriría que este equipo posea un procesador multinúcleo, preferiblemente de arquitectura x86-64, con al menos 8 a 16 núcleos de procesamiento, lo cual permitiría ejecutar algoritmos de análisis espectral de forma simultánea, procesos de aprendizaje automático y servicios de comunicación con los nodos de la red. Con respecto a la memoria, se requeriría un mínimo de 32 GB de memoria RAM para que pueda

soportar el procesamiento en tiempo real de datos de monitoreo, ejecución de modelos de inteligencia artificial y almacenamiento temporal de registros de espectro.

Con respecto al almacenamiento, el sistema necesitaría de unidades SSD de alta velocidad, con capacidades de 1 TB o superiores, configuradas en arreglos RAID que garanticen la redundancia y disponibilidad de la información. Este almacenamiento mantendría las bases de datos de ocupación del espectro, registros de interferencia, métricas de desempeño de la red y resultados de los algoritmos de análisis. Con respecto a la conectividad, se debería tener interfaces de red Gigabit o 10 Gigabit Ethernet, que permitirían la comunicación con los nodos de sensado, transmisores, enlaces STL y sistemas de gestión de red mediante protocolos como SNMP, REST API, SSH o MQTT, lo que facilitaría la recopilación de métricas y el envío de comandos de reconfiguración dinámica.

En lo referente al software, el servidor debería operar sobre sistemas operativos como Ubuntu Server o Red Hat Enterprise Linux, los cuales permiten estabilidad y soporte para aplicaciones de análisis de datos. Esta capa tendría la capacidad de decidir, si existe la necesidad de ajustar parámetros de transmisión frente a la detección de interferencia, cambiar temporalmente de canal dentro del rango autorizado, o modificar la potencia de emisión para conservar la calidad del servicio sin generar afectaciones a otros usuarios del espectro.

3.3.1.3. *Capa de Adaptación y Ejecución (Reconfigurable Radio Layer)*

La capa de adaptación se encargaría de ejecutar las decisiones tomadas por el motor cognitivo, actuando de forma directa en los equipos de transmisión y transporte del canal de televisión. Esta capa estaría integrada con los transmisores de televisión, enlaces de microondas y encoders, aprovechando las capacidades de configuración por software e interfaces IP disponibles en la infraestructura existente.

A través de esta capa, el sistema cognitivo realizaría ajustes dinámicos de parámetros tales como la frecuencia de operación, potencia de transmisión, ancho de banda, modulación o bitrate, manteniendo siempre estas variables dentro de los límites establecidos por la concesión y la normativa. Si no existen equipos que soporten la reconfiguración directa, se utilizarían módulos intermedios SDR como interfaces inteligentes para la integración entre el motor cognitivo y el hardware legado, esto se lo identificaría en base a un análisis de compatibilidad de los equipos actuales de la hoja de especificaciones con las características solicitadas por la capa de adaptación.

Este enfoque permitiría que la propuesta de radio cognitiva funcione como un sistema de apoyo y optimización, sin interferir de forma directa con la lógica principal de transmisión del canal de televisión, disminuyendo los riesgos operativos durante la fase de implementación.

3.3.1.4. *Capa de Supervisión, Control y Cumplimiento Regulatorio*

La última capa de la arquitectura propuesta corresponde al sistema de supervisión y control, el cual está encargado de garantizar que la operación del sistema cognitivo sea segura, trazable y conforme a las regulaciones establecidas. Dentro de esta capa se incluiría la incorporación de herramientas de monitoreo visual, registro de eventos, generación de reportes técnicos y alarmas operativas.

En este nivel se supervisaría el estado del espectro, comportamiento de los algoritmos cognitivos y las acciones ejecutadas sobre cada uno de los equipos. De igual manera, en esta capa se generarían reportes históricos los cuales se puedan utilizar como respaldo técnico frente alguna auditoría de ARCOTEL, lo que demostraría que el uso del espectro se encuentra dentro de los parámetros autorizados.

3.3.2. *Fases del Proceso de Implementación de la Radio Cognitiva*

La posible implementación de la tecnología de radio cognitiva en el canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte debería ser considerada como un proceso gradual y estructurado, buscando la reducción de riesgos técnicos, mantener la continuidad del servicio y asegurar el cumplimiento de las regulaciones vigentes. Para esto, se propone un plan de implementación el cual se divide en fases secuenciales que se muestra en la **Tabla 12**, y las cuales se presentan a detalle a continuación.

Tabla 12.

Fases del Proceso de Implementación

Fase	Objetivo principal	Actividades clave	Resultado esperado
Fase 1	Planificación técnica	Levantamiento de datos, mediciones espectrales	Documento técnico base
Fase 2	Diseño funcional	Definición de algoritmos y parámetros	Modelo lógico validado
Fase 3	Piloto	Instalación y pruebas controladas	Sistema cognitivo operativo
Fase 4	Evaluación	Medición de desempeño y cumplimiento	Informe técnico de resultados
Fase 5	Optimización	Ajustes y expansión gradual	Sistema optimizado y escalable
Fase 6	Operación	Integración y mantenimiento	Operación estable a largo plazo

3.3.2.1. *Fase 1: Levantamiento de información y planificación técnica*

La primera fase de la implementación consistiría en la recopilación y validación de la información técnica para el diseñar de manera detallada el sistema cognitivo. Se consolidarían los datos obtenidos en el diagnóstico técnico, incluyendo el inventario de equipos, frecuencias asignadas, potencias de transmisión, topología de la red y procedimientos operativos actuales del canal de televisión.

De igual forma, se realizaría una caracterización del entorno espectral mediante mediciones, utilizando analizadores de espectro o módulos SDR. Estas medidas permitirían establecer patrones de ocupación del espectro, identificando horarios críticos de interferencia y validando los umbrales de detección predeterminados.

3.3.2.2. *Fase 2: Diseño lógico y funcional del sistema cognitivo*

En la segunda fase de la propuesta se desarrollaría el diseño lógico del sistema de radio cognitiva, el cual estaría alineado con la arquitectura propuesta en la sección anterior. En esta etapa se incluiría la definición de las funciones de cada capa del sistema, los flujos de información entre módulos y los algoritmos de decisión que se emplearían para la gestión del espectro.

De igual forma, se seleccionarían los parámetros técnicos operativos, tales como tiempos de sensado, umbrales de detección, potencias máximas permitidas y políticas de adaptación, además se definirían las reglas de coexistencia con los usuarios primarios y los procedimientos automáticos de liberación de canal frente a la detección de interferencias.

En esta fase se obtendría un modelo funcional del sistema, que se validaría por medio de simulaciones previo a la implementación en campo.

3.3.2.3. *Fase 3: Implementación piloto del sistema de radio cognitiva*

La tercera fase correspondería a la implementación del sistema cognitivo en un entorno controlado. Inicialmente se realizaría un proyecto piloto, el cual se limitaría a uno de los enlaces críticos del canal, como el enlace STL entre los estudios de Ibarra y la estación matriz en el Cerro Cotacachi, o un nodo secundario como el Cerro Cabras.

Se especificarían los módulos de sensado espectral, motor cognitivo e interfaces de comunicación con los equipos existentes. El sistema se configuraría de forma inicial en modo pasivo o de observación, donde realizaría el sensado y análisis del espectro sin modificar ningún parámetro de transmisión, esto para poder validar la confiabilidad de las mediciones y los algoritmos de decisión.

Posteriormente, se habilitarían las funciones de adaptación, como alertas automáticas o ajustes de potencia dentro de márgenes seguros, manteniendo la supervisión técnica directa del personal operativo.

3.3.2.4. *Fase 4: Evaluación técnica, operativa y regulatoria*

Una vez implementado el piloto, se realizaría la evaluación integral del sistema. En esta fase se analizaría el desempeño del sistema cognitivo en condiciones reales de operación, comparando indicadores antes y después de la implementación.

Entre los aspectos evaluados se incluiría la reducción de eventos de interferencia, la estabilidad de la señal, eficiencia en el uso del espectro y confiabilidad del sistema de sensado. De igual manera, se verificaría el cumplimiento de los límites regulatorios con respecto a la potencia, frecuencia y tiempo de respuesta frente a la detección de usuarios primarios.

Los resultados se documentarían en informes técnicos que se utilizarían como respaldo para la toma de decisiones y para procesos de autorización o notificación frente a la autoridad reguladora.

3.3.2.5. *Fase 5: Ajustes, optimización y escalamiento*

En función de los resultados de la fase de evaluación, se aplicarían al sistema cognitivo, tanto a nivel de parámetros técnicos como de algoritmos de decisión. En esta etapa se optimizaría el desempeño del sistema, se corregirían posibles fallas detectadas en la fase piloto y se adaptaría la solución considerando condiciones reales del entorno espectral del canal.

Una vez validados los ajustes, se realizaría el escalamiento progresivo del sistema hacia otros nodos de la red del canal, como los enlaces hacia Pichincha, Cabras, Troya Alto y La Estrellita. Este proceso se realizaría de forma controlada, basados en la arquitectura y los parámetros validados en durante el piloto inicial.

3.3.2.6. *Fase 6: Operación continua y mantenimiento*

Durante la fase final se realizaría la operación permanente del sistema de radio cognitiva. En esta etapa, el sistema estaría integrado plenamente a los procedimientos operativos del canal, en donde se incluirían rutinas de monitoreo, mantenimiento preventivo y actualización de software. Se determinarían protocolos de respaldo y operación manual que puedan garantizar la continuidad del servicio frente a fallas del sistema cognitivo. Finalmente se establecerían mecanismos de capacitación técnica para el personal del canal, garantizando la sostenibilidad del sistema a largo plazo.

3.3.3. *Análisis de Viabilidad Técnica, Operativa y Económica*

El análisis de viabilidad determina si la implementación de la propuesta de radio cognitiva en el canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte es factible desde los puntos de vista

técnico, operativo y económico. Este análisis está apoyado en el diagnóstico realizado anteriormente, en los requerimientos establecidos para la gestión del espectro y en la arquitectura y fases de implementación que se encuentran propuestas en este estudio, lo que permitiría evaluar los beneficios, limitaciones y condiciones requeridas para su adopción.

3.3.3.1. *Viabilidad Técnica*

Considerando el punto de vista técnico, la viabilidad de la radio cognitiva en el canal de televisión UTV está sustentando en la compatibilidad entre la infraestructura existente y los requerimientos tecnológicos de los sistemas cognitivos. El canal posee transmisores preparados para operación analógica y digital, enlaces de microondas con configuración por software e interfaces IP, y una arquitectura de red distribuida la cual facilitaría la incorporación de módulos adicionales de sensado y control, lo cual se basa en la identificación de compatibilidad observada anteriormente.

La integración de SDR como módulos de sensado espectral permitiría la implementación de capacidades cognitivas sin requerir la intervención directa del núcleo de transmisión del canal. Estos módulos podrían operar paralelamente, recolectando información del entorno radioeléctrico y alimentando al motor cognitivo sin afectar la emisión principal. De igual forma, la existencia de puntos estratégicos de la red facilitaría el despliegue de la solución propuesta.

Por su parte, los parámetros técnicos tales como umbrales de detección, tiempos de sensado, potencias máximas y probabilidades de detección se podrían alcanzar con la tecnología comercial disponible, confirmando la factibilidad técnica del sistema. En la **Tabla 13** se muestra la evaluación de la viabilidad técnica del sistema propuesto.

Tabla 13.

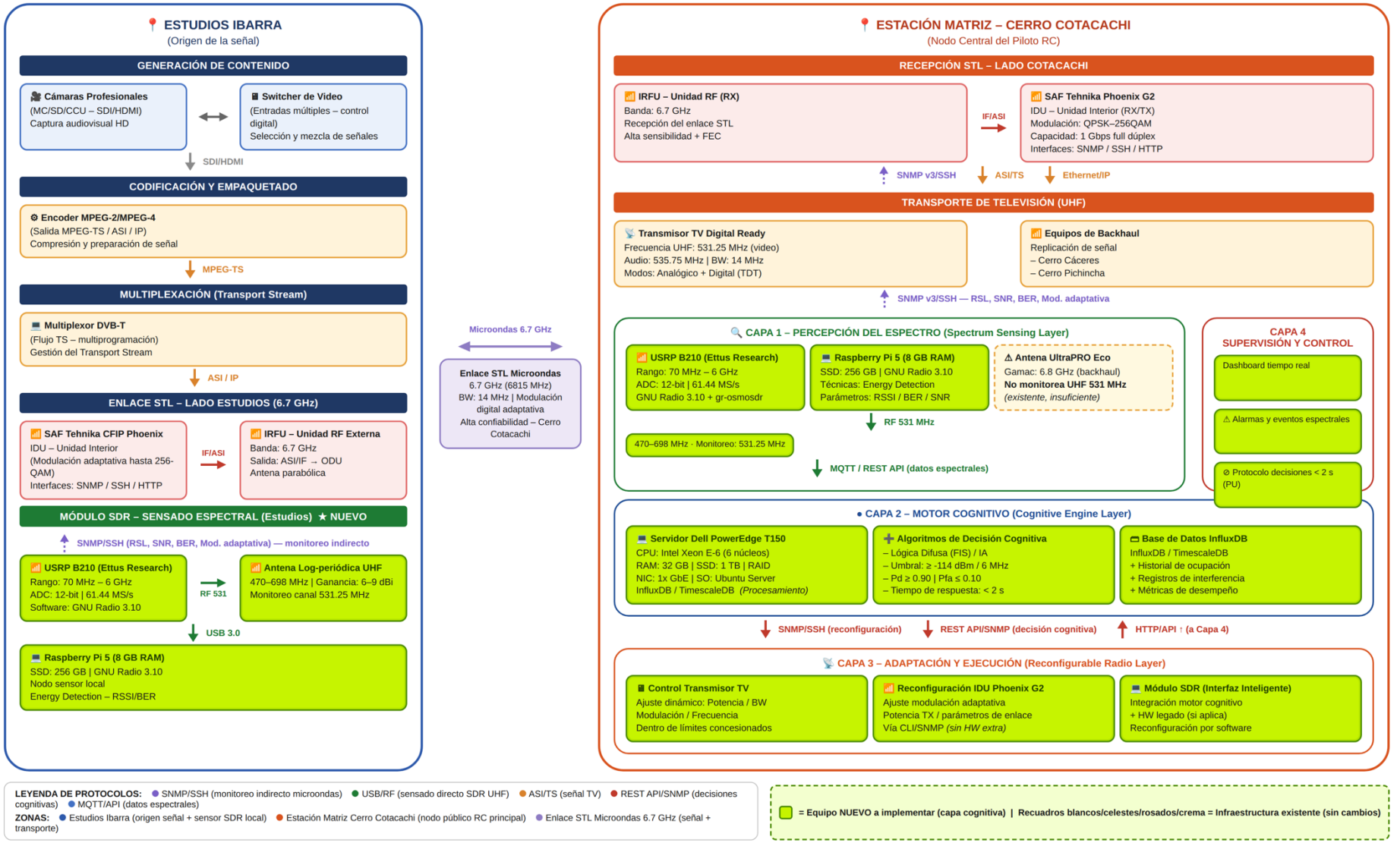
Evaluación de Viabilidad Técnica de la Propuesta

Elemento técnico	Estado en el canal UTV	Compatibilidad con RC	Observación
Transmisores TV	Analógico/Digital	Alta	Preparados para TDT
Enlaces de microondas	Banda 6 GHz, configurables	Alta	Compatibles con monitoreo
Interfaces IP	Disponibles	Alta	Facilitan integración
Analizador de espectro	Interno	Alta	Propio del Enlace que entrega métricas importantes
Capacidad de reconfiguración	Parcial	Media–Alta	Posible vía software

Como se muestra en la **Figura 16**, el esquema de red planteado para la fase piloto establece cada uno de los dispositivos y parámetros que deben conformar el sistema, en donde se incluyen los equipos de transmisión, recepción, codificación, moduladores propios de la empresa y como se interconectan con la arquitectura de la capa cognitiva planteada.

Figura 16.

Esquema de Arquitectura Piloto para el Sistema de Radio Cognitiva



3.3.3.2. *Acople de Impedancias*

El parámetro principal para evaluar las impedancias es el Coeficiente de Reflexión (Γ), del cual se puede obtener el VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) y la Pérdida de Retorno (Return Loss – RL). La compatibilidad de impedancias se comprueba mediante las Ecuaciones 1 a 4, que se aplican a cada interfaz de la cadena de RF del sistema de sensado propuesto:

$$\Gamma = (ZL - ZS) / (ZL + ZS) \quad (1)$$

$$VSWR = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|) \quad (2)$$

$$RL = -20 \cdot log_{10}(|\Gamma|) \ [dB] \quad (3)$$

$$\eta = (1 - |\Gamma|^2) \times 100 \ [\%] \quad (4)$$

donde ZS es la impedancia de la fuente, ZL es la impedancia de carga, $|\Gamma|$ es el módulo del coeficiente de reflexión, RL es la pérdida de retorno en decibelios y η es la eficiencia de transferencia de potencia, según las Ecuaciones 1 a 4. Para una transferencia óptima se necesita que $ZL = ZS$, lo que genera $\Gamma = 0, VSWR = 1{:}1$ y $\eta = 100\%$. En la **Tabla 14** se presenta el listado de todos los equipos propuestos con sus respectivas impedancias nominales y tipos de conector, lo cual es indispensable para el análisis de compatibilidad.

Tabla 14.

Impedancias nominales y conectores de los equipos propuestos

Equipo / Componente	**Modelo / Referencia**	**Impedancia nominal (Ω)**	**Tipo de conector RF**	**Norma aplicable**	**Observación**
Módulo SDR (sensado)	USRP B210 (Ettus Research)	50 Ω	SMA hembra × 2	MIL-STD-348	Puertos RX/TX SMA 50 Ω;

					rango 70 MHz – 6 GHz
Antena de sensado UHF	Antena logarítmica UHF 470-698 MHz	50 Ω	N hembra	IEC 61169-16	Impedancia de radiación 50 Ω; ganancia 6–9 dBi
Cable coaxial de interconexión	RG-213/U o LMR-400	50 Ω	N macho / SMA macho	MIL-C-17	Pérdida típica: 2.7 dB/100m @ 500 MHz
Enlace microondas (IDU)	SAF Tehnika Phoenix G2 / CFIP Phoenix	50 Ω	N hembra (RF) / RJ-45 (IP)	IEC 61169-16	Puerto RF 50 Ω; gestión vía IP (Ethernet)
Transmisor TDT UHF	Transmisor Digital Ready (instalado en sitios)	50 Ω	N hembra	ITU-R BT.1306	Salida RF 50 Ω; compatible con antenas UHF broadcast
Nodo embebido (SDR host)	Raspberry Pi 5 (8 GB RAM)	N/A (digital)	USB 3.0 / Ethernet	USB 3.2 Gen 1	Interfaz digital; no aplica impedancia RF

Las especificaciones técnicas completas de estos equipos, obtenidas de las fichas técnicas oficiales de cada fabricante, se detallan en el Anexo 3.

Aplicando las Ecuaciones 1 a 4 a cada interfaz de la cadena de RF del sistema de sensado, considerando las impedancias nominales de la **Tabla 14**, se obtendrían los resultados que se

muestran en la **Tabla 15.** Cálculo de compatibilidad de impedancias por interfaz de la cadena de RF. La resolución detallada de estas ecuaciones para cada interfaz se presenta en el Anexo 4.

Tabla 15.

Cálculo de compatibilidad de impedancias por interfaz de la cadena de RF

Interfaz	**ZS (Ω)**	**ZL (Ω)**	**VSWR**	**RL (dB)**	**η (%)**
USRP B210 (puerto RX/TX) ↔ Cable coaxial	50	50	1.00:1	∞ (ideal)	100
Cable coaxial ↔ Antena de sensado UHF	50	50	1.00:1	∞ (ideal)	100
Cable coaxial ↔ Enlace microondas IDU (SAF Tehnika/CFIP Phoenix)	50	50	1.00:1	∞ (ideal)	100
Cable coaxial ↔ Transmisor TDT UHF	50	50	1.00:1	∞ (ideal)	100

Dado que todos los equipos de la cadena de RF comparten una impedancia nominal de 50 Ω, el coeficiente de reflexión resultante sería nulo ($\Gamma = 0$), lo que indicaría una adaptación de impedancias ideal (VSWR = 1.00:1) y una eficiencia de transferencia de potencia teórica del 100% en cada interfaz. En la práctica, las tolerancias de fabricación y las transiciones entre conectores introducirían un VSWR ligeramente superior a 1.00:1 y una pérdida de retorno finita, aunque suficientemente alta (comúnmente superior a 30-40 dB en conectores tipo N y SMA de calidad comercial) como para no comprometer el desempeño del sistema de sensado propuesto.

3.3.3.3. *Protocolos de comunicación por capa arquitectónica*

La selección de protocolos se basa en los principios de interoperabilidad con la infraestructura IP que existe en el canal, mínima latencia para la toma de decisiones en tiempo real, y cumplimiento de los requerimientos de seguridad necesarios para la operación en entornos de radiodifusión regulada. En **Tabla 16** se aprecian los protocolos principales y los protocolos complementarios para cada capa de la arquitectura propuesta.

Tabla 16.

Protocolos de comunicación por capa arquitectónica del sistema de radio cognitiva

Capa arquitectónica	Protocolo principal	Protocolos complementarios
Capa 1 – Percepción del espectro	UHD sobre USB 3.0 / GigE	gr-osmosdr (GNU Radio) TCP/IP NTP
Capa 2 – Gestión y decisión cognitiva	MQTT v5 (Message Queuing Telemetry Transport)	InfluxDB Line Protocol REST API Python asyncio
Capa 3 – Adaptación y ejecución	SNMP v3 + API REST propietaria SAF Tehnika vía TCP/IP	SSH NETCONF/YANG
Capa 4 – Supervisión, control y cumplimiento regulatorio	HTTP/REST + Syslog (RFC 5424) + NTP (RFC 5905)	HTTPS/TLS 1.3 SMTP SNMPv3 WebSocket

La integración de los protocolos establecidos sigue una arquitectura de comunicación en cascada, en donde el módulo SDR realiza la recolección de las muestras del espectro en 533 MHz y las transmite al motor cognitivo mediante MQTT con QoS-1, lo que garantiza la entrega sin pérdidas a una tasa de hasta 1.000 mensajes/segundo. El motor cognitivo procesa los datos, almacena las series temporales en InfluxDB y emite comandos de adaptación hacia los equipos SAF Tehnika vía SNMP v3, con cifrado AES-128 y autenticación SHA-256.

La capa de supervisión consolida toda la información en dashboards accesibles por HTTP/REST, generando registros Syslog de cada evento para trazabilidad regulatoria ante ARCOTEL. La sincronización temporal frente a todos los nodos se garantiza mediante NTP con precisión, lo cual es una condición indispensable para la operación SFN del canal en los cuatro sitios de transmisión.

3.3.3.4. *Definición de Frecuencias*

El canal de televisión UTV de la UTN opera bajo un título habilitante el cual fue otorgado por ARCOTEL en el Canal 24 UHF, cuya frecuencia central es de 533 MHz, con un rango de banda de 530 a 536 MHz, de acuerdo con el Plan Nacional de Frecuencias. La frecuencia central se obtiene mediante la Ecuación 5:

$$fc = 473 + (N - 14) \times 6 \ [MHz] \qquad (5)$$

$$fc = 473 + (24 - 14) \times 6 = 473 + 60 = 533\,MHz$$

donde $N = 24$ corresponde al número de canal UHF asignado en la Ecuación 5. El canal ocupa un ancho de banda de 6 MHz, lo cual es estándar para todos los canales de televisión digital terrestre en el Ecuador que se encuentran sobre la norma ISDB-Tb.

Los cuatro sitios de transmisión que forman toda la red UTV operan en modalidad de Red de Frecuencia Única, transmitiendo de forma simultánea el Canal 24 UHF (533 MHz). Esta

configuración SFN permite que los transmisores distribuidos en distintas provincias compartan la misma frecuencia portadora sin interferencia co-canal entre sí. En la **Tabla 17** se presentan las frecuencias asignadas con las respectivas provincias de cobertura y potencias nominales ERP de cada sitio transmisor de la red.

Tabla 17.

Frecuencias asignadas por ARCOTEL para la red UTV

Sitio transmisor	Provincia / Cobertura	Canal UHF	Frec. central (MHz)	Rango de banda (MHz)	Pot. ERP nominal (W)
Cerro Cotacachi (Estación Matriz)	Imbabura (Ibarra, Otavalo, Cotacachi, Antonio Ante)	24	533	530 – 536	200
Cerro Cabras (Nodo secundario)	Imbabura / Carchi (zona fronteriza norte – Tulcán, Mira)	24	533	530 – 536	100
Cerro Pichincha (Nodo Pichincha)	Pichincha (Quito, Distrito Metropolitano, sur de la provincia)	24	533	530 – 536	500
Cerro La Estrellita	Imbabura / Carchi (zona interandina, complementario)	24	533	530 – 536	50

(Punto final de emisión)

El USRP B210 debería sintonizarse al canal 24 UHF como frecuencia de referencia para detectar la actividad del usuario primario que corresponde al canal UTV y los huecos espectrales disponibles en las bandas adyacentes como el Canal 23: 527 MHz y Canal 25: 539 MHz, conforme a los algoritmos de detección de energía configurados en la plataforma GNU Radio 3.10.

3.3.3.5. *Viabilidad Operativa*

La viabilidad operativa permite analizar la capacidad del canal de televisión para operar, mantener y supervisar un sistema de radio cognitiva sin interferir en los procesos habituales. La solución propuesta en este estudio no sustituye los procedimientos existentes, sino que sirve como complemento que utilizaría la automatización y monitoreo inteligente del espectro.

El personal técnico del canal actualmente realizaría tareas periódicas de mantenimiento y supervisión, lo que ayudaría a la incorporación de nuevos procedimientos relacionados con el sistema cognitivo, tales como el análisis de reportes espectrales, la validación de eventos de interferencia y la gestión de alarmas. Esta capa de supervisión permitiría mantener el control humano sobre la toma de decisiones críticas, lo cual es relevante para la aceptación institucional de la tecnología.

Considerando el punto de vista regulatorio, la radio cognitiva operaría principalmente en modo pasivo o de observación, sin modificar parámetros concesionados, lo cual disminuiría las barreras administrativas en las primeras etapas de la implementación. Cuando el sistema sea más escalable, cualquier cambio operativo importante debería ser gestionado mediante los procedimientos establecidos por la ARCOTEL, apoyándose en los reportes técnicos generados por

el sistema. En la **Tabla 18** se muestra el resumen de los aspectos operativos más relevantes y como influirían en el impacto para la implementación de la Radio Cognitiva propuesta.

Tabla 18.

Evaluación de Viabilidad Operativa

Aspecto operativo	Situación actual	Impacto de RC	Nivel de viabilidad
Continuidad del servicio	Operación estable	No afectada	Alta
Monitoreo del espectro	Periódico (externo)	Continuo y automatizado	Alta
Capacitación del personal	Básica en RF	Requiere capacitación adicional	Media
Gestión de interferencias	Reactiva	Proactiva	Alta
Cumplimiento regulatorio	No existe normativa regulatoria	No se puede Implementar	Baja

3.3.3.6. *Viabilidad Económica*

Por su parte, el análisis económico permite determinar si la implementación de la radio cognitiva es financieramente razonable para un canal de televisión universitario, tomando en cuenta que estas instituciones trabajan generalmente con presupuestos limitados. Debido a esto, la arquitectura propuesta daría prioridad al uso de equipamiento adicional de bajo costo relativo, evitando la sustitución de transmisores o enlaces existentes.

Los principales costos relacionados con el proyecto corresponderían a la adquisición de módulos SDR, servidores para el motor cognitivo, software de gestión y capacitación técnica del personal. Estos valores se concentrarían principalmente en la fase piloto y pueden ser escalados progresivamente dependiendo de los resultados obtenidos. Por otro lado, los beneficios económicos esperados, estarían relacionados con la reducción de eventos de interferencia, menor dependencia de servicios externos de medición, optimización del uso del espectro y disminución de riesgos relacionados con sanciones regulatorias por uso ineficiente o indebido del espectro.

Tomando en cuenta un punto de vista costo–beneficio, la radio cognitiva se presentaría como una inversión estratégica de mediano plazo, considerando la transición a televisión digital terrestre y la creciente presión sobre el espectro radioeléctrico. En la **Tabla 19** se muestra la estimación cualitativa inicial del impacto que se esperaría en relación con el costo beneficio de la implementación de la Radio Cognitiva propuesta.

Tabla 19.

Estimación Cualitativa de Costos y Beneficios

Concepto	Tipo	Impacto esperado
Módulos SDR y sensores	Costo inicial	Medio
Servidor/motor cognitivo	Costo inicial	Bajo–Medio
Software y licencias	Costo	Bajo
Capacitación técnica	Costo	Bajo
Reducción de interferencias	Beneficio	Alto
Optimización del espectro	Beneficio	Alto
Preparación para TDT	Beneficio estratégico	Muy alto

Como se muestra en la **Tabla 20**, la implementación de radio cognitiva no requeriría reemplazar la infraestructura existente, lo cual disminuye de manera significativa la inversión inicial. El costo principal estaría concentrado en la adquisición de sensores SDR distribuidos y un servidor para el motor cognitivo, componentes que permitirían realizar el monitoreo continuo del espectro y ejecutar los algoritmos de decisión. La inversión estimada para una fase piloto se establecería en aproximadamente entre 8.000 y 10.000 USD, siendo un valor relativamente bajo en comparación con proyectos de modernización completos de infraestructura de radiodifusión.

Tabla 20.

Estimación económica para la implementación de radio cognitiva

Categoría	Equipamiento	Modelo Referencial	Estado	Costo (USD)
Infraestructura actual	Enlace STL microondas (IDU + IRFU)	SAF Tehnika Phoenix G2 / CFIP Phoenix	Existente	—
	Módulo ASI STL	Módulo integrado SAF Tehnika	Existente	—
	Transmisor UHF digital – Cojitambo	Digital Ready (marca instalada)	Existente	—
	Transmisor UHF digital – Cabras	Digital Ready (marca instalada)	Existente	—
	Transmisor UHF digital – La Estrellita	Digital Ready (marca instalada)	Existente	—
	Transmisor UHF digital – Pichincha	Digital Ready (marca instalada)	Existente	—

Sensado de espectro	Módulo SDR para monitoreo espectral UHF (531 MHz)	USRP B210 (Ettus Research) – 70 MHz a 6 GHz, 12-bit ADC, 61.44 MS/s	Nuevo	$1,800
	Antenas de banda ancha UHF/VHF	Antena logarítmica UHF 470–698 MHz, ganancia 6–9 dBi	Nuevo	$480
	Computador embebido para nodo sensor	Raspberry Pi 5 (8 GB RAM) + almacenamiento SSD 256 GB, GNU Radio 3.10	Nuevo	$1,200
Motor cognitivo	Servidor de procesamiento central	Servidor Dell PowerEdge T150 / equivalente: Intel Xeon, 32 GB RAM, SSD 1 TB RAID-1, interfaces 10GbE	Nuevo	$2,500
	Sistema de almacenamiento y base de datos	Disco SSD externo 2 TB (WD Red / Seagate IronWolf NAS) + InfluxDB / TimescaleDB (open source)	Nuevo	$600
Software y desarrollo	Plataforma de análisis SDR y monitoreo	GNU Radio 3.10 (open source) + gr-osmosdr + módulos	Nuevo	$800

		de energy detection y WLAN sensing		
	Software de gestión y visualización	Grafana + InfluxDB (open source) / GNSS-SDR	Nuevo	$500
Capacitación	Capacitación técnica en SDR y radio cognitiva	Curso teórico-práctico GNU Radio / SDR	Nuevo	$700
Costos operativos iniciales	Instalación, configuración y pruebas	Servicio técnico	Nuevo	$600
INVERSIÓN TOTAL				$9,180

La estimación económica observada anteriormente en la **Tabla 20** correspondería a la fase piloto del sistema de radio cognitiva, en donde se considera únicamente la implementación del nodo principal de la estación matriz (Cerro Cotacachi), con un módulo SDR de sensado, un servidor de motor cognitivo centralizado y el software de gestión asociado. Esta delimitación de una fase piloto sirve para limitar el riesgo técnico y económico propio de cualquier proceso de innovación tecnológica, considerando previo al escalamiento hacia todos los nodos de la red, la validación del funcionamiento del sistema para ajustar los algoritmos de detección espectral y establecer los parámetros de configuración óptimos.

Pese a esto, se realiza la proyección del costo total que implicaría la implementación completa del sistema de radio cognitiva en toda la infraestructura del canal. La red de transmisión del canal cuenta con cuatro sitios operativos que requieren instrumentación de sensado como son la estación matriz en el Cerro Cotacachi, el nodo de distribución en el Cerro Cabras, el nodo en el Cerro Pichincha y el punto final de emisión en el Cerro La Estrellita. El Cerro Troya Alto, que

opera como repetidor pasivo de salto técnico, no necesitaría de la incorporación del sensado espectral al no realizar transmisión directa al usuario final.

Como se muestra en la **Tabla 21**, la implementación completa del sistema de radio cognitiva en la totalidad de los nodos de la red UTV implicaría una inversión estimada de $22,220, valor que representa más del doble del costo de la fase piloto. Este valor, pese a que es considerablemente superior al planteado al escenario piloto, se debería analizar para el contexto específico de la institución y compararlo con otros proyectos de modernización de infraestructura de radiodifusión.

Tabla 21.

Proyección económica de la implementación completa del sistema de Radio Cognitiva en los 4 sitios de la red UTV.

Sitio / Nodo	Módulo SDR + antena	Nodo embebido	Instalación y configuración	Subtotal por sitio
Cerro Cotacachi (Estación Matriz) – Piloto	$2,280	$1,200	$600	$4,080
Cerro Cabras (Nodo Secundario)	$2,280	$1,200	$800	$4,280
Cerro Pichincha (Nodo Final)	$2,280	$1,200	$900	$4,380
Cerro La Estrellita (Punto Final de Emisión)	$2,280	$1,200	$900	$4,380

Motor cognitivo central + software (estación matriz)	—	$2,500	$600	$3,100
Software de gestión y visualización (global)	—	$800	$500	$1,300
Capacitación técnica (global)	—	—	$700	$700
INVERSIÓN TOTAL (4 sitios – Implementación completa)				$22,220

Considerando la viabilidad económica total del proyecto, es importante recalcar que la inversión completa de $22,220 se puede considerar como una limitación de factibilidad financiera inmediata, principalmente considerando que está destinada en para un canal universitario que trabaja en base a presupuestos institucionales restringidos. Cabe señalar que todos los valores presentados corresponden a precios de referencia del año 2026 y tienen vigencia únicamente hasta diciembre de 2026, por lo que deberán actualizarse para ejercicios presupuestarios posteriores.

Pese a estas consideraciones, esta limitación no invalida la propuesta, sino más bien resalta la consideración de una estrategia de implementación adecuada, en donde se considere un despliegue progresivo considerando fases económicas diferenciadas.

3.3.4. *Viabilidad Global del Proyecto*

Tomando en cuenta de manera conjunta las dimensiones técnica, operativa y económica, se puede afirmar que la implementación de la tecnología de radio cognitiva en el canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte es viable y coherente con la realidad que tiene la institución**.** La compatibilidad tecnológica, la posibilidad de implementación progresiva y los beneficios demostrados en cuanto a gestión más eficiente del espectro justificarían la implementación de la propuesta planteada.

Finalmente, la adopción de radio cognitiva permitiría posicionar al canal de televisión como una entidad innovadora dentro de la radiodifusión, proporcionando capacidades técnicas que puedan replicarse en otros medios sirviendo como referencia para futuras políticas de gestión dinámica del espectro.

4. Capítulo IV: Análisis de Resultados

4.1 Evaluación de la propuesta de radio cognitiva

- La presente propuesta tiene un nivel de viabilidad elevado, ya que el canal cuenta con una infraestructura de transmisión digital que está preparada para la Televisión Digital Terrestre (TDT) en la banda UHF, así como con enlaces de microondas que están basados en equipos SAF Tehnika Phoenix G2 y CFIP Phoenix, mismos que poseen interfaces de gestión IP lo que posibilita la obtención lógica de parámetros operacionales sin la necesidad de realizar modificaciones físicas dentro de la infraestructura de transmisión principal. Esta condición es importante dentro de la propuesta, ya que permite integrar módulos SDR en paralelo, trabajando como sensores espectrales exteriores que permitan alimentar al motor cognitivo sin la necesidad de intervención de la cadena de emisión primaria del canal.
- La arquitectura propuesta está definida a través de los requerimientos técnicos establecidos para la gestión dinámica del espectro para el entorno de radiodifusión TDT. El módulo de sensado utilizaría el USRP B210 de Ettus Research, el cual tiene la capacidad de operar en el rango de 70 MHz a 6 GHz con una tasa de muestreo de hasta 61.44 MS/s, lo que garantiza tener una cobertura espectral adecuada para trabajar en la banda UHF de televisión. El procesamiento cognitivo estaría ejecutándose en la plataforma GNU Radio 3.10, implementando algoritmos de detección de energía y sensado basados en las características para la detección de la presencia de usuarios primarios que tengan probabilidades de detección mayores al 90% en condiciones reales de operación.
- El diagnóstico técnico pudo identificar que existieron eventos de interferencia en el canal durante el período analizado, lo que evidencia la necesidad real de la implementación de mecanismos para el monitoreo y gestión espectral. La propuesta de radio cognitiva

planteada podría transformar el modelo de gestión reactiva que se tiene actualmente en uno proactivo, en donde se realice un sensado continuo del espectro, detección temprana de usuarios primarios y generación automatizada de alertas, lo que mejoraría de forma sustancial la resiliencia operativa del canal. El plan de implementación que se diseñó en seis fases permitiría garantizar la continuidad del servicio durante todo el proceso, confirmando de esta forma la factibilidad operativa de la propuesta.

- La estructura de inversión propuesta es accesible para una institución de educación superior que requiere de financiamiento público. Esta estimación de inversión para el despliegue inicial en la estación matriz asciende a USD $9.180, mientras que el escalamiento hacia los cuatro sitios de la red UTV estaría relacionado una inversión total de USD $22.220. Debido al uso de software de código abierto como GNU Radio, InfluxDB, Grafana, se consigue disminuir significativamente los costos operativos, limitando las inversiones a hardware y formación del personal.
- El principal factor limitante que se ha podido identificar está en la dimensión regulatoria, ya que el marco normativo que se tiene actualmente en vigencia en Ecuador no considera de forma explícita la figura del usuario secundario ni tampoco regula el acceso dinámico al espectro mediante la tecnología de radio cognitiva, lo cual es un vacío legal de carácter estructural que, en las condiciones que está actualmente las leyes, no permitiría la implementación operativa regulada del sistema propuesto en bandas licenciadas de televisión. Esta limitación no invalida la propuesta, sino que permite identificar que se requiere una reforma regulatoria para la implementación plena y legítima.

4.2 Análisis de viabilidad de implementación

El análisis de viabilidad de la posible implementación considera los resultados del diagnóstico técnico del canal, los requerimientos establecidos para la gestión del espectro a través del uso de radio cognitiva y las fases del plan de implementación propuesto, con el propósito de definir sistemáticamente si las condiciones que se tiene actualmente son suficientes para poder adoptar esta tecnología de manera correcta

4.2.1. *Viabilidad técnica*

- Los transmisores digitales que están instalados en los cuatro sitios de la red operan en la banda UHF y se encuentran preparados para TDT, lo que garantiza la disponibilidad de la banda espectral objetivo para el sensado.
- Los equipos de microondas SAF Tehnika Phoenix G2 y CFIP Phoenix, tienen modulaciones digitales configurables como QPSK, 16QAM, 64QAM e interfaces IP de gestión, lo que permitiría la extracción de parámetros operacionales sin cambiar la arquitectura de hardware que existe actualmente.
- Otro aspecto importante es la integración de módulos SDR en paralelo, en donde el modelo USRP B210 que se definió como módulo de sensado, opera en el rango de 70 MHz a 6 GHz utilizando un convertidor analógico - digital de 12 bits y una tasa de muestreo máxima de 61.44 MS/s, las cuales son características técnicas suficientes para monitorear la banda UHF que está asignada al canal con la resolución espectral necesaria. Esta unidad operaría en paralelo con el sistema de transmisión principal, lo que alimenta al motor cognitivo evitando latencias o interferencias dentro de la cadena de emisión primaria.
- Los parámetros técnicos que se definieron para el sistema de radio cognitiva como el tiempo de sensado con un rango de 1 a 100 ms, probabilidades de detección >90% y

probabilidades de falsa alarma <10%, están dentro de los rangos definidos por los estándares internacionales como la IEEE 802.22 y las recomendaciones de la UIT-R, validando la factibilidad de esta propuesta.

4.2.2. *Viabilidad operativa*

- La fase piloto, que fue definida para el enlace de la estación matriz en Cerro Cotacachi, permitiría realizar las validaciones del comportamiento del sistema cognitivo en condiciones reales de operación antes de realizar el escalamiento de la propuesta a los otros nodos de la red.
- El sistema debería trabajar en un principio en modo pasivo o de observación, si realizar las acciones de adaptación activa, esto para garantizar la integridad de la transmisión en el proceso de validación.
- La adopción de radio cognitiva puede transformar el modelo de gestión de interferencias del canal aplicando el sensado continuo, detección temprana y generación automatizada de alertas y registros de eventos. Con esta mejora se generaría un impacto directo sobre la calidad del servicio y la eficiencia operativa del canal, principalmente cuando se busca la expansión de la red a los cuatro lugares de transmisión.
- El requerimiento de capacitación técnica del personal se considera como el único aspecto con nivel de viabilidad operativa medio. El personal actual del canal tiene conocimientos básicos en radiofrecuencia, pero la operación de sistemas SDR y la administración de plataformas como GNU Radio necesitan de cierta formación adicional específica, cuyo costo se ha incluido en la estimación económica del proyecto con un total de USD $700 para la fase piloto.

4.2.3. *Viabilidad económica*

- La fase piloto, la cual se limita al sitio de la estación matriz, requiere una inversión de USD $9.180, la cual se distribuye en el módulo SDR USRP B210 y antenas de banda ancha UHF por un valor de $2.280, el nodo embebido de procesamiento Raspberry Pi 5 con la SSD por un costo de $1.200, el servidor central Dell PowerEdge T150 o equivalente para el motor cognitivo que tiene un costo de $2.500, el sistema de almacenamiento y base de datos por $600, las plataformas de software y visualización de código abierto con $1.300), y capacitación técnica del personal con $700.
- El escalamiento para los cuatro sitios de la red UTV implicaría una inversión adicional de USD $13.040, llegando a obtener un total de USD $22.220 para la implementación completa del sistema. La propuesta de utilizar software de código abierto para el procesamiento cognitivo y la visualización disminuye los costos asociados con la operación lo que limita las inversiones principalmente las que se destinan a mantenimiento de hardware y actualización del personal técnico, sin la necesidad de tener costos de licenciamiento de software propietario. Estos montos corresponden al presupuesto del año 2026 y son válidos hasta diciembre de 2026.

4.3 Revisión del marco regulatorio aplicable

- El análisis incluye a los elementos normativos nacionales vigentes, las resoluciones emitidas por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), el Plan Nacional de Frecuencias (PNF) y los marcos regulatorios internacionales que sirven como referencia para el desarrollo de una normativa nacional específica.
- La Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT) indica en su artículo 9 que el espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado de dominio público, cuya administración,

regulación y control es competencia exclusiva del Estado. Pese a que esta definición indica que existe soberanía espectral, dentro del texto no se menciona nada referente al usuario secundario ni al s acceso dinámico al espectro. El hecho de que no exista esta figura jurídica impide que un operador de canal institucional, como el canal UTV de la Universidad Técnica del Norte, pueda legalmente operar un sistema de radio cognitiva en bandas licenciadas de televisión bajo el ordenamiento jurídico vigente.

- El régimen de concesión de frecuencias el cual es administrado por ARCOTEL necesita que cualquier operador posea un título habilitante vigente para el uso de una banda espectral específica, y que las modificaciones en los parámetros técnicos autorizados sean previamente aprobados con el uso de formularios y justificaciones técnicas frente a las autoridad reguladora. Esta principal exigencia, se toma en cuenta las entornos de asignación estática del espectro, resulta hasta cierto punto incompatible con la naturaleza dinámica y adaptativa de los sistemas de radio cognitiva, en donde se ajustan los parámetros en tiempo real como parte del funcionamiento.
- La banda UHF que fue determinada para el canal UTV, como la del resto de los operadores de TDT en el país, se encuentra destinada de forma exclusiva y primaria, pese a ello, el margen normativo que sirve para dar acceso compartido de usuarios secundarios a cognitivos.
- La comparación con otros marcos regulatorios, como el de Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (FCC) indica, que desde la transición hacia televisión digital, se necesita de un marco regulatorio para el uso de los TV White Spaces (TVWS) en donde se habilitaron las operaciones de dispositivos cognitivos en la banda UHF sin requerir de ningún tipo de licencia, considerando condiciones técnicas precisas de

no interferencia con usuarios primarios, bases de datos georreferenciadas de espectro disponible y mecanismos de detección automatizada. En Europa, la Comisión Europea y Ofcom han aplicado marcos similares dentro del Spectrum Policy and Radio Programme (RSPP), en donde se puede conseguir acceso secundario al espectro en bandas específicas.

- Las recomendaciones de la UIT-R, en las series SM.2130 y M.2150, indican el marco técnico internacional referencial que indica como se deben implementar sistemas de acceso cognitivo al espectro, incluyendo parámetros de convivencia con usuarios primarios y metodologías de evaluación de interferencia. Aunque estos documentos no poseen ningún tipo de valor a las normativas directas del país, se mantienen como una base técnica que puede servir como la base técnica sobre la cual ARCOTEL pueda desarrollar una normativa nacional específica para la radio cognitiva, disminuyendo de esta forma los costos de desarrollo y todo lo referente a los organismos internacionales competentes.

4.4 Recomendaciones regulatorias para la radio cognitiva

En base al análisis del marco regulatorio vigente y los resultados de la evaluación de viabilidad, se consideran las siguientes recomendaciones regulatorias que están orientadas a crear las condiciones normativas para la implementación legítima de sistemas de radio cognitiva en canales de televisión institucionales en Ecuador, siendo estas recomendaciones consideran los espacios legales identificados y definen a las mejores prácticas regulatorias internacionales, particularmente los marcos de la FCC, Ofcom y la UIT-R. A continuación, se presentan las recomendaciones regulatorias específicas, que se ordenaron de acuerdo con su prioridad e impacto potencial para la habilitación de la radio cognitiva en el contexto ecuatoriano.

- Emisión de una resolución de ARCOTEL en donde se establezca un régimen de licencias experimentales para radio cognitiva, se plantea debido a que existe una necesidad

inmediata de crear un instrumento jurídico habilitante que permita a instituciones como la Universidad del Norte trabajar en sistemas cognitivos piloto bajo supervisión regulatoria, sin comprometer los derechos de los operadores primarios del espectro.

- Elaboración de una norma técnica específica para usuarios secundarios en la banda UHF, el cual es un instrumento técnico complementario que no debería faltar. Esta norma debería establecer precisamente los parámetros operativos máximos para los sistemas cognitivos en donde se incluyen las potencias de emisión, tiempos mínimos de sensado, umbrales de detección y mecanismos certificados de desconexión cuando existe presencia de usuarios primarios, así como los estándares de certificación que pueden aplicarse a los equipos SDR utilizados. La alineación de esta norma con los estándares IEEE 802.22 y las recomendaciones UIT-R podría garantizar una compatibilidad técnica con los marcos internacionales vigentes y lo que facilitaría la homologación de equipos.
- Incorporación de una categoría de uso dinámico en el Plan Nacional de Frecuencias podría resolver el vacío estructural más evidente dentro del marco regulatorio actual. La inclusión de esto permitiría que las entidades educativas e institucionales operen sistemas cognitivos secundarios en bandas destinadas hacia otros servicios, considerando condiciones técnicas estrictas de no interferencia y con un esquema de prioridades que garantice la protección efectiva de los usuarios primarios licenciados.
- Reforma al Reglamento General de la LOT para reconocer de forma explícita la figura del usuario secundario, como carácter estructural y de mediano plazo. Sin este reconocimiento legal, cualquier operación de radio cognitiva, incluso en situaciones experimentales, no tendría de la suficiente base jurídica sólida. La inclusión de un artículo que mencione los derechos, obligaciones y limitaciones de los usuarios secundarios en redes cognitivas

podría generar un sistema regulatorio con la coherencia jurídica requerida para la adopción de esta tecnología a nivel nacional.

- Creación de un programa piloto institucional con acompañamiento regulatorio, es de carácter estratégico. Esto se articula entre ARCOTEL, el Ministerio de Telecomunicaciones y las universidades públicas que tienen canales de televisión, con el objetivo de generar datos empíricos relacionados con el comportamiento de los sistemas cognitivos en el entorno espectral ecuatoriano, siendo fundamental para establecer las bases técnicas para la consolidación de la normativa permanente.
- Adopción de estándares internacionales como referencia técnica, esto para garantizar que el marco normativo nacional para la radio cognitiva tenga coherente con lo mencionado a nivel mundial con respecto a la gestión del espectro y sea compatible con los sistemas de otros países, lo que facilitaría la transferencia de tecnología y el intercambio de experiencias técnicas. La adopción de estándares como el IEEE 802.22 e ITU-R SM.2130 aseguraría que se tenga una normativa sólida técnicamente y disminuiría el tiempo del desarrollo regulatorio aprovechando el conocimiento ya obtenido por los organismos internacionales competentes.
- Adoptar una estrategia de dos niveles para acoplar la radio cognitiva con la red de transporte de microondas, dado que sus frecuencias reales (6.7 GHz en el tramo Estudios Ibarra-Cotacachi y 7.0 GHz en los tramos de distribución desde Cotacachi) superan el límite superior de 6 GHz del USRP B210 seleccionado para el sensado UHF, lo que delimita técnicamente el alcance del hardware propuesto: suficiente para la banda UHF de radiodifusión, pero no para el sensado espectral directo de los enlaces de microondas legados. En el corto plazo, se recomienda integrar al motor cognitivo las métricas nativas

que ya entregan los equipos SAF Tehnika Phoenix G2 y CFIP Phoenix por SNMP/IP (RSSI, SNR, BER y estado de modulación adaptativa), utilizándolas como indicador indirecto y de bajo costo del estado del enlace de microondas, sin requerir hardware adicional. En el mediano plazo, si se requiere sensado espectral directo de estas bandas, se recomienda evaluar la incorporación de un módulo SDR de banda ancha adicional -como el USRP X410 con daughterboard ZBX, con cobertura sintonizable de 1 MHz hasta 8 GHz según su hoja técnica- dedicado exclusivamente al monitoreo de los enlaces de 6.7 y 7.0 GHz, integrado al mismo motor cognitivo mediante MQTT/REST, de forma análoga al módulo UHF; esta opción permitiría una supervisión espectral unificada de toda la red de transporte, aunque implica una inversión adicional que debería evaluarse frente al beneficio real que aporta sobre el monitoreo indirecto ya disponible.

A manera de cierre del capítulo, la Tabla 22 consolida los parámetros técnicos más relevantes de cada dimensión de viabilidad analizada (técnica, operativa, económica y regulatoria), junto con el concepto regulatorio asociado a cada uno.

Tabla 22.

Resumen técnico de parámetros por dimensión de viabilidad y su relación con el marco regulatorio

Dimensión	Parámetro evaluado	Resultado	Concepto regulatorio
Técnica	Infraestructura de transmisión UHF (TDT)	Transmisores digitales instalados y preparados en los 4 sitios	Banda UHF exclusiva y primaria (LOT Art. 9); sin figura de usuario secundario

Técnica	Enlaces de microondas SAF Tehnika (Phoenix G2 / CFIP Phoenix)	Modulación configurable QPSK-64QAM; interfaces SNMP/SSH/HTTP nativas	Gestión vía IP; no requiere modificación del título habilitante
Técnica	Módulo SDR de sensado (USRP B210)	Rango 70 MHz-6 GHz; ADC 12 bits; 61.44 MS/s	Sensado pasivo; sin marco nacional que regule su operación experimental
Técnica	Parámetros de sensado espectral	Tiempo 1-100 ms; Pd > 90%; Pfa < 10% (IEEE 802.22 / UIT-R)	Sin equivalente normativo nacional que reconozca estos parámetros
Operativa	Fase piloto	Cerro Cotacachi; modo pasivo/observación	Sustenta la recomendación de un régimen de licencia experimental ante ARCOTEL
Operativa	Gestión de interferencias	Sensado continuo, detección temprana, alertas automatizadas	Debe reportarse a ARCOTEL para trazabilidad regulatoria

Operativa	Capacitación técnica del personal	USD $700 incluidos en la fase piloto	No constituye un requisito regulatorio
Económica	Inversión fase piloto	USD $9.180	Condicionada a autorización regulatoria previa para operar
Económica	Inversión escalamiento (4 sitios)	USD $13.040 adicionales (total USD $22.220)	Ídem
Regulatoria	LOT, Art. 9 (dominio del espectro)	No reconoce usuario secundario ni acceso dinámico	Vacío legal estructural
Regulatoria	Régimen de concesión ARCOTEL	Asignación estática; requiere aprobación previa de cambios técnicos	Incompatible con ajuste dinámico en tiempo real
Regulatoria	Banda UHF (uso exclusivo/primario)	Sin margen normativo de acceso compartido	Requiere reforma legal o norma técnica específica
Regulatoria	Referencia internacional (FCC, Ofcom, UIT-R)	TV White Spaces, RSPP, Recomendaciones SM.2130/M.2150	Marco de referencia sin valor vinculante en Ecuador

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se concluye que el objetivo general de la investigación fue cumplido, al proponerse el uso del espectro radioeléctrico mediante la aplicación de tecnología de radio cognitiva en el canal de televisión de la Universidad Técnica del Norte, evaluando de manera integral su viabilidad técnica, operativa, económica y regulatoria; los resultados confirman que la gestión dinámica del espectro es una alternativa viable para optimizar el uso del recurso radioeléctrico en canales de televisión universitarios con recursos limitados.

Desde el punto de vista técnico, la propuesta es viable con la infraestructura actual del canal: los cuatro sitios cuentan con transmisores digitales y enlaces de microondas SAF Tehnika con modulación configurable (QPSK–64QAM) y gestión IP nativa, por lo que la capa cognitiva se incorpora únicamente mediante un módulo SDR de sensado (USRP B210, 70 MHz–6 GHz) sin reemplazar equipamiento; los parámetros exigidos de sensado (tiempos de 1 a 100 ms, $Pd > 90\ \%$ y $Pfa < 10\ \%$) son alcanzables con tecnología comercial y la cadena de RF opera adaptada a $50\ \Omega$ ($\Gamma = 0$, VSWR 1.00:1, $\eta = 100\ \%$).

En el ámbito operativo, la implementación no interfiere con la operación del canal, ya que la fase piloto en el Cerro Cotacachi funciona en modo pasivo o de observación, sin modificar los parámetros concesionados. El cambio se limita a incorporar el monitoreo continuo del espectro, la detección temprana de interferencias con alertas automatizadas y el registro trazable de eventos para su reporte a ARCOTEL, lo que exige únicamente una capacitación técnica del personal estimada en USD 700.

En el ámbito económico, la fase piloto demanda una inversión de USD 9.180 y el escalamiento a los cuatro sitios de la red UTV USD 13.040 adicionales, con un total de USD 22.220. El uso de software de código abierto y el aprovechamiento de la infraestructura existente contienen el costo, y el despliegue por fases permite que la inversión se ajuste a la capacidad presupuestaria de un canal universitario.

En el ámbito regulatorio, la propuesta no es aplicable bajo la normativa vigente en Ecuador: la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (Art. 9) no reconoce la figura del usuario secundario ni el acceso dinámico al espectro, el régimen de concesión de ARCOTEL mantiene una asignación estática que exige aprobación previa de cualquier cambio técnico, y la banda UHF conserva su condición de uso exclusivo y primario. Las referencias internacionales (TV White Spaces de la FCC, el RSPP europeo y las Recomendaciones UIT-R SM.2130 y M.2150) constituyen un marco orientativo sin valor vinculante en el país.

Recomendaciones

Se recomienda que la Universidad Técnica del Norte considere la adopción progresiva de la radio cognitiva como parte de una estrategia institucional de modernización tecnológica de su canal de televisión, iniciando con una fase piloto que permita validar los resultados obtenidos en este estudio antes de escalar la propuesta a la totalidad de la infraestructura de transmisión.

Se recomienda complementar los resultados teóricos de la presente investigación con campañas de medición real del espectro radioeléctrico en el entorno del canal, de manera que los parámetros técnicos definidos puedan validarse experimentalmente y ajustarse a las condiciones reales de operación.

Se recomienda que la Universidad Técnica del Norte, a través del canal UTV, gestione un acercamiento institucional con ARCOTEL para explorar de manera conjunta la viabilidad

regulatoria de la propuesta, considerando que la falta actual de reconocimiento del usuario secundario y del acceso dinámico al espectro representa la principal limitante identificada para su implementación legítima.

Se recomienda utilizar los resultados de este estudio como referencia metodológica para futuras investigaciones que busquen aplicar radio cognitiva en otros canales de televisión universitarios o públicos del país, considerando que muchos de estos comparten limitaciones similares de infraestructura y presupuesto.

Se recomienda que futuras líneas de investigación profundicen en la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático y técnicas más avanzadas de toma de decisiones espectral, con el fin de robustecer la capacidad de adaptación del sistema propuesto ante escenarios de mayor complejidad.

Se recomienda fortalecer las capacidades técnicas del personal institucional en tecnologías de radio definida por software y gestión dinámica del espectro, como condición habilitante para sostener en el tiempo cualquier iniciativa de modernización tecnológica de esta naturaleza.

Bibliografía

Acurio, A. (2024). OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO PARA COMUNICACIONES MÓVILES MEDIANTE TECNOLOGÍAS MIMO EN REDES DE QUINTA GENERACIÓN. *UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO* .

Aguilar, J., & Navarro, A. (2011). Radio cognitiva – Estado del arte. *Revista Sistemas y Telemática.*, 31 - 53.

Aguirre, L., & Espinoza, R. (2023). *La Radio Universitaria: Programación educativa y cultural para una identidad corporativa.* Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Albán, A., & Cerezo, E. (s.f.). PROPUESTA DE REGULACIÓN PARA LA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE EN EL ECUADOR. *2024*.

Alvarez, C., & Bravo, J. (2021). Diseño e implementación de un sistema de radio cognitiva para comunicación en la banda UHF. *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO*.

Andrade, A., Galaviz, G., Pablos, M., & Bastidas, E. (2024). Detección de Anomalías: Una Solución Inteligente al problema de Detección de Espectro en Redes de Radio Cognoscitivo . *Universidad Autónoma de Baja California*.

Andrade, C. (2022). La radio universitaria en Ecuador. *Dialnet*.

ARCOTEL. (2016). *REGLAMENTO GENERAL A LA LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES.* Decreto Ejecutivo 864.

ARCOTEL. (2024). *BASES PARA LA ADJUDICACIÓN DE FRECUENCIAS DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO POR PROCESO PÚBLICO COMPETITIVO Y EQUITATIVO PARA LA OPERACIÓN DE MEDIOS DE COMUNICACIÓN SOCIAL PRIVADOS Y COMUNITARIOS DEL SERVICIO DE RADIODIFUSIÓN DE TELEVISIÓN DE SEÑAL ABIERTA* .

Baque, O., Álava, J., Tóala, M., & Maldonado, K. (2022). Revisión sistemática de la literatura sobre espectro radioeléctrico en la cobertura de red 5G y su aporte en el desarrollo de las ciudades inteligentes. *RECIAMUC*, 169 - 182.

Barboza, R., Harrison, X., & Pérez, D. (2023). Diseño de una red TVWS desde UNPRG para brindar acceso a internet a los colegios 10908 Naylamp y 10997, provincia de Lambayeque. *UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO*.

Bonilla, L. (2017). *EL ODS-4 EN LA PERSPECTIVA DE LA PEDAGOGÍA RADICAL DE LAS RESISTENCIAS.* Runae.

Bordón, R., & Montejo, S. (2015). La Radio Cognitiva y su Impacto en el Uso Eficiente del Espectro de Radio. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 36*(1).

Bordón, R., & Montejo, S. (2015). La Radio Cognitiva y su Impacto en el Uso Eficiente del Espectro de Radio. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 36*(1), 1815-5928.

Cadena, E., Eslava, H., & Franco, J. (2015). Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia. *Tecnura, 19*(4).

Carro, G., Hernández, P., Hernández, F., Simon, M., Capdehourat, G., & Rodríguez, B. (2019). Consideraciones para el Despliegue de Redes basadas en Radio Cognitiva: Ocupación y Regulación del Espectro. *Revista Politécnica, 44*(1).

CEPAL. (2012). *Uso y regulación del espectro en América Latina.* Estudios de caso de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela.

Chen, L., Wu, J., & Zhang, X. (2020). Cognitive Radio: A solution for efficient spectrum management. *Journal of Wireless Communications, 25*(3), 123-140.

Chere, B., Ulloa, R., & Reyna, L. (2022). Optimization of the use of the radio spectrum in Ecuador. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies, 3*(3), 238 - 249.

Chere, B., Ulloa, R., & Reyna, L. (2022). Optimization of the use of the radio spectrum in Ecuador. *Sapienza*.

CO, G. (2025). *¿Qué es el espectro radioeléctrico?* Obtenido de https://portalespectro.ane.gov.co/Style%20Library/ane_master/que-es-el-espectro-radioelectrico.aspx

Dmitruk, A. (2023). Universidad Nacional de La Matanza. *La convergencia en el sector de la televisión*.

Erazo, O., Miramá, V., & Mora, J. (2021). Detección de espectro en banda ancha Sub-Nyquist para redes Radio Cognitiva: compleción de matrices mediante valores semilla. *Inge CuC, 17*(1), 126–145.

Espinosa, M. (2021). Arquitectura de radio cognitiva para servicios masivos de IoT con acceso dinámico al espectro. *Dialnet*.

Giral, D., Hernández, C., & Martinez, F. (2019). Algoritmos para Toma de Decisiones en Redes Inalámbricas Cognitivas: una Revisión. *Información tecnológica*.

Giral, D., Hernández, C., & Martínez, F. (2022). Clasificación de la ocupación espectral para la toma de decisiones en redes inalámbricas cognitivas implementando extracción de características y aprendizaje automático. *Información tecnológica, 33*(4).

Guanoquiza, S., & Ruíz, M. (2024). Diseño de una red de comunicación para AMI basado en la optimización de radio enlaces. *Revista Ingenio Global, 3*(2), 138 - 156.

Haro, A., García, N., Moreno, A., Salguero, S., & Freire, M. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS 9 - Industria, Innovación e Infraestructura: un análisis mediante modelos estadístico y algorítmico.* Tesla Revista Científica.

Haykin, S. (2005). Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 201 – 220.

Hemández, C., Pedraza, L., Páez, I., & Rodriguez, E. (2015). Análisis de la Movilidad Espectral en Redes de Radio Cognitiva. *Inf. tecnol., 26*(6).

Hernández, C., Martínez, F., & Giral, D. (2022). Evaluación del desempeño de modelos de decisión espectral predictivos. *Información tecnológica, 33*(3).

IFT. (2017). PLAN PARA LA BANDA 470 – 608 MHz. *Unidad de Espectro Radioeléctrico*.

Jinez, J., & Macas, M. (2025). Diseño y evaluación de una red de radio cognitiva utilizando un modelo de Márkov para garantizar calidad de servicio en términos de probabilidad de bloqueo. *UNACH*.

Llanos, A. (2013). Gestión del espectro radioeléctrico en Ecuador nueva modalidad para radiodifusión y televisión abierta. *Serie Magister*.

López, D., & Hernández, L. (2020). Una mirada a la sincronización de la radio cognitiva. *Inclusión y Desarrollo, 7*(2).

López, V. (2024). Arquitectura de IoT para la implementación de servicios cognitivos. *Universidad Politécnnica de Valencia*.

Martínez, G. (2019). TECNOLOGÍAS DE ACCESO DINÁMICO Y USO. *The Law, State and Telecommunications Review*, 53-70.

Martínez, W. (2013). ANÁLISIS DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO, MODIFICACIÓN, ASIGNACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DURANTE LA TRANSICIÓN DE TELEVISIÓN ANALÓGICA A DIGITAL TERRESTRE EN EL ECUADOR. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*.

Martins, D. (2023). Sensoriamento espectral para rádios cognitivos aplicado em cenários de TVWS. *Universidade Federal de Uberlândia*.

MINTEL. (2018). *PLAN MAESTRO DE TRANSICIÓN A LA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE* .

Miño, H., & Anzules, J. (2017). DISEÑO DE ALGORITMOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD ESPECTRAL DE CANALES INDIVIDUALES Y CONJUNTOS EN LA BANDA UHF UTILIZANDO UN DISPOSITIVO RTL SDR EN EL INTERIOR DE UN EDIFICIO UBICADO EN ANDRÉS MARÍN ENTRE SUCRE Y COLÓN EN LA CIUDAD DE GUAYAQUI. *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL* .

Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Obtenido de https://sdgs.un.org/es/goals

ONU. (2018). *Informe sobre el 21er período de sesiones (14 a 18 de mayo de 2018)* . Comisión de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo .

Pedraza, L., Forero, F., & Páez, I. (2012). Detección de espectro para radio cognitiva. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 20*(2), 197-210.

Pineda, D. (2019). MODELO DE ASIGNACIÓN ESPECTRAL PARA EL USO EFICIENTE DE LA BANDA DE TELEVISIÓN DIGITAL EN LA CIUDAD DE BOGOTA A TRAVÉS DE LA RADIO COGNITIVA . *Universidad Francisco José de Caldas* .

Rodríguez, C. (2024). Diseño de una red de frecuencia única de televisión digital terrestre para mejorar la cobertura de una estación de televisión abierta ubicada en el cerro Para de la ciudad de Tacna, 2022. *UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA*.

SAF Tehnika. (2023). *PhoeniX G2* [Página web]. https://www.saftehnika.com/en/products/phoenix-g2/

Sandoval, C. (2017). VHDLModelof configurable neural networks applied to decoding in cognitive radio. *Revista IngenierÍa UC,*, 290 - 301.

Telecomunicaciones, M. d. (2022). *POLÍTICA PÚBLICA DE TELECOMUNICACIONES 2023 - 2025* .

UIT. (2019). *Parámetros técnicos y de funcionamiento de los dispositivos de radiocomunicaciones de corto alcance y utilización del espectro por los mismos.* Serie SM Gestión del espectro .

UNESCO. (2024). *Qué necesita saber acerca del aprendizaje digital y la transformación de la educación*. Obtenido de https://www.unesco.org/es/digital-education/need-know?hub=84636

Vega, A. (2020). Revisión al Desarrollo de la Tecnología de Radio Cognitiva en Bandas VHF – UHF en el Ecuador. *RTE, 32*(1).

Anexos

Anexo1: Entrevista realizada

A continuación se presenta la transcripción resumida de la entrevista técnica semiestructurada realizada al personal encargado del área de transmisión del canal universitario, utilizada como fuente primaria en la fase de diagnóstico (Capítulo III). Las respuestas fueron sintetizadas a partir de la conversación, conservando los datos técnicos (frecuencias, ubicaciones y periodicidad) tal como fueron mencionados.

Pregunta	Respuesta

¿Usted sabe qué equipos y tecnología utiliza actualmente el canal para sus transmisiones?	Actualmente trabajan con equipamiento y una solución conocida como “Digital Ready”. La infraestructura está lista para transmisión digital, aunque hoy transmiten al aire en analógico porque la concesión vigente es de TV analógica. El transmisor es compatible analógico-digital, por lo que el canal quedaría preparado para una transición a TV digital cuando se concrete el proceso regulatorio (apagón analógico). También mencionan que hicieron pruebas temporales de TDT (canales 24.1 y 24.2) mediante software.
¿Existen registros de interferencia, pérdida de señal o saturación que se haya presentado en 2025?	Se reportó un episodio de interferencia en diciembre del año anterior, con degradación de calidad (pixelación) y cortes a negro esporádicos. El problema fue más acentuado en Pichincha; en Imbabura se percibió con menor frecuencia e impacto.
¿Se evalúa el estado del espectro de la transmisión? ¿Con qué frecuencia?	Sí. El canal no dispone internamente de un analizador de espectro, pero lo incluye en un contrato anual de mantenimiento. Se realizan tres mantenimientos preventivos al año y, en cada uno, la empresa contratista monitorea el espectro y verifica que los parámetros de operación estén dentro de lo asignado por ARCOTEL. Como resultado, entregan un informe técnico con la medición y verificación.

¿Cuáles son las frecuencias que tiene asignadas el canal (y el enlace principal)?	Según la concesión: video en 531.25 MHz y audio en 535.75 MHz (para la estación en estudios). Para el enlace de microondas se indicó una frecuencia de 6815 MHz.
¿El canal ha evaluado el uso de nuevas tecnologías o plantea quedarse como está?	Sí han evaluado nuevas tecnologías, principalmente el enfoque hacia IPTV/tecnología IP, pero lo han considerado más para la radio. En TV no lo han priorizado todavía, en parte porque la concesión actual es de televisión analógica y no han profundizado el marco normativo aplicable a una migración completa a IP. Señalan que sus equipos sí disponen de interfaces IP, por lo que es una opción a futuro.
¿Usted considera viable que el canal adopte sistemas inteligentes de gestión del espectro?	Sí, lo considera viable. Se argumenta que, con el uso de sistemas inteligentes (incluida IA), podrían mitigarse eventos como interferencias, mejorando la estabilidad y la calidad de señal. También se menciona que en Ecuador aún no hay casos de éxito conocidos; los referentes se ubican más en Norteamérica y Europa.
¿Cuáles son los objetivos estratégicos del canal respecto a innovación y calidad de señal?	El objetivo principal identificado es avanzar hacia la transición a televisión digital terrestre (TDT) cuando el proceso regulatorio se consolide. Sin embargo, existe una preocupación: gran parte de la cobertura está dirigida a zonas rurales donde podría no existir aún suficiente disponibilidad de receptores o decodificadores TDT, lo que podría afectar la audiencia si la transición se da sin la adopción tecnológica adecuada.

¿Usted sabe cuál es el ancho de banda?	Indicó un ancho de banda estimado de aproximadamente 14 MHz.
En su experiencia, ¿qué oportunidades existen para mejorar el uso del espectro del canal y estarían dispuestos a un piloto de radio cognitiva?	Las oportunidades se evalúan en función de necesidades concretas (principalmente mejora de calidad y continuidad del servicio). La decisión suele elevarse a la máxima autoridad con un estudio e informe de necesidad, y el factor limitante típico es el presupuesto. Sobre un piloto o simulación de radio cognitiva, la disposición dependería de los resultados y la factibilidad que arroje la tesis; se reconoce que el equipamiento (transmisión/microondas) implica inversiones relevantes.

Fuente: transcripción de entrevista proporcionada por la estudiante.

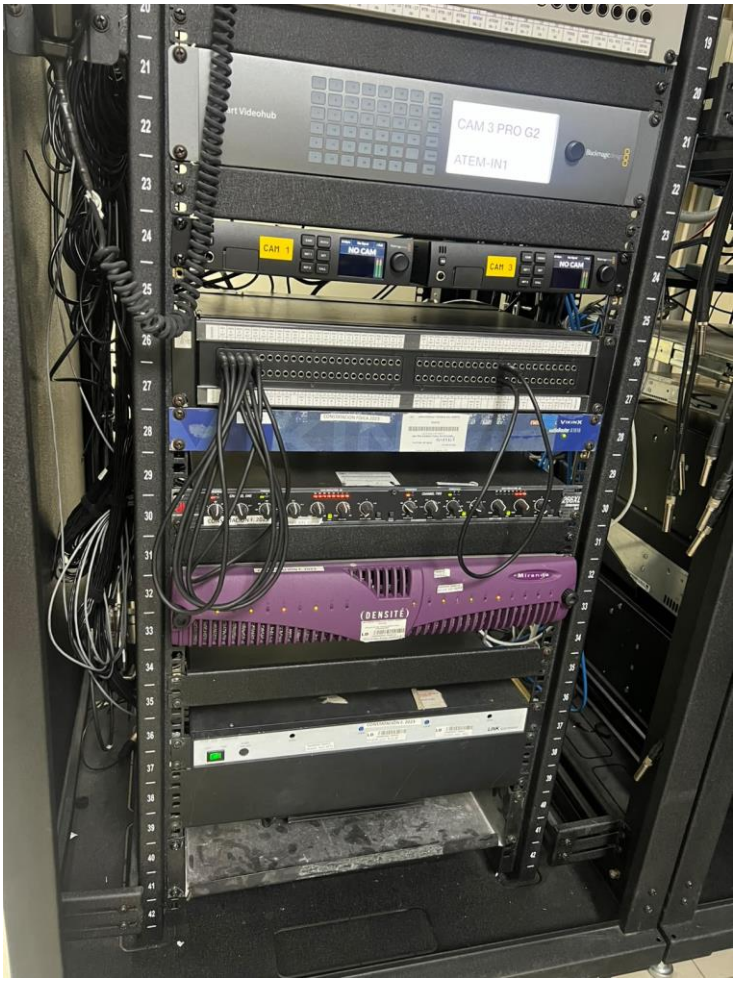
Anexo2: Evidencia fotográfica del diagnóstico técnico

A continuación se presentan fotografías tomadas durante la visita técnica de diagnóstico realizada al canal universitario UTV, correspondientes a la infraestructura descrita en el proceso de recopilación de información técnica del Capítulo III.

Rack de enlace de microondas SAF Tehnika PhoeniX G2 (unidades IRFU y G2+) del canal universitario UTV.



Rack de enrutamiento y producción (Blackmagic Smart Videohub, control de cámaras y procesador Densité) del canal UTV.



Puesto de control de continuidad y máster del canal UTV.



Anexo 3: Fichas técnicas de los equipos referenciados

A continuación se presenta un resumen de las especificaciones técnicas de los equipos citados a lo largo del presente trabajo, elaborado a partir de las fichas técnicas oficiales publicadas por cada fabricante. Los documentos completos pueden consultarse en las fuentes indicadas.

USRP B210 (Ettus Research) – módulo SDR de sensado

- Cobertura de frecuencia: 70 MHz a 6 GHz, sintonía continua
- 2 canales Tx y 2 canales Rx (MIMO 2x2 coherente), full duplex
- Ancho de banda instantáneo de hasta 56 MHz (61.44 MS/s)
- Resolución de 12 bits en ADC/DAC
- Interfaz USB 3.0 SuperSpeed, alimentación por bus
- FPGA Xilinx Spartan6 XC6SLX150

- Dimensiones 9.7 x 15.5 x 1.5 cm; peso 350 g

Fuente: Ettus Research, "USRP B200/B210 Datasheet", 2019. Disponible en: https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210_spec_sheet.pdf

USRP X410 con daughterboard ZBX (Ettus Research/NI) – módulo SDR de banda ancha complementario

- Cobertura de frecuencia de 1 MHz a 7.2 GHz, sintonizable hasta 8 GHz
- 4 canales Tx y 4 canales Rx, hasta 400 MHz de ancho de banda instantáneo por canal
- SoC Zynq UltraScale+ ZU28DR (RFSoC); ADC de 12 bits, DAC de 14 bits
- Interfaces de red: 2 puertos QSFP28 (hasta 100 GbE) y Ethernet 10/100/1000
- GPSDO integrado para sincronización multi-radio

Fuente: NI / Ettus Research, "USRP X410 Product Specification". Disponible en: https://www.ni.com/pdf/manuals/378493a.pdf

SAF Tehnika PhoeniX G2 – enlace de microondas (IDU)

- Bandas soportadas: 2, 4, U4, L6, U6, 7, 8, 11, 13, 18, 23 y 38 GHz
- Capacidad de hasta 1 Gbps en configuración 2+0; hasta 452 Mbps a 60 MHz con 1024QAM
- Ancho de canal ETSI de 3.5 MHz a 56 MHz
- Gestión mediante SNMP v1/v2c/v3, HTTP/HTTPS y CLI (Telnet/SSH)
- Consumo máximo menor a 30 W (solo IDU) y menor a 180 W (IDU + 2 ODU)
- Rango de temperatura operativa de -5 °C a +45 °C

Fuente: SAF Tehnika JSC, "PhoeniX G2 Series Datasheet v2.38", junio 2020. Disponible en: https://saftehnika.com/files/downloads/92436a1f-d2a4-ea11-beb6-0050569a8c0f/PhoeniX%20G2_ETSI_FCC_DS_EN_V2%2038.pdf

CFIP Phoenix (SAF Tehnika) – enlace de microondas híbrido (IDU)

- Anchos de canal de 3.5, 7, 14, 28, 40 y 56 MHz
- Modulaciones soportadas de 4QAM a 256QAM
- Capacidad de 9 a 366 Mbps
- Configuraciones 1+0, 1+1 (HSB/SD/FD), anillo/malla con RSTP, hasta 4+0
- Conexión IDU-ODU mediante cable Belden 9914/RG-8 (hasta 300 m) o RG-213 (hasta 200 m), conectores N-Type
- Consumo máximo de 20 a 30 W

Fuente: SAF Tehnika JSC, "CFIP PhoeniX Series Technical Specification", 2014. Disponible en: https://saftehnika.com/files/downloads/dcd9ff5f-5376-e211-bc32-0050569aa6cf/CFIP_PhoeniX_ETSI_DS_EN_V1%2013.pdf

Raspberry Pi 5 – nodo embebido (host del SDR)

- Procesador Broadcom BCM2712, quad-core ARM Cortex-A76 a 2.4 GHz (64 bits)
- Memoria LPDDR4X-4267, con opciones de 1 a 16 GB
- GPU VideoCore VII, salida HDMI dual 4Kp60
- Conectividad Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0 y Ethernet Gigabit con soporte PoE+
- Puertos 2x USB 3.0, 2x USB 2.0 e interfaz PCIe 2.0 x1
- Temperatura operativa de 0 °C a 70 °C

Fuente: Raspberry Pi Ltd, "Raspberry Pi 5 Product Brief". Disponible en: https://pip.raspberrypi.com/documents/RP-008348-DS-raspberry-pi-5-product-brief.pdf

Cable coaxial LMR-400 (Times Microwave Systems) – interconexión RF

- Impedancia de 50 ohms
- Velocidad de propagación del 84%
- Atenuación típica de 2.7 dB/100 ft (≈ 8.9 dB/100 m) a 450 MHz

- Rango de temperatura de -40 °C a +85 °C
- Radio de curvatura de instalación de 1.00 in (25.4 mm)
- Uso previsto como reemplazo directo de cable tipo RG-8/9913 de dieléctrico de aire

Fuente: Times Microwave Systems, "LMR-400 Datasheet". Disponible en: https://timesmicrowave.com/wp-content/uploads/2022/06/lmr-400-datasheet-1.pdf

Anexo 4: Resolución de los ejercicios de cálculo de compatibilidad de impedancias

A continuación se presenta la resolución detallada de las Ecuaciones 1 a 4 empleadas en el análisis de compatibilidad de impedancias de la cadena de RF del sistema de sensado, aplicadas a cada interfaz listada en la Tabla 14.

Ecuación 1. Coeficiente de reflexión: $\Gamma = \frac{Z_L - Z_S}{Z_L + Z_S}$

Ecuación 2. Relación de onda estacionaria de voltaje: $VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$

Ecuación 3. Pérdida de retorno: $RL\ (dB) = -20 \cdot log_{10}|\Gamma|$

Ecuación 4. Eficiencia de transferencia de potencia: $\eta\ (\%) = (1 - |\Gamma|^2) \times 100$

Aplicando las Ecuaciones 1 a 4 a cada interfaz de la cadena de RF, considerando las impedancias nominales ZS = ZL = 50 Ω de la Tabla 14 (todos los equipos propuestos comparten esta impedancia nominal), se obtiene la siguiente resolución:

1. USRP B210 (puerto RX/TX) ↔ Cable coaxial

$$Z_S = 50\,\Omega;\ Z_L = 50\,\Omega$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_S}{Z_L + Z_S} = \frac{50 - 50}{50 + 50} = \frac{0}{100} = 0$$

$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + 0}{1 - 0} = 1.00 \rightarrow$ VSWR = 1.00:1

$RL\ (dB) = -20 \cdot log_{10}(0) \rightarrow$ RL → ∞ (idealmente, sin pérdida por desadaptación)

$$\eta\ (\%) = (1 - 0^2) \times 100 = 100\,\%$$

2. Cable coaxial ↔ Antena de sensado UHF

$$Z_S = 50\,\Omega;\ Z_L = 50\,\Omega$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_S}{Z_L + Z_S} = \frac{50 - 50}{50 + 50} = \frac{0}{100} = 0$$

$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = \frac{1+0}{1-0} = 1.00 \rightarrow$ VSWR = 1.00:1

$RL\,(dB) = -20 \cdot log_{10}(0) \rightarrow$ RL → ∞ (idealmente, sin pérdida por desadaptación)

$$\eta\,(\%) = (1 - 0^2) \times 100 = 100\,\%$$

3. Cable coaxial ↔ Enlace microondas IDU (SAF Tehnika / CFIP Phoenix)

$$Z_S = 50\,\Omega;\ Z_L = 50\,\Omega$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_S}{Z_L + Z_S} = \frac{50 - 50}{50 + 50} = \frac{0}{100} = 0$$

$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = \frac{1+0}{1-0} = 1.00 \rightarrow$ VSWR = 1.00:1

$RL\,(dB) = -20 \cdot log_{10}(0) \rightarrow$ RL → ∞ (idealmente, sin pérdida por desadaptación)

$$\eta\,(\%) = (1 - 0^2) \times 100 = 100\,\%$$

4. Cable coaxial ↔ Transmisor TDT UHF

$$Z_S = 50\,\Omega;\ Z_L = 50\,\Omega$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_S}{Z_L + Z_S} = \frac{50 - 50}{50 + 50} = \frac{0}{100} = 0$$

$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = \frac{1+0}{1-0} = 1.00 \rightarrow$ VSWR = 1.00:1

$RL\,(dB) = -20 \cdot log_{10}(0) \rightarrow$ RL → ∞ (idealmente, sin pérdida por desadaptación)

$$\eta\,(\%) = (1 - 0^2) \times 100 = 100\,\%$$

Estos resultados confirman, de forma analítica, lo señalado en el Capítulo III: al compartir todos los equipos de la cadena de RF una impedancia nominal de 50 Ω, la adaptación resulta ideal (Γ = 0, VSWR = 1.00:1, η = 100 %). En la práctica, las tolerancias de fabricación y las transiciones

entre conectores introducirían un VSWR ligeramente superior a 1.00:1 y una pérdida de retorno finita, aunque suficientemente alta como para no comprometer el desempeño del sistema de sensado propuesto, tal como se resume en la Tabla 15.