



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Uso del Espectro Radioeléctrico en Uruguay y Oportunidades para el Uso de Radio Cognitiva

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Patricia Hernández, Gonzalo Carro

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR

María Simon.....	Universidad de la República
Benigno Rodríguez.....	Universidad de la República
Federico Beltramelli.....	Universidad de la República

TRIBUNAL

María Simon.....	Universidad de la República
Benigno Rodríguez.....	Universidad de la República
Federico Beltramelli.....	Universidad de la República
Gabriel Gómez.....	Universidad de la República
Martín Prats.....	Universidad de la República

Montevideo
martes 1 noviembre, 2016

Uso del Espectro Radioeléctrico en Uruguay y Oportunidades para el Uso de Radio Cognitiva, Patricia Hernández, Gonzalo Carro.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 218 páginas.

Compilada el martes 1 noviembre, 2016.

<http://iie.fing.edu.uy/>

La unión nos hace tan fuertes como débiles la
desunión.

ESOPPO

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

En estas líneas queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las personas que han colaborado directa o indirectamente en la realización de este proyecto.

A nuestros tutores María Simon, Benigno Rodríguez (FING-UDELAR) y Federico Beltramelli (FIC-UDELAR), quienes guiaron nuestro trabajo en todo momento.

A Juan Pablo Garella y Andrés Gomez de FING-UDELAR por brindarnos su tiempo y los primeros aportes para la investigación realizada.

A Sergio de Cola (FING-UDELAR), Héctor Budé (URSEC) y Leslie Green (URSEC) por el tiempo dedicado y los conocimientos compartidos en las entrevistas realizadas.

A Daniel Rosas Tapia (Colombia) y Andrés Navarro Cadavid (Colombia) quienes fueron nuestros profesores en los cursos a distancia que fueron realizados durante el desarrollo de este proyecto. A OEA/CITEL y a Universidad Icesi que cubrieron los gastos de los mencionados cursos.

A Horacio Todeschini (FIC-UDELAR) y Felipe Zipitría (FING-UDELAR) por el trabajo y el apoyo brindado en la elaboración de la página web que muestra la investigación realizada.

A German Capdehourat (FING-UDELAR) por su tiempo y sus aportes en el estudio de radio cognitiva.

En este proyecto de investigación han sido de gran importancia los conocimientos aportados por todos los que han participado de una u otra forma.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

A nuestros padres.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

Nos encontramos en una era donde los servicios y sistemas de telecomunicaciones experimentan un crecimiento sin precedentes y puede especularse que la cima aún está lejos. El avance tecnológico trae consigo la llamada convergencia; en este nuevo mercado la tecnología existente permite brindar a los usuarios todo tipo de comunicaciones electrónicas de diferentes fuentes de información en un solo dispositivo. La convergencia no solo se da a nivel de los dispositivos terminales sino también a nivel de las redes de comunicaciones que hoy en día integran múltiples servicios. Esto ha transformado la manera en que se ofrecen los servicios de telecomunicaciones y la forma de realizar negocios en el sector así como la calidad con que los usuarios reciben y perciben esta clase de servicios.

En particular las telecomunicaciones inalámbricas se preparan para enfrentar importantes desafíos como el aumento en la demanda de capacidad y acceso a los servicios de datos móviles lo que redundará en una necesidad mayor del recurso espectro radioeléctrico. Para satisfacer esta demanda existen diferentes enfoques. Uno es aumentar la cantidad de espectro radioeléctrico utilizado, aumentando así la capacidad de las redes, mientras que otro es el de optimizar la utilización del espectro a través de una gestión y un uso más eficiente de este recurso.

El espectro radioeléctrico es un recurso con capacidad de influir en la competitividad de un país, en la mejora de la calidad de vida, en la libertad de información y opinión, en los servicios y oportunidades que se ofrecen a sus ciudadanos e incluso en la creación de puestos de trabajo. Por lo tanto y con el objetivo de contribuir significativamente al desarrollo económico y social de un país, se hace necesaria una revisión y mejora de los mecanismos utilizados para la gestión de este recurso, no sólo considerando la demanda actual, sino anticipando las necesidades futuras que acompañan la innovación y la convergencia.

Las capacidades de cada país para aprovechar todas las ventajas que ofrece el uso del espectro radioeléctrico depende en gran medida de sus políticas con respecto a este recurso y de los mecanismos prácticos para su regulación y gestión.

En este marco se realiza este proyecto de investigación en el que se busca comprender la situación actual del recurso espectro en Uruguay y evaluar las oportunidades que la nueva realidad trae aparejadas. A partir de ello se pretende dar una mirada al estado de situación a la luz de nuevas tecnologías disponibles en la actualidad y plantear interrogantes acerca de si es posible gestionar y utilizar el recurso de forma más eficiente.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Prefacio

El presente proyecto ha sido realizado con los objetivos generales de brindar los elementos básicos para comprender la situación actual del Espectro Radioeléctrico (ERE) en Uruguay, exponer los resultados de la investigación sobre las formas de gestión y nuevas tecnologías aplicadas para un uso más eficiente de este recurso y lograr un mejor nivel de comprensión de los retos y oportunidades a las que se enfrentan los actores involucrados en la gestión y en el uso del ERE.

A lo largo de este proyecto de investigación se manejó un gran volumen de información debido a lo extenso de los temas tratados. A la hora de elaborar esta memoria fue preciso sintetizar esta información para cumplir los requisitos de formato. Por lo tanto algunos resultados de este trabajo se incluyen en los Apéndices.

El Apéndice A busca ser un apoyo a personas no directamente relacionadas con el ámbito de la ingeniería en telecomunicaciones interesadas en comprender el concepto de ERE. Por esta razón se utilizó un abordaje de los temas y un lenguaje adaptado para tal fin.

La bibliografía de este documento esta dividida en dos partes, bibliografía básica y bibliografía complementaria. La primera contiene los documentos en los que se apoya esta investigación mientras que la segunda puede ser consultada en caso de que se quiera profundizar aún más sobre los conceptos expresados en el texto. La bibliografía complementaria esta acompañada de un breve resumen de su contenido.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	VII
Prefacio	IX
1. Introducción	1
1.1. Metodología de la Investigación	2
1.2. Descripción del Documento	3
2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión	5
2.1. Definición y Características del ERE	5
2.2. Importancia del ERE	7
2.3. Gestión del ERE	8
2.3.1. Los Fundamentos de la Regulación Técnica	9
2.3.2. Actores	9
2.3.3. Conceptos Asociados a la Regulación del ERE	15
2.3.4. Particularidades de la Gestión del ERE	19
2.3.5. Marco Regulatorio Actual en Uruguay	21
2.3.6. Contexto Regional	29
2.3.7. Nuevos Retos en la Gestión del ERE	30
2.4. Conclusiones	32
3. Uso actual del ERE en Uruguay	35
3.1. Atribuciones	35
3.1.1. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias	36
3.1.2. Atribución por Servicio	36
3.1.3. Diferencias con la Atribución de Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)	37
3.2. Adjudicaciones	39
3.3. Asignaciones	41
3.3.1. Uso de las Bandas VHF y UHF	41
3.3.2. La Dimensión Geográfica del ERE	46
3.3.3. La Dimensión Temporal del ERE	50
3.4. Estadísticas	52
3.5. Conclusiones	54

4. Alternativas para el uso eficiente del ERE	55
4.1. Introducción	55
4.2. Servicios Móviles	55
4.2.1. Pequeñas Celdas	57
4.3. Ondas Milimétricas	60
4.3.1. Banda-V	61
4.3.2. Banda-E	62
4.4. Comunicaciones Ópticas en Espacio Libre	63
4.4.1. Láser en Espacio Libre	64
4.4.2. Li-Fi	65
4.5. Compartición de Espectro	65
4.5.1. Radios Cognitivas	66
4.6. Situación en Uruguay	67
4.7. Conclusiones	68
5. Radio Cognitiva	69
5.1. Principio de Acceso Dinámico al ERE	69
5.2. Sistemas de Radio Cognitivos	71
5.2.1. Características de los CRS	72
5.2.2. Radios Definidos por Software	74
5.2.3. Beneficios	75
5.2.4. Desafíos	76
5.3. Normalización	77
5.3.1. Estándar IEEE 802.22 WRAN	77
5.3.2. Estándar IEEE 802.11af WLAN	85
5.3.3. Estándar IEEE 802.16h	87
5.4. Experiencias con Radio Cognitiva	89
5.4.1. NICT: IEEE 802.11af	90
5.4.2. NICT, Hitachi Kokusai e ISB Corporation: IEEE 802.22	92
5.4.3. Ofcom Pilotos TVWS	92
5.4.4. Microsoft y Adaptrum Demostración Junta Anual del BID	94
5.4.5. Plan Ceibal Piloto TVWS	94
5.5. Dispositivos CR	95
5.5.1. Productos CR Autorizados por la FCC	95
5.5.2. Adaptrum ACRS 2.0	98
5.6. Conclusiones	100
6. Conclusiones	103
A. Espectro Radioeléctrico	107
A.1. Introducción	107
A.2. Un Poco de Historia	107
A.3. Ondas Electromagnéticas	109
A.3.1. El Concepto de Onda	109
A.3.2. Crestas Valles y Amplitud de una Onda	110
A.3.3. Longitud de Onda Frecuencia y Velocidad de Propagación	111
A.3.4. Ancho de Banda	112
A.3.5. Onda Electromagnética	113
A.4. Espectro Electromagnético y Espectro Radioeléctrico.	114
A.5. Modulación y Conversión de Frecuencia	120

B. Esquema Organizacional de la UIT	125
B.1. La Conferencia de Plenipotenciarios	126
B.2. El Consejo de la UIT	126
B.3. La Secretaria General	126
B.4. Oficinas Sectoriales	126
B.5. Marco Jurídico	127
C. Breve Historia de las Telecomunicaciones en Uruguay	129
D. Proceso de una CMR	133
E. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias en Uruguay	137
F. Servicios de Radiocomunicaciones Definiciones UIT.	141
G. Resoluciones MERCOSUR	145
H. Asignaciones por Servicio	155
I. Internet de las Cosas	169
J. Contenido del CD	173
K. Página web de Esopo	175
Bibliografía Básica	177
Bibliografía Complementaria	181
Glosario	187
Índice de tablas	197
Índice de figuras	199

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

El auge de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), que está acompañado por una vertiginosa evolución tecnológica y el crecimiento en la demanda de acceso a la amplia gama de servicios y aplicaciones que tienen como base las radiocomunicaciones, trae consigo importantes desafíos en materia política, social y económica, tanto a nivel nacional como internacional.

Las radiocomunicaciones son parte esencial de las TIC y el espectro radioeléctrico es el recurso natural fundamental para su desarrollo. En la actualidad, gracias al uso del espectro, es posible comunicarse a distancia además de tener a disposición de los ciudadanos y de las entidades privadas o estatales servicios tan diversos como la radio, la televisión, los teléfonos móviles, el acceso a Internet, las comunicaciones con fines militares, médicos y educativos, las comunicaciones náuticas y aeronáuticas, entre otras. Como producto de las nuevas necesidades en materia de radiocomunicaciones se requieren soluciones más universales, más robustas y más complejas.

En el escenario actual se plantea la necesidad de revisar los esquemas regulatorios en los sectores relacionados con las TIC a fin de evitar posibles restricciones al desarrollo derivadas de estructuras desactualizadas. Lo anterior, acompañado del actual incremento en la demanda de dispositivos móviles e inalámbricos, plantea nuevas interrogantes sobre el uso del espectro radioeléctrico y las políticas que lo gestionan.

Con el objetivo de dar el primer paso hacia generar un espacio de divulgación de conocimiento, promoviendo discusiones fundamentadas en el ámbito de la gestión y el uso del ERE en Uruguay, se lleva a cabo este proyecto que centra su atención en el recurso espectro radioeléctrico y las oportunidades que traen las nuevas tecnologías para su uso más eficiente. Para ello la Facultad de Ingeniería (FING) trabaja en conjunto con la Facultad de Información y Comunicación (FIC) para abordar el tema de forma multidisciplinaria y promover la difusión de la información obtenida.

La importancia que han tomado las telecomunicaciones ha producido una transformación de las TIC cuyo impacto ha afectado a todos los sectores de la economía y de la sociedad. Por esta razón la FIC manifiesta su interés en comprender este impacto desde el punto de vista técnico, complementando la visión política, económica y comunicacional que cultiva.

En este marco, este proyecto de investigación está dividido en dos grandes partes. La primera parte consiste principalmente de un análisis detallado de los procedimientos administrativos involucrados en la gestión del ERE a nivel nacional e internacional y un relevamiento actualizado del uso del ERE en Uruguay basado mayormente en información de acceso público. La segunda parte comprende una investigación de las tendencias a nivel mundial en cuanto a los usos de las nuevas tecnologías para el mejor

aprovechamiento del recurso ERE, centrando su atención en la radio cognitiva, en inglés *Cognitive Radio* (CR).

Debido a que el ERE es un recurso vasto, esta investigación centra su atención en las bandas de frecuencia de frecuencia ultra alta, en inglés *Ultra High Frequency* (UHF) y frecuencia muy alta, en inglés *Very High Frequency* (VHF), las cuales tienen un gran atractivo debido a sus características técnicas. Esto no implica que no se haga mención a sistemas de radiocomunicaciones y nuevos usos que trabajen fuera de estas bandas.

La presente investigación fue presentada en las primeras Jornadas de Investigación de la FIC de la UDELAR¹.

1.1. Metodología de la Investigación

Esta investigación tiene su base en la lectura y revisión de diversas fuentes de información: libros, artículos, publicaciones científicas, revistas, foros, conferencias, charlas, estándares internacionales, entre otras. La mayoría de las fuentes consultadas fueron descargadas de Internet, otras fueron aportadas en las entrevistas y por los tutores de este proyecto. Se realizaron a lo largo de este proyecto dos cursos a distancia que aportaron valiosos conocimientos:

- Gestión del Espectro Radioeléctrico Utilizando Herramientas de Última Generación (*ITU Academy*)
- Radio Cognitiva y Regulación: Nuevos Retos de la Gestión de Espectro (Universidad Icesi)

Se consideró clave para adentrarse en el tema obtener información de la situación de las TIC a nivel nacional e internacional. El principal aporte en este sentido fue de diversos artículos publicados por organismos internacionales, empresas del ramo de telecomunicaciones y universidades, además de los cursos previamente mencionados.

Luego de comprender la situación global de las TIC, se centró la atención en el estudio del espectro radioeléctrico, su gestión y su uso en Uruguay. Como primer paso se realizó una reunión con el grupo de investigación Políticas, Medios Audiovisuales, Tecnologías y Espectro (POLIMATE), que había comenzado un estudio sobre el espectro radioeléctrico en Uruguay. En dicha reunión se obtienen consejos e información recolectada por el grupo.

Para el estudio de qué es el ERE se consultaron libros especializados en ondas electromagnéticas, principalmente libros recomendados para estudiantes de ingeniería eléctrica en la FING. Dado que se debía desarrollar este concepto para que sea comprendido por personas de otras especialidades se debió realizar un trabajo de adaptación de los temas vinculados al ERE para poder expresarlos en un lenguaje accesible y claro.

En lo referente a la gestión del ERE la información se recolectó fundamentalmente de material descargado de Internet y de los cursos que se realizaron durante el proyecto. A nivel internacional la UIT cuenta con información pública accesible, clara y detallada que permitió darle a la investigación un buen marco internacional actualizado. A nivel nacional la búsqueda de información sobre la gestión de este recurso fue compleja, este equipo de trabajo encontró que la información pública es poco clara y está fraccionada. Se estudió primero la historia de la regulación del recurso en Uruguay marcada principalmente por los actores involucrados en ella, luego se estudió el rol que cada actor

¹<http://www.prodic.edu.uy/jific>

1.2. Descripción del Documento

cumple actualmente y finalmente las principales leyes, decretos y resoluciones relacionadas con dicha gestión. Lo anterior fue complementado con entrevistas a personas vinculadas al tema.

Para el relevamiento del uso del ERE en Uruguay la información presentada en este documento proviene de las siguientes fuentes:

- Decretos del Poder Ejecutivo Uruguayo
- Leyes del Estado Uruguayo
- Resoluciones de la URSEC
- Información intercambiada con el grupo de investigación POLIMATE
- Información extraída de reuniones con la URSEC
- Resoluciones del Mercado Común del Sur (MERCOSUR)
- Publicaciones varias sobre las tecnologías aplicadas

La información disponible sobre la asignación del ERE no se encuentra centralizada y en algunos casos es incompleta. No obstante, el alcance de esta investigación no incluía realizar mediciones en aquellas porciones del espectro de las cuales no se cuente con información suficiente para determinar su uso.

Para el estudio de las alternativas en el uso del ERE, se consultaron publicaciones de empresas y organismos internacionales, así como publicaciones académicas. El análisis de CR se basa en tres estándares del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, en inglés *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) y entrevistas con personas de la FING que estudian el tema.

Toda la información obtenida durante la investigación requirió una clasificación, confrontación de diferentes fuentes, ordenamiento de conceptos extraídos y sobre todo, un ejercicio de síntesis importante para llegar a los resultados expuestos en el proyecto.

1.2. Descripción del Documento

Este documento está constituido por dos grandes partes. En la primera (Capítulos 2 y 3), se tratan los conceptos básicos relacionados con el ERE, los motivos que hacen que sea necesaria una gestión eficiente de este recurso y los mecanismos de gestión utilizados, así como el uso que se le da a este recurso en Uruguay. En la segunda parte (Capítulos 4 y 5), se centra la atención en las alternativas y nuevas tendencias para el uso del ERE, profundizando en particular en el tema de Radio Cognitiva. Vale aclarar que el énfasis en éste último tema no responde a una consideración sobre su importancia en comparación con el resto, sino que por motivos de alcance y tiempos del proyecto no era razonable profundizar en todas las alternativas mencionadas y desde el inicio del proyecto se eligió trabajar sobre esta tecnología a los efectos de contribuir a profundizar el conocimiento sobre ella.

El Capítulo 2 comienza con un repaso del concepto de ERE y la importancia que tiene en la actualidad. A continuación se trata el tema de la gestión del ERE, en función de los actores involucrados a nivel nacional e internacional en la formulación de regulaciones y toma de decisiones en este tema. Avanzado este capítulo el interés se vuelca a la regulación del ERE en Uruguay. Complementando lo expuesto se incluye en el Apéndice A una descripción detallada del concepto de ERE destinado a un público no necesariamente vinculado a la ingeniería, siendo éste revisado en varias ocasiones en forma conjunta con personas de la FIC. Se podrá encontrar asimismo una reseña histórica

Capítulo 1. Introducción

acerca de la evolución de los organismos reguladores de las telecomunicaciones en Uruguay y un esquema organizacional de la UIT, en los Apéndices C y B respectivamente. Como apoyo a una comprensión global de la gestión a nivel internacional del ERE, en el Apéndice D se relata el proceso de una Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones.

En el Capítulo 3, se presenta el estudio sobre el uso actual del ERE en Uruguay, organizado en torno a las tareas de atribución, adjudicación y asignación. Es importante comprender y familiarizarse con estos tres conceptos, ya que en un lenguaje coloquial a menudo se utilizan indistintamente para ciertas aplicaciones, mientras que si se utilizan aplicados al espectro sus significados son totalmente diferentes. En el Apéndice E se adjunta el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias publicado por la URSEC restringido a las bandas estudiadas en este proyecto y en el Apéndice F se proporciona una lista de las definiciones de la UIT para todos los servicios que figuran en el cuadro. En el Apéndice G se brinda un resumen de aquellas resoluciones tomadas por el MERCOSUR, desde su creación a la fecha, que involucran la utilización de las bandas de frecuencia en estudio. En el Apéndice H se abordan algunos de los servicios que utilizan las bandas de VHF y UHF, realizando para cada uno de ellos una descripción técnica sobre la tecnología aplicada en Uruguay.

En la segunda parte, se cambia el foco hacia el estudio de modalidades alternativas para el uso del ERE, es decir tendencias mundiales que se implementan para aprovechar el recurso de forma más eficiente. De eso precisamente trata el Capítulo 4, el cual describe el modelo de pequeñas celdas, las ondas milimétricas, las comunicaciones ópticas en espacio libre y la compartición de ERE. En el Apéndice I se explica además el concepto de Internet de las cosas, en inglés *Internet of Things* (IoT).

En el Capítulo 5, se desarrolla el tema de la Radio Cognitiva (CR), presentando sus conceptos y definiciones básicas, un resumen de tres estándares IEEE de CR, experiencias piloto realizadas en los últimos años por diversas organizaciones y un análisis de diferentes productos comerciales que permiten implementar CR.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones extraídas del proyecto, así como posibles líneas de trabajo a futuro para su continuidad. En el Apéndice J se explica la estructura del CD entregado junto a este documento y las referencias a los documentos que contiene. En el Apéndice K se encuentra información sobre la página web elaborada.

Capítulo 2

Espectro Radioeléctrico y su Gestión

El espectro radioeléctrico es el medio físico por el cual se transmiten las ondas electromagnéticas (OEM) que hacen posibles las radiocomunicaciones, por lo tanto es un concepto fundamental en materia de comunicaciones inalámbricas. Las frecuencias que componen este espectro soportan una amplia gama de aplicaciones para negocios, usos personales, industriales, científicos, médicos y culturales, tanto públicos como privados. Como se verá estas aplicaciones tienen una importancia creciente para el desarrollo económico y social de los países. El desarrollo tecnológico que actualmente nos rodea crece en base a este recurso que se puede calificar de finito, compartido y escaso.

En este capítulo se define el concepto de ERE. Se hará una breve mención a las características más destacadas de las diferentes bandas de frecuencia y sus usos tradicionales, así como la importancia que tiene este recurso en la actualidad.

Se presentarán también aquí los fundamentos que llevan a gestionar y regular el espectro radioeléctrico, se detallan los actores involucrados en la gestión, tanto nacionales como internacionales y se describirán algunos conceptos básicos con el objetivo de ayudar a comprender mejor la problemática ligada a la utilización eficiente del espectro.

2.1. Definición y Características del ERE

La definición de ERE, tal y como lo ha definido la UIT¹ es: *“Las frecuencias del espectro electromagnético usadas para los servicios de difusión y servicios móviles, de policía, bomberos, radioastronomía, meteorología y fijos.”*. Este concepto no es un concepto estático, pues a medida que avanza la tecnología los rangos de frecuencia utilizados en comunicaciones se van ampliando.

Como no todas las ondas electromagnéticas (OEM) tienen el mismo comportamiento, el espectro electromagnético se divide convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia. Existen una amplia variedad de aspectos a considerar para establecer las diferentes bandas del espectro electromagnético y para utilizar las diferentes frecuencias para distintas aplicaciones. Entre los elementos a tener en cuenta se encuentran:

- **Atenuación con la frecuencia:** a menos frecuencia generalmente se tiene menor atenuación de la señal y por lo tanto mayor alcance.
- **Factores climatológicos:** las diferentes frecuencias son afectadas de forma distinta por factores como la lluvia, niebla, calor, etc.

¹Organismo especializado de las Naciones Unidas con sede en Ginebra (Suiza).

Capítulo 2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión

- **Comportamiento frente a obstáculos:** factor que involucra los llamados mecanismos de propagación.
- **Comportamiento frente a las capas de la atmósfera:** las distintas frecuencias no se comportan igual en la ionósfera o en la tropósfera e incluso hay ondas que se propagan por la superficie terrestre.

En la Fig. 2.1 se muestran las distintas regiones del espectro electromagnético donde se identifica la parte que corresponde al ERE.

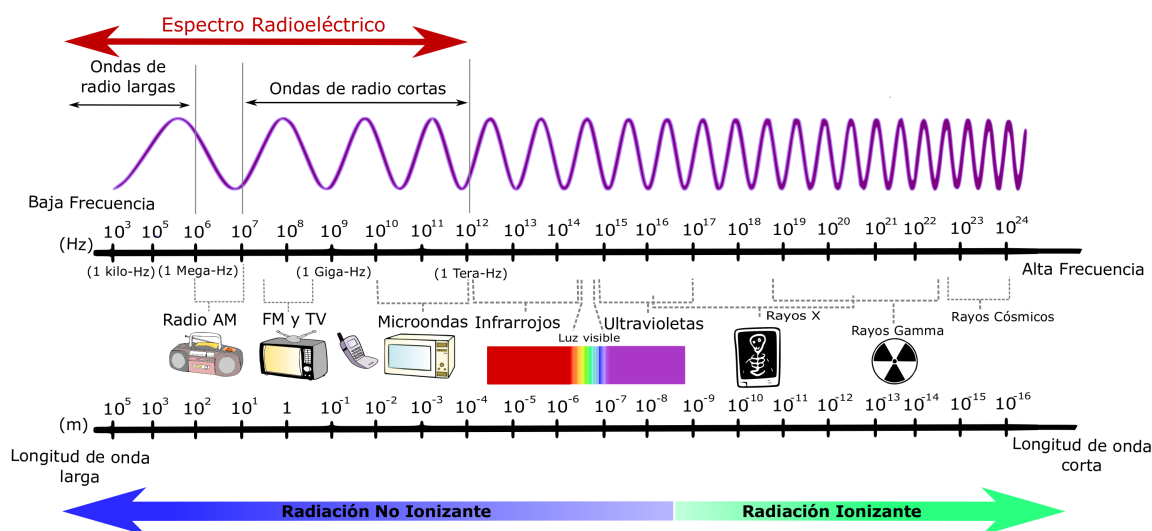


Figura 2.1: Espectro electromagnético².

El medio de transmisión influye en la propagación de las ondas electromagnéticas³ mediante fenómenos físicos como reflexión, refracción, difracción, dispersión o absorción, entre otros. Sus efectos dependen del medio (tipo de terreno, condiciones y capas de la atmósfera) así como de la frecuencia de la onda, entre otros factores. Por ejemplo, a partir de ciertas frecuencias altas las ondas pueden atravesar las capas de la atmósfera dando lugar a comunicaciones con el espacio exterior empleando satélites espaciales para comunicaciones⁴.

Formalmente y según la UIT el rango de frecuencias que comprende el espectro radioeléctrico es de 0 Hz a 3000 GHz. El Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) de la UIT establece las llamadas bandas de frecuencia⁵. El rango teórico de frecuencias está limitado en la práctica. Inferiormente por 9 kHz, estas frecuencias tienen baja capacidad para transportar información y en ellas se producen interferencias considerables, por lo que no se suelen emplear. Por otra parte, las frecuencias más altas del espectro están “poco exploradas”, esto es, la tecnología comercial disponible en la actualidad no es capaz de utilizar de forma efectiva dichas frecuencias. Por tanto, en la práctica, el espectro radioeléctrico se reduce a un recurso que comprende las frecuencias desde 9 kHz hasta 275 GHz. Existen frecuencias fuera de este rango regulado por UIT (por

²Elaboración propia en base a figuras descargadas de Internet.

³<http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiacion-y-propagacion/contenidos/apuntes/presentaciones/rdpr3.pdf>

⁴En [51] y [52] se encuentra información para profundizar en este tema.

⁵Artículo 2 - Sección I del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR).

ejemplo, en infrarrojos y en luz visible, en frecuencias del orden de centenas de THz) que se emplean también para telecomunicaciones.

Son muchas las consideraciones a tener en cuenta a la hora de determinar el conjunto de frecuencias aptas para determinado servicio de radiocomunicación. En la Fig. 2.2 se muestra como varían la atenuación, la capacidad, la cobertura (alcance) y el coste de equipos con las diferentes bandas de frecuencia.

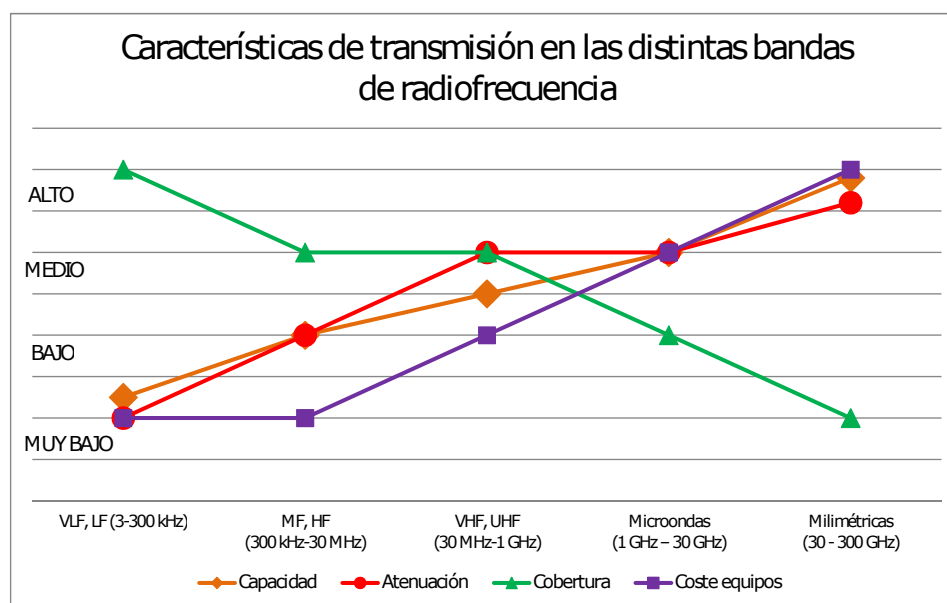


Figura 2.2: Características bandas de radiofrecuencia⁶.

Observando la Fig. 2.2, se hace notorio que algunas bandas de frecuencia pueden ser más deseables o codiciadas que otras para ser utilizadas por determinado tipo de servicio, debido a sus características. A baja frecuencia se tiene bajo coste en los equipos, mayor cobertura, baja atenuación pero baja capacidad para transmitir información. A alta frecuencia se tiene todo lo contrario. En la Tabla A.2 en el Apéndice A se muestran las bandas de frecuencia, sus características de propagación y algunos de los servicios que generalmente se encuentran en cada una de ellas [1].

2.2. Importancia del ERE

Desde hace ya unos años se ha estudiado la incidencia de las TIC en el desarrollo socio-económico de los países. Para poder tomar decisiones en materia de política que sean eficaces y realistas se dispone de indicadores comparables y de parámetros mensurables. Dos de estos indicadores son el Índice de Desarrollo de las TIC (IDT) y el indicador de disposición de red, en inglés *Networked Readiness Index* (NRI).

El IDT constituye una herramienta para comparar la sociedad de la información que resulta útil a gobiernos, proveedores de servicio y analistas del mercado. El IDT es un índice compuesto que combina 11 indicadores⁷. En Uruguay, el desarrollo de las

⁶Elaboración propia.

⁷<http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/misr2015/MISR2015-ES-S.pdf>

telecomunicaciones acompañó las tendencias mundiales, es así como en el año 2015 fue el país mejor clasificado de América Latina según el IDT⁸.

El grado de penetración de las TIC en un país o región contribuye positivamente en el impulso de su desarrollo social y económico. En el Reporte Global de las Tecnologías de la Información 2015 del Foro Económico Mundial⁹ se publica anualmente el NRI, este índice evalúa desde el año 2001 los factores, políticas e instituciones que permiten a un país aprovechar los beneficios de las TIC¹⁰. El último informe¹¹ publicado en abril del año 2015 confirma la elevada correlación entre la adopción de las TIC por parte de los gobiernos y la capacidad para generar un impacto económico y social favorable. El NRI ubica a Uruguay en el puesto 46 del mundo, escalando 10 posiciones respecto a la medición del año 2014.

Thierry Geiger, economista principal del Foro Económico Mundial y coautor del informe opina que: *“Aunque los teléfonos móviles se utilizan en todas partes del mundo, la revolución de las TIC no se llevará a cabo por voz o SMS. Sin un mejor acceso a Internet a precios accesibles, una gran parte de la población mundial seguirá viviendo en la pobreza digital y se perderá las enormes ventajas sociales y económicas que ofrecen las TIC”*.

En el desarrollo de las TIC juega un importante papel el ERE por ser el recurso natural sobre el cual se implementan muchos de los servicios de telecomunicaciones que se brindan en la actualidad. El crecimiento exponencial que han experimentado las TIC en los últimos años y el constante avance de los servicios móviles, no solo en materia de telefonía celular, sino también para ser aplicados en educación [2], seguridad, cultura, medicina y negocios entre otros, ha llevado a que la demanda sobre el espectro radioeléctrico crezca de manera vertiginosa. Para el 2020 se estima que el 90 % de los accesos móviles en América Latina serán por tecnologías 3G o 4G [3].

La gran variedad de usos, la importancia del ERE como recurso económico, político y social para el desarrollo de los países y para la sociedad, sumados a la cantidad de agentes públicos y privados interesados en el uso de este recurso llevan a que la gestión del ERE requiera una atención particular. En la siguiente sección se detalla la gestión del ERE tanto en el ámbito internacional como nacional.

2.3. Gestión del ERE

La gestión del espectro radioeléctrico (ERE) es una combinación de aspectos científicos, técnicos, jurídicos, económicos y administrativos que se combinan, para garantizar que este recurso sea usado de manera eficiente y sin interferencias. La gestión del espectro es compleja desde el punto de vista técnico, económico y legal, se basa en un conjunto de conceptos específicos alrededor del espectro los cuales se definirán en esta sección.

⁸<http://www.itu.int/net4/ITU-D/idi/2015/#idi2015byregion-tab>

⁹Institución internacional dedicada a mejorar el estado del mundo a través de la cooperación entre los sectores público y privado en un espíritu de ciudadanía mundial. Esta institución colabora con líderes empresariales, políticos, académicos y otros líderes de la sociedad para formular agendas mundiales, regionales y sectoriales.

¹⁰Esta evaluación se basa en la suma de 53 indicadores individuales agrupados en cuatro componentes principales: entorno, preparación, uso e impactos.

¹¹http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global.IT_Report_2015.pdf

2.3.1. Los Fundamentos de la Regulación Técnica

El ERE es un recurso escaso y es, además, un bien preciado que se utiliza en servicios esenciales para la sociedad. Dependiendo de la clase de servicio que se quiera ofrecer se prefiere el uso de una banda determinada del ERE. Por tal motivo, pueden darse algunos conflictos a la hora de atribuir frecuencias a servicios en el ámbito de las conferencias internacionales y a la hora de asignar ERE en el plano nacional.

Debido a la multiplicidad de servicios que pueden prestarse por medio del ERE su organización y regulación resulta indispensable para permitir su desarrollo, sobre todo al tratarse de un bien intangible. Si a las OEM que conforman el ERE no se las canaliza adecuadamente, si no se ordena su tráfico, es posible que se generen interferencias que afectan la calidad de todas las emisiones [4].

Como se ha señalado, las OEM se propagan en el espacio y no conocen las fronteras territoriales de cada país, por esta razón se crean organismos internacionales y regionales que intervienen en materia de ERE. El control y gestión del espectro se da principalmente por medio de tratados y acuerdos internacionales que fijan los lineamientos que habrán de adoptarse posteriormente al interior de cada país.

Básicamente, tras planificar el empleo que se da a cada banda de frecuencia, especificando el servicio que puede utilizarla y la tecnología que debe emplearse, se concede el derecho de uso a determinados agentes mediante decisiones administrativas. Mediante este sistema se solventan los problemas que pudieran aparecer debido a interferencias, adicionalmente y dado que dicha planificación se hace a nivel mundial, se asegura en un gran porcentaje, la compatibilidad global de los sistemas de comunicación que genera importantes economías de escala en el mercado de dispositivos electrónicos.

2.3.2. Actores

Los organismos reguladores, asesores de estos organismos, responsables de la toma de decisiones, administradores y personal pueden organizarse de diversas formas. Dicha organización dependerá de la estructura institucional de cada país. Las funciones y los objetivos de los distintos organismos reguladores son los factores que determinan las diferencias en la organización. Se detallan a continuación los principales actores involucrados en la regulación de las telecomunicaciones a nivel internacional, regional y nacional.

Unión Internacional de Telecomunicaciones

La UIT¹² es el organismo especializado de las Naciones Unidas para las TIC. Actualmente tiene entre sus funciones la coordinación del espectro radioeléctrico y de las órbitas de satélites a escala mundial, elabora normas técnicas que garantizan la interconexión¹³ continua de las redes y las tecnologías y busca mejorar el acceso a las TIC

¹²<http://www.itu.int>

¹³El campo de la interconexión de redes de telecomunicación es amplio e interdisciplinario, en él existen elementos económicos, regulatorios y técnicos que determinan la viabilidad del servicio. Sin embargo dichos elementos han de configurarse en base a una serie de principios, que conforman la interconexión de redes de telecomunicación. La interconexión es un aspecto importante para los consumidores. Los usuarios de servicios de telecomunicaciones no pueden comunicarse entre sí, o conectarse a los servicios que requieren, si no existen acuerdos de interconexión idóneos.

de todas las comunidades a nivel mundial.

Comienzos de la UIT¹⁴

En 1844 se realiza la primera comunicación telegráfica entre las ciudades de Washington y Baltimore en los Estados Unidos. Unos diez años más tarde el telégrafo ya era un medio de comunicación popular en muchos países pero cada uno utilizaba un sistema telegráfico diferente. Cuando fue necesaria la comunicación entre países se descubren los problemas de incompatibilidad que generaba el uso de diferentes sistemas, por lo tanto se establecieron acuerdos para solucionarlos.

Se fueron estableciendo acuerdos individuales que luego se transformaron en regionales y el rápido crecimiento de las redes telegráficas llevó a 20 estados a firmar el primer Convenio Telegráfico Internacional. En 1865 se funda la Unión Telegráfica Internacional en París, en 1934 adoptó su nombre actual (UIT) y en 1947 se convirtió en organismo especializado de las Naciones Unidas. Dentro de la UIT, se forma en 1956 el Comité Consultivo Internacional de Telegrafía y Telefonía (CCITT).

Actualmente son 193 los países miembros de UIT y más de 700 miembros de sector, entre ellos figuran organismos científicos e industriales, operadores públicos y privados, radiodifusores y organizaciones regionales e internacionales. Uruguay es miembro de la UIT y como parte integrante de la estructura del país, URSEC trabaja y participa en las diferentes actividades de los sectores de este organismo, asesorando técnicamente en las áreas que forman parte de sus competencias.

Estructura de la UIT¹⁵

Desde 1993 la UIT cuenta con tres principales áreas de actividad organizadas en oficinas sectoriales (comúnmente llamadas sectores) que desarrollan su labor a través de conferencias y reuniones, los sectores son:

- El sector de radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R)
- El sector de normalización de las telecomunicaciones de la UIT (UIT-T)
- El sector de desarrollo de las telecomunicaciones de la UIT (UIT-D)

El UIT-R desempeña un papel fundamental en la gestión internacional del espectro radioeléctrico y de las órbitas de los satélites. Coordina el vasto y creciente número de servicios de radiocomunicaciones. A través de su Oficina de Radiocomunicaciones, el sector hace de registro central del uso de las frecuencias internacionales. Así pues, registra y mantiene actualizado el registro maestro internacional de frecuencias, en inglés *Master International Frequency Register* (MIFR)¹⁶. En el año 2014 el MIFR contenía 2.3 millones de asignaciones de frecuencias y se estima que se añaden aproximadamente 200000 asignaciones cada año¹⁷.

¹⁴<http://www.itu.int/en/history/Pages/ITUsHistory.aspx>

¹⁵<http://www.itu.int/es/about/Pages/whatwedo.aspx>

¹⁶El MIFR es una base de datos que contiene las características del espectro (“asignaciones de frecuencia”) de las estaciones de radiocomunicaciones en funcionamiento en todo el mundo y confiere a estas estaciones el reconocimiento internacional y la protección frente a las interferencias.

¹⁷<https://www.itu.int/en/plenipotentiary/2014/newsroom/Documents/backgrounders/pp14-background-itu-r-managing-radio-frequency-es.pdf>

El UIT-T es lo que anteriormente se llamó CCITT, este sector se encarga de escribir las recomendaciones para el área de comunicaciones telefónicas y comunicación de datos. Las normas técnicas de la UIT (llamadas comúnmente recomendaciones) son fundamentales para el funcionamiento de las actuales redes de TIC. Cada año la UIT elabora o revisa un promedio de 150 normas.

El UIT-D se creó para contribuir a difundir el acceso equitativo, sostenible y con un costo razonable a las TIC, como medio para estimular un desarrollo social y económico más amplio. La Conferencia Mundial de Desarrollo de las Telecomunicaciones (CMDT), que se celebra cada cuatro años, define prioridades concretas para contribuir al logro de estos objetivos a través de una serie de iniciativas regionales y de actividades a escala mundial.

La Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR) es un acontecimiento fundamental para el cumplimiento de las principales responsabilidades de la UIT y es parte del UIT-R, que es el único sector de la Unión que elabora textos con carácter de tratado internacional. Otros organismos que pueden elaborar textos con carácter de tratado son la Conferencia de Plenipotenciarios, la Conferencia Mundial de Telecomunicaciones Internacionales (CMTI) y las Conferencias Regionales de Radiocomunicaciones (CRR).

La última CMR tuvo lugar en Ginebra (Suiza), del 2 al 27 de noviembre del año 2015¹⁸. Las CMR tienen lugar cada tres o cuatro años, la próxima CMR se realizará en el año 2019. El mandato de las CMR es examinar y, cuando corresponda, revisar el RR, que es el tratado internacional por el que se rige la utilización del espectro de radiofrecuencias y de las órbitas de los satélites geoestacionarios y no geoestacionarios. Las revisiones se efectúan sobre la base de un orden del día fijado por el consejo de la UIT, que tiene en cuenta las recomendaciones formuladas por las CMR anteriores.

La Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del año 2015 (CMR-15) examinó los resultados de los estudios relativos a las opciones para mejorar el marco reglamentario internacional del espectro sobre la base de la eficiencia, el carácter apropiado y los efectos del RR para la evolución de las aplicaciones, sistemas y tecnologías actuales, emergentes y futuras. También se tomaron decisiones acerca de la manera más beneficiosa y eficiente de explotar el limitado recurso del espectro de radiofrecuencias y de gestionar las órbitas de los satélites, factores que resultan esenciales y cada vez más valiosos para el desarrollo de la economía mundial en el Siglo XXI¹⁹. Entre los temas que se anotaron como pendientes para la agenda de la próxima CMR (CMR-19) se encuentran la asignación de espectro adicional para servicios Wi-Fi; nuevas bandas por encima de los 24 GHz para servicios móviles y un marco regulatorio para el funcionamiento de las llamadas “plataformas en movimiento” como drones o globos de conectividad²⁰.

Cabe aclarar aquí que la UIT no es un regulador a escala mundial en el sentido de que la regulación nacional del espectro la realiza cada país. El RR es un tratado internacional que gobierna la utilización del espectro de radiofrecuencias y de las órbitas de los satélites geoestacionarios y no geoestacionarios, cubriendo los aspectos legales y técnicos, es redactado y actualizado por los Estados Miembros de la UIT en el marco de cada CMR. Este reglamento también proporciona reglas para el mantenimiento de los registros de frecuencias y las órbitas de los satélites que utilizan los diferentes países.

En el Apéndice B se encuentra información detallada sobre la estructura completa

¹⁸<http://www.itu.int/es/ITU-R/conferences/wrc/2015/Pages/default.aspx>

¹⁹Para más información sobre la CMR-15 consultar <https://itunews.itu.int/Es/5853-Conferencia-Mundial-de-Radiocomunicaciones-2015.note.aspx>.

²⁰Un ejemplo de estas plataformas es el proyecto *Loon* de *Google* del que se puede consultar información en <http://www.google.com/loon/>.

de la UIT y en el Apéndice D se detalla el proceso de preparación de cada CMR.

Comisión Interamericana de Telecomunicaciones

La CITELE²¹ es el organismo asesor de la OEA en asuntos relacionados con las telecomunicaciones reconocido por la UIT para la región 2 (Las Américas). Fue establecida por la Asamblea General de la OEA en el año 1994, con la misión de “Facilitar y promover el desarrollo integral y sostenible de las telecomunicaciones y las TIC interoperables, innovadoras y fiables en las Américas, basado en principios de universalidad, equidad y asequibilidad”²².

Actualmente son miembros de CITELE los 35 países independientes de las Américas miembros de la OEA y tiene más de 100 miembros asociados provenientes de la industria de telecomunicaciones, Internet, medios electrónicos, entre otros.

Estructura

La CITELE esta compuesta por

- Asamblea de la CITELE
- Comité Directivo Central (COM/CITELE)
- Comité Consultivo Permanente I (CCPI)
- Comité Consultivo Permanente II (CCPII)
- Secretaría de la CITELE

La Asamblea de la CITELE tiene como fin servir de Foro Interamericano para que las mas altas autoridades de telecomunicaciones de sus Estados Miembros intercambien opiniones y experiencias, fija las políticas para el cumplimiento de los objetivos establecidos en su estatuto, elige los miembros del COM/CITELE y establece los Comités Consultivos Permanentes, entre otras funciones²³. Sus reuniones se celebran cada 4 años.

El COM/CITELE es el órgano directivo de la CITELE compuesto por representantes de 13 Estados Miembros. El CCPI es el comité asesor de la CITELE en todo lo relacionado a las telecomunicaciones y las TIC, el CCPII es el comité asesor de la CITELE en todo lo relacionado a las radiocomunicaciones incluyendo radiodifusión. Ambos reportan al COM/CITELE.

Actualmente Uruguay es miembro del COM/CITELE, electo como tal en febrero del año 2014²⁴. En el ámbito del CCPI Uruguay posee la vicepresidencia del Grupo de Desarrollo y a nivel del CCPII preside el Grupo de Trabajo para la Preparación de la CITELE para las Conferencias Regionales y Mundiales de Radiocomunicaciones, adicionalmente es vicepresidente del CCPII. En CITELE así como en otros organismos internacionales el objetivo es alcanzar posiciones comunes en los diversos temas que se tratan, a fin de llevar la postura de la región a ámbitos de mayor alcance, como el que constituye la UIT. Asimismo, Uruguay a través de URSEC es quien ejerce la coordinación del Grupo de Desarrollo de Recursos Humanos de CITELE.

²¹<https://www.citel.oas.org/>

²²Extraído del *Plan estratégico de la CITELE para el período 2014 - 2018*.

²³Para más información se puede consultar el Plan Estratégico CITELE 2014 - 2018 en https://www.citel.oas.org/es/Documents/Acerca-de-la-CITELE/PLAN%20ESTRATEGICO%20CITELE%202014-2018_e.pdf

²⁴Durante la VI Asamblea de CITELE celebrada en Santo Domingo, República Dominicana.

Mercado Común del Sur

El MERCOSUR²⁵ es un proceso de integración regional que desde sus orígenes tuvo como objetivo principal propiciar un espacio para acuerdos entre sus países miembros que diera lugar a oportunidades comerciales y de inversiones. Actualmente está integrado por Argentina, Brasil, Paraguay, Uruguay, Venezuela y Bolivia.

El Grupo Mercado Común (GMC) es uno de los tres órganos con capacidad decisoria que forman el MERCOSUR²⁶. Sus normas se denominan resoluciones y son de aplicación obligatoria en los países miembros. Dentro del GMC se desenvuelven los Sub-Grupos de Trabajo (SGT), organismos bajo su dependencia encargados de analizar y proponer decisiones sobre todas las cuestiones relacionadas con la integración, con excepción de los temas aduaneros y arancelarios que corresponden al CCM. Hoy en día existen 17 SGT distintos. El SGT N° 1 se denomina *Comunicaciones* y se integra por 4 comisiones temáticas.

- Comisión Temática de Asuntos Postales (CTAP)
- Comisión Temática de Radiocomunicaciones (CTRc)
- Comisión Temática de Radiodifusión (CTRd)
- Comisión Temática de Servicios Públicos de Telecomunicaciones (CTSPT)

En todas las comisiones el objetivo es alcanzar un mercado común de telecomunicaciones y servicios postales, eliminando aspectos normativos que dificulten el proceso de integración entre los países. A nivel MERCOSUR las decisiones se toman por consenso y en el ámbito de las comisiones lo que surgen son recomendaciones al GMC, este órgano las transforma en resoluciones propias, las cuales luego de emitidas deben ser incorporadas en cada país. En el caso de Uruguay las recomendaciones se incorporan a través de decreto del Poder Ejecutivo (PE) en acuerdo con el ministerio de tutela del sector, que en este caso es el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM).

URSEC participa con técnicos especializados en las reuniones de las cuatro comisiones temáticas mencionadas, así como en las del SGT N° 1 proponiendo los cambios que se estiman oportunos para lograr los objetivos explicitados en la creación del MERCOSUR.

La historia de Uruguay en materia de telecomunicaciones es determinante para entender el estado actual de la gestión del ERE en nuestro país, por esta razón en el Apéndice C se incluye una reseña histórica en la que se describen los principales hitos en relación con los organismos competentes en materia de telecomunicaciones²⁷.

A continuación se describen los principales actores nacionales en el ámbito de las telecomunicaciones.

Poder Ejecutivo

El PE tiene la competencia exclusiva en la fijación de la política nacional de telecomunicaciones y servicios de comunicación audiovisual, actuando a través del MIEM²⁸.

²⁵<http://www.mercosur.int/>

²⁶Los otros dos son el Consejo del Mercado Común (CMC) y la Comisión de Comercio del MERCOSUR (CCM).

²⁷Para más información se puede consultar [53] y [54].

²⁸Las competencias completas del PE se encuentran redactadas en el Artículo 147 de la Ley N° 18.719.

Capítulo 2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión

Dentro de sus principales competencias en materia de telecomunicaciones están la aprobación de convenios con entidades extranjeras, la autorización del funcionamiento de estaciones de radiodifusión de AM, FM, televisión abierta y televisión para abonados (previo informe de DINATEL y URSEC) y la autorización de la asignación de frecuencias que realiza URSEC.

MIEM-DINATEL

La DINATEL²⁹ tiene como misión formular, implementar, articular, coordinar y supervisar las políticas nacionales de telecomunicaciones y servicios de comunicación audiovisual, buscando universalizar el acceso a las TIC y contribuir al desarrollo del sector y del país³⁰.

Dentro de sus principales cometidos se encuentran: la realización de propuestas y el asesoramiento al PE en la fijación de la política nacional de telecomunicaciones y la planificación de la gestión del espectro radioeléctrico. DINATEL asesora al PE en las políticas y criterios para el otorgamiento de licencias y autorizaciones de servicios de telecomunicaciones y comunicación audiovisual así como en la administración de los recursos utilizados para el despliegue de las TIC. Realiza el monitoreo de la situación del sector a nivel nacional e internacional.

URSEC

URSEC³¹ tiene como misión la regulación y el control de las actividades referidas a las telecomunicaciones y, asimismo, las referidas a la admisión, procesamiento, transporte y distribución de correspondencia realizada por operadores postales³².

Asesora al PE y a sus organismos competentes como DINATEL, aportando insumos para la formulación, instrumentación y aplicación de la política nacional de telecomunicaciones. Administra y controla el espectro radioeléctrico nacional. Otorga autorizaciones para el uso de frecuencias del espectro radioeléctrico nacional, así como para la instalación y operación de estaciones radioeléctricas excepto estaciones de radiodifusión (AM, FM y TV abierta) mediante resoluciones.

Controla la instalación y funcionamiento así como la calidad, regularidad y alcance de todos los servicios de telecomunicaciones realizando inspecciones. Supervisa las emisiones de radiodifusión y de televisión y controla que se cumplan normas técnicas y jurídicas establecidas. Formula las normas técnicas y fija reglas que aseguren la compatibilidad, interconexión e interoperabilidad de las redes. Como se mencionó anteriormente, participa activamente de las actividades vinculadas a los diferentes organismos internacionales.

Presenta por intermedio de DINATEL al PE para su aprobación, proyectos de reglamento y de pliego de bases y condiciones para la selección de las entidades autorizadas al uso de frecuencias radioeléctricas. Adicionalmente recibe y resuelve las denuncias y reclamos de los usuarios.

²⁹<http://www.dinatel.gub.uy/>

³⁰Las competencias completas de la DINATEL se encuentran redactadas en el Artículo 418 de la Ley N° 18.719.

³¹<https://www.ursec.gub.uy/>

³²Las competencias completas de la URSEC se encuentran redactadas en el Artículo 145 de la Ley N° 18.719.

2.3.3. Conceptos Asociados a la Regulación del ERE

Términos Generales Estaciones Servicios y Sistemas Radioeléctricos

A nivel de UIT se define **administración** como *“todo departamento o servicio gubernamental responsable del cumplimiento de las obligaciones derivadas del Convenio Internacional de Telecomunicaciones y sus Reglamentos”*³³.

En el caso de Uruguay, la URSEC es la administración responsable de las telecomunicaciones a nivel de UIT, también figuran en el Directorio Global UIT³⁴ como organismos relacionados con la administración responsable de las telecomunicaciones, la Administración Nacional de Telecomunicaciones (ANTEL) y DINATEL.

El RR define en su última edición 42 servicios distintos³⁵. En cuanto a estaciones y sistemas radioeléctricos define 39 tipos de estaciones y 17 tipos de sistemas radioeléctricos³⁶.

Interferencia

Antes de continuar, es clave definir este concepto en el marco del compartimento de frecuencias entre administraciones y regiones.

Según UIT, **interferencia** es el *“efecto de una energía no deseada debida a una o varias emisiones, radiaciones, inducciones o sus combinaciones sobre la recepción en un sistema de radiocomunicación, que se manifiesta como degradación de la calidad, falseamiento o pérdida de la información que se podría obtener en ausencia de esta energía no deseada.”*.

Se reconocen tres tipos o grados de interferencia

- **Interferencia admisible:** Interferencia observada o prevista que satisface los criterios cuantitativos de interferencia y de compartición que figuran en el Reglamento de la UIT o en Recomendaciones (UIT-R) o en acuerdos especiales según lo previsto en el Reglamento de la UIT.
- **Interferencia aceptada:** Interferencia de nivel más elevado que el definido como interferencia admisible, que ha sido acordada entre dos o más administraciones sin perjuicio para otras administraciones.
- **Interferencia perjudicial:** Interferencia que compromete el funcionamiento de un servicio de radionavegación o de otros servicios de seguridad, o que degrada gravemente, interrumpe repetidamente o impide el funcionamiento de un servicio de radiocomunicación explotado de acuerdo con el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR).

La gestión del espectro radioeléctrico buscará siempre evitar las interferencias perjudiciales.

Adjudicación Atribución y Asignación

Estos tres términos pueden resultar familiares e incluso se puede pensar en que es indistinto usar uno u otro, pero no es así. Formalmente estos términos indican acciones totalmente diferentes.

³³ Artículo 1 - Sección I del RR.

³⁴ <http://www.itu.int/GlobalDirectory/search.html>

³⁵ Artículo 1 - Sección III del RR.

³⁶ Artículo 1 - Sección IV del RR.

En el RR en su *Artículo 1 - Sección II. Términos específicos relativos a la gestión de frecuencias* se definen estos tres términos.

Atribución

Según UIT se define **Atribución (de una banda de frecuencias)** como “*Inscripción en el cuadro de atribución de bandas de frecuencias, de una banda de frecuencias determinada, para que sea utilizada por uno o varios servicios de radiocomunicación terrenal o espacial o por el servicio de radioastronomía en condiciones especificadas. Este término se aplica también a la banda de frecuencias considerada*” [5].

El Cuadro de Atribución de bandas de frecuencia forma parte del Artículo 5, Sección IV del RR³⁷. En él se define la repartición de las bandas de frecuencia en función de los diferentes servicios de radiocomunicaciones en las tres regiones definidas por UIT³⁸. Uruguay pertenece a la región 2, como se aprecia en el mapa mostrado en la Fig. 2.3.

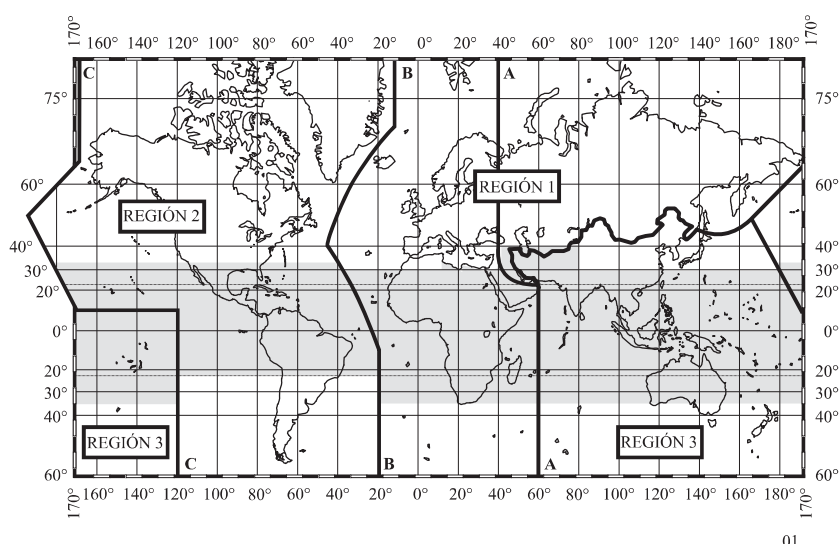


Figura 2.3: Regiones UIT³⁹.

Cuando en el cuadro una casilla correspondiente a una banda de frecuencia se atribuye a varios servicios, ya sea en todo el mundo o en una región, estos servicios se enumeran en el siguiente orden:

- **Servicios primarios** Su nombre aparece impreso en el cuadro en mayúsculas.
- **Servicios secundarios** Su nombre está impreso en el cuadro en minúsculas.

Según el RR, las estaciones de un servicio secundario:

- No deben causar interferencia perjudicial a las estaciones de un servicio primario a las que se les hayan asignado frecuencias con anterioridad o se les puedan asignar en el futuro.

³⁷El cuadro comienza en la página 43 y se extiende hasta la 178 del RR.

³⁸Es importante que no se confundan estas 3 regiones de radio, para efectos de atribución de frecuencias con las regiones administrativas, para efectos de representación política, éstas últimas son 5 identificadas con letras de la A a la E.

³⁹Imagen extraída del Artículo 5, Sección I del RR.

2.3. Gestión del ERE

- No pueden reclamar protección contra interferencias perjudiciales causadas por estaciones de un servicio primario a las que se les hayan asignado frecuencias con anterioridad o se les puedan asignar en el futuro.
- Tienen derecho a la protección contra interferencias perjudiciales causadas por estaciones del mismo servicio o de otros servicios secundarios a las que se les asignen frecuencias posteriormente.

Existen otros tipos de atribuciones:

- **Atribución adicional** es una atribución que se agrega en una zona o en un país al servicio o a los servicios indicados en el cuadro.
- **Atribución sustitutiva** es una atribución que reemplaza en una zona o en un país a la atribución que se indica en el cuadro.

En ambos casos, si la nota del cuadro no impone ninguna restricción al servicio o servicios en cuestión, excepto la obligación de funcionar en una zona o en un país determinado, las estaciones de este servicio o servicios funcionan sobre la base de igualdad de derechos con las estaciones del otro o de los otros servicios primarios indicados en el cuadro.

En la Fig. 2.4 se pueden observar los tipos de atribuciones mencionados en una porción del cuadro de atribución de bandas de frecuencia.

410-460 MHz			
Atribución a los servicios			
Región 1	Región 2		Región 3
410-420 Anchura de banda	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico INVESTIGACIÓN ESPACIAL (espacio-espacio) 5.268		
420-430	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización 5.269 5.270 5.271		Servicio Primario Servicio Secundario
430-432 AFICIONADOS RADIOLOCALIZACIÓN 5.271 5.272 5.273 5.274 5.275 5.276 5.277	430-432 RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.271 5.276 5.278 5.279		

5.274 *Atribución sustitutiva:* en Dinamarca, Noruega, Suecia y Chad, las bandas 430-432 MHz y 438-440 MHz están atribuidas, a título primario, a los servicios fijo y móvil, salvo móvil aeronáutico.

5.275 *Atribución adicional:* en Croacia, Estonia, Finlandia, Libia, la ex República Yugoslava de Macedonia, Montenegro, Serbia y Eslovenia, las bandas 430-432 MHz y 438-440 MHz están también atribuidas, a título primario, a los servicios fijo y móvil, salvo móvil aeronáutico.

5.278 *Categoría de servicio diferente:* en Argentina, Colombia, Costa Rica, Cuba, Guyana, Honduras, Panamá y Venezuela, la atribución de la banda 430-440 MHz al servicio de aficionados es a título primario (véase el número 5.33).

Figura 2.4: Porción del cuadro de atribución de bandas de frecuencia⁴⁰.

Este cuadro es de aplicación internacional pues el RR se puede considerar un tratado internacional y si bien es aplicable en el ordenamiento nacional, cada país requiere

⁴⁰Imagen elaborada a partir del Artículo 5 del RR.

de un cuadro nacional de frecuencias propio, en el cual indique la elección de los servicios para cada banda de frecuencia. En Uruguay la realización y actualización de dicho cuadro es competencia de URSEC.

Adjudicación

Las decisiones sobre el uso del espectro involucran procesos extensos en el tiempo y los interesados en participar de estas decisiones deben acordar planes elaborados con varios años de anticipación a su aplicación en los hechos. En áreas donde puede existir interferencia entre diferentes estados o países, se elaboran planes que establecen qué frecuencias o canales utiliza cada uno. En estos planes, que apuntan gestionar la interferencia, es donde se realiza la adjudicación.

La UIT define **Adjudicación (de una frecuencia o de un canal radioeléctrico)** como la *“Inscripción de un canal determinado en un plan, adoptado por una conferencia competente, para ser utilizado por una o varias administraciones para un servicio de radiocomunicación terrenal o espacial en uno o varios países o zonas geográficas determinados y según condiciones especificadas”* [5].

A modo de ejemplo, Uruguay planifica el uso de frecuencias y canales de las estaciones generadoras y repetidoras de TV en la banda de VHF en sus fronteras con Argentina y Brasil en el marco del MERCOSUR. Las estaciones uruguayas de TV en la banda de VHF que se encuentran en territorio de coordinación con Argentina o con Brasil podrán utilizar sólo ciertos canales en esa banda. En Fray Bentos por ejemplo, se pueden utilizar, en la banda de VHF, los canales 4, 6 y 12⁴¹.

Asignación

Según UIT se define **Asignación (de una frecuencia o de un canal radioeléctrico)** a la *“Autorización que da una administración para que una estación radioeléctrica utilice una frecuencia o un canal radioeléctrico determinado en condiciones especificadas”* [5].

Esto implica que la asignación es realizada por la administración que corresponda en cada nación, donde se otorga a determinada estación radioeléctrica el permiso de uso de una frecuencia o de un canal radioeléctrico con determinadas condiciones técnicas establecidas. Utilizando el cuadro internacional de atribución de bandas de frecuencia como punto de partida y teniendo en cuenta acuerdos regionales e internacionales, la autoridad de gestión del espectro de frecuencias de cada país selecciona normalmente las frecuencias adecuadas a fin de asignarlas a las estaciones de un determinado servicio.

De las descripciones anteriores se desprende que, la asignación es un proceso que cada administración realiza de forma autónoma, las adjudicaciones se realizan en forma coordinada entre varias administraciones y las atribuciones se realizan según las recomendaciones del cuadro de atribuciones del RR, con carácter vinculante para los estados. En la Tabla 2.1 se muestra el dominio de aplicación de cada concepto.

⁴¹Resolución del MERCOSUR número 6 año 1995.

Distribución de frecuencias entre	Concepto
Servicios	Atribución
Zonas o países	Adjudicación
Estaciones	Asignación

Tabla 2.1: Adjudicación, Atribución y Asignación.

Finalmente se redondean estos tres conceptos regulatorios con un ejemplo. En el cuadro de atribución de frecuencias de UIT, la banda de frecuencia de 76 MHz a 108 MHz se encuentra **atribuida** al servicio de radiodifusión como servicio primario, en el rango de frecuencia comprendido entre 76 MHz y 88 MHz se atribuyen además como servicios secundarios, el servicio móvil y el fijo. En Uruguay, dicha banda está **atribuida** al servicio de radiodifusión en carácter primario exclusivamente la banda de 76 MHz a 108 MHz⁴². En virtud de la Resolución N° 31/2001, el canal FM 282 (frecuencia central 104.3 MHz) está **adjudicado** al servicio de radiodifusión FM en la ciudad de Montevideo (en coordinación con Argentina y Brasil). Finalmente para que una estación pueda operar en 104.3 MHz en Montevideo dicha frecuencia le debe ser **asignada** por parte de la administración a su titular.

2.3.4. Particularidades de la Gestión del ERE

Eficiencia en la Gestión del ERE

Eficiencia económica: Se trata de garantizar el uso eficiente del espectro de forma que se cumplan los objetivos del país, incluidos los relativos al crecimiento económico. Por ejemplo, se supone que hay determinada cantidad de ERE para su uso exclusivo en dos sectores, comunicaciones móviles y radiodifusión comercial. ¿Cómo debería repartirse el espectro entre ambos usos? Dado que los usuarios obtienen beneficios de ambos servicios, la atribución de todo el espectro de frecuencias exclusivamente a uno de ellos crearía una escasez artificial de espectro. Es necesario, por tanto, llegar a algún tipo de compromiso que refleje el valor que para el usuario final tienen ambos servicios, el costo de proporcionarlos y la cantidad de espectro que requieren. Esto no es una tarea fácil y exige que los gestores del espectro tengan un alto nivel de conocimiento sobre la relación entre proporcionar un *MHz* adicional a un servicio y los beneficios económicos netos de hacerlo [6].

Eficiencia técnica: La elección de las frecuencias adecuadas para determinado servicio, puede considerarse como el factor principal en las decisiones de atribución del espectro. No obstante, la aplicación práctica puede hacer que entren en juego objetivos políticos relativos a la competencia. Se trata de maximizar la utilización del espectro evitando interferencias.

Como ejemplo, se sabe que la transmisión de televisión digital es técnicamente más eficiente que la analógica, ¿esto significa que las transmisiones analógicas deben ser canceladas y sustituidas por digitales?. Esto depende de otros factores como ser el costo del paso de analógico a digital, la escasez del espectro y el espectro que se libera. La

⁴²Plan conjunto MERCOSUR, uso de FM.

Capítulo 2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión

eficiencia técnica no es un objetivo en sí mismo, sin embargo, al ser el espectro cada vez más escaso, existen múltiples razones para perseguir la eficiencia técnica.

Objetivos políticos: También deben hacerse otras consideraciones de tipo social, político o de desarrollo, a través de las políticas los gobiernos impulsan el desarrollo del país. Las atribución, asignación y fijación de precios sobre el espectro radioeléctrico se van modificando para ser consistentes con los objetivos políticos de los gobiernos, buscando un equilibrio entre consideraciones técnicas y económicas.

Se debe asegurar que el espectro es apto para nuevas tecnologías y servicios, además de preservar la flexibilidad para adaptarse a los nuevos requerimientos de los usuarios de los servicios [6].

Métodos de Gestión de Frecuencias

Los reguladores históricamente han asignado frecuencias y concedido licencias a usuarios concretos para fines concretos, este es el llamado *método administrativo*. El enfoque administrativo incluye cierto nivel de restricciones sobre la utilización del espectro. Frecuentemente se especifican que tipo de equipos se pueden utilizar, dónde se pueden utilizar y con qué nivel de potencia. Es una buena forma de controlar la interferencia, aunque estos métodos frecuentemente son lentos y no ofrecen una respuesta rápida a nuevas tecnologías.

Otro método o modelo es el *orientado al mercado* en el cual tanto la propiedad como el uso del espectro pueden modificarse, la comercialización del espectro implica permitir el cambio de titularidad de las licencias otorgadas y requiere la especificación completa sobre qué derechos de propiedad del espectro pueden comercializarse y ser utilizados. Generalmente la comercialización del espectro implica mecanismos como ser las subastas o el intercambio⁴³.

Finalmente se tiene el llamado *espectro común* que es el espectro que permanece libre de un control centralizado y en el que los usuarios pueden transmitir sin licencia, pero cumpliendo reglas diseñadas para limitar o evitar la interferencia (bandas sin licencia). Un ejemplo de estas bandas son las industriales, científicas y médicas (ICM) sobre las cuales se volverá en la Sección 2.3.5.

Actualmente existe un nuevo enfoque en la gestión del ERE, el *acceso dinámico al medio*, el cual representa un reto para los reguladores de cada país⁴⁴. Para los organismos encargados de la regulación del espectro el desafío es buscar una combinación eficiente de los modelos de gestión descritos.

Comprobación Técnica y Monitoreo de Espectro

La comprobación técnica viene a ser los ojos y los oídos del proceso de gestión del espectro. En la práctica es necesaria puesto que, en realidad, la autorización para uso del espectro no garantiza que éste se utilice como se ha previsto. La causa puede estar en la complejidad del equipo, en su interacción con otros equipos, anomalías funcionales o manipulación mal intencionada.

Entre los objetivos que se buscan en la comprobación técnica se encuentra resolver los problemas de interferencias, garantizar una calidad aceptable del servicio dado al

⁴³El Reino Unido ha sido uno de los pioneros en lo referente al lanzamiento de iniciativas que reformulan la gestión del espectro hacia un enfoque orientado al mercado.

⁴⁴Consultar Sección 4.5.

público en general, generar los datos para el proceso de gestión del espectro radioeléctrico de una administración en lo que concierne a la utilización real de frecuencias y bandas (por ejemplo, la ocupación de canales y la congestión de bandas), la verificación de las características técnicas y operativas correctas de las señales transmitidas (cumplimiento de las condiciones de otorgamiento de la licencia), la detección e identificación de transmisores ilegales y fuentes de interferencia potenciales⁴⁵.

Bases de Datos

Contar con una base de datos que permita almacenar, mantener y acceder a la información actualizada es esencial para una buena gestión del espectro. Esto permite a los organismos encargados de la gestión realizar las tareas más cotidianas como son las de asignación, aplicación de sanciones y la comprobación técnica, así como llevar a cabo análisis de ingeniería que permitan alcanzar la máxima eficacia en la gestión y el mejor aprovechamiento del recurso.

Sin unos registros exactos en la base de datos, la integridad del proceso de gestión del espectro puede verse comprometida. Por ejemplo, para realizar correctamente la comprobación técnica del espectro se debe contar con un medio para comprobar las asignaciones e identificar los usos no autorizados.

Cabe mencionar que contar con un software de gestión adaptado a las necesidades del regulador tiene una importancia relevante en la gestión eficaz del espectro.

2.3.5. Marco Regulatorio Actual en Uruguay

La diversidad y la cantidad de servicios de telecomunicaciones que existen en la actualidad hace que la gestión del ERE sea muy amplia y variada. En la Tabla 2.2 se muestran los principales servicios que utilizan el ERE en Uruguay.

Sector	Servicio
Telecomunicaciones	Telefonía móvil. Transmisión de datos. Internet.
Tele-difusión	TV terrestre (analógico/digital – TV abierta, TV abonados). TV satelital (analógico/digital). Servicios auxiliares (tele-texto, tele-compra, etc.). Radio (analógico/digital).
Gobierno	Defensa (control, radares). Emergencias (policía, bomberos). Ciencia. Aplicaciones derivadas de compromisos internacionales (ayudas a la navegación, posicionamiento; medio ambiente).
Transporte	Transporte aéreo (control de tráfico, navegación). Transporte marítimo. Transporte terrestre. Transporte ferroviario y fluvial (localización).
Investigación y desarrollo	Observación de la Tierra. Radioastronomía

Tabla 2.2: Servicios que utilizan el ERE.

⁴⁵Para información más detallada dirigirse a [55].

Capítulo 2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión

Dada esta amplia gama de servicios y sistemas de telecomunicaciones existentes, son muchos los procedimientos establecidos para la asignación de espectro radioeléctrico en Uruguay. En esta sección se describen algunos de los reglamentos vigentes y los procesos asociados a ellos.

Reglamento de Administración y Control del ERE

El reglamento fue aprobado por Decreto N° 114/003⁴⁶ con el objetivo de realizar un uso eficiente del espectro asegurando el buen funcionamiento tanto de los servicios como de los sistemas de radiocomunicaciones. Se busca promover la igualdad en el acceso al espectro y contribuir a la planificación estratégica del sector telecomunicaciones en nuestro país.

En este reglamento se indica que la administración y el control del espectro radioeléctrico incluye, entre otras funciones, la elaboración y aprobación de los planes generales de utilización de este recurso. Esta función en nuestro país compete a URSEC, salvo en el caso de servicios de radiodifusión donde los planes son elaborados por URSEC pero elevados al PE para su aprobación.

Dentro de dichos planes se encuentra el llamado Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), el cual establece la atribución de frecuencias en Uruguay (bandas, sub-bandas y canales)⁴⁷ a los diferentes servicios de telecomunicaciones que emplean el ERE, así como las normas técnicas para su utilización.

La URSEC tiene entre sus funciones mantener actualizado el llamado Registro Nacional de Frecuencias el cual contiene información detallada sobre las asignaciones vigentes de frecuencias radioeléctricas. La información contenida en este registro es de acceso público salvo aquella que por razones de defensa nacional o protección de datos personales se clasifique como reservada⁴⁸.

Los interesados en el uso del espectro radioeléctrico deberán realizar una solicitud formal a URSEC. Dependiendo del tipo de aplicación que planifican, necesitarán una autorización (o licencia) y la asignación de la o las frecuencias a utilizar acompañada de las condiciones técnicas en las cuales realizarán dicho uso.

Los posibles usos del espectro radioeléctrico según este reglamento se detallan en la Tabla 2.3.

⁴⁶<http://www.impo.com.uy/bases/decretos-reglamento/114-2003>

⁴⁷La definición de atribución utilizada en este Decreto no coincide con la definición dada por la UIT en el sentido en el que en la definición de la UIT no está referida a canales sino a bandas de frecuencia.

⁴⁸Resolución URSEC N° 102/2012.

2.3. Gestión del ERE

Tipo de Uso	Autorización	Asignación	Características
Uso libre	No	No	No podrán producir interferencias perjudiciales, ni solicitar protección frente a otras estaciones que correspondan a sistemas de radiocomunicaciones que operen dentro de los parámetros autorizados. Por ejemplo estaciones y sistemas de radiocomunicaciones de muy baja potencia de transmisión.
Uso común	Si	No	Las autorizaciones se otorgarán por orden de presentación de solicitudes de uso ante URSEC. Por ejemplo frecuencias atribuidas a los servicios de radioaficionados y banda ciudadana y las frecuencias de socorro y seguridad de los servicios móvil marítimo y móvil aeronáutico.
Uso específico	Si	Si	Asociadas a priori a determinado servicio o sistema de radiocomunicación.
Uso general	Si	Si	No asociadas a priori a determinado servicio o sistema de radiocomunicación.

Tabla 2.3: Clasificación de usos del ERE.

La URSEC asigna bandas o canales de frecuencia en carácter exclusivo o compartido. Cuando la asignación es realizada en carácter compartido, dos o más usuarios comparten las mismas frecuencias, durante un período de tiempo determinado y en la misma zona geográfica, pudiendo existir interferencias perjudiciales con otros sistemas de radiocomunicaciones. En carácter exclusivo implica que un único usuario hará uso de la banda o canal, durante un período determinado y en determinada zona geográfica.

A la hora de realizar una asignación la URSEC verifica que el solicitante posea debida autorización de uso del espectro que ha solicitado. En caso de realizar la asignación ésta estará acompañada de todas las condiciones técnicas que rigen la operación de la o las estaciones de radiocomunicación o sistema de telecomunicación en cuestión. Cuando la asignación implica la prestación de servicios de telecomunicaciones a terceros o al público en general se requiere una licencia. Existen varias clases de licencias las cuales se detallan más adelante en esta sección.

Los servicios de radiodifusión terrestre y radiodifusión por satélite (sonora y de televisión) requieren autorización otorgada por el PE con asesoramiento de la URSEC. Las autorizaciones para el servicio de televisión para abonados son realizadas por URSEC. Las autorizaciones otorgadas se realizan en forma de resoluciones.

En cada resolución donde la URSEC realice una asignación, se determina que cualquier modificación que se desee realizar en cuanto a ubicación del sistema, parámetros de operación, conformación del sistema radioeléctrico del que se trate, entre otras, debe

Capítulo 2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión

ser autorizada por la URSEC. Dependiendo del tipo de sistema, se indican las normas técnico-administrativas bajo las cuales debe operar dicho sistema.

Cualquier instalación puede ser inspeccionada en cualquier oportunidad por parte de la URSEC, ya sea porque se recibió una denuncia de interferencia perjudicial o de una operativa no autorizada, o por una inspección de rutina de la URSEC. En caso de verificar irregularidades de cualquier tipo la URSEC puede proceder en el caso de interferencia perjudicial mediante intimación a la entidad responsable a que corrija su situación, en el caso de operativa no autorizada con la incautación provisoria de los equipos de telecomunicaciones involucrados, en caso de que luego de la incautación no se regularice la situación o no sea posible hacerlo, se puede realizar el decomiso definitivo del equipo, el cual luego de estar en poder de URSEC, generalmente es donado a otros organismos públicos.

Las autorizaciones de uso de frecuencia son otorgadas generalmente por un período máximo de 20 años.

Dependiendo de la demanda de solicitudes de autorizaciones y la disponibilidad espectral, la URSEC puede determinar que la asignación de frecuencias se realice mediante un procedimiento competitivo y no a demanda. En esos casos la URSEC elabora el pliego de condiciones para el procedimiento competitivo y lo eleva al PE para su aprobación.

Reglamento de Licencias de Telecomunicaciones

Este reglamento fue aprobado por Decreto N° 115/003⁴⁹. En él se establecen las condiciones para la prestación de servicios de telecomunicaciones, excluida la radiodifusión.

Se define licencia como la autorización para la prestación de servicios de telecomunicaciones a terceros o al público en general. Las licencias son otorgadas mediante resoluciones de la URSEC.

Las clases de licencias de telecomunicaciones otorgadas son

- **Clase A:** habilita la operación de una red pública de telecomunicaciones y la prestación por esos medios de los servicios de telecomunicaciones que resulten técnica y jurídicamente factibles conforme a la legislación vigente, con excepción del servicio de televisión para abonados. La licencia incluye el derecho y la obligación de dar interconexión y de negociar compensación recíproca por los servicios de acceso o terminación conmutada de telefonía.
- **Clase B:** habilita la prestación de servicios de telecomunicaciones utilizando como soporte la red, medios o enlaces propios o de otro prestador.
 - **Clase B1:** habilita la prestación de los servicios de telecomunicaciones que surgen de su plan técnico y para cuya prestación el licenciatario requiere el acceso a los recursos de numeración, enlaces u otros medios de las redes de titulares de licencias de telecomunicaciones clase A.
 - **Clase B2:** habilita la prestación de los servicios de telecomunicaciones que surgen de su plan técnico y para cuya prestación el licenciatario no requiere de acceso a los recursos de numeración, enlaces u otros medios de las redes de titulares de Licencias de Telecomunicaciones clase A.

⁴⁹<http://www.impo.com.uy/bases/decretos/115-2003/1>

- **Clase C (licencia para el arriendo de enlaces, medios y sistemas de telecomunicaciones):** habilita exclusivamente la instalación de enlaces, medios y sistemas de telecomunicaciones para su provisión o arriendo a licenciarios de servicios de telecomunicaciones.
- **Clase D (licencia de televisión para abonado):** habilita la prestación de servicios de televisión por suscripción que requieren la utilización de medios de transmisión alámbricos o inalámbricos para la difusión de los contenidos.

Las licencias son otorgadas por la URSEC cuando una persona física o jurídica desea operar redes públicas y privadas de telecomunicaciones para prestar sus servicios. Este reglamento detalla las condiciones técnicas y las sanciones en caso de incumplimiento, entre otros aspectos regulatorios.

Reglamento del Servicio de Radioaficionados

El reglamento de radioaficionados⁵⁰ fue aprobado por la Resolución N° 262/003⁵¹ de la URSEC. La modalidad de uso de los canales radioeléctricos en el servicio de radioaficionados corresponde al uso común del espectro radioeléctrico. Esto implica que la operación en las frecuencias radioeléctricas atribuidas a este servicio requiere de la previa obtención de la autorización correspondiente de acuerdo a los términos que se establecen en este reglamento y las normas complementarias que eventualmente dicte la URSEC.

La operación del servicio de radioaficionados se realiza en base a la compartición de las frecuencias radioeléctricas entre quienes las usufructúan, no asignándose en ningún caso frecuencias, sea en carácter compartido o exclusivo, ni dándose protección alguna contra las interferencias perjudiciales que pudieren causar las emisiones de otras estaciones autorizadas siempre que operaren en las condiciones impuestas por este Reglamento. La operación de estaciones en frecuencias atribuidas al servicio de radioaficionados sólo podrá efectuarse por parte de radioaficionados o Radio Clubes (asociación civil constituida por radioaficionados con el objeto de fomentar el desarrollo del servicio de radioaficionados).

Los tipos de autorizaciones que permiten la instalación y operación de equipos de radiocomunicaciones aptos para transmitir en frecuencias atribuidas al servicio de radioaficionados y el empleo de distintivos de llamadas son las siguientes

- Certificado de Distintivo Especial
- Permiso internacional de radioaficionado emitido por la Administración de Telecomunicaciones, en inglés *International Amateur Radio Permit* (IARP)
- Permiso de Estación
- Permiso de Radioaficionado

La autorización otorgada por la URSEC no involucra la obtención de los permisos comprendidos en áreas de competencias de otros organismos públicos.

Los permisos de radioaficionado y de estación tendrán una vigencia de 5 años, con excepción de los expedidos por reciprocidad o cortesía, los cuales se expedirán con una

⁵⁰La Ley N° 13.569 del 14 de octubre de 1966 declaró de interés nacional la actividad de los radioaficionados y la Ley N° 17.517 refiere a la instalación de sistemas de antenas por parte de radioaficionados.

⁵¹<https://www.ursec.gub.uy/inicio/normativa/telecomunicaciones/radiocomunicaciones>

Capítulo 2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión

vigencia de 1 año. En algunos casos se debe rendir un examen para obtener el permiso de radioaficionado.

Servicio de Radiodifusión Comunitaria

La Ley N° 18.232⁵² promulgada por el PE el 22 de diciembre del 2007⁵³, establece las normas que rigen al servicio de radiodifusión comunitaria. En dicha ley se determina que el PE (con el asesoramiento de URSEC y con la opinión del Consejo Honorario Asesor de Radiodifusión Comunitaria (CHARC)) reservará para la prestación del servicio de radiodifusión comunitaria y otros sin fines de lucro, al menos un tercio del espectro radioeléctrico por cada localidad en todas las bandas de frecuencia de uso analógico y digital y para todas las modalidades de emisión. La reserva deberá ser actualizada anualmente y será de conocimiento público. La asignación de frecuencias para servicios de radiodifusión comunitaria (una vez identificadas las disponibles por parte de URSEC) se realiza mediante concurso abierto y público y las autorizaciones son otorgadas por un plazo de 10 años⁵⁴.

Servicios de Comunicación Audiovisual

La Ley N° 19.307⁵⁵ denominada “Ley de Medios. Regulación de la prestación de servicios de radio, televisión y otros servicios de comunicación audiovisual”, promulgada por el PE el 29 de diciembre del 2014, regula la prestación de servicios de radio, televisión y otros servicios de comunicación audiovisual. Comprende disposiciones relativas a los derechos de los prestadores de servicios de comunicación, disposiciones sobre publicidad y promoción de la diversidad y el pluralismo y la producción audiovisual nacional, entre otras, amparando el derecho a la libre expresión y el de acceso a la información. La autorización y su correspondiente asignación de espectro radioeléctrico se otorga por el plazo de 10 años para servicios de radiodifusión de radio y de 15 años para servicios de radiodifusión de televisión.

La mencionada ley era considerada imprescindible pues el marco normativo hasta el año 2014 era basado en la Ley de Radiodifusión vigente en nuestro país desde 1977 que era considerada obsoleta dado que no era capaz de responder a los desafíos regulatorios de los avances tecnológicos de los últimos años⁵⁶.

Esta Ley crea la Comisión Honoraria Asesora de Servicios de Comunicación Audiovisual (CHASCA), la cual sustituye al CHARC⁵⁷ y a la Comisión Honoraria Asesora Independiente (CHAI)⁵⁸.

La ley aún no esta reglamentada por el PE porque hay varios artículos cuya constitucionalidad esta siendo cuestionada⁵⁹.

⁵²<http://www.impo.com.uy/bases/leyes/18232-2007>

⁵³Reglamentada por Decreto N° 417/010 del 30 de diciembre del 2010 (<http://www.impo.com.uy/bases/decretos/417-2010>).

⁵⁴<https://www.presidencia.gub.uy/comunicacion/comunicacionnoticias/radios-comunitarias-frecuencias-uso-compartido-interior+pais>

⁵⁵<http://www.impo.com.uy/bases/leyes/19307-2014>.

⁵⁶Se puede consultar información adicional en [56] y [57].

⁵⁷Creado por la Ley N° 18.232 del año 2007.

⁵⁸Creada por el Decreto N° 374/08 del año 2008.

⁵⁹<http://www.elpais.com.uy/que-pasa/vaivenes-ley-medios-analisis-fallo.html>

Servicios Móviles

Las autorizaciones para el uso del espectro en las bandas atribuidas a los servicios móviles en el CNAF, son otorgadas a través de procedimientos competitivos mencionados en los reglamentos anteriores.

Se han utilizado diversos mecanismos a la hora de asignar frecuencias mediante procedimientos competitivos a nivel mundial como ser loterías, procesos de evaluación comparativa (“concursos de belleza”), subastas de una sola ronda o rondas sucesivas.

La lotería o sorteo fue un mecanismo usado en Estados Unidos a partir del año 1982 el cual no dio resultados debido a que los ganadores no tenían intención de utilizar el espectro sino que vendieron los derechos de uso a terceros, proceso que llevo años e implicó importantes pérdidas en el sector. Por otra parte, los procedimientos competitivos como las llamadas audiencias comparativas (concursos de belleza, en inglés *beauty contests*) son un instrumento para asignar recursos escasos y son consideradas por algunos autores como más propicios a la corrupción y a los favoritismos [7].

Las subastas se han convertido en el mecanismo dominante para asignar el espectro radioeléctrico en materia de servicios móviles pues permiten asignar de forma eficiente, transparente y a un precio que refleja el valor real del espectro para el mercado. El diseño de las subastas es complejo y requiere del asesoramiento de expertos en el área [8].

En Uruguay, la URSEC ante la posibilidad de asignar el uso de frecuencias por procedimientos competitivos, eleva al PE el pedido de autorización para la asignación de los bloques de frecuencia que considera pueden ser utilizados para la prestación de servicios de comunicaciones móviles. Si el PE autoriza la asignación propuesta, le encomienda a la URSEC la elaboración del Pliego de Bases y Condiciones del procedimiento competitivo⁶⁰.

El caso uruguayo posee la particularidad de que ANTEL es un servicio descentralizado del Estado uruguayo y a su vez una empresa prestadora de servicios de comunicaciones móviles por lo tanto, para evitar que el Estado sea quien convoque el procedimiento y a su vez participe de manera activa de él, se determina que ANTEL participe mediante el mecanismo de reserva previa de espectro aportando transparencia y credibilidad. Dicho mecanismo implica que, de los lotes de frecuencia a asignar, se reserven algunos a favor de ANTEL previo al comienzo del procedimiento.

El procedimiento competitivo en Uruguay consta actualmente de tres instancias⁶¹:

- **Instancia previa:** En la cual los interesados adquieren el pliego.
- **Instancia Inicial del Procedimiento (IIP):** Quienes compraron el pliego deberán presentar la documentación indicada por la URSEC para ser controlada. En esta instancia se determina si los interesados cumplen los requisitos técnicos y económicos para pasar a la siguiente instancia, no forma parte del procedimiento competitivo.
- **Instancia Final del Procedimiento (IFP):** En esta instancia los pre-calificados presentan ofertas para los lotes de frecuencia que se ofrecen mediante rondas, en esta instancia se realiza la selección.

El derecho a uso de bandas de frecuencia para proveer servicios de telefonía móvil se otorga por 20 años y en carácter de usuario y no de propietarios del espectro.

⁶⁰Un ejemplo de autorización es la dada por el Decreto N° 83/015 del PE y un ejemplo de Pliego se puede encontrar en el Decreto N° 390/012.

⁶¹Decreto N° 438/001.

Capítulo 2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión

La relevancia del servicio móvil se ha ido incrementando a medida que los usuarios finales consumen cada vez más servicios de datos a través de las redes móviles, lo anterior acompañado del rápido desarrollo de nuevas tecnologías ha aumentado los requisitos de espectro radioeléctrico en todo el mundo. Esto lleva a la necesidad de planificar una asignación oportuna de la cantidad necesaria de espectro; y así garantizar un desarrollo adecuado de los servicios móviles en la región. La asignación de espectro para la industria móvil se considera un requisito indispensable para la *Sociedad del Conocimiento* y el desarrollo económico de los países.

Las telecomunicaciones móviles internacionales, en inglés *International Mobile Telecommunications* (IMT) son sistemas móviles que ofrecen acceso a una amplia gama de servicios de telecomunicaciones y en particular a servicios móviles avanzados. Los sistemas IMT soportan aplicaciones de baja a alta movilidad y una amplia gama de velocidades de datos de acuerdo a las exigencias de los usuarios y los servicios en múltiples entornos. Gracias a las características que poseen, las IMT dan respuesta a las necesidades del usuario en permanente cambio. Las capacidades de los sistemas IMT se mejoran continuamente en concordancia con las tendencias de los usuarios y de las novedades tecnológicas⁶².

Bandas ICM

Las bandas ICM⁶³ son bandas de radiofrecuencia reservadas internacionalmente para uso no comercial con fines industriales, científicos, médicos, domésticos o similares, por ejemplo la cocción de alimentos en hornos de microondas, ciertas aplicaciones médicas y los controles remotos de puertas de garaje. Dichas bandas están definidas en el Artículo 5 del RR de la UIT⁶⁴.

El Artículo 15 del RR (Interferencias) indica que cada administración adoptará las medidas prácticas necesarias para que la radiación de los equipos destinados a aplicaciones ICM sea mínima y para que, fuera de las bandas destinadas a estos equipos, el nivel de dicha radiación sea tal que no cause interferencia perjudicial al resto de los servicios que operan en esas bandas. Adicionalmente el RR indica que los servicios de radiocomunicación que funcionan en las bandas destinadas a las aplicaciones ICM deben aceptar la interferencia perjudicial que las ICM puedan provocar⁶⁵.

Estas bandas se denominan comúnmente bandas “sin licencia”, pues pueden ser utilizadas sin necesidad de realizar una solicitud formal, siempre que los equipos utilizados cumplan las especificaciones técnicas necesarias. Es un error pensar que un espectro sin licencia no está regulado, en realidad la regulación técnica detallada de los dispositivos sin licencia es lo que hace posible su coexistencia. Los dispositivos sin licencia están regulados para limitar su capacidad de interferir unos con otros.

La utilización de estas bandas permitió construir redes inalámbricas para transmisión de datos que hoy cubren importantes áreas geográficas. El espectro sin licencia es el pilar fundamental del éxito del conocido Wi-Fi⁶⁶ que garantiza la posibilidad de interacción de los equipos producidos por diferentes fabricantes, lo que derivó en un rápido

⁶²Extraído y adaptado de la *Recomendación UIT-R M.1224-1 - Vocabulario de términos de las telecomunicaciones móviles internacionales (IMT)*.

⁶³La *Recomendación UIT-R SM.1056-1* aporta información técnica detalla sobre las bandas y aplicaciones ICM y el *Informe UIT-R SM.2180* presenta un método de análisis de la interferencia y de los límites de radiación de los equipos ICM.

⁶⁴Numerales: 5.138, 5.150 y 5.280.

⁶⁵URSEC advierte de estas condiciones cuando se asigna una frecuencia de las bandas ICM.

⁶⁶En 1997 el IEEE aprobó el estándar 802.11.

crecimiento del mercado e impulsó la competencia. La banda de frecuencia ICM ubicada entre 2400 MHz y 2483 MHz es la que la utilizan ampliamente las computadoras portátiles, las tabletas y los teléfonos inteligentes⁶⁷.

2.3.6. Contexto Regional

Las ondas radioeléctricas atraviesan las fronteras nacionales por lo que muchos de los usos del espectro radioeléctrico repercuten fuera del territorio de cada país o región. Suele ser necesario entablar discusiones bilaterales o multilaterales para coordinar la utilización del espectro radioeléctrico en las regiones de frontera y para resolver los problemas potenciales de interferencia. La regulación del ERE definida en cada país o región esta ligada íntimamente a los tratados regionales e internacionales de los que participa.

Diversos organismos se encargan de regular y, en algunos casos operar, internacionalmente lo relativo a las telecomunicaciones, la UIT lo hace a nivel internacional y la CITEL a nivel regional. Existen otros organismos internacionales con aportes en materia de regulación de las telecomunicaciones como es el caso de la Organización Mundial del Comercio (OMC)⁶⁸.

A nivel del MERCOSUR se han formulado resoluciones relacionadas con el espectro radioeléctrico⁶⁹ las cuales se toman en cuenta en las decisiones de atribución y asignación que toma nuestro gobierno en materia de telecomunicaciones.

En el marco internacional, la Ley N° 16.967 promulgada por el PE el 10 de junio de 1998 aprueba en Uruguay el convenio de constitución de la UIT⁷⁰, éste constituye una de las bases más importantes de la normativa existente, a su vez la UIT ha publicado una serie de recomendaciones para la explotación del espectro en áreas fronterizas⁷¹.

El llamado *Libro Azul*⁷² es una herramienta de referencia para proporcionar a los países de la región de las Américas descripciones e información objetivas sobre políticas de telecomunicaciones y asuntos relativos a la regulación, incluidas las dificultades y oportunidades que presenta el desarrollo de nuevas tecnologías de telecomunicaciones.

En la Tabla 2.4 se resumen los principales organismos reguladores de algunos países de América Latina.

⁶⁷Extraído y adaptado de <https://www.apc.org/es/>.

⁶⁸Organización internacional que se ocupa de las normas que rigen el comercio entre los países, Uruguay es miembro de la OMC desde el año 1995. <https://www.wto.org/>

⁶⁹<http://www.mercosur.int/innovaportal/v/485/2/innova.front/resoluciones>.

⁷⁰<http://www.parlamento.gub.uy/htmlstat/pl/convenios/conv16303-1.htm>

⁷¹Por ejemplo la *UIT SM.1049-1: Método de gestión del espectro destinado a facilitar el proceso de asignación de frecuencias a estaciones de servicios terrenales en zonas fronterizas*.

⁷²https://www.citel.oas.org/en/SiteAssets/About-Citel/Publications/BlueBook_e.pdf

Capítulo 2. Espectro Radioeléctrico y su Gestión

País	Organismos Competentes	Generalidades
Argentina	Secretaría de Comunicaciones (SECOM), Comisión Nacional de Comunicaciones (CNC) y Autoridad Federal de Servicios de Comunicación Audiovisual (AFSCA).	Se separa la radiodifusión tradicional (radio y televisión) de la transmisión de datos. Por un lado, la SECOM asigna ERE destinado a telecomunicaciones, por otro la AFSCA asigna las porciones del espectro a radiodifusión. La CNC controla la viabilidad técnica y geográfica de dichas asignaciones.
Brasil	Ministerio de Comunicaciones (MiniCom) y la Agencia Nacional de Telecomunicaciones (ANATEL)	ANATEL se crea como un ente regulador formalmente autónomo, siguiendo el modelo general de la Comisión federal de comunicaciones, en inglés <i>Federal Communications Commission</i> (EE.UU.) (FCC) de Estados Unidos, con autoridad sobre las telecomunicaciones, mientras que la radiodifusión sigue bajo la órbita del MiniCom.
Colombia	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), Agencia Nacional del Espectro (ANE) y Comité Nacional del Espectro (CNE)	Todos los organismos están bajo la autoridad del MinTIC, la ANE da soporte técnico y operacional al ministerio y el CNE esta limitado a realizar recomendaciones.
Ecuador	Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL Ecuador) y Superintendencia de Telecomunicaciones (SUPERTEL)	SUPERTEL es el organismo encargado del monitoreo y fiscalización de las telecomunicaciones, opera bajo la órbita de CONATEL Ecuador como parte de la estructura de manejo del espectro. CONATEL Ecuador está subordinado al Ministerio de Telecomunicaciones, que es el órgano ejecutivo formulador de políticas.
Perú	Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones (OSIPTEL)	La gestión del ERE está a cargo del Viceministerio de Comunicaciones que responde al Despacho Ministerial del MTC. El OSIPTEL es un ente vinculado al MTC involucrado con los procesos de asignación de frecuencias y fiscalización de su uso, pero las autorizaciones, licencias y permisos se gestionan mediante la <i>Dirección de Autorizaciones</i> del MTC.
Venezuela	Comisión Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL Venezuela)	CONATEL Venezuela es desde el año 2010 un instituto autónomo adscrito a la Vicepresidencia de la República Bolivariana de Venezuela (órgano rector de las telecomunicaciones). Tiene entre sus funciones la administración, regulación, ordenación y control del ERE, así como también, establece las políticas para la planificación y determinación del CNAF.

Tabla 2.4: Organismos Reguladores en Latino América⁷³.

La experiencia en la gestión del ERE en la región no es uniforme, en comparación con la Unión Europea (donde existe una normativa supranacional que asegura un modelo coherente de gestión), en América Latina, la situación está caracterizada por una diversidad de esquemas regulatorios [10]⁷⁴.

2.3.7. Nuevos Retos en la Gestión del ERE

La gestión del espectro radioeléctrico se enfrenta a nivel mundial a muchos desafíos, entre ellos⁷⁵:

- El aumento en los servicios que utilizan el espectro, así como la diversidad de agentes que lo utilizan (administraciones públicas, agencias de investigación y desarrollo sin ánimo de lucro, operadores privados).

⁷³Elaboración propia en base a documento *Uso del espectro en América Latina* [9].

⁷⁴Consultar bibliografía complementaria sobre la regulación del ERE en la región en [58] y [59].

⁷⁵Según informe Gretel 2007. Gretel es el Grupo de Regulación de las telecomunicaciones del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación de la Asociación Española de Ingenieros de Telecomunicación (COIT/AEIT) [11].

- Velocidad de las innovaciones tecnológicas que se relacionan o se basan en el uso del espectro. La aparición de nuevas tecnologías que potencialmente pueden mejorar la eficiencia de utilización del espectro⁷⁶.
- La creciente utilización de bandas que no precisan licencia para su uso (por ejemplo aquellas en las que se encuentran Wi-Fi y Bluetooth).
- Existencia de bandas que no son utilizadas por los servicios que tienen asignados y que, por lo tanto, deberían ser reasignadas (fallos en la planificación o en la atribución para los servicios contemplados en el RR).
- La convergencia tecnológica.

Convergencia

El concepto de convergencia tiene muchas definiciones, puede referirse a la combinación de diferentes tecnologías, redes y servicios.

Convergencia de redes y servicios: se refiere a la capacidad de ofrecer servicios sobre distintas tecnologías de red, es decir permite a los usuarios tener acceso a múltiples servicios en una sola plataforma.

Convergencia de Dispositivos: Capacidad de ofrecer ya sea varios servicios sobre una misma red usando un mismo equipo terminal, o un mismo servicio sobre múltiples redes usando el mismo terminal.

La mayoría de las normas existentes se basan en la idea de que la radiodifusión, la informática y las telecomunicaciones son industrias distintas desde el punto de vista comercial y, por lo tanto, están sujetas a regímenes reglamentarios independientes. Sin embargo, la realidad esta cambiando y los servicios convergentes desdibujan las fronteras entre estas industrias, lo que puede conducir a conflictos [12].

Acceso Dinámico al Espectro

La manera clásica de acceder al espectro, utilizando bloques de frecuencia previamente asignados de forma exclusiva a usuarios licenciados ha permitido el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas libres de interferencias perjudiciales, pero la tecnología disponible hace que este acceso pueda optimizarse mediante técnicas relacionadas con el acceso dinámico al espectro, en inglés *Dynamic Spectrum Access* (DSA)⁷⁷.

Gracias al DSA nuevos agentes podrán utilizar frecuencias que de otro modo no sería posible que las utilicen. En la actualidad el instituto europeo de normas de telecomunicaciones, en inglés *The European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) trabaja en estandarizar sistemas DSA en la banda de 2.3-2.4 GHz.

En esta modalidad es necesario desarrollar métodos de asignación de espectro que sean más dinámicos y que operen aprovechando las características de las nuevas tecnologías de radio. Todo este desarrollo debe apuntar a una mayor flexibilidad de las redes inalámbricas de próxima generación para adaptarse a las nuevas condiciones.

⁷⁶Esto ha llevado a los expertos a abandonar la caracterización del espectro como “recurso escaso” por la de “recurso finito”.

⁷⁷Ver Sección 5.1.

Licencia de Acceso Compartido

Licencia de acceso compartido, en inglés *Licensed Shared Access* (LSA) es una herramienta de gestión del espectro complementaria que facilita la introducción en una banda de frecuencia de nuevos usuarios, sin modificar los servicios que se prestan en dicha banda.

El Grupo de política del espectro radioeléctrico, en inglés *Radio Spectrum Policy Group* (RSPG) ha definido la LSA como: “*Un enfoque regulatorio con el objetivo de facilitar la introducción de sistemas de radiocomunicaciones operados por un número limitado de licenciatarios en virtud de un régimen de licencias individuales en una banda de frecuencia ya asignada o en espera a ser asignada a uno o más usuarios titulares. Bajo el enfoque de licencia de acceso compartido (LSA), los usuarios adicionales están autorizados a usar el espectro (o parte del espectro), de conformidad con las normas de compartición incluidas en sus derechos de uso del espectro, permitiendo así que todos los usuarios autorizados cuenten con una calidad de servicio (QoS) determinada*”.

LSA no incluye conceptos como “acceso oportunista al espectro”, “uso secundario” o “servicio secundario”, pues en estos el nuevo usuario de espectro (o usuario adicional) no tiene protección contra interferencias perjudiciales que puedan ser provocadas por los usuarios primarios (o usuarios titulares)⁷⁸.

El primer caso de uso práctico de la LSA está siendo estudiado por la CEPT, la idea será proporcionar acceso adicional para servicios de banda ancha móvil [13]. A su vez Francia a iniciado las pruebas de este nuevo método⁷⁹.

2.4. Conclusiones

El espectro radioeléctrico no sólo es valioso por ser la base física de las radiocomunicaciones en la actualidad, sino por su potencial de generar un alto impacto en el nivel socio-económico de cada país⁸⁰. Dado que las frecuencias difieren en sus capacidades debe identificarse la mejor correspondencia posible entre características y tipo de utilización. Las tareas de atribución y asignación del espectro pretenden que dicha correspondencia sea lo más eficiente posible. La complejidad de estas tareas lleva a que existan alrededor del mundo cientos de organismos, grupos de estudio y comisiones asesoras que se enfocan en los aspectos técnicos, administrativos y políticos que traen consigo las decisiones en materia de espectro.

Las experiencias internacionales muestran cómo las decisiones regulatorias impactan en el comportamiento de los inversionistas, la dinámica competitiva, el nivel de adopción de un servicio y la asequibilidad, entre otros factores. Cada entidad encargada de gestionar el espectro debe comenzar a adoptar políticas más flexibles y transparentes que faciliten la adaptación rápida a un nuevo modelo de gestión. No basta tampoco con lograr evolucionar hacia un marco político y de gestión robusto en materia de telecomunicaciones, si no existen instituciones fortalecidas y con sus objetivos claros para planificar estratégicamente sus pasos actuales y futuros. La buena gestión del espectro

⁷⁸En [60] y [61] se encuentra información adicional sobre este tema.

⁷⁹<http://www.mediatelecom.com.mx/index.php/agencia-informativa/noticias/item/99444-inician-pruebas-de-compartici%C3%B3n-de-espectro-en-francia>

⁸⁰Por ejemplo, el espectro asignado a servicios móviles es el facilitador para la implementación de redes y servicios de banda ancha, servicios que cobran gran importancia para el desarrollo de los países.

requiere de reguladores que puedan actuar con independencia y autonomía, fomentando la transparencia en sus procedimientos y disponer de los recursos económicos necesarios para poder cumplir correctamente sus funciones.

Los organismos involucrados en la regulación del ERE en Uruguay (URSEC, DINATEL, comisiones asesoras, proveedores de servicios, entre otros) han avanzado en los últimos años, pero aún queda un largo camino por recorrer. En esta investigación se descubrió que no se encuentra disponible de manera sistematizada la información lo que dificulta extraer conclusiones certeras sobre la gestión del ERE en el país. Con base a estudios internacionales y regionales se puede decir que la regulación del espectro en Uruguay presenta retardos administrativos e informativos y un diseño institucional que no acompañan el dinamismo del sector de las telecomunicaciones. Se debe trabajar en un sistema de monitoreo y en plataformas de software que se adapten a la realidad del país. Uruguay tiene las condiciones técnicas y profesionales capacitados para construir un esquema de gestión del espectro apto para las necesidades actuales.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Uso actual del ERE en Uruguay

En este Capítulo se presenta el estado de situación del uso del ERE en Uruguay entre los 30 MHz y los 3000 MHz (bandas VHF y UHF). En la Sección 3.1 se presenta la atribución de frecuencias en Uruguay, mientras que en la Sección 3.2 se presenta la adjudicación. En la Sección 3.3 se detalla la asignación de bandas de frecuencia y finalmente, en la Sección 3.4 se presentan estadísticas que complementan la descripción del uso actual del ERE en Uruguay.

3.1. Atribuciones

En el Artículo 5 del Reglamento de Administración y Control del ERE¹ se dispone la creación del CNAF a cargo de la URSEC, el cual será presentado más adelante en esta sección. El CNAF tiene como finalidad lograr una utilización coordinada y eficaz del ERE. Allí se establece qué bandas de frecuencia serán aplicables a los diferentes tipos de servicios de radiocomunicaciones. Para la elaboración del CNAF se toman en cuenta: el RR, convenios internacionales vigentes, disponibilidades nacionales e internacionales de canales radioeléctricos y las prioridades nacionales establecidas.

En el CNAF se identifica para cada banda una lista de servicios que son atribuidos a título primario o secundario y se mencionan diferentes excepciones o peculiaridades para ciertas regiones o países a través de las notas del Artículo 5 del RR. La UIT explica en el RR el compromiso que asumen los estados miembros respecto al cuadro de atribuciones que allí se publica:

“Los Estados Miembros se comprometen a atenerse a las prescripciones del Cuadro de atribución de bandas de frecuencias, así como a las demás disposiciones del presente Reglamento, al asignar frecuencias a las estaciones que puedan causar interferencias perjudiciales a los servicios efectuados por las estaciones de los demás países.”².

De lo anterior se destaca que no se obliga a los estados miembros a acatar, ni replicar la atribución incluida en el RR en toda la extensión de su territorio, sino que se llama al compromiso de que se respete en zonas donde se pudiera causar problemas de interferencia con estados vecinos.

¹Decreto N° 114/003.

²Capítulo 2, Artículo 4 del RR [5].

3.1.1. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias

El Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias fue elaborado por URSEC en el año 2002³. A pesar de no ser una versión actualizada, se presenta en la Fig. 3.1 el CNAF de URSEC por ser el oficial para Uruguay, restringido a las bandas VHF y UHF⁴.

Los números representan el servicio atribuido a cada banda de frecuencia según la Tabla E.1, no se especifica si los servicios se atribuyen a título primario o secundario. En el Apéndice F se encuentra la lista completa de los servicios atribuidos que figuran en el CNAF con la descripción que da la UIT de cada uno.



Figura 3.1: Cuadro de atribución de URSEC. Referencias: Tabla E.1.

3.1.2. Atribución por Servicio

Si bien el CNAF constituye una forma de presentar la atribución de forma ordenada y estandarizada, no es tan sencillo extraer del cuadro conclusiones cualitativas sobre la atribución que éste muestra. En la Fig. 3.2 se muestra la cantidad de ERE expresado en MHz que es atribuido a cada servicio dentro de las bandas de interés, VHF y UHF, según el CNAF. Dado que existen bandas con más de un servicio atribuido, las cantidades mostradas no deben interpretarse como el espectro destinado al servicio en forma exclusiva.

³En contacto con personal de URSEC en julio del año 2015, se informa que este CNAF es obsoleto y que el cuadro de atribución que se toma en cuenta actualmente es el publicado por UIT en el RR. Asimismo, se indica que la URSEC está en proceso de implementar un nuevo software de gestión que facilitará, una vez que se encuentre operativo, la elaboración de este CNAF, por lo que es de esperar que un nuevo CNAF sea publicado en el corto o mediano plazo.

⁴En el Apéndice E se incluye el CNAF en una escala más adecuada para versiones impresas.

3.1. Atribuciones

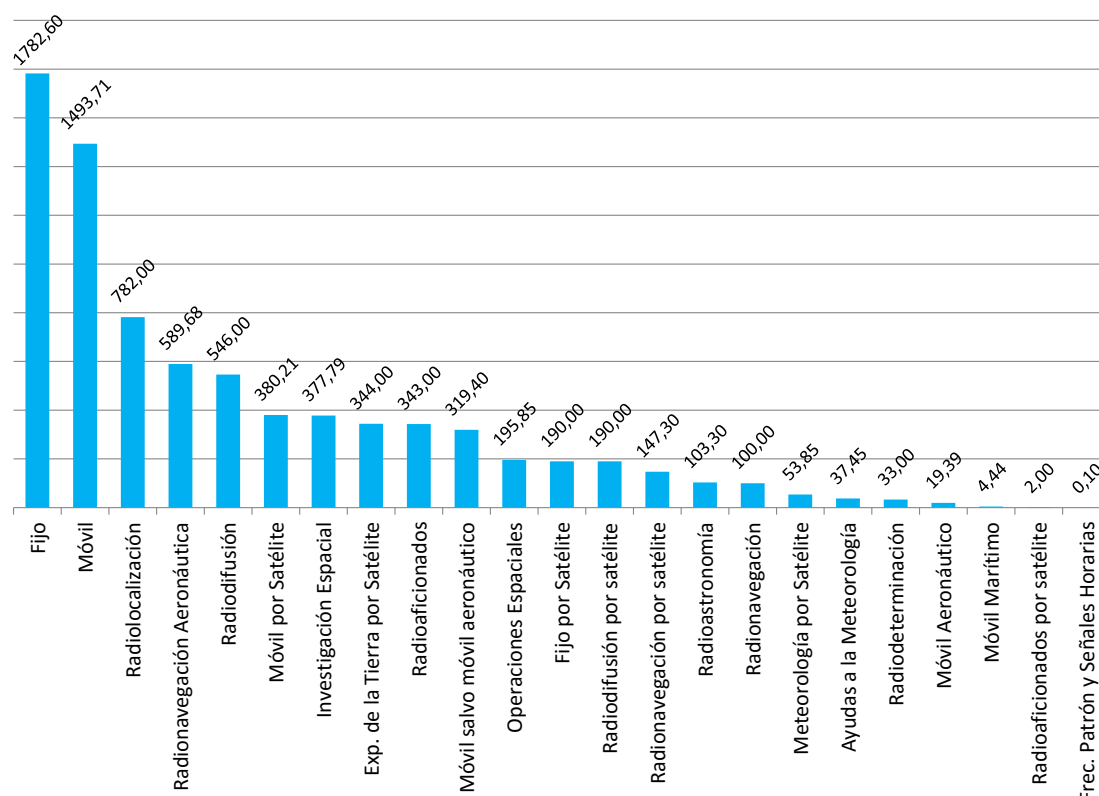


Figura 3.2: Cantidad de espectro atribuido por servicio en Uruguay (MHz).

Se observa que los servicios de radiocomunicaciones móvil y fijo son los que más ERE tienen atribuido, cada uno de ellos superando al doble del total asignado al servicio de radiodifusión. Teniendo en cuenta que la radiodifusión incluye a la televisión abierta analógica y digital, emisoras de AM y FM, entre otros, la diferencia es significativa y, cómo se muestra en la Sección 3.4, la tendencia en la demanda de espectro para el servicio móvil presenta un claro aumento.

3.1.3. Diferencias con la Atribución de UIT

Con el fin de analizar la atribución en las bandas de VHF y UHF en Uruguay se hace la comparación de las atribuciones publicadas en el RR de UIT para la región 2 y la atribución que publica la URSEC en el cuadro nacional de atribución de frecuencias (ver Tabla 3.1). Como se vio al principio de este capítulo estos dos cuadros de atribución no necesariamente deben coincidir, sin embargo se comparan a modo de ejercicio de análisis⁵.

En la primer columna se indica la banda en cuestión, en la segunda columna se muestra la atribución que realiza la UIT y en la tercera columna la atribución realizada en Uruguay. Para la recomendación de la UIT, se presentan los servicios atribuidos como primarios en mayúsculas y los atribuidos como secundarios en minúsculas. En cuanto a las números de nota, se muestran en línea con cada servicio cuando refieren al servicio y en la última línea de cada cuadro cuando refieren a toda la banda⁶.

⁵Durante la investigación realizada se encontró que varias administraciones de otros países de la región tienen publicada dicha comparación.

⁶El contenido de cada nota está disponible en el Volumen I del RR [5].

Capítulo 3. Uso actual del ERE en Uruguay

Banda (MHz)	Atribución UIT Región 2	Atribución CNAF Uruguay
76 - 88	RADIODIFUSIÓN Fijo Móvil	Radiodifusión (4)
136 - 137	MÓVIL AERONÁUTICO 5.200	Móvil aeronáutico (1) Fijo (5) Móvil salvo móvil aeronáutico (24)
156.4875 - 156.5625	MÓVIL MARÍTIMO (Socorro y llamada por LLSD) 5.226,5.227	Fijo (5) Móvil (10)
156.7625 - 156.7875	MÓVIL MARÍTIMO MÓVIL POR SATÉLITE (Tierra-Espacio) 5.111,5.226,5.228	Móvil Marítimo (7)
156.8125 - 156.8375	MÓVIL MARÍTIMO MÓVIL POR SATÉLITE (Tierra-Espacio) 5.226,5.228	Móvil Marítimo (7)
161.9625 - 161.9875	MÓVIL AERONÁUTICO OR MÓVIL MARÍTIMO MÓVIL POR SATÉLITE (Tierra-Espacio) 5.228C,5.228D	Fijo (5) Móvil (10)
432 - 438	RADIOLOCALIZACIÓN Radioaficionados Exploración de la Tierra por Satélite (activo)	Radioaficionados (3) Radiolocalización (11)
960 - 1164	MÓVIL AERONÁUTICO RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA 5.327A	Radionavegación Aeronáutica (2).
1260 - 1300	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE 5.328B,5.329,5.329A INVESTIGACIÓN ESPACIAL Radioaficionados 5.332	Exploración de la tierra por Satélite (14) Radiolocalización (11) Investigación Espacial (20) Radioaficionados (3)
1300 - 1350	RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA 5.337 RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE 5.149,3.337A	Radionavegación Aeronáutica (2) Radiolocalización (11).
1492 - 1518	FUO MÓVIL 5.343 5.341	Fijo (5) Móvil (10) Móvil por Satélite (22)
1668 - 1668.4	MÓVIL POR SATÉLITE 5.351A RADIOASTRONOMÍA INVESTIGACIÓN ESPACIAL Fijo Móvil salvo móvil aeronáutico 5.149,5.341	Radioastronomía (17) Investigación Espacial (20) Fijo (5) y Móvil salvo móvil aeronáutico (24).
1668.4 - 1670	AYUDAS A LA METEOROLOGÍA FUO MÓVIL SALVO MÓVIL AERONÁUTICO MÓVIL POR SATÉLITE 5.351A RADIOASTRONOMÍA 5.341	Ayudas a la meteorología (9) Fijo (5) Móvil salvo móvil aeronáutico (24) Radioastronomía (17)
1670 - 1675	AYUDAS A LA METEOROLOGÍA FUO METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (Espacio-Tierra) MÓVIL MÓVIL POR SATÉLITE (Tierra-Espacio) 5.351A 5.341,5.380A	Ayudas a Meteorología (9) Fijo (5) Meteorología por Satélite (16) Móvil (10)
1690 - 1700	AYUDAS A LA METEOROLOGÍA METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (Espacio-Tierra) 5.289,5.341	Ayudas a Meteorología (9) Meteorología por Satélite (16) Móvil por Satélite (22)
1700 - 1710	FUO METEOROLOGÍA POR SATÉLITE (Espacio-Tierra) MÓVIL SALVO MÓVIL AERONÁUTICO 5.289,5.341	Fijo (5) Meteorología por Satélite (16) Móvil salvo móvil aeronáutico (24) Móvil por Satélite (22)
2290 - 2300	FUO MÓVIL SALVO MÓVIL AERONÁUTICO INVESTIGACIÓN ESPACIAL	Móvil (10)
2500 - 2520	FUO FUO POR SATÉLITE (Espacio-Tierra) 5.415 MÓVIL SALVO MÓVIL AERONÁUTICO	Fijo (5) Fijo por satélite (21) Móvil salvo móvil aeronáutico (24) Móvil por Satélite (22)
2670 - 2690	FUO FUO POR SATÉLITE (Espacio-Tierra)(Tierra-Espacio) 5.208B,5.415 MÓVIL SALVO MÓVIL AERONÁUTICO 5.384A Exploración de la Tierra por Satélite (pasivo) Radioastronomía Investigación Espacial (pasivo) 5.149	Fijo (5) Fijo por satélite (21) Móvil salvo móvil aeronáutico (24) Exploración de la Tierra por Satélite (14) Radioastronomía (17) Investigación Espacial (20) Móvil por Satélite (22)

Tabla 3.1: Comparación entre atribución de UIT y atribución realizada por URSEC.

3.2. Adjudicaciones

Las atribuciones realizadas por el CNAF en Uruguay y las realizadas por UIT en su RR difieren, en cuanto al servicio atribuido, en un total de 416.15 MHz. Esto representa un 13.55 % del total de espectro de VHF y UHF. En la Fig. 3.3 se muestra una comparación del ancho de banda atribuido por UIT contra lo que es atribuido en Uruguay en las bandas de VHF y UHF en aquellos servicios donde existe diferencia. Allí se puede ver que las mayores diferencias se dan para los servicios: móvil aeronáutico, móvil por satélite, radionavegación por satélite y móvil.

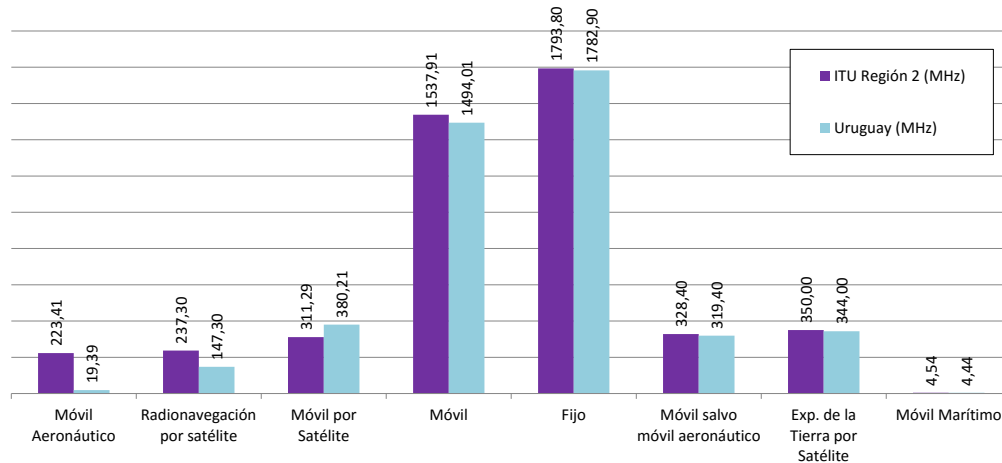


Figura 3.3: Cuadro comparativo entre atribución por servicio de UIT y URSEC.

3.2. Adjudicaciones

En esta sección se aborda el tema de la adjudicación a través de los acuerdos regionales de los que Uruguay forma parte respecto al uso de bandas y canales de radiofrecuencia (en particular dentro de las bandas VHF y UHF) con los países de la región. En la región el MERCOSUR es un actor fundamental para la toma de decisiones sobre la adjudicación del ERE en Uruguay. Si bien a lo largo de la investigación se estudiaron acuerdos sobre el uso del ERE realizados por Uruguay previo a la fundación del MERCOSUR, estos acuerdos fueron posteriormente incorporados como resoluciones del MERCOSUR.

Algunas de las pautas negociadoras del grupo, principalmente aquellas que aplican a las actividades relacionadas al ERE, según la última actualización realizada en la Resolución N° 14/2008 son:

- Identificación de temas de interés y posicionamiento común en foros internacionales
- Desarrollo de la infraestructura regional e integración de los servicios de comunicaciones
- Investigación y desarrollo tecnológico
- Radiodifusión digital (sonora y televisión)
- Armonización del uso del espectro radioeléctrico
- Coordinación de estaciones radioeléctricas

Capítulo 3. Uso actual del ERE en Uruguay

- Legislación e intercambio de información sobre la implementación de servicios de telecomunicaciones y uso y administración del espectro radioeléctrico
- Convergencia de servicios y redes de telecomunicaciones de nueva generación (NGN)
- Armonizar principios de interconexión de redes de telecomunicaciones
- Relevamiento, monitoreo y mediciones de intensidad de campo de estaciones de radiodifusión

Resoluciones MERCOSUR

Las resoluciones tomadas por el GMC establecen las pautas a nivel regional para las decisiones sobre el uso del ERE, en especial para los procedimientos de asignación de canales y frecuencias. Estas resoluciones se encuentran publicadas en la página web del MERCOSUR.

En el marco de esta investigación, se realizó un repaso de todas aquellas resoluciones que involucraran en alguna medida la gestión del ERE repercutiendo específicamente sobre los usos que se le da en Uruguay al recurso. En general, las resoluciones indican qué frecuencias se deberán utilizar en cada país para determinado servicio de modo de evitar interferencias. Además, se determinan en caso de ser necesario las zonas de coordinación, que son franjas fronterizas donde los países están obligados a compartir la información de las estaciones radioeléctricas que allí se decida instalar con los países vecinos. El tamaño de dichas zonas de coordinación varía según la tecnología o el tipo de servicio en cuestión. También se definen los procedimientos y plazos admitidos para el intercambio de la información de estaciones en coordinación así como qué información ha de ser compartida o intercambiada.

En el Apéndice G se incluye un resumen de cada resolución con datos numéricos y de frecuencia.

3.3. Asignaciones

Para conocer el uso del ERE es importante tener claro de qué forma las estaciones utilizan la banda de frecuencia que les es asignada. Esto puede variar según la tecnología empleada para dar el servicio, dado que cada una implementa su propia forma de acceder al recurso ERE.

Durante la investigación realizada se repasaron los conceptos de las principales tecnologías de radiodifusión y comunicaciones móviles utilizadas en Uruguay en las bandas de interés del proyecto, siempre haciendo foco en los aspectos del uso del ERE. En el Apéndice H se presenta un resumen de cada servicio estudiado, incluyendo una breve introducción al servicio, una descripción técnica de las tecnologías aplicadas en Uruguay para dar dicho servicio y una lista de qué cantidad de canales se encuentran asignados a cada servicio. Las tecnologías presentadas son: TV analógica, radiodifusión FM, TV digital, TV para abonados y las comunicaciones móviles celulares.

Durante este estudio se observa que, las tecnologías más recientes (como LTE o TV Digital) usan de mejor forma el espectro, con mayor eficiencia espectral y con mayor robustez frente a problemas conocidos. Quizá el ejemplo más claro sea el de la televisión digital (TVD) frente a la TV analógica. Mientras en un canal de 6 MHz se puede enviar una señal de TV analógica, el estándar ISDB-T (elegido por Uruguay para TVD) permite enviar en el mismo ancho de banda 3 señales de la misma calidad o una señal en HD, brindando no solamente mejor eficiencia espectral sino también mayor flexibilidad en el uso del ERE y el servicio que se provee (ver Fig. 3.4).

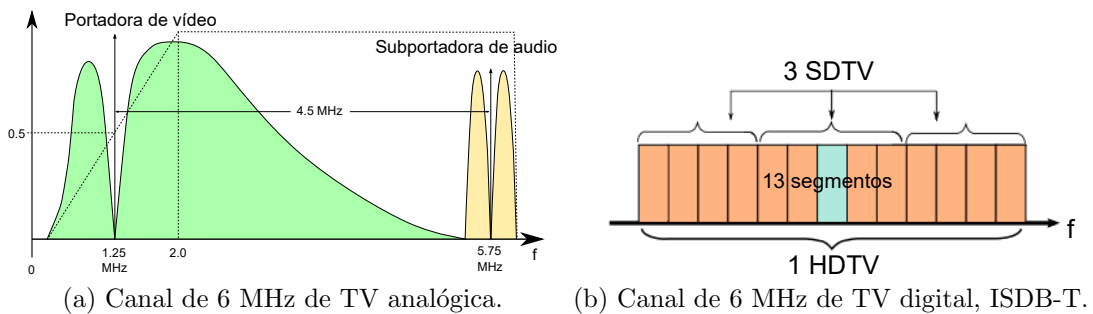


Figura 3.4: Comparación de uso del ERE para diferentes sistemas de TV.

Otro caso claro de cómo el uso del ERE ha evolucionado es el de los servicios móviles celulares. Éstos implementan técnicas de modulación y acceso al medio cada vez más robustas mejorando así las velocidades que ofrecen y la capacidad de prevalecer frente a obstáculos o en ambientes interiores. En el Apéndice H, la Tabla H.7 presenta un cuadro comparativo de las últimas cuatro generaciones de estándares para servicios móviles.

3.3.1. Uso de las Bandas VHF y UHF

Para estudiar la ocupación del ERE en Uruguay se estudian los servicios asignados en el espacio de frecuencias que componen las bandas de VHF y UHF. Para el primer relevamiento realizado sobre el uso del espectro se contó con información basada en las siguientes fuentes:

- Información disponible en el sitio web de URSEC que incluye planillas electrónicas, planes técnicos y resoluciones.

Capítulo 3. Uso actual del ERE en Uruguay

- Leyes y decretos del Estado uruguayo publicados por la Dirección Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales (IMPO).
- Información recibida del Grupo POLIMATE⁷, actualizada a la fecha de Setiembre de 2014.

La información obtenida por estos medios se puede ver en la Fig. 3.5 en la cual se representan las sub-bandas asignadas de VHF y UHF. Vale aclarar que los segmentos en blanco de esta figura no necesariamente son espacios libres, sino partes del espectro sobre las que, en este primer revelamiento, no se conoce su asignación. En la Fig. 3.5 se muestran además, las bandas de frecuencia identificadas para el despliegue de las IMT⁸.

Como puede apreciarse esta información no abarca la totalidad de las bandas VHF y UHF, sino que se reduce a los servicios de radiodifusión y servicios móviles celulares. Por tal motivo se realiza un segundo revelamiento en el cual se consulta a URSEC acerca de las asignaciones en las porciones de espectro en las bandas de VHF y UHF de las cuales no se tiene información.

URSEC informa que estas asignaciones son de carácter reservado pues son consideradas como información sensible a las actividades de las empresas asignatarias y que no puede ser divulgada en virtud la Resolución N° 102/2012. En esta resolución se encuentra la siguiente definición para “información reservada”: *“Clasificar como reservada la siguiente información: las asignaciones de frecuencias definidas como usos específicos y generales en el contexto del Decreto N° 114/003 empleadas para seguridad, seguridad pública y defensa nacional. Se excluyen de la reserva las frecuencias que corresponden a sistemas cuya asignación se efectiviza por procedimientos competitivos (tales como los de telecomunicaciones móviles, canales de radiodifusión, canales de radiodifusión por vínculo inalámbrico y similares).”* [14]. URSEC proporcionó sólo la información de qué tipos de servicios hay asignados en las bandas consultadas sin aclarar la ubicación geográfica de las estaciones, los canales asignados a cada una de ellas ni otros parámetros técnicos como la potencia utilizada o la altura de las antenas. Asimismo, URSEC sugirió las modificaciones a realizar a la información de POLIMATE sobre las asignaciones de servicios móviles para actualizarla a Julio de 2016. Con esta nueva información se elabora la Fig. 3.6⁹.

⁷<http://www.prodic.edu.uy/GIpolimate>

⁸Una identificación para IMT se refiere a una gama específica de frecuencias en una banda que está designada para su posible uso por parte de tecnologías de banda ancha móvil compatibles.

⁹En esta figura se representa la franja de frecuencia de 2700 MHz a 2900 MHz con puntos suspensivos ya que mantener la proporcionalidad dificulta su presentación en el formato de este documento.

3.3. Asignaciones

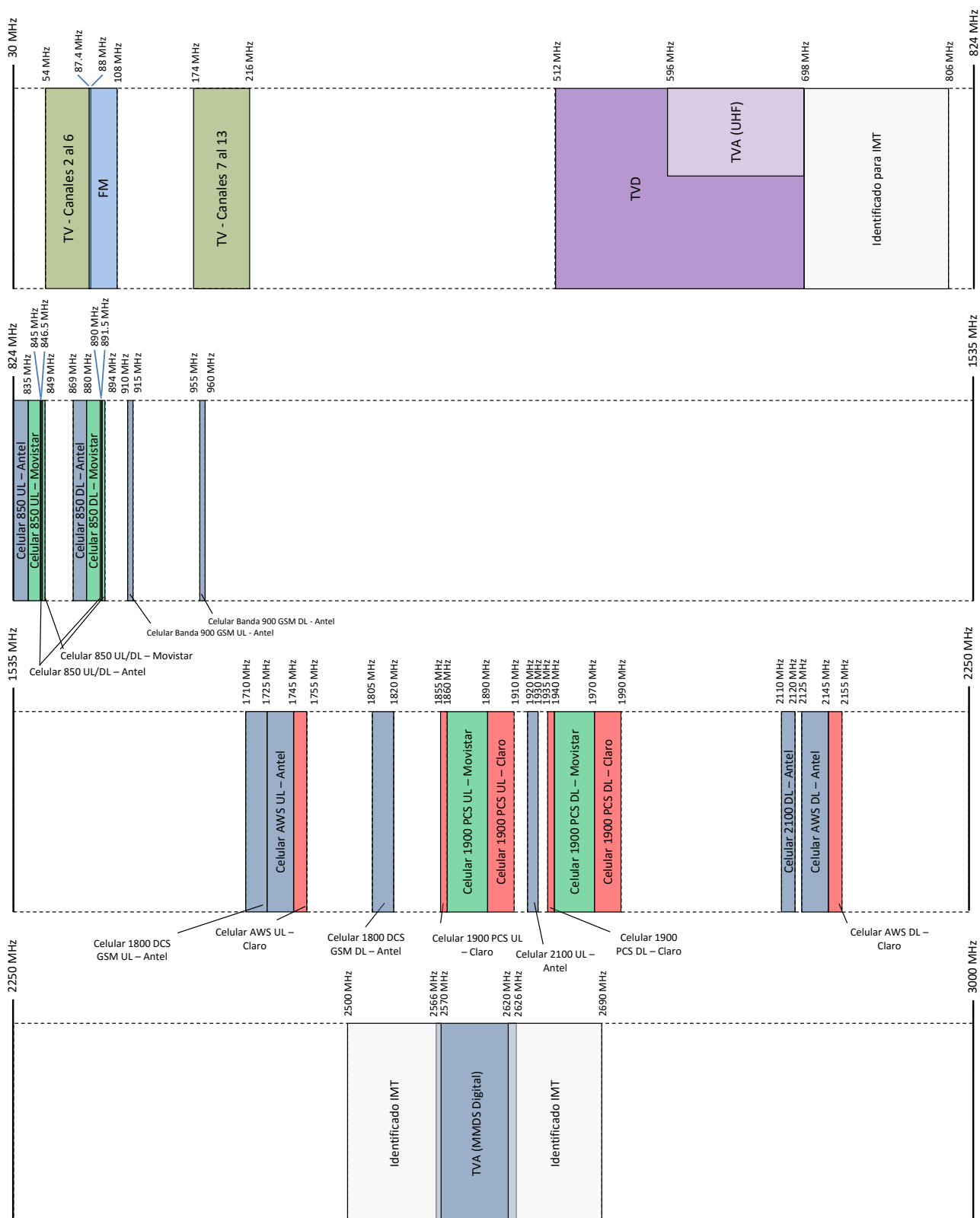


Figura 3.5: Asignaciones recopiladas de página web de la URSEC, decretos PE y POLIMATE.

Capítulo 3. Uso actual del ERE en Uruguay

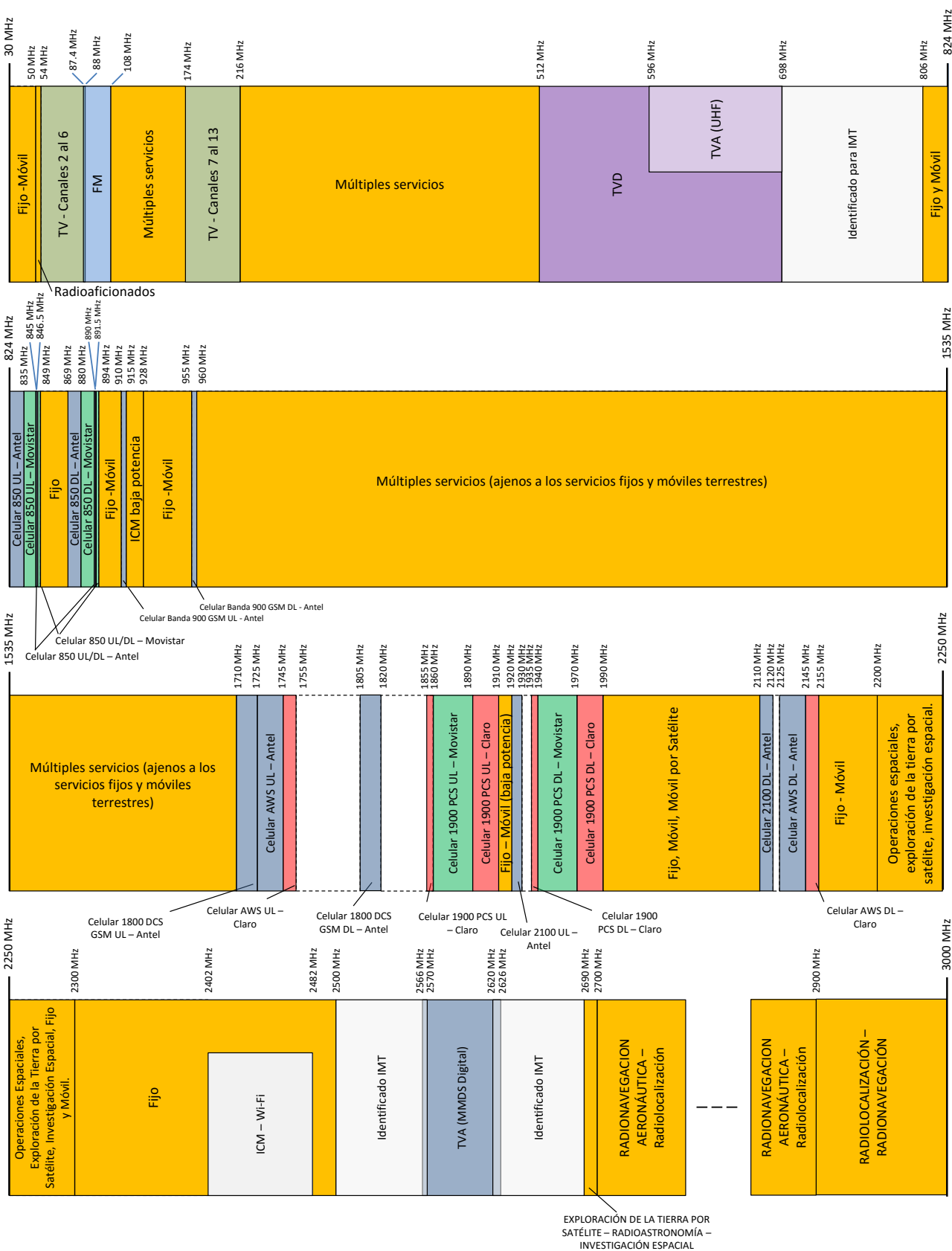


Figura 3.6: Utilización de bandas de frecuencia según datos brindados por la URSEC.

Para interpretar correctamente las Fig. 3.5 y 3.6, es preciso recordar que las asignaciones de frecuencia se realizan en términos de las estaciones, por lo cual, en cada asignación hay una componente geográfica además de la designación de un canal o frecuencia a una entidad. Es así que, lo que se muestra como un solapamiento entre el espectro asignado al servicio de televisión para abonados por UHF codificado y al servicio de televisión digital (entre 596-698 MHz) no es necesariamente un problema que pueda causar interferencias entre estos servicios, en la medida que las estaciones asignadas en esa zona del espectro se encuentren apropiadamente separadas geográficamente. En ese caso televisión para abonados (TVA) tiene asignado el espectro sólo en determinadas localidades del país.

Según el Artículo 6 del Decreto N° 114/003 de Reglamento de Administración y Control del Espectro Radioeléctrico, la información sobre las asignaciones de frecuencia debe estar centralizada en lo que se denomina el Registro Nacional de Frecuencias (RNF). También se explicita que este registro debe ser “de acceso público, excepto aquella (información) que por su naturaleza deba tenerse por reservada.” [15]. Responsables de la URSEC indican que dicho registro unificado no está disponible al público como tal y que la única información de asignaciones que se puede divulgar es la que se encuentra en el sitio web de la URSEC.

Sin perjuicio de lo anterior, cabe mencionar que la URSEC publicó durante el desarrollo de esta investigación un documento que resume la Planificación Estratégica del organismo para los años comprendidos entre 2015 y 2019¹⁰ donde se destacan algunas líneas de acción como son “Implantar la nueva plataforma del Sistema Informático modular e integrado de planificación, administración y gestión del espectro radioeléctrico, con todas sus funcionalidades” y la “Publicación de datos en formato abierto”. En particular dentro de la segunda línea de acción mencionada se marcó como objetivo para el año 2016 la “Publicación de atribución y asignación de espectro radioeléctrico”, por lo que es de esperar que existan cambios en cuanto a la disponibilidad de la información en los próximos años.

Bandas de Uso Libre y Común

Si bien una parte importante del espectro radioeléctrico se encuentra regulada a través de asignaciones específicas, donde se determina la ubicación de las estaciones, canales o frecuencias a utilizar, duración del permiso para transmitir, entre otras limitaciones, hay porciones de las bandas de VHF y UHF cuya regulación tiene características completamente diferentes. Como es el caso de las bandas de uso libre y uso común del ERE.

Uso Libre

Como lo establece el Decreto N° 114/003¹¹, el uso en modalidad libre del espectro radioeléctrico no requiere de autorización de las estaciones ni asignación de frecuencia alguna. Dentro de las bandas de VHF y UHF se atribuyen los siguientes tramos a ICM¹²: 40.66-40.70 MHz, 902-928 MHz y 2400-2500 MHz.

Como se ha mencionado, existen una variedad de aplicaciones en estas bandas como los micrófonos inalámbricos, teléfonos inalámbricos, redes de área personal como las

¹⁰<https://www.ursec.gub.uy/inicio/institucional/planificacion-estrategica-y-gestion/planificacion/>

¹¹Reglamento de Administración y Control del ERE [15].

¹²Ver Sección 2.3.5.

Capítulo 3. Uso actual del ERE en Uruguay

redes Bluetooth, puntos de acceso Wi-Fi por citar algunas. Estos dispositivos combinan el uso de bajas potencias de transmisión con técnicas de acceso al medio del tipo de espectro expandido(o en inglés, *spread spectrum*) lo que los hace más robustos frente a interferencias causadas por otras estaciones.

Uso Común

La modalidad de uso común del ERE difiere de la modalidad libre en que la primera sí requiere autorización de la administración. El uso común sin embargo, no implica una asignación de un canal ni de un servicio en particular.

En VHF se encuentra bajo esta modalidad al servicio de radioaficionados atribuido en la siguientes bandas, asignadas a título primario:

- 50-54 MHz
- 144-148 MHz
- 220-225 MHz

En UHF las bandas atribuidas a radioaficionados son las que siguen, asignadas a título secundario:

- 430-438 MHz
- 438-440 MHz
- 614-698 MHz
- 902-928 MHz
- 1240-1300 MHz
- 2300-2450 MHz

3.3.2. La Dimensión Geográfica del ERE

En la sección anterior, se presentaron gráficamente las asignaciones en las bandas de frecuencia en Uruguay sin tomar en cuenta la dimensión geográfica de éstas. Como se ha mencionado en la Sección 3.3, éstas asignaciones no son necesariamente válidas en todo el territorio nacional, sino dentro de ciertos límites establecidos por la administración. A la hora de realizar una asignación éstos límites son impuestos definiendo valores para ciertos parámetros técnicos como por ejemplo la potencia máxima con la que una estación puede transmitir.

Para el caso de las estaciones de radiodifusión se establece el llamado *contorno de protección*. El contorno de protección delimita la zona geográfica correspondiente al área primaria de servicio de una estación, cuyo centro se ubica en la posición de la antena transmisora y su radio (en km) se determina por los parámetros técnicos de la estación¹³.

¹³Parte de esta información se encuentra disponible en: <https://www.ursec.gub.uy/inicio/informacion-tecnica/telecomunicaciones/radiodifusion-sonora/2014-listados-radiodifusion/>

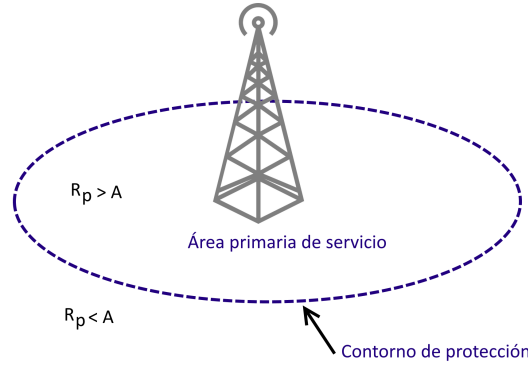


Figura 3.7: Área primaria de servicio de una estación de radiodifusión.

Formalmente, el contorno de protección es el límite del área geográfica dentro de la cual la relación entre la intensidad del campo de la señal transmitida por una estación (señal deseada, S_d) y las señales interferentes (señal no deseada, S_{nd}) supera un umbral, al que se llama *relación de protección* (R_p).

$$R_p = \frac{S_d}{S_{nd}} \quad (3.1)$$

La regulación establece la relación de protección (es decir, el valor “A” de la Fig. 3.7). Con este parámetro, la Potencia Efectiva Radiada (PER) y la altura media de antena (HMA) de una estación se obtiene el radio del contorno de protección mediante las curvas de propagación de la FCC $F(50, 50)$ ¹⁴ (tal como lo especifica la regulación vigente en Uruguay).

En lo que sigue se brinda una visión del uso del espectro desde el aspecto geográfico, mostrando cómo ciertas bandas de radiodifusión admiten un reuso espacial del ERE que todavía parece no estar explotado en todo su potencial en Uruguay. En particular, se busca mostrar la existencia de espacios en blanco, en inglés *White Spaces* (WS) en el país, es decir, lugares donde ciertos canales o bandas de frecuencia no están siendo utilizados.

Espacios en Blanco de TV

En el Decreto N° 298/995 que internaliza la Resolución N° 06/95 del MERCOSUR se establecen los contornos de protección para las estaciones de TV según su categoría. A las estaciones que operan en la banda baja de VHF (canales 2 al 6) les corresponde una relación de protección de $47 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{Vm}$. A modo de ejemplo, en la Fig. 3.8 se muestran las coordenadas de las estaciones de TV asignadas al canal 2 de VHF (54-60 MHz), donde el contorno de protección se representa por un círculo coloreado. Este contorno indica el área primaria de servicio de cada estación de forma aproximada, ya que no toma en cuenta los factores geográficos ni los climáticos, fue derivado de la información publicada por la por URSEC en su sitio web.

¹⁴<https://www.fcc.gov/media/radio/fm-and-tv-propagation-curves>

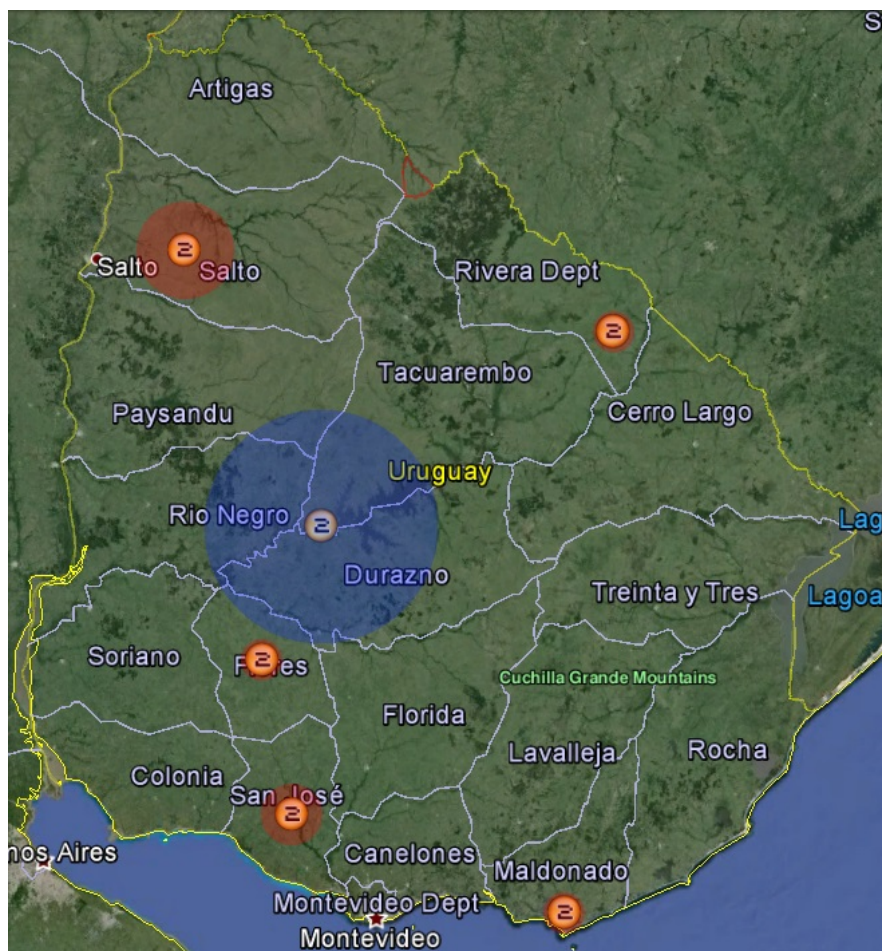


Figura 3.8: Asignaciones de TV para el canal 2 de VHF.

Canal	Localidad	PER (kW)	HMA (m)	Latitud	Longitud	Cat.	Cont. de protección (km)
2	Trinidad	0.1	30	-33.52	-56.898	C	11.997
2	Maldonado	0.1	30	-34.8386	-54.9425	C	11.997
2	Vichadero	0.1	30	-31.7769	-54.69	C	11.997
2	Biassini	3.5	60	-31.34	-57.3983	C	28.556
2	San José	0.5	60	-34.3394	-56.7136	C	18.103
2	Paso de los Toros(*)	100	-	-32.8113	-56.5125	A	67

Tabla 3.2: Cálculo de contornos de protección, estaciones en canal 2 de TV VHF¹⁵.

En la Fig. 3.8 se aprecia como casi la totalidad de los departamentos de Artigas, Paysandú, Soriano, Colonia, Florida, Canelones, Rivera, Cerro Largo, Treinta y Tres, Lavalleja y Rocha se encuentran fuera de los contornos de protección para el canal en cuestión. Un análisis similar puede realizarse para los demás canales de TV de VHF. En

¹⁵(*) Para el caso de la estación de la localidad de Paso de los Toros se toma un contorno de protección equivalente a una estación de categoría A (67 km). Para este caso no se cuenta con la información para realizar el cálculo, por lo que se toma el peor caso. En las estaciones de categoría A, HMA es de 120 m y PER es de 20 kW.

3.3. Asignaciones

la Fig. 3.9 se muestra la ubicación de las estaciones de TV analógica asignadas según la URSEC.

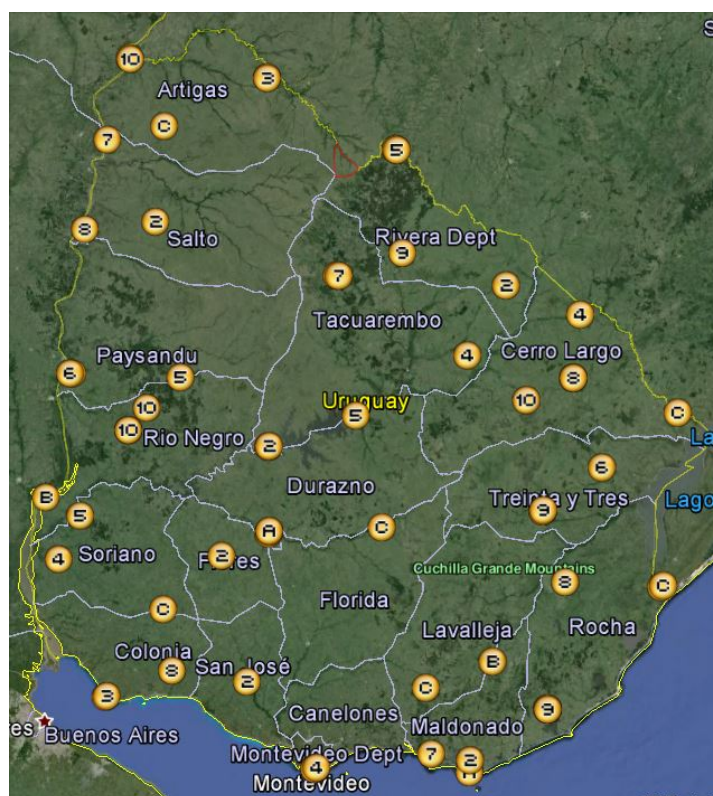


Figura 3.9: Asignaciones de TV analógica en Uruguay¹⁶.

Espacios en Blanco de FM

En la Resolución N° 31/2001 del MERCOSUR se establecen los contornos de protección para las estaciones de radiodifusión FM según parámetros técnicos que determinan su categoría. La relación de protección para este caso es de $54 \text{ dB}\mu/\text{Vm}$. Para el canal 227 de FM (frecuencia central 93.3 MHz) figuran en el listado de la URSEC tres estaciones. En la Tabla 3.3 se muestran para cada una de ellas los valores de altura y potencia, además de su categoría.

Estación	HMA (m)	PER (kW)	Latitud	Longitud	Cat.	Cont. de Protección (km)
FM Minas	75	1	-34.3750	-55.2350	F	22.518
FM Luna	60	1	-32.7033	-57.6317	F	20.367
FM Positiva	30	0.030	-33.2344	-56.0014	G	5.891

Tabla 3.3: Cálculo de contornos de protección, estaciones en canal 227 de FM

¹⁶Los iconos numerados indican el canal VHF de la estación. Las letras A, B y C representan a los canales 11, 12 y 13. En el CD que acompaña la memoria del Proyecto *Esopo* se encuentra el archivo *.kml* generado con las estaciones de radiodifusión TV, FM y AM.

En la Fig. 3.10 se muestran los contornos de protección asociados a cada estación del canal 227 de FM.

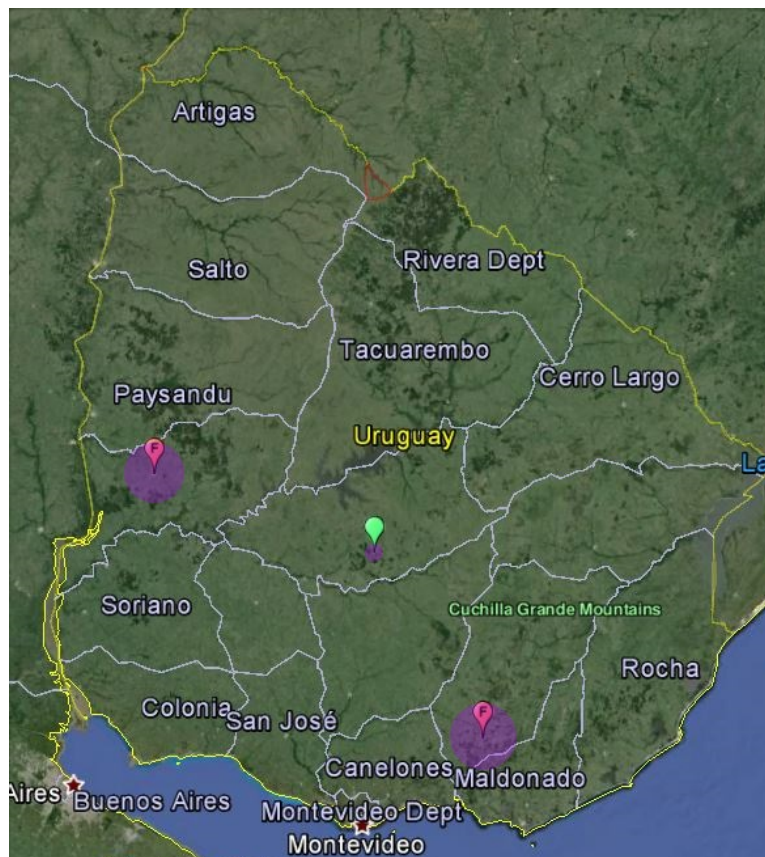


Figura 3.10: Asignaciones de FM para el canal 227.

La gran mayoría del territorio no se encuentra dentro del contorno de protección de las estaciones.

Finalmente, tanto para el caso de TV como para FM se puede extender el análisis si se toman en cuenta todos los canales y sus contornos de protección, conformando así un mapa teórico de espacios en blanco en el país¹⁷. Si se tiene en cuenta que el servicio de radiodifusión es uno de los que mayor cantidad de ERE tiene atribuido (ver Sección 3.1.2), estos espacios en blanco podrían conformar una oportunidad a futuro para un mejor aprovechamiento del recurso ERE en Uruguay.

3.3.3. La Dimensión Temporal del ERE

Estudios realizados por la FCC en el año 2002¹⁸ ya identificaban que instantáneamente es utilizado solo un porcentaje relativamente pequeño del espectro total disponible para la operación de los sistemas de radiocomunicaciones, que la escasez del espectro se debe más a las políticas y prácticas para su administración que a una verdadera insuficiencia física del recurso y que es necesario diseñar e implementar tanto políticas como tecnologías que optimicen su uso.

¹⁷Este estudio se deriva exclusivamente de las asignaciones de canales publicadas por la URSEC.

¹⁸*Report of the Spectrum Efficiency Working Group*, noviembre 2002.

3.3. Asignaciones

A modo de ejemplo, se destaca lo realizado por el Observatorio de Espectro de Microsoft (MSO)¹⁹ en la ciudad de Washington, Estados Unidos. Éste publica medidas de la ocupación del ERE en base diaria, semanal y mensual. En la Fig. 3.11 se aprecia cómo algunas bandas son escasamente utilizadas al cabo de una semana. El comportamiento diario y mensual es similar.

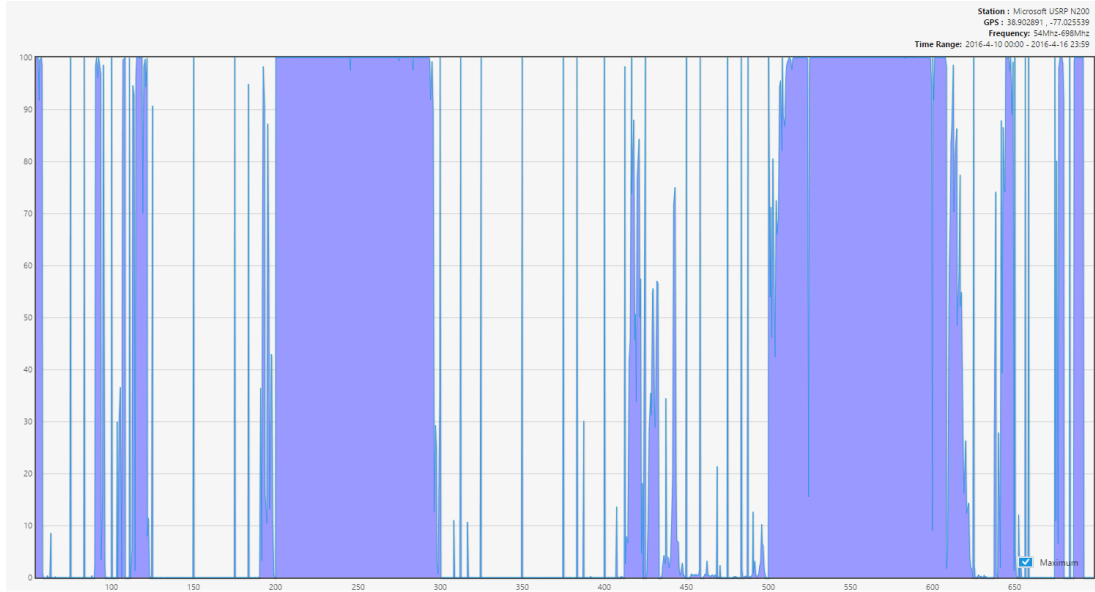


Figura 3.11: Ocupación máxima de la banda de 54-698 MHz, en base semanal, para Washington DC.

Queda fuera del alcance del proyecto *Esopo* la realización de medidas que ratifiquen o refuten esta idea para el caso de Uruguay. No obstante, se registran a continuación en la Tabla 3.4 los parámetros más importantes de la estación de medidas de Washington DC, los cuales podrían ser de utilidad para desarrollar una estación similar en Uruguay.

Latitud	38.902891
Longitud	-77.025539
Elevación sobre nivel del mar	97.5 m
Tipo de radio	Ettus USRP N200 WBX & SBX
Tipo de antena	MultiPolarized Super-M Ultra Base Station (25 MHz to 6 GHz)
Altura de antena	6 m
Tipo de cable	LMR-900
Largo del cable	12 m
Tipo de conector	Mini Circuits Splitter ZX10R-14-S+
Frecuencia Min	50 MHz
Frecuencia Max	2200 MHz

Tabla 3.4: Parámetros de estación del Observatorio de Espectro de Microsoft.

¹⁹La Fig. 3.11 y la Tabla 3.4 son extraídas de <https://observatory.microsoftspectrum.com/>.

3.4. Estadísticas

En esta sección se presentan estadísticas relacionadas con el sector de las telecomunicaciones, el cual incluye a las radiocomunicaciones. Se presentarán algunos datos sobre la evolución que este sector ha experimentado en el país en los últimos años.

En la Fig. 3.12 se presenta una comparación del porcentaje del Producto Interno Bruto (PIB) que aportan diferentes sectores productivos en Uruguay. Allí se puede ver como las telecomunicaciones se encuentran en el mismo orden de magnitud que, por ejemplo, la industria de la energía, gas y agua sumadas.

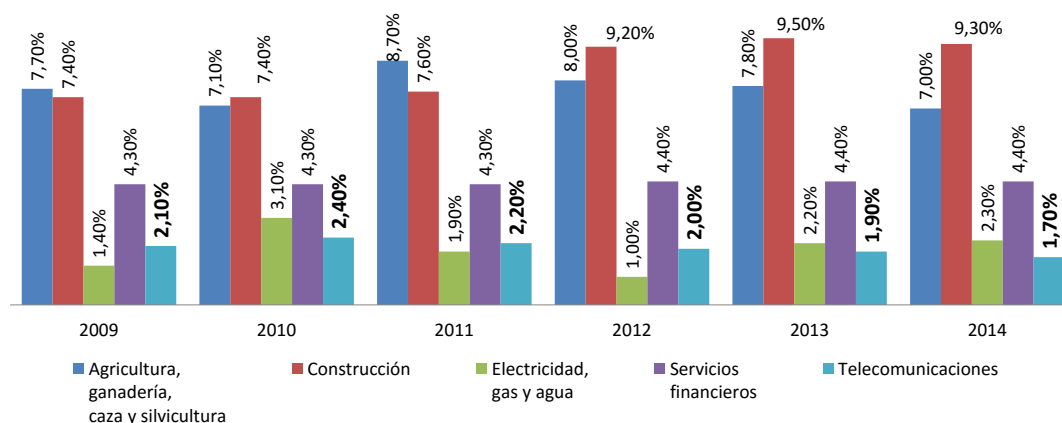


Figura 3.12: Comparación de participación en el PIB de diferentes sectores productivos [16].

Se observa en los datos de la Fig. 3.12 que el porcentaje aportado por las telecomunicaciones ha ido decreciendo en los últimos años, sin embargo esto no significa que el sector esté produciendo menos. Por el contrario, como se evidencia en el gráfico de la Fig. 3.13, el sector telecomunicaciones muestra el crecimiento sostenido de su PIB en la última década.

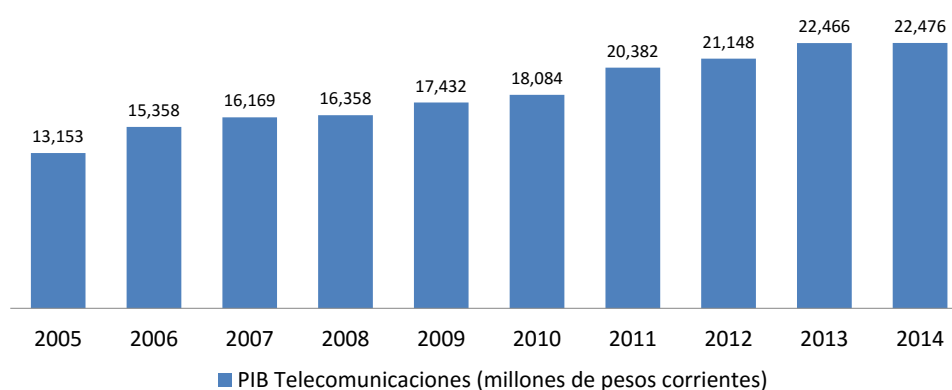


Figura 3.13: PIB del sector de telecomunicaciones en Uruguay [16].

Hasta ahora se mostraron estadísticas que aplican a las telecomunicaciones en su conjunto, a continuación se presentarán otros indicadores que revelan el crecimiento de un área de las radiocomunicaciones como son las telecomunicaciones móviles celulares. La cantidad de servicios telefónicos móviles en comparación con la cantidad de servicios telefónicos fijos se muestra en la Fig. 3.14. Mientras que los servicios fijos prácticamente

no varían con los años el crecimiento de los servicios móviles es muy pronunciado, creciendo a un promedio de casi 280000 servicios nuevos al año en los últimos cinco años.

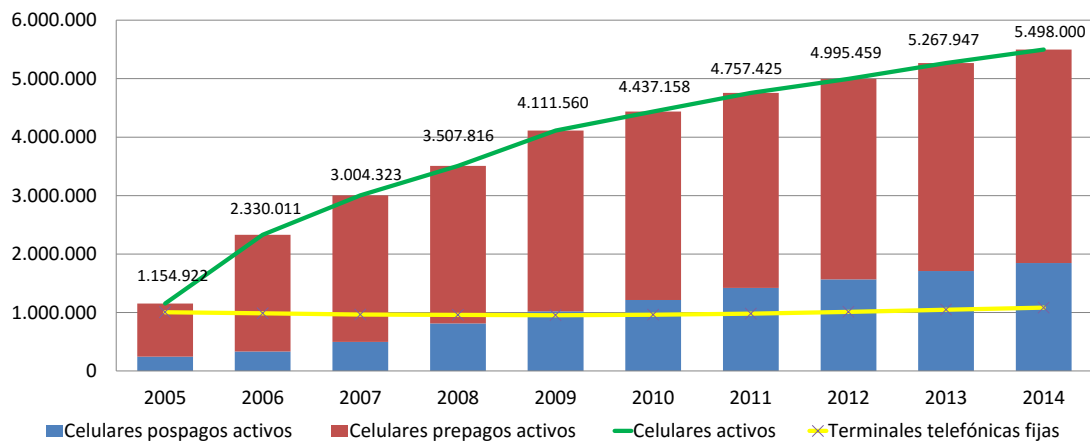


Figura 3.14: Número de servicios activos de telefonía móvil y fija²⁰.

También en la Fig. 3.14 se puede ver como dentro de la cantidad de servicios móviles activos, aumenta la cantidad de servicios pos-pagos (servicios con “contrato”), incluso la relación entre los servicios pre-pagos y pos-pagos muestra una tendencia de crecimiento hacia los pos-pagos. Esto podría ser interpretado como un aumento en el uso y la importancia que se le otorga a los sistemas móviles celulares. Es interesante detenerse en lo que es el acceso a datos por redes móviles celulares (en particular acceso de banda ancha), en la Fig. 3.15 se muestra la evolución del número de servicios móviles que cuentan con esta prestación.

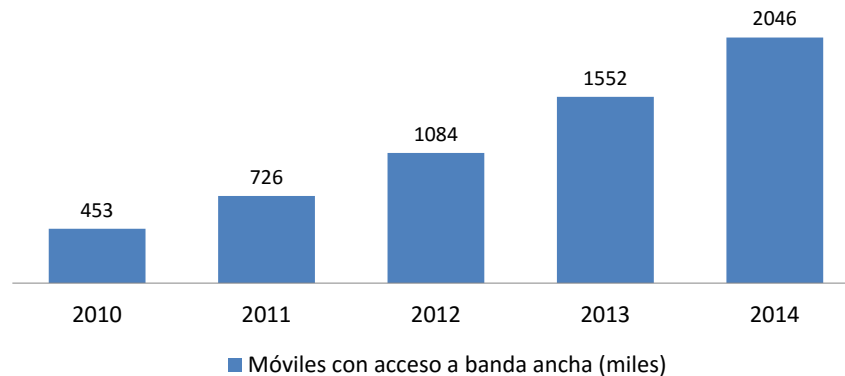


Figura 3.15: Número de servicios móviles con acceso a conexión de datos de banda ancha [16].

A mayor cantidad de demanda de servicios móviles y mayor número de usuarios, se requiere un aumento de la cantidad de espectro asignado al servicio. Las nuevas aplicaciones demandan mayores velocidades de conexión de datos, las nuevas tecnologías ocupan mayores anchos de banda (por ejemplo LTE puede ocupar hasta 20 MHz por portadora, contra los 5 MHz por portadora de UMTS) y el aumento constante de

²⁰Fuente: página web del Instituto Nacional de Estadística (INE), <http://www.ine.gub.uy/web/guest/transporte-y-comunicaciones>.

usuarios concentrados en zonas reducidas como centros urbanos, estadios O plazas, también requieren utilizar más portadoras para aumentar la capacidad de las redes.

A la luz de estas tendencias no sorprende que los servicios IMT de telecomunicaciones móviles hayan sido sujeto de identificación de grandes porciones de espectro en UHF (más precisamente 248 MHz) para su despliegue futuro, incluso siendo necesario para ello la reubicación en el espectro radioeléctrico de otros servicios tales como los operadores de TVA.

3.5. Conclusiones

Describir el uso del ERE en Uruguay en función de la atribución, adjudicación y asignación es una tarea que involucra el manejo de grandes cantidades de información, incluso habiéndola restringido a ciertas bandas. De todas formas parece ser ésta una forma ordenada y sistemática de aprender cualitativamente en qué se usa el recurso y documentarlo.

En cuanto a la coordinación a nivel regional sobre el uso del espectro, Uruguay suscribe a las resoluciones sobre el uso de bandas de ERE a nivel del MERCOSUR que respetan los acuerdos internacionales realizados principalmente en la órbita de la UIT en su Reglamento de Radiocomunicaciones (edición 2012). Estos acuerdos determinan en general los aspectos de atribución del recurso a los diferentes servicios y en casos puntuales como lo son las estaciones transmisoras de televisión analógica, radiodifusión sonora por FM, o los servicios móviles celulares, también la adjudicación.

No es posible estimar el grado de utilización del ERE desde el punto de vista de la cantidad de canales que se encuentran en uso y la reutilización de las frecuencias a lo largo del territorio nacional con la información obtenida de esta investigación.

En el plano de las asignaciones específicas de las bandas en estudio se encontró la dificultad de que el Registro Nacional de Frecuencias no está disponible de forma pública y abierta. La información disponible de asignaciones en VHF y UHF es la referente a los servicios de radiodifusión sonora, radioaficionados y televisión. Las resoluciones no mencionan en todos los casos los parámetros técnicos de las asignaciones realizadas. Esta información se complementó mediante entrevistas con personal de URSEC y, para el caso de los servicios móviles celulares, con los resultados de la investigación realizada por el grupo POLIMATE.

En la planificación estratégica publicada por la URSEC para los próximos años se destacan algunas líneas de acción que van en dirección a publicar las atribuciones y asignaciones.

Capítulo 4

Alternativas para el uso eficiente del ERE

4.1. Introducción

Los servicios que se brindan a través del ERE son cada día más variados y de mayor calidad. Los usuarios, consumidores de estos servicios, crecen en número y aumentan sus exigencias. Hoy en día el uso del ERE experimenta un incremento no solo de usuarios y servicios, sino también de redes y dispositivos.

A corto plazo, los avances tecnológicos necesarios para satisfacer la demanda pueden demorar en estar disponibles para su aplicación y la regulación debe evolucionar acorde a las nuevas modalidades de uso del ERE. La reglamentación y las normas existentes relativas a la utilización del espectro son importantes pues se utilizan para minimizar la interferencia entre usuarios y sistemas que comparten bandas de frecuencia. Los nuevos usos del espectro también plantean nuevos retos en la gestión de este recurso. La capacidad de un país para aprovechar todas las ventajas del uso eficiente del ERE depende de su política en materia de telecomunicaciones y de los mecanismos para la regulación y gestión del recurso [11].

Se enumeraran aquí las principales tendencias en cuanto al uso del ERE a nivel mundial: las pequeñas celdas, las ondas milimétricas, las comunicaciones ópticas y la compartición de espectro.

4.2. Servicios Móviles

Se espera que el tráfico de datos móviles se multiplique por 10 en el periodo comprendido entre el año 2014 y el 2019¹.

Según la Asociación GSM (GSMA)² el aumento se debe a la rápida adopción de los servicios *3G* y *4G*, así como a la enorme aceptación de los teléfonos inteligentes cuyo uso trae consigo aplicaciones que requieren una gran cantidad de banda ancha, especialmente en el caso del vídeo [17].

¹Según el *Visual Networking Index (VNI)* de Cisco, consultar <http://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/service-provider/vni-service-adoption-forecast/index.html>, para información más detallada se recomienda visitar el siguiente enlace http://www.cisco.com/c/dam/assets/cdc_content_elements/flash/netsol/sp/mspan/index.html

²GSMA (<http://www.gsma.com/>) es una organización de operadores móviles y compañías relacionadas, dedicada al apoyo de la normalización, la implementación y promoción del sistema de telefonía móvil.

Capítulo 4. Alternativas para el uso eficiente del ERE

La revolución de la llamada *banda ancha móvil* está teniendo un gran impacto en el tráfico de datos a nivel mundial, en la Fig.4.1 se pueden observar las previsiones de crecimiento en base a cuatro estudios diferentes³.

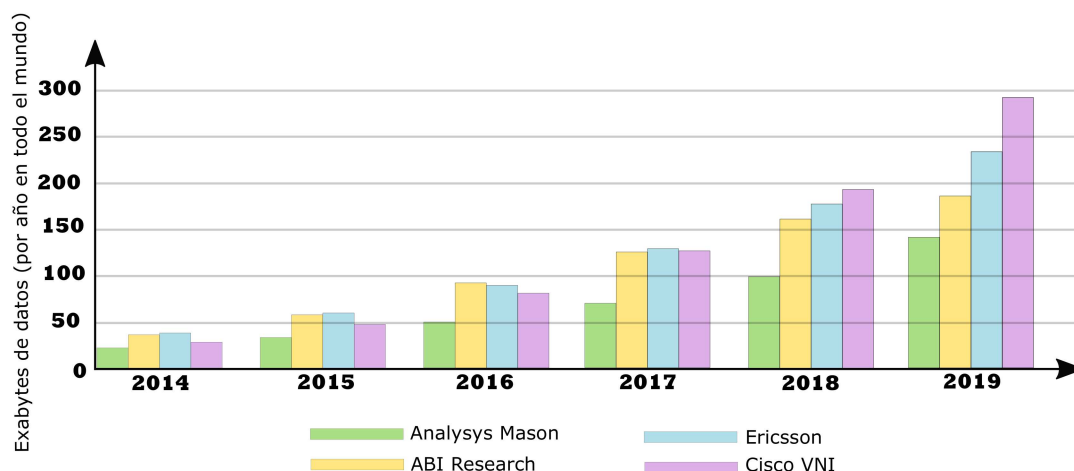


Figura 4.1: Estimación de la cantidad de tráfico de servicios móviles periodo 2014-2019⁴.

Entonces, surge la pregunta, ¿el enorme crecimiento del uso de datos móviles y el avance tecnológico que lo acompaña, implica que se debe poner a disposición de las IMT una cantidad adicional de espectro electromagnético?. A nivel de UIT la respuesta es sí⁵. Se necesita disponer de nuevas bandas para abordar tanto las necesidades de cobertura como de capacidad de los sistemas IMT y es importante considerar las frecuencias más allá de las utilizadas tradicionalmente para sistemas celulares, en especial aquellas por encima de los 6 GHz.

En este aspecto son de interés las decisiones que se tomaron en la última CMR-15 donde se identificó la *banda L* (1427 a 1518 MHz), la parte inferior de la *banda C* (3.4 a 3.6 GHz) y algunas porciones adicionales en otras bandas para IMT. Algunas de las bandas propuestas para las IMT avanzadas ya estaban atribuidas a otros servicios en carácter primario, por lo tanto existe la posibilidad de que se utilicen técnicas de uso compartido del espectro y actualmente se estudian diferentes mecanismos (como banda ultra ancha, en inglés *Ultra Wide Band* (UWB) y CR). De todas formas, al definirse las bandas de frecuencia para el desarrollo de servicios móviles de cuarta generación comenzaron en la región las licitaciones de espectro para que los operadores desplieguen sus redes⁶.

Los proveedores de los servicios de banda ancha se enfrentan al desafío constante de cumplir con las expectativas de sus clientes (crecientes demandas de capacidad y mejores velocidades de transmisión, entre otras), para ello utilizan una variedad de nuevas tecnologías y uno de estos avances es la implementación de las llamadas pequeñas celdas, en inglés *Small Cells*. Esta tecnología permite a los operadores mejorar

³Los estudios son *Analysys Mason, Global Mobile Network Traffic* (Tráfico global en las redes móviles) de octubre 2014, *ABI Research, Mobile Data Traffic and Usage* (Tráfico y uso de datos móviles) de octubre de 2014, previsión para el sector móvil de Cisco VNI de enero 2015 y *Ericsson Mobility Report* (Informe sobre movilidad) de febrero 2015.

⁴Imagen elaborada en base a información extraída de la GSMA.

⁵Los resultados de los estudios se encuentran en el reporte *UIT-R M.2078*.

⁶Información adicional sobre algunos casos de la región se puede encontrar en [62] y [63].

la cobertura y capacidad en diversos lugares como hogares, empresas y sitios donde brindar un buen servicio de comunicaciones móviles es difícil.

4.2.1. Pequeñas Celdas

La demanda de servicios de banda ancha móvil es cada vez mayor, lo que lleva a los operadores a ampliar la capacidad de sus redes de acceso de radio. Esto se consigue con una combinación de la utilización de más espectro radioeléctrico (para lo que se necesita mayor disponibilidad del ERE), la optimización continua de la red, la mejora de la eficiencia espectral y nuevas topologías de red que posibiliten atender una mayor densidad de usuarios en una determinada zona.

La celda (o célula) celular es la unidad básica de cobertura en que se divide un sistema celular. El tamaño de cada celda estará determinado por factores como la potencia del transmisor, restricciones naturales y artificiales en el área a cubrir, la banda de frecuencia en la que se trabaja, altura y posición de la antena, entre otros. La construcción de una red de telefonía móvil celular es realizada mediante la agregación de células grandes (macro-celdas), lo que permite la cobertura de un área en particular. A medida que va aumentando el tráfico o el número de usuarios en la macro-celda, se realiza lo que se llama una subdivisión celular, para así disponer de mayor capacidad creando celdas más pequeñas a costa de disminuir el área de cobertura de cada antena y, consecuentemente, aumentar el número de estaciones base necesarias.

El espacio disponible para la instalación de las llamadas macro-celdas es costoso y cada día más escaso, a esto se le suma que no siempre es posible realizar la instalación de la Radiobase (RB) debido a otras limitaciones que van desde la limitación en el espacio físico hasta cuestiones estéticas en lugares urbanos, por lo que se requieren permisos especiales para realizar instalaciones. Como alternativa a las macro-celdas existen las pequeñas celdas que brindarán la capacidad adicional necesaria en el lugar adecuado y no requieren de una amplia concesión de permisos y gastos para ser instaladas.

Es importante notar que esta solución no reemplaza a las tradicionales radiobases sino que es una alternativa para mejorar la cobertura y para respaldar la capacidad de las redes celulares en áreas con una gran densidad de tráfico, ofreciendo buenos niveles de servicio a los clientes. En la Tabla 4.1 se detallan cuatro tipos de celdas celulares y su radio de cobertura.

Tipo de celda	Radio cobertura típico	Aplicación
Macro-celda	1 - 20 km	Se emplean en áreas rurales, rutas y poblaciones cercanas a éstas.
Micro-celda	500 m - 2 km	Ofrecen servicio a usuarios fijos o que se muevan lentamente con elevada densidad de tráfico.
Pico-celda	100 m - 300 m	Ofrecen servicio en áreas pequeñas, como parte de un edificio, una esquina, centros comerciales, etc. Estos se utilizan para extender la cobertura a la zona donde las señales al aire libre no llegan bien o para añadir capacidad de la red en zonas con alta densidad de tráfico.
Femto-celda	menor a 50 m	Utilizadas para mejorar la cobertura móvil en interiores.

Tabla 4.1: Clasificación de celdas celulares⁷.

En la Fig. 4.2 se muestra la relación entre la cobertura y la capacidad por usuario que permite el despliegue de los diferentes tipos de celdas.

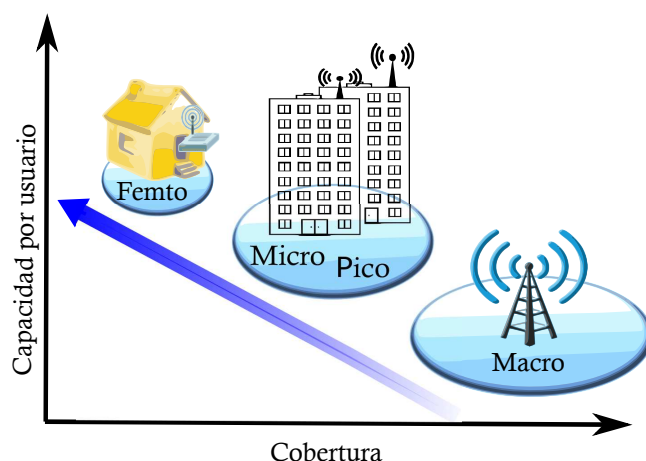


Figura 4.2: Relación entre cobertura y capacidad por usuario en pequeñas celdas⁸.

En cuanto a la historia del concepto de pequeña celda, en el año 2002 la empresa *Motorola* anunció su primera pequeña celda 3G, pero fue en el año 2005 que el concepto de *home base station* tomó mayor aceptación en el sector. Para 2006, el término cambia por femto-celda, durante el Congreso Internacional 3GSM en Barcelona. En julio de 2007 se funda el *Femto Forum* (en la actualidad, *Small Cell Forum*⁹) con el objetivo de promover el despliegue de esta tecnología y una estandarización a nivel mundial. Para diciembre de ese año el grupo ya incluía a más de 100 empresas del sector de telecomunicaciones.

⁷Elaborado a partir de paper publicado en *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 2, No 9, 2011, página 51. "Hierarchical Cellular Structures in High-Capacity Cellular Communication Systems".

⁸Imagen elaborada en base a presentación de la compañía *Radisys Embedded Wireless Infrastructure Solutions. Company Overview Q4 2012*.

⁹<http://www.smallcellforum.org>

Según el *Small Cell Forum* las pequeñas celdas se clasifican según el segmento de mercado de la siguiente manera:

- Rurales y remotas (*Rural and Remote*): desplegadas en áreas rurales, que sirven también a la industria y el transporte.
- Urbanas (*Urban*): pequeñas celdas en intemperie en zonas urbanas, de alta capacidad.
- Empresariales (*Enterprise*): pequeñas celdas para interiores.
- Residencial/SOHO¹⁰ (*Residential/SOHO*): unidades en los hogares y oficinas muy pequeñas.

A febrero del año 2016 existen en el mercado global 13.3 millones de pequeñas celdas. La Fig. 4.3 muestra las perspectivas sobre la cantidad de pequeñas celdas en el mercado para los próximos años en millones de unidades.

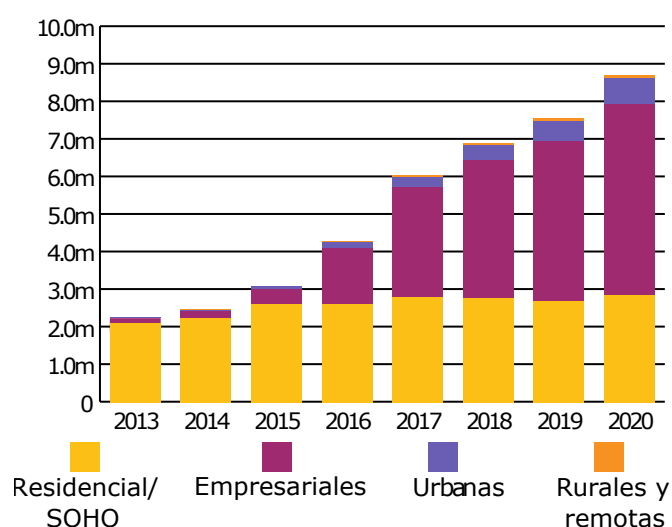


Figura 4.3: Estimación de la cantidad de pequeñas celdas a nivel global¹¹.

Redes heterogéneas

Para hacer frente de una manera eficiente al incremento exponencial de tráfico, serán necesarias nuevas tecnologías y topologías de red. Una solución pasa por las llamadas redes heterogéneas, en inglés *Heterogeneous Networks* (HetNets), de las que las pequeñas celdas son un elemento fundamental. HetNets introduce el uso de infraestructura de pequeñas celdas, así como el de otras tecnologías de acceso que no pertenecen a la familia *the 3rd generation Partnership Project* (3GPP), como Wi-Fi. Una red celular heterogénea implica agregar una capa de pequeñas celdas a la capa celular de macro-celdas tradicional (ver Fig. 4.4).

¹⁰ *Small Office/Home Office*.

¹¹ Imagen extraída de *Small cell deployments Market status report. February 2016. Small Cell Form*.

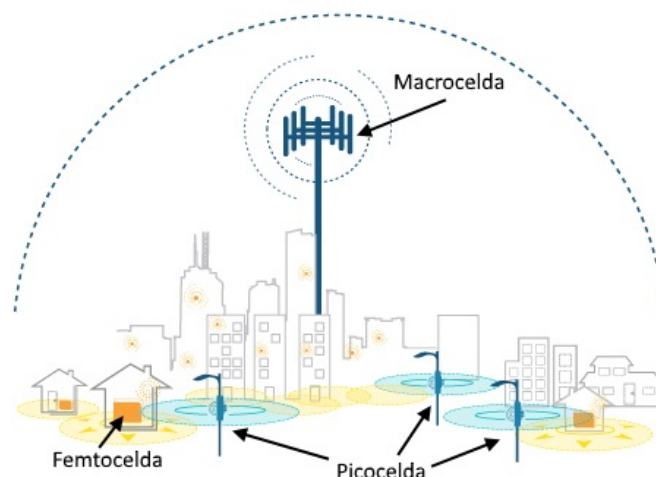


Figura 4.4: Representación de una red heterogénea¹².

Este nuevo enfoque mejora la eficiencia espectral mediante una operación en las bandas ya utilizadas por las macro-celdas. A través de técnicas efectivas de reducción de interferencia y coordinación entre las macro-celdas y las pequeñas celdas la capacidad de la red puede ser mucho mayor.

Los proveedores de servicio se enfrentan a los retos que acompañan a las HetNets, pues éstas redes son más complejas y requieren más planificación. Para que el sistema pueda ser eficiente, cada uno de los nodos de baja potencia que constituyen las pequeñas celdas debe interactuar con todas las capas de la red celular tradicional, realizando tareas como el *handoff*, manejo de interferencias, facturación y autenticación. La coexistencia entre las macro-celdas y las pequeñas celdas agrega complejidad a funciones de la red ya existentes y genera nuevas.

El despliegue de un gran número de pequeñas celdas crea nuevos desafíos para el *backhaul*¹³ pues este debe proporcionar la capacidad suficiente para transportar el tráfico de datos de todas las pequeñas celdas de la red¹⁴ [18].

A modo de resumen, en cuanto a las redes de acceso a servicios móviles, las principales alternativas para mejorar la cobertura y aumentar la capacidad mediante el uso más eficiente del ERE es la implementación de pequeñas celdas y la descarga de tráfico hacia otras redes (por ejemplo Wi-Fi) llamada *offload*.

4.3. Ondas Milimétricas

Las ondas electromagnéticas denominadas ondas milimétricas, en inglés *Millimeter Waves* (MMW), son ondas que se encuentran en la porción del espectro radioeléctrico comprendida entre 30 GHz y 300 GHz (Esta porción es nombrada según UIT¹⁵, banda de extremadamente alta frecuencia, en inglés *Extremely High Frequency* (EHF)).

¹²Imagen extraída de Internet.

¹³En este documento se define *backhaul* como la parte de la red de comunicaciones que conecta el núcleo de la red con la última milla [64].

¹⁴*Ericsson* ha publicado recientemente un informe sobre las tendencias en el *backhaul*. El informe indica que el *backhaul* está dominado por las microondas y que con el tiempo, la fibra reemplazará totalmente al cobre.

¹⁵Recomendación UIT-R V.431-8.

Éstas ondas son parte de las llamadas microondas (ondas en el rango de frecuencia comprendido entre 300 MHz y 300 GHz, este rango incluye las bandas de UHF, SHF y EHF).

Jagdish Chandra Bose fue el primero en experimentar con esta tecnología¹⁶, en el año 1895 realizó la primera transmisión y recepción de ondas electromagnéticas a 60 GHz, más de 23 metros de distancia (a través de dos paredes intermedias haciendo sonar de forma remota una campana). Luego la investigación de las MMW se mantuvo dentro de los laboratorios universitarios y gubernamentales, las primeras aplicaciones fueron en la década de 1960 para radioastronomía, seguidas por aplicaciones militares en la década de los años 70 [65].

En la década de los años 90, el desarrollo del radar de detección de proximidad para automóviles que funcionaba a 77 GHz fue la primera aplicación orientada a usuarios usando ondas milimétricas por encima de 40 GHz. En el año 1995 la FCC liberó las frecuencias entre 59 GHz y 64 GHz para la comunicación inalámbrica sin licencia lo que resultó en el desarrollo de variedad de radares con aplicación comercial. En el año 2003 se autorizó el uso de las bandas de frecuencia de 71 GHz a 76 GHz y 81 GHz a 86 GHz¹⁷ para enlaces punto a punto licenciados, en el año 2006 se habilitó en Europa.

Las frecuencias tradicionalmente usadas por debajo de 50 GHz ya son explotadas de manera diversa, de aquí la necesidad de explorar nuevas bandas de frecuencia, en este caso más altas para satisfacer los requisitos y la demanda (actuales y futuros).

Hoy en día uno de los atractivos más importantes de las MMW es que a frecuencias tan elevadas los anchos de banda disponibles son mucho mayores, permitiendo la instalación de radioenlaces con capacidades de múltiples Gbps. Como se vio en la sección anterior, el *backhaul* de las redes inalámbricas móviles debe hacer frente al aumento en la capacidad necesaria para satisfacer la demanda de servicios. Las MMW proporcionan una alternativa para enfrentar este tipo desafíos.

El interés actual está centrado en las llamadas banda-V (en inglés *V-band*) y banda-E (en inglés *E-band*). La banda-V abarca desde 57 GHz a 66 GHz. La banda-E cubre desde 71 GHz a 76 GHz y desde 81 GHz a 86 GHz¹⁸.

4.3.1. Banda-V

Durante muchos años se han utilizado los sistemas inalámbricos punto a punto que operan a 60 GHz para comunicaciones de alta seguridad, esto es resultado de un fenómeno de la naturaleza. Las moléculas de oxígeno absorben energía electromagnética a 60 GHz lo que atenúa (debilita) las señales con estas frecuencias a medida que aumenta la distancia¹⁹. Esto hace que los 60 GHz sean una excelente opción para las comunicaciones secretas de satélite a satélite porque la atmósfera de la Tierra actúa como un escudo que previene los intentos de espionaje desde la Tierra.

Otra ventaja de la absorción de oxígeno es que la radiación de un enlace de radio particular de 60 GHz se reduce rápidamente a un nivel que no interfiere con otros enlaces de 60 GHz que operan en la misma zona. Esta reducción permite una mayor

¹⁶En el mismo momento en el que Marconi realizaba la primera transmisión inalámbrica oficial.

¹⁷Estas bandas son comúnmente llamadas bandas E, en inglés *E-band*.

¹⁸Dado que no hay una visión única sobre las definiciones de la letra de banda, la definición aquí expresada puede variar con respecto a otras fuentes. Existe cierta confusión o controversia acerca de estos rangos de frecuencia, por ejemplo, en algunos países el rango de la banda-V incluye frecuencias desde 48.5 GHz a 57 GHz.

¹⁹Absorción gaseosa de 16 dB/km aproximadamente.

re-utilización de frecuencia. Si bien esta característica limita el enlace de radio, la propagación se ve más afectada por la lluvia²⁰, por lo tanto, para diseñar un enlace de radio en 60 GHz robusto es necesario considerar la atenuación por lluvia como principal limitante, además de la absorción gaseosa [19].

En materia de regulación, las decisiones de los gobiernos han sido diversas. En Europa existen dos recomendaciones para este tipo de enlaces, una para el uso de la banda de 57 GHz a 64 GHz y otra para la banda de 64 GHz a 66 GHz²¹. La razón para tener recomendaciones separadas es el impacto de absorción de oxígeno reducido significativamente en el rango superior, lo que genera diferentes condiciones de operación. En algunos países la banda de 59 GHz a 61 GHz está reservada para aplicaciones militares y en otros la banda de 61 GHz a 61.5 GHz se reserva para su uso en aplicaciones ICM únicamente²² [20]. En la mayoría de los países esta banda es una banda no licenciada.

4.3.2. Banda-E

Desde el año 2000 los reguladores de algunos países han habilitado el uso de estas bandas para enlaces de radio que proporcionan grandes velocidades de datos sin absorción gaseosa, lo que permite llegar a distancias más largas en comparación con radioenlaces en la banda-V.

A estas altas frecuencias, las longitudes de onda son cortas lo que resulta en enlaces altamente directivos, permitiendo colocar más de una antena sobre un mismo mástil o techo incluso aunque estén trabajando a la misma frecuencia. Esto facilita la instalación de estos sistemas en una misma área. Si bien en estas bandas no se tiene el nivel de absorción gaseosa mencionado para la banda-V, sí se mantiene el efecto de las lluvias sobre estos enlaces. Dada la diferente naturaleza de las dos bandas de frecuencia, diferentes escenarios han sido planteados para su uso.

En algunos países europeos, las bandas 71 GHz a 74 GHz y 81 GHz a 84 GHz se consideran como bandas militares y son utilizadas por los sistemas de defensa, por esta razón hoy en día no están disponibles para uso civil. En otros países se ha identificado que estas bandas se pueden compartir entre los usuarios civiles y militares de acuerdo a la legislación que esté vigente. La situación, en términos de métodos de concesión de licencias es muy variada. En la Fig. 4.5 se muestra la situación de la banda-E en algunos países según encuesta realizada por ETSI²³.

²⁰En las regiones de precipitaciones moderadas, la atenuación debida a la lluvia es aproximadamente el doble que la debida al oxígeno. En las regiones de lluvias fuertes, la atenuación es más de tres veces la provocada por la absorción de oxígeno.

²¹Recomendación ECC(09)01 y Recomendación ECC(05)02.

²²Información detallada sobre los usos de estas bandas y su regulación se puede encontrar en [66].

²³Para información detallada país por país consultar la base de datos de la encuesta en http://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp9_e_band_and_v_band_survey_database.zip.

4.4. Comunicaciones Ópticas en Espacio Libre

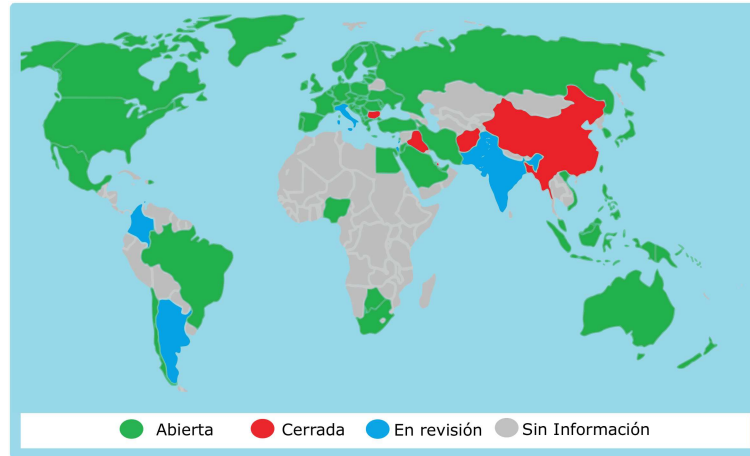


Figura 4.5: Situación de la banda-E²⁴.

En cuanto a recomendaciones internacionales la UIT publicó en el año 2012 la recomendación sobre disposición de canales y bloques de radiofrecuencia en los sistemas inalámbricos fijos que funcionan en las bandas de 71-76 GHz y 81-86 GHz²⁵.

El uso sin licencia del espectro de 60 GHz hace muchas aplicaciones de datos viables. Mientras la intensiva degradación de la señal es útil para algunos atributos específicos como la re-utilización de frecuencias, se reduce la cobertura del enlace.

La asignación de espectro para 5G no puede ser separada de la atribución de espectro suficiente y adecuado para desplegar la red de *backhaul*. Para el *backhaul* de las pequeñas celdas se espera que la banda-V (con ancho de banda de canal de unos pocos cientos de MHz y normas adecuadas para reducir la interferencia) juegue un papel clave en el mediano y largo plazo. La banda-E aparece como la banda de radiofrecuencia capaz de permitir la transmisión de datos de alta capacidad a unos pocos kilómetros (*backhaul* de macro-celdas). Se cree también que los requisitos a largo plazo para el *backhaul* 5G utilizaran espectro por encima de los 90 GHz.

4.4. Comunicaciones Ópticas en Espacio Libre

La idea de las comunicaciones ópticas en espacio libre, en inglés *Free Space Optics* (FSO)²⁶ es transmitir información por el espacio libre utilizando señales ópticas similares a las que viajan a través de la fibra óptica. Los orígenes de estos enlaces se remontan a cuando en el siglo XIX Graham Bell logró transmitir señales de voz a través del aire por un haz de luz una distancia de unos 180 metros. Este descubrimiento de Bell no llegó a convertirse en un producto comercial pero sentó las bases de las comunicaciones ópticas actuales.

En poco tiempo se obtuvo el conocimiento de las técnicas necesarias para implementar estos enlaces pero la utilidad y la viabilidad de sistemas FSO eran cuestionables pues en la época los sistemas de comunicaciones existentes cubrían la demanda, a esto se le sumaba que este tipo de enlaces está totalmente sujeto a las condiciones atmosféricas como la niebla, por lo que no todos los países son aptos para su implementación

²⁴Imagen extraída de *E-Band and V-Band - Survey on status of worldwide regulation* [20].

²⁵UIT-R F.2006.

²⁶<http://www.freespaceoptics.org/>

exitosa. En las aplicaciones en el espacio donde los efectos de la atmósfera podían ser despreciables se requería un nivel de exactitud en la ubicación del transmisor y el receptor que no fue posible lograr en esos años. Por estos motivos FSO no tuvo rápida incorporación a las redes de telecomunicaciones. El problema de los agentes atmosféricos condujo a que a partir de 1980 la mayoría de estos sistemas fuesen desarrollados para espacios cerrados.

Por limitaciones tecnológicas los sistemas FSO no se empezaron a desarrollar hasta la década de los años 60, con la llegada de distintas fuentes ópticas, la más importante entre ellas, el láser. Esta tecnología ha sido investigada ampliamente por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, en inglés *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y la Agencia Espacial Europea, en inglés *European Space Agency* (ESA), para aplicaciones en el espacio con mucho éxito, ya que se llegaron a alcanzar tasas de 10 Gbps en comunicaciones entre satélites, constituyendo uno de los medios de comunicaciones de mayores prestaciones y más alta potencialidad. En el año 2008, se introdujo en el mercado el primer sistema de FSO para espacios abiertos funcionando a 10 Gbps. Y finalmente, en el año 2009 se establece el estándar IEEE 802.15.7²⁷ para las comunicaciones en luz visible, en inglés *Visible Light Communication* (VLC).

Existen variedad de fuentes de luz y foto-detectores que podrían ser usados para los sistemas FSO. Las fuentes de luz más utilizadas son diodo emisor de luz, en inglés *Light Emitting Diode* (LED) y diodo láser, en inglés *Laser Diode* (LD). Los LED se utilizan principalmente para aplicaciones de interior, mientras que los láseres debido a su perfil de haz altamente direccional, se emplean principalmente para aplicaciones al aire libre [21].

4.4.1. Láser en Espacio Libre

Los estudios en el campo del láser en espacio libre, en inglés *Free Space Laser* (FSL) durante los últimos 40 años han estado centrados en aplicaciones militares y espaciales. Uno de los primeros experimentos que se hicieron en el campo de las comunicaciones por láser consistió en transmitir mensajes en código Morse simplemente obstruyendo el rayo con la mano.

Las principales ventajas de las comunicaciones FSL es que se logran enlaces de alta capacidad (del orden de Gbps)²⁸, que pueden operar sin necesidad de pagar una licencia por el uso del espectro y no son afectados por otras ondas electromagnéticas (libres de interferencia).

Mientras que las comunicaciones por fibra óptica han ganado la aceptación mundial en la industria de las telecomunicaciones, no es así para las comunicaciones FSL que aún se consideran relativamente nuevas. La tecnología FSL permite obtener capacidades (ancho de banda de transmisión) que son similares a la fibra óptica, usando transmisores y receptores ópticos similares [21], [22].

FSL tiene múltiples aplicaciones en las redes de telecomunicaciones terrestres actuales, en el ámbito empresarial se pueden implementar para dar conectividad edificio a edificio (por ejemplo una empresa con varias sucursales físicamente próximas a ser conectadas para el intercambio de datos). A nivel de los operadores de telefonía móvil este tipo de enlace puede ser desplegado en el *backhaul*²⁹ permitiendo liberar el espectro

²⁷<http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>

²⁸La frecuencia de la señal portadora puede ir de 3 THz a 400 THz.

²⁹Concretamente entre estaciones base y centros de conmutación en 3G y 4G.

de microondas para ser utilizado en otras aplicaciones (como por ejemplo radio enlaces de larga distancia).

Entre las desventajas se encuentra que los enlaces FSL necesitan para funcionar línea de vista total (se deben alinear en línea vista perfectamente transmisor y receptor, sin obstáculos), por lo que son altamente afectados por las condiciones atmosféricas como ser niebla, neblina o lluvia que pueden provocar la pérdida total de la comunicación, adicionalmente cualquier movimiento específico en la zona de los láser también afecta el enlace (aves o el movimiento de los edificios donde se instale) provocando pequeños cortes en la comunicación. A fin de mejorar este aspecto, hay sistemas FSL que tienen incorporados sistemas de *tracking* para mantener el alineamiento y compensar así el movimiento que tienen los edificios a lo largo del día.

4.4.2. Li-Fi

Li-Fi³⁰ es un sistema de comunicación inalámbrica que utiliza la parte visible de espectro electromagnético como medio de transmisión de datos. Es un tecnología muy nueva, en el año 2011 Harald Haas³¹ profesor en la Universidad de Edimburgo dió una demostración de lo que él llamo Li-fi, en una charla de organización Tecnología, Entretenimiento, Diseño, en inglés *Technology, Entertainment, Design* (TED) en Edimburgo³². En la charla Haas habló sobre los beneficios de usar tecnologías que usen el espectro visible de luz, demostrando su uso, en un experimento en el cual con una linterna LED, logro transmitir datos a 10 Mbps a un computador.

Li-Fi podría usarse en aviones y en lugares en los que Wi-Fi no es suficiente o genera interferencia con otro tipo de señales (por ejemplo, estaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica), tiene costos más bajos y llega a velocidades más altas que los dispositivos actuales de Wi-Fi. Entre sus desventajas se encuentran es afectado por la luz del sol directa, tiene un corto alcance y al ser tan reciente surgen problemas de compatibilidad y uso, ya que ningún dispositivo actual cuenta con receptor de Li-Fi integrado [67].

Si bien no se trata de una tecnología madura y aun es muy reciente como para que sea comercializada a gran escala, el simple hecho de que exista puede solucionar, por ejemplo problemas de cobertura celular o acceso a Internet en lugares como sótanos o aviones³³.

4.5. Compartición de Espectro

Potencialmente, todas las bandas de frecuencia pueden compartirse y muchas permanecen infrautilizadas, es decir, es técnicamente posible compartir bandas utilizando combinaciones de métodos administrativos (como la asignación, limitaciones de tiempo, geografía y gestión de la interferencia) y soluciones técnicas (filtros, antenas y transmisores inteligentes, como las radios definidas por software (SDR) y los sistemas radioeléctricos cognitivos). No obstante, es posible que algunas administraciones to-

³⁰<http://www.lifi.eng.ed.ac.uk/>

³¹<http://www.lifi.eng.ed.ac.uk/about>

³²TED es una organización sin fines de lucro con el lema de “difundir ideas dignas de ser difundidas”. Sitio web: <https://www.ted.com/>.

³³La empresa francesa *Oledcomm* tiene entre sus productos una amplia gama de soluciones que utilizan esta tecnología (<http://www.oledcomm.com/portfolio>).

men decisiones políticas destinadas a mantener bandas de frecuencia exclusivas para servicios de socorro y seguridad.

“Actualmente en los países desarrollados todo el espectro disponible está adjudicado, sin embargo varios estudios independientes han demostrado que la cantidad total de espectro asignado que esta realmente en uso en cualquier momento y en cualquier lugar es apenas una pequeña fracción del total” [23]. Esto se debe a la forma en que el espectro fue adjudicado originalmente y al hecho de que el espectro se utiliza a menudo de forma intermitente.

La FCC ha adoptado las normas para permitir el uso sin licencia del ERE en ciertas bandas de frecuencia cuando este no es utilizado por un servicio licenciado³⁴. En el Reino Unido la Oficina de Comunicaciones, en inglés *Office of Communications* (OfCom) luego de estudios y el desarrollo de varios planes piloto, reguló el uso no licenciado para las bandas de radiodifusión de TV en el año 2015³⁵.

4.5.1. Radios Cognitivas

El concepto de CR se basa en un concepto de radio oportunista, la pregunta fundamental es: ¿existe espacio en las bandas de espectro asignadas con licencia (o uso primario) para acomodar otros servicios (uso secundario) sin afectar las comunicaciones de los usuarios primarios?. Aquí aparece un concepto adicional pero que no es nuevo en la regulación de espectro, el uso secundario del espectro. Es decir, hay un usuario primario que es quien obtiene el derecho de uso del espectro o licencia y un posible usuario secundario (posiblemente no licenciado) que comparte el espectro con otros usuarios secundarios o inclusive con los usuarios primarios.

La idea general es aprovechar los momentos ociosos del espectro que dejan libres los usuarios primarios, para transmitir información sin generarle interferencia. Dependiendo del conocimiento del entorno que se necesite para que los usuarios secundarios puedan coexistir con el usuario primario, existen tres enfoques de CR: *Underlay*, *Overlay* y *Interweave*³⁶.

Existen dos esquemas básicos para compartir espectro entre usuarios primarios y secundarios: “cooperativo” y “no cooperativo”. En el esquema cooperativo el usuario secundario podrá utilizar el espectro sólo si el usuario primario lo autoriza. Este esquema puede involucrar algún esquema de pago por este uso del espectro. En el esquema no cooperativo el usuario secundario no requiere autorización del usuario primario. En este caso, son los organismos reguladores los que establecen las condiciones para este uso³⁷.

Para llegar a aplicar esta tecnología novedosa, se comienzan a realizar los primeros estudios espectrales consistentes en la recopilación de datos mediante campañas de mediciones con el objetivo de cuantificar e identificar huecos espectrales, también conocidos como “espacios en blanco” (o en inglés *White Spaces*)³⁸ y así disponer de bases de datos fiables con las cuales poder desarrollar este concepto.

³⁴<https://www.fcc.gov/general/white-space-database-administration>

³⁵En EE.UU. las bandas permitidas para uso no licenciado son las bandas de TV: 54-72 MHz, 76-88 MHz, 174-216 MHz y 470-698 MHz. En el caso del Reino Unido, las bandas permitidas, también bandas de TV son: 470-790 MHz.

³⁶Extraído de *Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective*. Proc. IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 894-914, May 2009.

³⁷Como lo es el caso de la UWB.

³⁸Se desarrolla el concepto de espacios en blanco en la Sección 5.3.1.

Esto busca mitigar los problemas de escasez e ineficiencia en el uso del espectro radioeléctrico ocasionados por los actuales procedimientos de administración y asignación de este recurso. Por supuesto que la implementación del acceso dinámico al espectro requiere nuevas tecnologías y nueva legislación³⁹.

4.6. Situación en Uruguay

Como se vio en la Sección 3.4 el aumento sustancial de los servicios de banda ancha de acceso a Internet ha llevado a que los proveedores de servicios de telecomunicaciones planifiquen nuevas formas de abastecer la demanda actual. Es así como en materia de redes móviles heterogéneas Uruguay acompaña las tendencias mundiales. Como ejemplo, desde el año 2014, ANTEL ha utilizado las pequeñas celdas para expandir la capacidad de su red móvil (*3G* y *LTE*) en zonas con elevado tráfico de datos y en lugares de difícil acceso tales como hogares, empresas, estadios y centros comerciales. Entre los productos adquiridos por ANTEL se encuentran: celdas empresariales, celdas residenciales, metro-celdas, entre otros.

Como se ha mencionado, el incremento en la demanda de tráfico debido al desarrollo de numerosas aplicaciones para los servicios móviles lleva a que los proveedores de estos servicios deban incrementar la capacidad de su red de *backhaul* manteniendo los costos asociados acotados de forma tal de mantener la rentabilidad de su negocio. Al mismo tiempo que deben procurar brindar a sus clientes un servicio de calidad sostenida. Para ello es importante que los proveedores diseñen su red de *backhaul* de forma tal que se reduzcan (o no existan) los cuellos de botella en su red.

En la actualidad la mayor parte de la red de *backhaul* de los proveedores de servicio en Uruguay esta implementada en cobre, fibra y enlaces de microondas. El cobre es el material usado tradicionalmente, paulatinamente esta siendo reemplazando por la fibra óptica. La principal desventaja del cobre, además de su alto costo de despliegue es que el ancho de banda disponible esta acotado por la distancia del tendido. Es por esta razón que contar con enlaces de fibra óptica se vuelve una solución al problema del ancho de banda acotado, aunque también se tiene alto costo de despliegue (obras civiles, técnicos especializados, etc.). En cuanto a los enlaces de microondas, éstos se han vuelto una alternativa cuando no se cuenta con otra infraestructura implementada. La desventaja de los enlaces en la banda de microondas⁴⁰ es que son licenciados por lo que los operadores deben pagar un costo mensual por su uso⁴¹.

En vista de lo anterior y teniendo en cuenta que los proveedores de servicio deberían optar por una estrategia que les permita incrementar la capacidad de su red de *backhaul* y al mismo tiempo reducir los costos, surge el interés en las tecnologías FSL y MMW, ambas permiten un rápido despliegue debido a que no se necesitan obras civiles importantes. En el año 2011 en el marco de un proyecto de grado de la FING de la UDELAR se estudiaron ambas tecnologías y su aplicación en Montevideo, concluyéndose de los estudios que tanto FSL como MMW son soluciones inalámbricas de gran ancho de banda que pueden ser implementadas en Montevideo. En particular se obtuvo que la más adecuada es MMW pero la banda de las ondas milimétricas aún no cuenta con regulación en Uruguay. Mientras que los FSL no necesitan regulación por

³⁹CR se desarrolla en profundidad en el Capítulo 5.

⁴⁰Formalmente de 3 GHz a 30 GHz.

⁴¹Algunas de las tasas e impuestos se pueden encontrar en <https://www.ursec.gub.uy/inicio/tramites-y-servicios/tasas-y-precios/>.

lo que se transforman en una buena alternativa para que los proveedores puedan lograr sus objetivos [24].

En cuanto a los sistemas de radio cognitiva en el Capítulo 5 se mencionan los desarrollos y aplicaciones en Uruguay.

4.7. Conclusiones

Las pequeñas celdas potencian los niveles de señal celular en áreas donde la cobertura actual es insuficiente debido a las pérdidas por las edificaciones, la geografía, la distancia de la torre celular o donde grandes concentraciones de usuarios sobrecargan la red. El uso de las pequeñas celdas facilita el proceso de responder a las necesidades de los clientes residenciales o corporativos. La asignación de suficiente espectro por parte de los países para los servicios de telecomunicaciones móviles es clave para el desarrollo de la industria, la conectividad de la población y el cierre de la llamada *brecha digital*.

A nivel mundial no hay escasez de soluciones innovadoras para dar servicio a las áreas que aún no cuentan con cobertura celular. Pero estas nuevas soluciones tendrán que aprovechar la infraestructura existente para poder ser competitivas a nivel del mercado. Además las nuevas tecnologías tendrán que ser complementadas con un uso más eficiente del ERE.

En los últimos años ha crecido el interés por los enlaces de ondas milimétricas y láser en espacio libre. Ambas son utilizadas generalmente en el *backhaul* de las redes, su instalación permite liberar espectro que era utilizado por los enlaces de microondas existentes. Estos tipos de enlace tienen entre sus desventajas que son afectados por fenómenos atmosféricos que pueden hacer que el enlace no funcione correctamente. Cabe aclarar que en Uruguay las MMW no están reguladas, pero esto no significa que no se pueda realizar un enlace a estas frecuencias, sino que se debe solicitar a la URSEC el permiso necesario especificando sus características.

La tecnología CR se ha comenzado a desarrollar recientemente como una prometedora solución al problema de escasez de espectro; a diferencia del sistema actual, esta tecnología utiliza técnicas de acceso dinámico al espectro, cuya idea básica consiste en la re-utilización de las frecuencias en desuso con la condición de no interferir a los usuarios licenciados.

Para poder implementar los avances tecnológicos en materia de espectro radioeléctrico es claro que los países deben realizar una buena gestión del recurso a escala nacional, regional y mundial. La buena gestión debe, entre otros objetivos, procurar que todos los servicios de radiocomunicaciones puedan coexistir sin causar interferencias perjudiciales. La gestión del espectro radioeléctrico debe tener en cuenta las necesidades actuales y futuras de todos los usuarios y servicios, así como la constante evolución tecnológica.

Capítulo 5

Radio Cognitiva

El continuo desarrollo de las aplicaciones de comunicación inalámbricas, reflejado tanto en el crecimiento del número de usuarios como en la variedad de dispositivos inalámbricos destinados aplicaciones cotidianas, representa una demanda cada vez mayor de ERE. Un ejemplo de esto es el concepto del IoT, que implica que muchos de los dispositivos utilizados en hogares, oficinas o incluso en la vía pública se conecten a Internet y entre sí, posibilitando una amplia variedad de aplicaciones de telecomunicaciones¹. En este sentido las tecnologías inalámbricas permiten establecer conexiones sin la necesidad de desplegar infraestructura de medio físico (como el par de cobre o la fibra óptica) a costa de un aumento en el uso del recurso ERE.

Estudios realizados por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) muestran que el uso de las bandas de frecuencia no es uniforme y varía según la hora del día y la ubicación geográfica. En horas pico algunas bandas se sobrecargan de usuarios, mientras otras quedan sin utilizar. La eficiencia con la que se administra el acceso a este recurso limitado cobra gran importancia de cara al futuro y la idea de desarrollar herramientas para un mejor uso del espectro surge naturalmente [25]. Los avances tecnológicos están permitiendo el desarrollo de sistemas de comunicación con el potencial de usar los recursos de radio de una forma más dinámica y eficiente que los antiguos sistemas de radiocomunicaciones. En este contexto, las técnicas de CR ofrecen una eficiencia mejorada y flexibilidad adicional respecto al uso del espectro [26].

En el desarrollo de este capítulo se presentarán los conceptos básicos en torno a CR, sus beneficios y desafíos, se presentará información acerca de estándares existentes para sistemas de CR, así como también ejemplos de implementación de dichos sistemas. Para finalizar, se analizará un equipo de CR que se encuentra disponible comercialmente.

5.1. Principio de Acceso Dinámico al ERE

El DSA es el concepto detrás de los radios cognitivos. Este concepto surge a partir de la observación de cómo es que se utiliza usualmente el ERE en las dimensiones del tiempo, la frecuencia y el espacio. En muchas de las técnicas de acceso al ERE a un usuario licenciado (o usuario primario) se le asigna un canal o banda de frecuencia de manera exclusiva. Esto implica que ese espectro es utilizado sólo en aquellos instantes donde el usuario licenciado accede al él, quedando no utilizado (o disponible) el resto del tiempo. Este tipo de asignación rígida del ERE parece entonces no ser la más eficiente y redundante en un bajo aprovechamiento del recurso.

¹El concepto de IoT se desarrolla en el Apéndice I.

En la Fig. 5.1 se representan aquellos segmentos de tiempo-frecuencia donde el espectro es utilizado por usuarios primarios y también los espacios vacantes donde el espectro no se está utilizando. A estos segmentos de tiempo-frecuencia vacantes se les denomina espacios en blanco (WS).

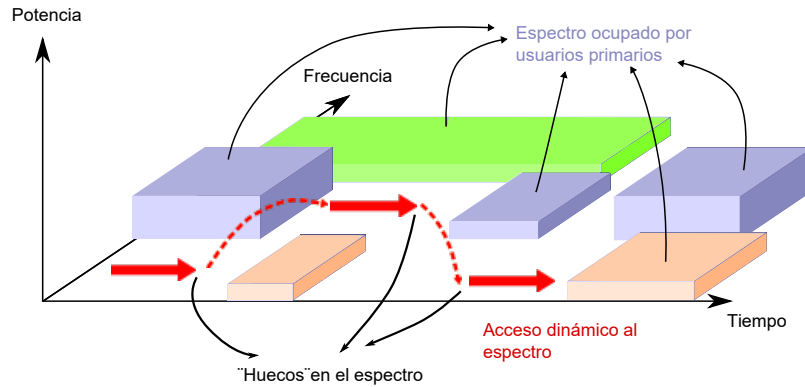


Figura 5.1: Representación del DSA en los espacios en blanco del ERE².

Para poder aprovechar los WS dejados por el usuario primario, un usuario secundario debe poder adecuar su frecuencia de operación con el paso del tiempo, por ejemplo, como describen las flechas rojas en la Fig. 5.1. Así, teóricamente, los usuarios primario y secundario pueden utilizar una misma banda de frecuencia sin provocarse interferencias entre sí. Las técnicas de acceso dinámico al ERE permiten aprovechar esos espacios y se implementan mediante el uso de sistemas de radio cognitiva, en inglés *Cognitive Radio Systems* (CRS). A lo largo de esta sección se definirá el concepto de CR, los principios de funcionamiento de los CRS y cómo estos habilitan el acceso dinámico al ERE.

TV White Spaces

Un caso particular de WS son los espacios en blanco de televisión, en inglés *TV White Spaces* (TVWS). El término TVWS refiere a los canales atribuidos para televisión que no son utilizados para dicho servicio en una zona geográfica dada. Este es un fenómeno frecuente, dado que las administraciones dejan canales de guarda entre dos emisoras autorizadas contiguas para protegerse de posibles interferencias entre ellas, o para coordinar el uso de los canales de TV en diferentes localidades (ver Fig. 5.2). En otras zonas, hay canales de TV vacantes porque no existen emisoras que los ocupen (por ejemplo, en las zonas rurales o desérticas).

²<http://www.brunel.ac.uk/cedps/electronic-computer-engineering/research-activities/wncs/student-profiles/abdullah-masrub>

5.2. Sistemas de Radio Cognitivos

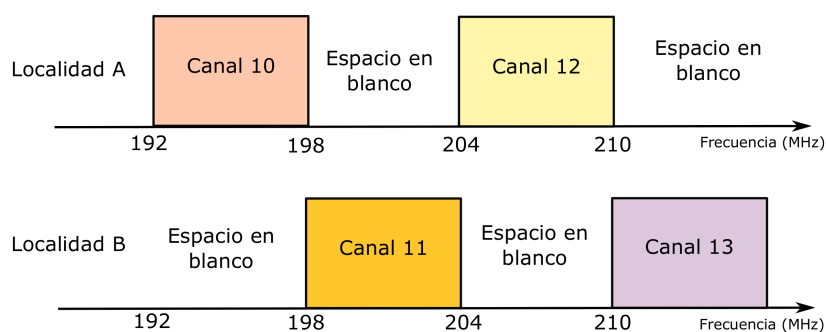


Figura 5.2: Espacios en blanco entre canales de TV³.

Las bandas atribuidas al servicio de TV en el rango de frecuencias comprendido entre 54 MHz y 862 MHz, son atractivas para sistemas que usen el espectro de forma oportunista por tres razones fundamentales. En primer lugar poseen características de propagación favorables que permiten lograr grandes áreas de cobertura si se compara, por ejemplo, con las redes móviles celulares de la actualidad. Por otra parte, el bajo dinamismo con que se accede al uso de este espectro por parte de los usuarios licenciados también favorece el uso oportunista del recurso. Las emisoras de TV no inician ni cesan su transmisión muy frecuentemente y en ese sentido son más predecibles que otros sistemas de radio de la actualidad. Finalmente, otra cualidad que se destaca es el alto grado de sub-utilización de estas bandas.

Otros servicios utilizan las bandas de TV de forma autorizada, además de la propia radiodifusión de TV. A continuación se listan los servicios que la FCC exige proteger cuando se hace un uso oportunista de la porción del espectro en cuestión:

- **Estaciones radiodifusión de TV:** incluyendo las de alta y baja potencia.
- **Enlaces auxiliares para radiodifusión:** esto es, radio enlaces utilizados como *backhaul* para transmisores de TV.
- **Estaciones repetidoras de TV:** incluyendo los sitios receptores de estaciones repetidoras.
- **TV para abonados:** tanto operadoras de TV para abonados por aire, como TV satelital.
- **Servicios de seguridad pública y dispositivos de radiocomunicación de corto alcance:** Por ejemplo, radiocomunicadores en vehículos o los populares *Walkie-Talkie*.
- **Servicios de radiotelefonía en alta mar:** sólo en el Golfo de México.
- **Servicios de radioastronomía**
- **Micrófonos inalámbricos:** licenciados y algunos sitios para espectáculos donde el uso es autorizado pero no licenciado.

5.2. Sistemas de Radio Cognitivos

El concepto de CR fue presentado oficialmente por Joseph Mitola III en un seminario en el *KTH Royal Institute of Technology*⁴, en 1998. Más tarde, es publicado en el

³Imagen elaborada en base a información publicada por la Asociación para el Progreso de las Comunicaciones (APC). Disponible: <http://www.apc.org/en/home>.

⁴<https://www.kth.se/en>

artículo “*Cognitive radio: making software radios more personal*” [27]. La UIT define un sistema de radio cognitivo como “un sistema radioeléctrico que utiliza una tecnología que permite al sistema extraer información de su entorno operativo y geográfico, las políticas establecidas y su situación interna; y adaptar de manera dinámica y autónoma sus parámetros y protocolos operacionales en función de la información obtenida a fin de cumplir unos objetivos predeterminados, así como extraer enseñanzas de los resultados obtenidos.” [28].

En otras palabras, los sistemas de radio cognitivos (CRS) son conformados por equipos de radiocomunicaciones capaces de sensor el espectro radioeléctrico y determinar en qué momento y en qué bandas éste se encuentra disponible, así como en qué momentos está siendo utilizado. Estos sistemas pueden tomar decisiones basados en políticas establecidas o programas pre-cargados que buscan optimizar los parámetros de funcionamiento con la finalidad de aprovechar de la mejor manera posible el espectro disponible, al tiempo que pueden aprender de los resultados obtenidos.

El CR se puede modelar como una serie de componentes funcionales que interactúan entre sí y de esa interacción surge el comportamiento operativo del equipo. En la Fig. 5.3 se muestra una representación de dicha interacción. El motor de razonamiento configura el SDR a través de la interfaz de programación de aplicaciones, en inglés *Application Programming Interface* (API). Obtiene información del sensado del entorno y de una base de conocimiento que incluye las políticas de Radiofrecuencia (RF) para tomar decisiones sobre los parámetros de operación del SDR. El motor de aprendizaje monitorea estas decisiones y sus resultados, actualizando en función de éstos la base de datos de conocimiento.

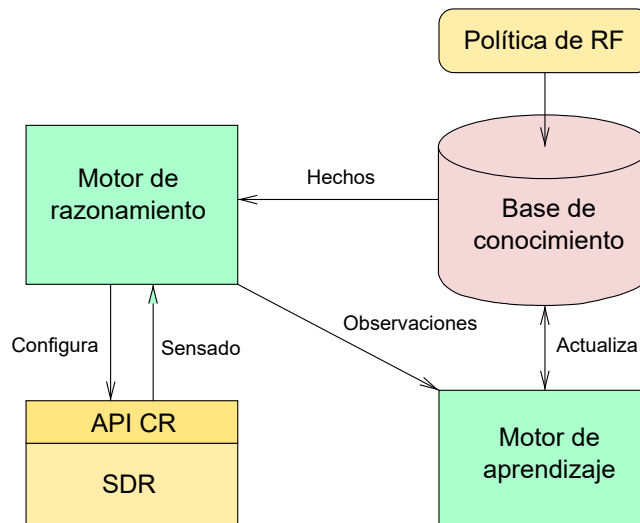


Figura 5.3: Diagrama funcional de un CR, representando sus capacidades de razonamiento y aprendizaje [68].

Esta nueva clase de radios presenta nuevas posibilidades así como también retos para las políticas sobre tecnología. La flexibilidad provista por los CR permite un mayor dinamismo dentro de las operaciones de radiofrecuencia y presenta retos para su certificación y las complicaciones asociadas al potencial mal uso de la tecnología [69].

5.2.1. Características de los CRS

Las CR presentan tres características fundamentales [26]:

- Capacidad de obtener conocimiento.
- Capacidad de modificar sus parámetros de funcionamiento.
- Capacidad de aprender de los resultados obtenidos para continuar mejorando su rendimiento.

Obtención de Conocimiento

Una de las características más interesantes de los CR es la capacidad de obtener conocimiento. El conocimiento necesario se debe extraer de diferentes fuentes, algunas externas al CR (entorno radioeléctrico y geográfico, ciertas políticas establecidas para el uso del ERE, patrones de uso y preferencias de los usuarios) y otras internas (el estado operativo del propio CR).

El entorno radioeléctrico (o entorno de RF) de un CR se caracteriza por el estado de uso del ERE, la existencia de otros sistemas de radio, su frecuencia y ancho de banda asignados, su área de cobertura y el nivel de interferencia. Para conseguir esta información el CR debe ser capaz de sensar el ERE.

El entorno geográfico de un CR se caracteriza por las posiciones del CRS y de los nodos de otros sistemas de radio, la orientación de las antenas de los diferentes sistemas y la distribución de los usuarios en el área de cobertura.

Estos equipos de radio deberán respetar una serie de políticas predefinidas que establecen condiciones sobre las frecuencias que el CR podrá utilizar y en qué circunstancias, la potencia máxima a emplear, entre otros parámetros operativos, con el fin de evitar interferencias perjudiciales en las bandas en las que funciona y en las bandas adyacentes.

El estado interno de un CR consta de su configuración (bandas de frecuencia y protocolos que utiliza), distribución de la carga de tráfico, potencia de transmisión, entre otros parámetros de operación.

Finalmente, el conocimiento de los usuarios implica que el sistema sepa si necesitan acceso de alta velocidad, o bajas latencias, o mejores relaciones costo/rendimiento, de tal manera de que el CR pueda adecuarse dichas necesidades de mejor manera.

Ajuste de los Parámetros de Funcionamiento

Otra característica de los CR es la de modificar sus parámetros de funcionamiento de forma automática, persiguiendo objetivos predefinidos. Es decir, no requieren de la intervención del usuario para realizar dichos ajustes, sino que realizan esta tarea de forma autónoma y dinámica, modificando sus parámetros de operación y protocolos utilizados basándose en el conocimiento obtenido y las experiencias pasadas. El proceso de decisión de un CR implica entender las preferencias de múltiples usuarios en conjunto con el entorno de radio en el que se encuentra operando y respetar la política definida para así elegir la configuración más adecuada de potencia, frecuencia, modulación y tecnología de acceso.

La toma de decisiones puede realizarse de forma centralizada o distribuida. La arquitectura centralizada es simple y fácil de controlar desde el punto de vista del operador de la red. Recolectando información de los nodos en un nodo central (radio base, o punto de acceso), es posible evitar la sub-utilización de los recursos de radio y usarlos de la manera más efectiva posible. Sin embargo, cuando las redes incluyen un conjunto de nodos centrales y un gran número de terminales es difícil coordinar las decisiones de forma centralizada. En esos casos los CRS requerirán múltiples equipos

de toma de decisión, en una arquitectura distribuida, de forma de proveer una solución escalable y eficiente.

En lo que refiere a los métodos de ajuste de los parámetros de funcionamiento existen dos tendencias a la hora de implementar un CR. Una de ellas es proveer al CR de los módulos de hardware necesarios para implementar las diferentes modulaciones, frecuencias de funcionamiento y tecnologías de acceso entre las cuales pueda elegir en función de las necesidades que le imponga el entorno. La otra es el uso de la SDR, en las que se programan las diferentes funciones en software capaz de procesar las señales como lo haría un módulo dedicado (ver Sección 5.2.2).

Aprendizaje de los Resultados Obtenidos

El objetivo del proceso de aprendizaje es permitir mejorar el rendimiento del CRS utilizando información guardada de las acciones tomadas en el pasado y sus resultados. Para realizar esta tarea se utilizan modelos y algoritmos que evalúan cada acción tomada por el CR, de esta forma se aumenta la calidad de las decisiones tomadas por el sistema y con ello del rendimiento del CRS.

5.2.2. Radios Definidos por Software

El desarrollo de amplificadores de potencia de banda ancha, sintetizadores y conversores analógico-digitales hace posible los llamados sistemas radioeléctricos determinados por programas informáticos (SDR). Según la UIT un SDR consiste en “un transmisor y/o receptor radioeléctrico que utiliza una tecnología que permite fijar o modificar mediante programas informáticos los parámetros de funcionamiento de RF, incluidos, entre otros, la gama de frecuencias, el tipo de modulación o la potencia de salida, salvo los cambios de los parámetros de funcionamiento que se producen durante el funcionamiento normal preinstalado y predeterminado de un sistema radioeléctrico con arreglo a una especificación del sistema o a una norma.” [28].

Utilizando los SDR, se facilita en buena medida el diseño y la implementación de los sistemas de radio cognitivo. En la Fig. 5.4 se representa una comparación entre un equipo de radio tradicional, un equipo SDR y un CR basado en SDR, en términos de sus bloques funcionales.

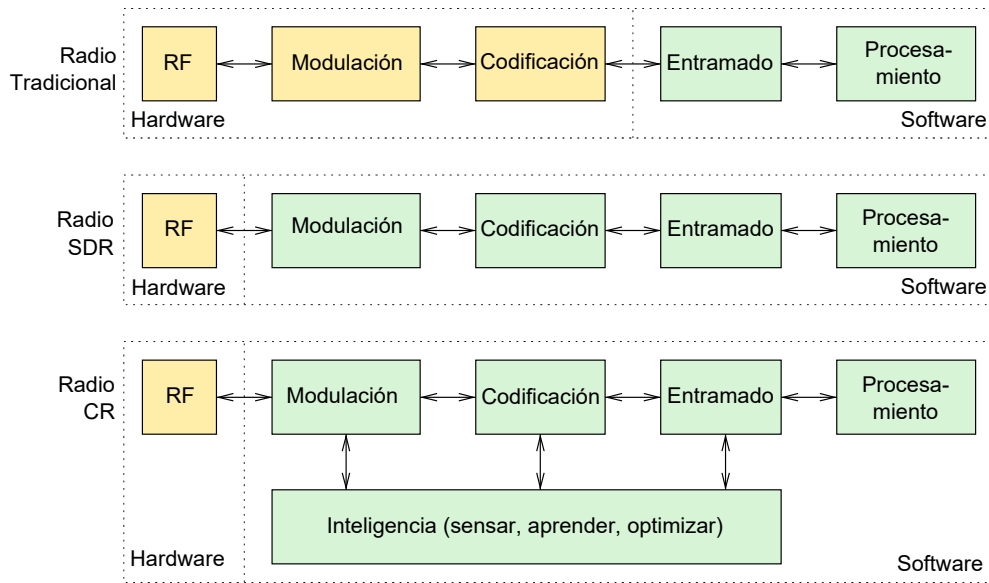


Figura 5.4: Comparación funcional de los distintos tipos de equipos de RF [68].

5.2.3. Beneficios

En un escenario en que la demanda de ERE aumenta rápidamente, las tecnologías de CR buscan un uso más racional del espectro, que trae consigo los siguientes beneficios [26]:

- **Mejoras en la eficiencia del uso del ERE:** la mejora puede lograrse tanto al aumentar el rendimiento de una tecnología de acceso de radio, en inglés *Radio Access Technology* (RAT) como permitiendo la coexistencia de diferentes RAT.
- **Flexibilidad adicional:** aporta flexibilidad extra no sólo en cuanto a la gestión del espectro, sino flexibilidad a nivel operacional en los equipos desplegados a lo largo de su vida útil.
- **Autocorrección y tolerancia a las fallas:** gracias a la capacidad de aprender del resultado de las decisiones tomadas, los CRS mejoran la capacidad de recuperarse de fallas eligiendo para ello las estrategias que mayor probabilidad de éxito tengan.
- **Ayudas a la recuperación de desastres naturales y protección pública:** en áreas golpeadas por desastres naturales, donde los sistemas de comunicación pueden estar caídos o funcionando parcialmente, los CRS pueden facilitar el reestablecimiento de las comunicaciones de los equipos de rescate y los demás actores a cargo de la respuesta a la emergencia.
- **Eficiencia en el uso de la energía de los terminales:** es posible utilizar la información tanto del estado interno del equipo (por ejemplo, la carga de la batería) como de entorno (por ejemplo, la ubicación) para modificar los parámetros operacionales (por ejemplo, ancho de banda y algoritmos de procesamiento) de modo de prologar la duración de las baterías.
- **Potencial para nuevas aplicaciones de comunicaciones móviles:** se presentan nuevas posibilidades de desarrollo de aplicaciones que utilicen e intercambien la información obtenida por los CR.

5.2.4. Desafíos

En la actualidad existen en Uruguay sistemas que tienen características compartidas con los CRS, como la detección de nodos vecinos, o el ajuste automático de la potencia de transmisión, por citar algunos⁵. Según la UIT el desarrollo de los CRS se deberá dar paso a paso, debido a la variedad de desafíos que esta modalidad de uso compartido del espectro trae consigo. Estos no son solamente desafíos a nivel técnico, sino en términos de la gestión y regulación del ERE [26].

Entre los desafíos a nivel técnico se encuentran:

- La confiabilidad de los métodos de sensado del espectro.
- Resolver problema del “nodo escondido”. Este problema se presenta cuando por efectos del entorno (como por ejemplo el efecto de sombra, en inglés *shadowing*⁶), un nodo existente en la zona no es detectado por el CR cuando sensa el ERE. También puede ocurrir que exista un nodo que solamente es receptor, por lo que el CR detectaría la banda utilizada por este dispositivo como disponible durante el sensado de ERE.
- Robustez de los canales de control en caso de ser necesarios de implementar.
- Resolver el problema que se genera cuando dos nodos de un CRS intentan acceder al mismo recurso de forma oportunista, es decir las colisiones en el acceso al medio.
- La forma de acceso a bases de datos y la robustez de éstas.
- Entorno de radio cambiante, entorno geográfico cambiante y uso del espectro cambiante podrían generar un *overhead*⁷ de señalización significativo.
- La coexistencia de diferentes nodos de CR y otros nodos de RF puede requerir soluciones específicas para cada escenario.
- Desafíos relacionados con la reconfiguración de los parámetros de operación y los protocolos de comunicación, en particular la frecuencia de operación variable.

En cuanto a los desafíos en la gestión del recurso ERE, una cuestión importante a resolver es la elaboración de una regulación por parte de los administradores que habilite y establezca reglas claras a cumplir por los dispositivos que pretendan hacer uso de una porción de ERE en modalidad oportunista o compartida. En este tema, se identifican a la vanguardia la administración de Estados Unidos, la Comisión Federal de Comunicaciones, en inglés *federal communications commission* (FCC) y más recientemente la oficina de comunicaciones, en inglés *Office of Communications* (Ofcom) del Reino Unido. Ambas han autorizado el uso de las bandas de televisión digital en UHF para el uso compartido con CRS en carácter oportunista.

Además de la elaboración de la regulación, se suma el desafío de la comprobación técnica de sistemas CR donde el uso dinámico del espectro hace más compleja dicha

⁵Por ejemplo, este es el caso de las femto celdas de comunicaciones celulares de tercera y cuarta generación.

⁶Este efecto es causado por obstáculos entre el transmisor y el receptor, éstos absorben energía y provocan que la señal transmitida sea recibida con diferente nivel de potencia en cada momento. Cuando el obstáculo absorbe toda la energía de la señal entonces se produce el efecto sombra.

⁷Bits de datos que se añaden a los datos transmitidos por un usuario, para llevar información de enrutamiento y corrección de errores entre otras instrucciones, para que el paquete llegue a su destino correctamente.

tarea. La verificación de que efectivamente los equipos de radio se ajusten a la regulación y los permisos vigentes en cuanto a potencia transmitida, área geográfica en la que operan, bandas o canales utilizados, cobra otra dimensión y se debe controlar para asegurar que los usuarios primarios no se vean afectados por interferencias derivadas del uso incorrecto o indebido de estas nuevas tecnologías.

5.3. Normalización

En esta sección se presentan tres estándares que implementan funciones de Radio Cognitiva y sus principales características. Se eligieron para estudiar los estándares del IEEE:

- **IEEE 802.22:** para redes regionales inalámbricas (WRAN)
- **IEEE 802.11af:** para redes de área local inalámbricas (WLAN)
- **IEEE 802.16h:** para redes metropolitanas inalámbricas (WMAN)

El primero nace como un estándar de CR desde su creación, siendo reconocido como el primer estándar de CR, por lo que se hará énfasis en su estudio. El segundo y tercero se basan en estándares existentes, agregando funciones que los convierten en estándares para CRS. En el caso del IEEE 802.11af se trata de extender el uso de las WLAN IEEE 802.11 a las bandas de frecuencia comúnmente atribuidas al servicio de televisión. En el caso del estándar IEEE 802.16, en su enmienda IEEE 802.16h, se agrega la posibilidad de operar en bandas de frecuencia exentas de licenciamiento.

Cabe aclarar, que muchos de los datos presentados en cuanto a los estándares se encuentran referidos a la reglamentación y usos posibles en países donde se encuentra habilitado el uso oportunista de bandas de frecuencia en carácter secundario, en particular, a Estados Unidos.

5.3.1. Estándar IEEE 802.22 WRAN

El grupo de trabajo IEEE 802.22 se forma en octubre de 2004, luego del aviso de reglamentación propuesta, en inglés *Notice of Proposed Rulemaking* (NPRM), sobre la operación no licenciada en bandas atribuidas a radiodifusión de televisión⁸ publicado por la FCC en mayo de 2004. Esta reglamentación proponía el uso de dispositivos no licenciados en los llamados TVWS, bajo la condición de no introducir interferencias en los servicios licenciados o autorizados en dichas bandas.

El estándar IEEE 802.22 tiene por objeto permitir el despliegue de redes de área regional para promover la competencia en servicios de banda ancha inalámbrica, proveyendo alternativas a la banda ancha cableada y extendiendo el alcance de dichos sistemas inalámbricos en áreas geográficas diversas, incluyendo áreas rurales escasamente pobladas [29].

Motivación

Si bien la disponibilidad de acceso de banda ancha en las ciudades suele ser suficiente, gracias a las tecnologías de acceso *Digital Subscriber Line* (xDSL) o *Gigabit-capable*

⁸Canales de VHF y UHF entre 54 MHz y 862 MHz.

Passive Optical Network (GPON), en las zonas rurales y remotas la realidad es diferente. En estas zonas escasamente pobladas la inversión en infraestructura necesaria para desplegar este tipo de acceso de banda ancha suele no ser rentable, por lo que las soluciones inalámbricas se ajustan mejor a este tipo de zonas. En países como Estados Unidos donde gran parte de la población reside en áreas rurales, las tecnologías inalámbricas de banda ancha que permiten grandes alcances habilitan a esa parte de la población a acceder al servicio.

En la Fig. 5.5 se muestran la cantidad de canales de TV utilizados en el territorio de Estados Unidos. Allí queda en evidencia que, sobre todo en las áreas donde no existen grandes ciudades, hay decenas de canales vacantes que podrían ser utilizados por otras tecnologías.

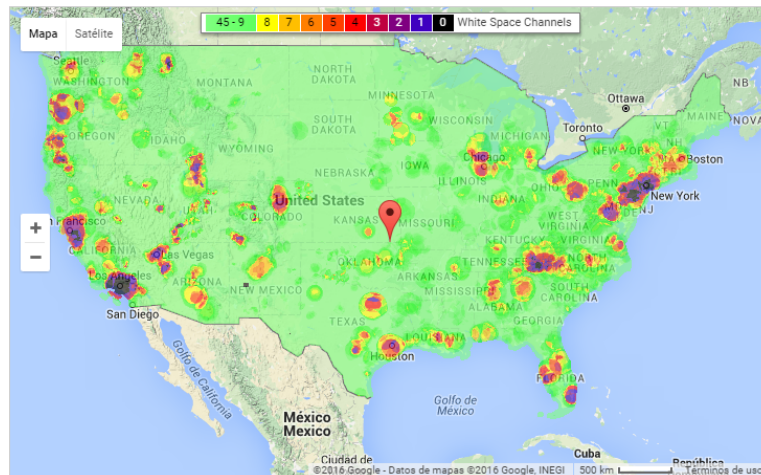


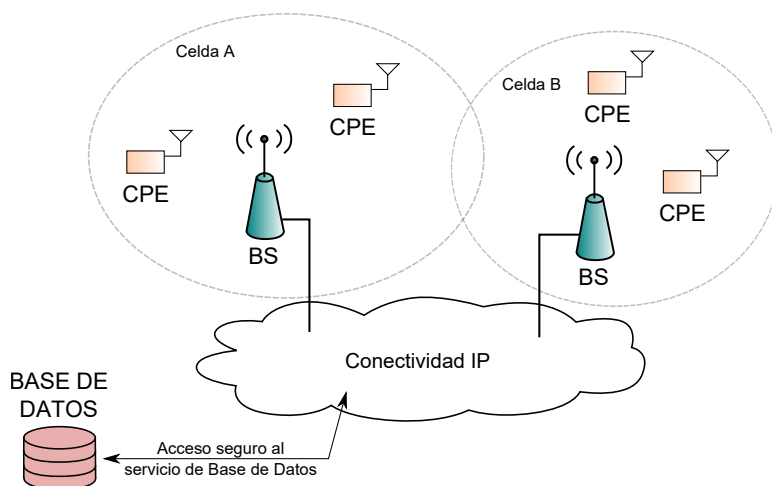
Figura 5.5: Uso de canales de TV en Estados Unidos⁹.

Topología

El estándar IEEE 802.22 define una interfaz de aire del tipo punto-multipunto donde una radiobase (BS) gestiona varios equipos de usuario (CPE) dentro de su área de cobertura. Cada BS, podrá servir hasta 512 CPE, fijos o portables y cuenta con la posibilidad de aplicar mecanismos de calidad de servicio (QoS).

Además de estos dos equipos se requiere de una base de datos que mantiene un mapa de utilización del ERE y provee la información necesaria para autorizar o no la operación de sistema bajo ciertas especificaciones. La Fig. 5.6 muestra de forma gráfica lo antedicho.

⁹Fuente: Google Spectrum Database (<http://www.google.com/get/spectrumdatabase/channel/>).

Figura 5.6: Topología de red IEEE 802.22¹⁰.

La radiobase (BS) tiene el control sobre los parámetros de operación de todos sus terminales (CPE) asociados. Es entonces natural que la interacción del sistema con la base de datos de ERE se realice entre la base de datos y la BS, tal como muestra la Fig. 5.7.

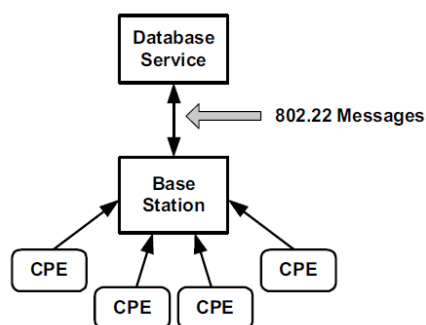


Figura 5.7: Relación con una base de datos externa en IEEE 802.22 [29].

La BS debe inicialmente registrarse a sí misma en la base de datos como un servicio fijo y luego registrar a todos sus CPE asociados. Debe registrar el tipo de dispositivo y su ubicación geográfica entre otros parámetros y lo debe hacer al momento de la asociación de cada nuevo CPE en tiempo real, ya que la asociación está sujeta a aprobación de la base de datos. Al menos una vez al día la BS debe consultar a la base de datos por información sobre el canal y la base de datos puede enviar actualizaciones sobre la información del canal en cualquier momento. De esta forma, se logra mejorar los tiempos de reacción frente a cambios en el entorno de radio o geográfico manteniendo un bajo tráfico entre BS y base de datos.

La seguridad en los mensajes entre la base de datos y los demás nodos es un punto crítico para el correcto funcionamiento del sistema, por lo que dicha mensajería se transmite mediante *Secure Sockets Layer* (SSL). Además, la autenticación de todos los dispositivos se realiza de forma segura con protocolos *Extensible Authentication Protocol - Transport Layer Security* (EAP-TLS) o *Extensible Authentication Protocol - Tunnelled Transport Layer Security* (EAP-TTLS) y el formato de los mensajes de

¹⁰Figura de elaboración propia, basada en la extraída del estándar IEEE 802.22 [29].

autenticación debe adecuarse al servicio que preste la base de datos, por ejemplo RADIUS o DIAMETER.

Capas PHY y MAC

El requerimiento más importante para la interfaz de aire del estándar es la flexibilidad y la facilidad de adaptarse, dado que se debe operar en bandas donde el usuario primario debe ser protegido contra interferencia a toda costa. Dado que el IEEE 802.22 opera de forma no licenciada y cada radiobase sirve un área extensa, la coexistencia con otras celdas IEEE 802.22 también es un tema importante a manejar.

Una cualidad que distingue al IEEE 802.22 frente a otros estándares, es el alcance de las BS. Se estima que puede alcanzar un radio de 33 km con equipos de capaces de transmitir a 4 Watts de Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE), sin embargo si la potencia y altura de la antenas son suficientes, se pueden lograr radios de cobertura de hasta 100 km mediante el uso de algoritmos especiales de agendado de tramas previstos en la especificación de la capa MAC (ver Fig. 5.8).

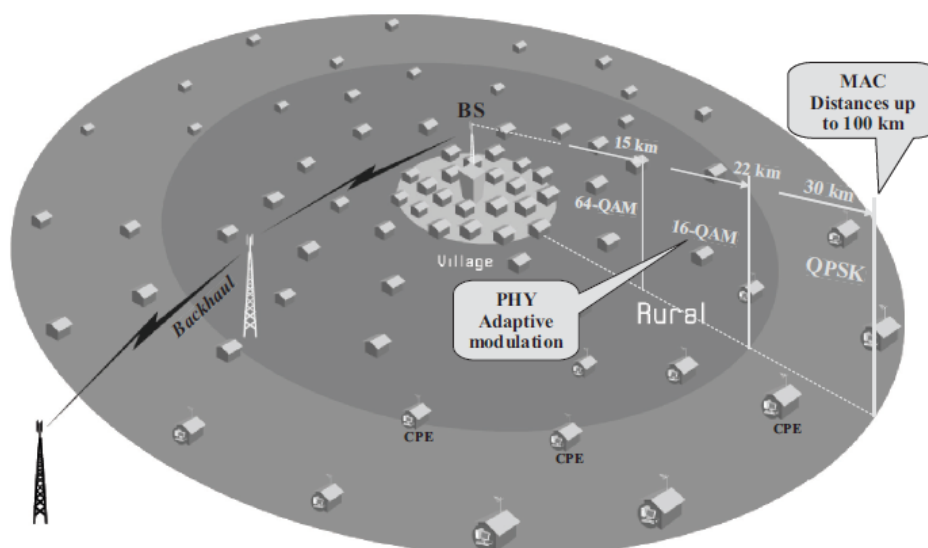


Figura 5.8: Distribución física de red punto-multipunto [29].

El estándar soporta un esquema adaptivo de modulaciones que incluye QPSK, 16QAM y 64QAM y códigos de convolución de tasa de codificación 1/2, 3/4 y 2/3. Estas características aportan la flexibilidad necesaria, pudiendo ofrecer desde unos pocos Kbps por subcanal, hasta 19 Mbps en todo un canal de TV. La capa física implementa a su vez técnicas de *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), tanto en el flujo descendente (*downstream*) como en el ascendente (*upstream*). Esto permite un manejo dinámico del ancho de banda, modulación y codificación para servir a los distintos CPE mediante la asignación de una o varias subportadoras a cada uno. El canal es dividido en 2048 subportadoras, de las cuales 368 quedan vacías (subportadoras de guarda y de DC). Las restantes se organizan en 60 subcanales, cada canal compuesto por 28 subportadoras (24 subportadoras de datos y 4 subportadoras piloto).

Parámetro	Valor
# total de subportadoras N_{FFT}	2048
# suportadoras de guarda N_G (L, DC, R)	368 (184, 1, 183)
# subportadoras utilizadas $N_T = N_D + N_P$	1680
# subportadoras de datos N_D	1440
# subportadoras piloto N_P	240

Tabla 5.1: Número de subportadoras por canal [29].

Debido a las restricciones de asignación de canales de TV de Estados Unidos debe existir al menos 2 canales libres entre 2 canales asignados, a fin de reducir la interferencia entre transmisores de alta potencia de TV. Por lo tanto, la mínima cantidad de canales libres consecutivos necesarios para que un sistema IEEE 802.22 opere es en ese país de 3 canales, es decir 18 MHz (a modo de ejemplo, ver Fig. 5.9). En Canadá la regulación es más estricta aún, exigiendo 4 canales libres entre 2 canales asignados, por lo que el espectro libre necesario para usar el IEEE 802.22 asciende a los 30 MHz. De existir suficientes canales libres, el estándar soporta la función de acoplamiento de canales, es decir, utilizar más de un canal para aumentar las velocidades ofrecidas a los usuarios a costa de utilizar más ERE.

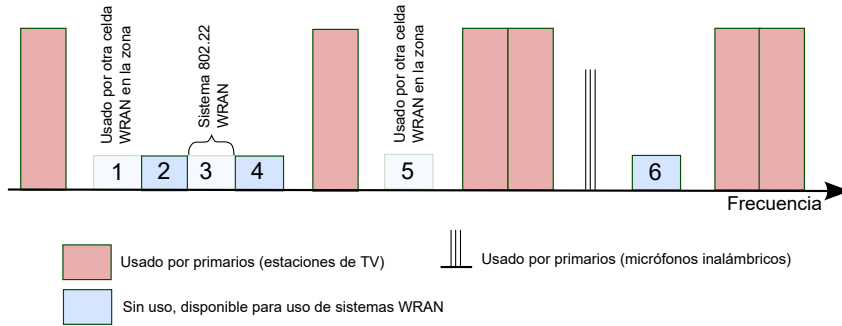


Figura 5.9: Representación del uso del ERE en la banda de TV [29].

La capa de acceso al medio se organiza en supertramas, en cuyo encabezado la BS publica en los canales libres la información necesaria para que los CPE se puedan sintonizar con la BS. Las supertramas portan las tramas y éstas últimas son quienes contienen las ráfagas de datos de los usuarios, tal como muestra la Fig 5.10.

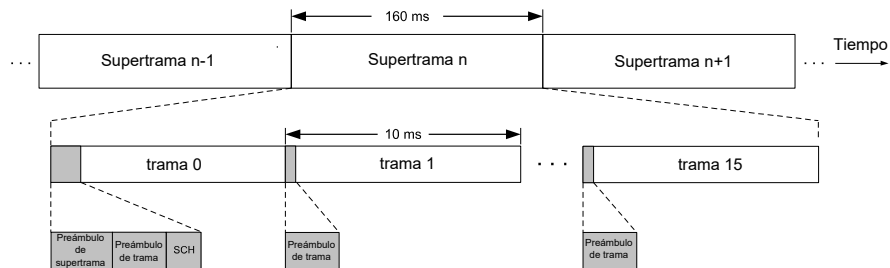


Figura 5.10: Estructura general de supertrama [29].

Sensado y Gestión del ERE

Aparte del rol tradicional de una radiobase, la BS IEEE 802.22 se encarga de manejar la función del sensado distribuido del ERE. Para operar sin interferir a los usuarios primarios, la BS debe solicitar a sus CPE asociados que realicen mediciones periódicas, dentro del canal de funcionamiento (en banda, o *in-band*) o en otros canales (fuera de banda, o *out-of-band*). Se requiere de dos antenas separadas en el CPE: una direccional para la comunicación con la BS y otra omnidireccional para realizar las tareas de sensado del ERE en la zona. Esta última deberá ser instalada a la intemperie, por ejemplo, en el techo de un edificio de modo de asegurar que el sensado se pueda realizar correctamente.

Para las medidas en banda la BS periódicamente deja sin usar el canal para que se pueda así detectar eventuales usuarios primarios en ese canal. A este período se le llama *quiet period*. En este *quiet period* los CPE realizan una medición rápida (menos de 1 ms/canal) y envían a la BS los resultados. Luego, la BS decide en función de esas mediciones si es necesario hacer una medición fina, que consta de un sensado más detallado (de mayor duración). Para evitar que en los *quiet period* una radiobase IEEE 802.22 se interfiera con otra radiobase IEEE 802.22 el estándar prevé un sistema de sincronización de tal modo de que las celdas adyacentes midan exactamente al mismo tiempo.

La función de gestión del espectro es fundamental en todo CRS. El estándar IEEE 802.22 atribuye esa función a la entidad lógica llamada gestor de espectro, en inglés *Spectrum Manager* (SM). Esta entidad reside en la BS y se encarga de las siguientes tareas:

- Mantener la información de disponibilidad de ERE
- Clasificar y seleccionar los canales
- Controlar las asociaciones con los CPE
- Manejar el conjunto de canales
- Acceder al servicio de base de datos de ERE
- Agendar los *quiet period* para el sensado de ERE
- Hacer cumplir las políticas regulatorias
- Decidir cambios de canal para uno o más CPE o la celda entera
- Garantizar la auto-coexistencia con otras WRAN

El SM es quien asigna el canal de operación a los equipos de la WRAN, sus canales de respaldo y sus respectivas prioridades. Los canales son clasificados como disponibles (en inglés *available*) si están disponibles para operar la WRAN de acuerdo al servicio de base de datos de ERE. Aquellos canales no estén permitidos según el servicio de base de datos de ERE no son tomados en cuenta. Luego los canales disponibles se clasifican en las siguientes categorías¹¹:

- **No permitido:** canales prohibidos por el operador por razones operativas o regulatorias de la zona.

¹¹En inglés los nombres de las categorías son: *Disallowed*, *Operating*, *Backup*, *Candidate*, *Protected* y *Unclassified* respectivamente.

- **Operativo:** es el canal usado para comunicar la BS con los CPEs en la WRAN. Este canal se sensa al menos cada 2 segundos en busca de los tipos de señal requeridos por la regulación de la zona y también por señales baliza IEEE 802.22 (ver Sección 5.3.1).
- **Respaldo:** canales que han sido autorizados para volverse operativos inmediatamente en caso de que se requiera un cambio de canal. La BS puede clasificar como de respaldo varios canales y asignarles su respectiva prioridad. Estos canales se sensan al menos cada 6 segundos en busca de señales de usuarios primarios y en caso de encontrarse alguna, ese canal deja de ser de respaldo.
- **Candidato:** son canales candidatos a ser de respaldo. Estos canales deben sensarse cada 6 segundos pero durante no menos de 30 segundos en busca de usuarios primarios. Si un canal no detecta actividad de usuarios primarios durante ese tiempo, puede ser elevado a la categoría de canal de respaldo.
- **Protegido:** son canales en los que se ha detectado actividad de usuarios primarios o de WRAN a través del sensado. Los canales protegidos pueden pasar a ser candidatos, si el usuario primario los deja vacantes. Esa información se puede obtener por sensado o por el servicio de base de datos.
- **Sin clasificar:** son los canales que no han sido sensados. Una vez sensados serán clasificados como protegidos o como candidatos según corresponda.

Inicialización

En IEEE 802.22, a diferencia de otras tecnologías inalámbricas, no hay un canal fijo predeterminado que el CPE pueda usar para comunicarse con la BS. Cuando el CPE se inicia éste escanea todos los canales de TV y forma un mapa de ocupación del espectro, identificando qué canales están siendo usados por usuarios primarios y cuáles no. Esta información será usada por el CPE para saber en qué canales debe buscar a la BS (aquellos en que no haya usuarios primarios transmitiendo) y también se enviará a la BS más adelante. Luego de encontrar el canal de la BS, el CPE recibe la información necesaria para ingresar a la red a través del canal *Superframe Control Header* (SCH) emitido por la BS.

Coexistencia con TV y Micrófonos Inalámbricos

Para detectar usuarios primarios (principalmente emisoras de TV y de micrófonos inalámbricos), los dispositivos IEEE 802.22 deben ser capaces de detectar señales de bajas relaciones señal a ruido con precisión. Se utilizan las medidas tomadas por los CPE, por instrucción de la BS. Dado que las medidas de un CPE en particular pueden ser poco confiables, ya que fenómenos como el “efecto sombra” (en inglés *shadowing*) pueden interferir, se utilizan métodos de sensado periódico y distribuido en todos los CPE de tal forma que, a partir de los datos de todos los CPE, la BS pueda reconstruir un mapa de uso del ERE en su celda.

Para determinar si un canal está utilizado, el CPE deberá sensar en todas las direcciones azimutales y en todas las posibles polarizaciones, determinando si recibe una potencia mayor a ciertos umbrales predeterminados (ver Tabla 5.2).

Tipo de emisión	Umbral de sensado (dBm)
TV analógica	-94
TV digital	-116
Micrófonos inalámbricos	-107

Tabla 5.2: Umbrales utilizados por el CPE para detectar actividad en un canal dado.

Además de los umbrales de potencia, se establecen en el estándar límites para los tiempos de monitoreo, inicio y fin de una transmisión y movimiento hacia otra frecuencia. Estos valores se presentan en la Tabla 5.3.

Descripción	Valor
Tiempo de detección de canal (máx)	30 s
Inicio de una transmisión (máx)	100 ms (de asignado el canal)
Fin de una transmisión (máx)	100 ms (de dada la orden)
Movimiento a otra frecuencia (estando en operación)	2 s

Tabla 5.3: Algunos parámetros temporales del ERE de IEEE 802.22 [30].

Para el caso de los micrófonos inalámbricos puede ser más complicada su detección dado que generalmente estos dispositivos tienen alcances más reducidos, del orden de los cien metros, trabajan a menor potencia que las estaciones de TV y utilizan un ancho de banda menor que los canales de TV (en general 200 kHz). Para corregir estos inconvenientes el estándar IEEE 802.22 prevé el uso de lo que llama balizas, en inglés *beacons*, por parte de los usuarios de micrófonos inalámbricos. Estas balizas son dispositivos que emiten una señal conocida por los dispositivos IEEE 802.22, a mayor potencia que lo que transmite un micrófono inalámbrico, permitiendo a los CPE detectarlos más fácilmente al reconocer una señal baliza en sus proximidades.

Coexistencia con Otros Sistemas WRAN

A diferencia de por ejemplo, las redes celulares, donde cada operador tiene asignada una frecuencia, las WRAN al utilizar el ERE de forma oportunista no tienen una forma de coordinación sencilla para el uso de los canales entre diferentes operadores. Este problema surge cuando varios CPE y BS funcionan unos próximos a los otros.¹²

El estándar IEEE 802.22 prevé el problema de la coexistencia con otro sistema que implemente el mismo estándar, incorporando protocolos y algoritmos de auto-coexistencia, en inglés *self-coexistence*.

Para coordinarse, los diferentes equipos deben sincronizarse en el envío de tramas. Esta sincronización se alcanza por medio de la transmisión de señales baliza de coexistencia (en inglés *coexistence beacons*) que contienen marcas de tiempo. Cuando los CPE no están comunicándose con su BS, éstos buscan señales baliza de coexistencia de otras BS o de otros CPE. En caso de encontrarlos, se debe ajustar el tiempo de las tramas de acuerdo a ciertas reglas para que ambos sistemas WRAN se sincronicen [31].

¹²O no tan próximos, dado que las celdas de las BS de IEEE 802.22 puede llegar a tener decenas de km de radio.

Conclusiones

El estándar IEEE 802.22, a diferencia de los otros dos mencionados al principio de la sección, nace como una norma para sistemas CR. Es considerado el primer estándar de CR. Su principal objetivo es posibilitar el acceso a conexiones de banda ancha en zonas rurales, a través del uso de los TVWS, logrando velocidades del orden de los obtenidos con sistemas cableados xDSL, alcances muy superiores, mayor robustez frente a los obstáculos y mejor penetración en interiores que otros sistemas de banda ancha inalámbrica. Sólomente es capaz de operar en las bandas de televisión, para ello además de una regulación que permita el uso sin licencia de estas bandas, necesita al menos tres canales de televisión vacantes consecutivos para poder operar, es decir al menos 18 MHz (de acuerdo a las restricciones regulatorias de EE.UU.).

5.3.2. Estándar IEEE 802.11af WLAN

El estándar IEEE 802.11 para redes de área local inalámbricas, en inglés WLAN, permite el acceso a servicios de banda ancha de forma inalámbrica y se ha vuelto de uso masivo en los últimos tiempos. El grupo IEEE 802.11af TG se forma en el año 2009, creando posteriormente una enmienda que introduce modificaciones en la especificación de las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC) del IEEE 802.11 para permitir la operación en los TVWS¹³. Por tal motivo se le conoce por el nombre *White-Fi*, haciendo alusión al conocido nombre Wi-Fi usado para referirse al IEEE 802.11. Para ello se vale de técnicas de CR así como también del uso de bases de datos de geolocalización [32].

Motivación

Con la llegada de la televisión digital en varios países del mundo y la migración de los canales analógicos hacia la nueva tecnología, se han generado tramos vacantes en el ERE en la banda de UHF y esto se suma al hecho de que la banda de TV es ya de por sí sub-utilizada. Es por eso que los reguladores¹⁴ en estos países han impulsado el desarrollo de diferentes sistemas de comunicaciones en estas bandas, favoreciendo pruebas piloto de varios estándares para el uso de los TVWS. El estándar IEEE 802.11af es considerado como uno de los más prometedores de cara al futuro [33].

Topología

En el estándar IEEE 802.11af se utiliza la modalidad punto-multipunto, donde se identifican cuatro clases de equipos¹⁵:

- Bases de datos de geolocalización (GDB)
- Servidor seguro de ubicaciones registradas (RLSS)
- Estaciones (STA)
 - Puntos de acceso (AP-STA)
 - Estaciones de usuario (nonAP-STA)

¹³En particular entre los 54 MHz y los 790 MHz.

¹⁴Por ejemplo, la FCC en EE.UU. o la Ofcom en el Reino Unido.

¹⁵En inglés: *geolocation database* (GDB), *registered location secure server* (RLSS), *station* (STA) y *access point* (AP).

Las estaciones se pueden clasificar como dependientes (*dependent*) o habilitantes (*enabling*) respecto a una GDB. Las estaciones dependientes son las que dependen de información a ser entregada desde la GDB para iniciarse en la red y mantenerse en ella. Las estaciones habilitantes son aquellas que habiendo recibido la información sobre el ERE disponible proveniente de la GDB, tienen la autoridad de controlar a otras estaciones dependientes de la misma GDB.

En el diseño que muestra la Fig. 5.11 los AP están funcionando como estaciones habilitantes mientras que los terminales de usuario funcionan como dependientes. Esto significa que los AP obtendrán la información sobre qué espectro utilizar desde la GDB y luego en función de esa información, está autorizado a controlar a las estaciones de usuario para que operen en dicho espectro.

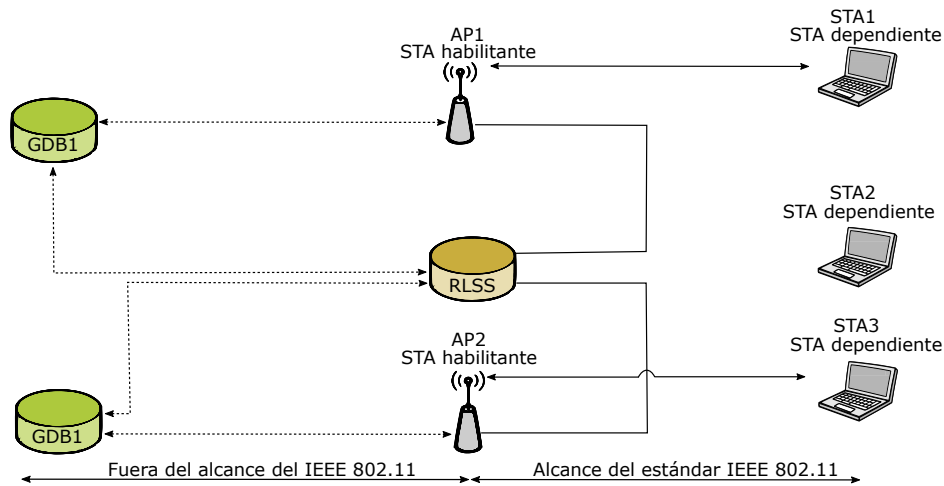


Figura 5.11: Topología de red IEEE 802.11af [32].

Se utiliza un protocolo denominado *Registered Location Query Protocol* (RLQP) para compartir el estado de uso de los canales y el mapa de espacios en blanco, en inglés *White Space Map* (WSM) entre las estaciones habilitantes. Asimismo, las estaciones dependientes pueden consultar esta información tanto a las estaciones habilitantes como al RLSS. Haciendo uso de la información, las estaciones pueden usar inteligentemente sus recursos de espectro disponible, potencia y ancho de banda para sus comunicaciones [32].

Interfaz de Aire

En cuanto a la capa física utilizada, la enmienda IEEE 802.11af introduce modificaciones para adaptarse a que el ancho de banda del canal de TV es menor el canal previsto en el estándar IEEE 802.11¹⁶. A pesar de ello, la nueva capa PHY utiliza también el sistema *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) y se basa fuertemente en la especificada en éste último estándar.

Para adecuar el estándar a los canales de TV, se introducen tres nuevas unidades básicas de canal, en inglés *Basic Channel Unit* (BCU) de 6 MHz, 7 MHz y 8 MHz. Además, se soporta la agregación de canales para aumentar el ancho de banda siempre que existan canales disponibles, con las siguientes configuraciones¹⁷:

¹⁶Mientras que los canales de IEEE 802.11 pueden ser de 20 MHz o 40 MHz, los de TV son de apenas 6 MHz a 8 MHz.

¹⁷Se toman los BCU de 6 MHz para los valores numéricos ya que es el caso en Uruguay.

- **TVHT_W** - Un BCU (6 MHz)
- **TVHT_2W** - Dos BCU contiguos (12 MHz)
- **TVHT_W+W** - Dos BCU no contiguos (6+6 MHz)
- **TVHT_4W** - Cuatro BCU contiguos (24 MHz)
- **TVHT_2W+2W** - Dos segmentos no contiguos de dos BCU cada uno (12+12 MHz)

Conclusiones

La enmienda IEEE 802.11af agrega al masivamente adoptado estándar IEEE 802.11 la posibilidad de operar en las bandas de UHF atribuidas a la televisión. Utilizando estas frecuencias se logra aumentar el alcance de los puntos de acceso logrando, cómo se verá más adelante en la Sección 5.4.2, comunicaciones con alcances de hasta 200 metros de distancia. La contrapartida es que para utilizar las frecuencias de televisión con un ancho de banda similar al de un canal IEEE 802.11 usual de 20 MHz, deben existir al menos cuatro canales de televisión vacantes en la zona.

5.3.3. Estándar IEEE 802.16h

Las actividades referentes a este estándar comienzan en agosto de 1998, en una reunión llamada N-WEST del *U.S. National Institute of Standards and Technology*. Luego, el IEEE recibe al emprendimiento formando un grupo de estudio denominado IEEE 802.16 que trata sobre acceso a banda ancha inalámbrica (BWA). El estándar IEEE 802.16 conocido bajo el nombre *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WIMAX) y completado en octubre de 2001, especifica la capa MAC para las redes inalámbricas de área metropolitana, denominada *WirelessMAN*. Originalmente, el grupo IEEE 802.16 se interesó por la banda comprendida entre 10 GHz y 66 GHz, para luego agregar con la enmienda IEEE 802.16a la banda comprendida entre los 2 GHz y los 11 GHz [34].

La enmienda IEEE 802.16h agrega al estándar IEEE 802.16 funcionalidades de CR a nivel de las capas MAC y PHY para permitir el funcionamiento en bandas exentas de licenciamiento por debajo de los 11 GHz. Para ello se agregan mecanismos para la detección de interferencia y coexistencia con otros sistemas presentes en dichas bandas.

Motivación

El desarrollo de WIMAX busca dar una alternativa a las conexiones de banda ancha por medios físicos, como el par de cobre o la fibra óptica. Los sistemas inalámbricos, al prescindir en gran medida de los enlaces físicos entre estaciones, permiten dar servicio en áreas extensas¹⁸ con costos menores. Es posible dar el servicio tanto en exteriores como en el interior de edificios colocando adecuadamente las antenas y radiobases. En cuanto al uso de las bandas exentas de licenciamiento, la motivación yace en poder explotar una importante cantidad de ERE que está disponible en general en todo el país y no requiere el pago del derecho para el uso del ERE.

¹⁸Dependiendo de la tecnología y la frecuencia, entre otros factores.

Topología

La topología utilizada por IEEE 802.16 es de punto-multipunto con una BS y CPE. Los CPE pueden ser desde equipos fijos instalados en un edificio o casa particular, hasta dispositivos móviles compatibles con el estándar (laptops, móviles, etc.), como se ve en la Fig. 5.12.

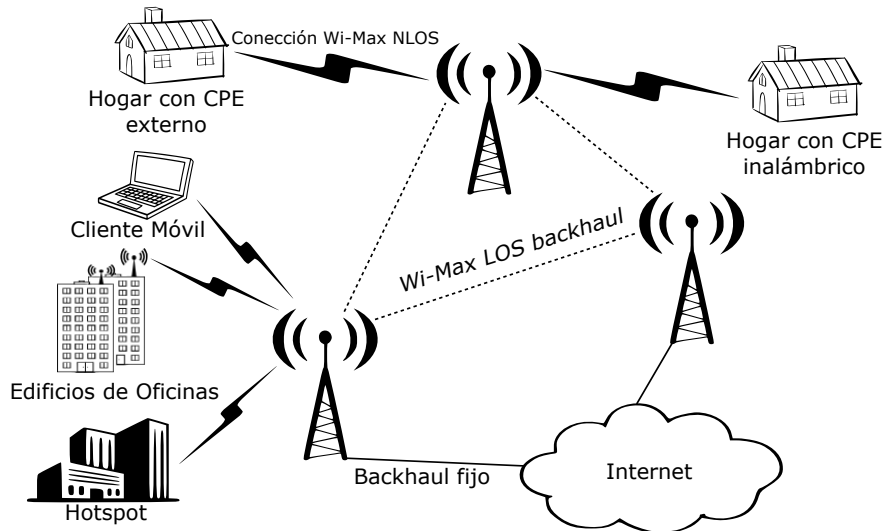


Figura 5.12: Topología de red IEEE 802.16 [35].

Interfaz de Aire

Las modificaciones presentes en la enmienda IEEE 802.16h, se encargan de manejar la interferencia que los sistemas WIMAX introducen en los otros usuarios que comparten el espectro. Éstos usuarios, pueden ser licenciados (lo que la norma llama usuarios específicos de espectro, en inglés *Specific Spectrum Users* (SSU)) o no licenciados (usuarios no específicos de espectro, en inglés *non Specific Spectrum Users* (non-SSU)).

Se presentan dos perfiles diferentes de mecanismos de coexistencia:

- Mecanismos de coexistencia no coordinada (WirelessMAN-UCP)
- Mecanismos de coexistencia coordinada (WirelessMAN-CX)

WirelessMAN-UCP. El perfil UCP se adecua a los escenarios donde se tienen sistemas heterogéneos operando en las bandas compartidas, dado que no requiere una fuerte interacción entre dichos sistemas para su coexistencia. Los protocolos UCP incluyen rutinas capaces de sensor el espectro para determinar la existencia de usuarios primarios, discontinuar la operación luego de la detección de un usuario primario, detectar otros usuarios, solicitar reporte de mediciones, seleccionar y publicar los canales elegidos.

Este perfil, a su vez, permite una gestión distribuida de los recursos de radio dentro del conjunto formado por una BS y sus CPE asociados. Mediante políticas del IEEE 802.16h para compartir el ERE la radio base puede construir una base de datos que describa el uso real y futuro del ERE y compartir esa información.

Para prevenir incumplimientos de las regulaciones todos los equipos transmisores deben utilizar una firma de radio, en inglés *radio signature*, a fin de que puedan ser identificados. Esta firma puede ser por ejemplo un preámbulo de trama distintivo.

WirelessMAN-CX. Cuando en una misma región coexisten múltiples redes secundarias, éstas pueden colaborar para coordinar sus transmisiones y conformando una relación de vecindad. El estándar provee tres mecanismos para coexistencia coordinada: Sincronización de tramas MAC, Selección dinámica de canal, en inglés *Dynamic Channel Selection* (DCS) y Selección adaptativa de canal, en inglés *Adaptive Channel Selection* (ACS).

El primero de ellos se trata de sincronizar las tramas e intervalos de transmisión y de recepción, permitiendo la operación en zonas comunes. Los otros dos mecanismos proveen formas de encontrar frecuencias con menor grado de interferencia (o menor grado de utilización), de forma similar al del caso no coordinado. Para instrumentar el grado de cooperación requerido por estos mecanismos, el estándar define un canal de control de coexistencia en intervalos de tiempo sincronizados de forma global, es decir común a todas las redes secundarias [36].

Conclusiones

La enmienda IEEE 802.16h, agrega la funcionalidad de operar en frecuencias exentas de licenciamiento al estándar IEEE 802.16, dando así origen al nombre “Cognitive WIMAX”. Este sistema es desarrollado para brindar servicios de acceso de banda ancha fijo de forma inalámbrica, aunque también soporte equipos de usuario móviles. Con el agregado de las bandas exentas de licencia, el sistema gana una importante cantidad de ERE para operar sin tener los costos fijos asociados al arrendamiento de dicha cantidad de ERE. El sistema puede operar en las bandas de televisión, o TVWS, como también en otras bandas exentas de licencia, por ejemplo las bandas ICM.

5.4. Experiencias con Radio Cognitiva

Con el desarrollo de diferentes estándares de CR distintas organizaciones y empresas comenzaron a realizar prototipos de equipos de CR y con ellos los primeros pilotos y pruebas de campo. La *Dynamic Spectrum Alliance*¹⁹ presenta en su sitio web una recopilación de pilotos a lo largo del planeta, la mayoría de los cuales son implementaciones de CRS en las bandas de TVWS. En la Fig. 5.13 se muestran las ubicaciones de éstos pilotos. En la presente sección se comentan algunas de las experiencias realizadas en el mundo y en Uruguay, con objetivos y con resultados diversos.

¹⁹Organización formada por empresas relacionadas con las telecomunicaciones. Sitio web: <http://dynamicspectrumalliance.org/>



Figura 5.13: Ubicación de pilotos CR²⁰.

5.4.1. NICT: IEEE 802.11af

El 17 de Octubre de 2012 el *National Institute of Information and Communications Technology* (Japón) (NICT) publica el primer prototipo de equipo que implementa las especificaciones PHY y MAC del borrador que existía en ese entonces del estándar IEEE 802.11af (D2.0). Para poder realizar las pruebas con el prototipo, el NICT desarrolló una base de datos GDB y un servidor RLSS, de acuerdo al estándar [33]. La Fig. 5.14 muestra la topología utilizada en el piloto.

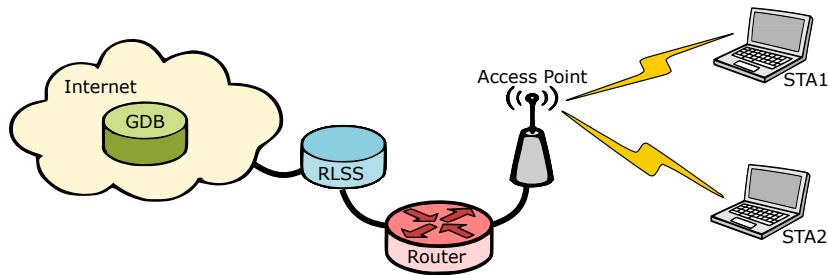


Figura 5.14: Sistema montado para pruebas con el prototipo de IEEE 802.11af [33].

Además de la interfaz inalámbrica IEEE 802.11af, el prototipo contó con otra interfaz IEEE 802.11abgn para poder funcionar en modo multibanda. El dispositivo soporta además interfaces USB, LTE y WiMax. La Fig. 5.15 muestra el aspecto del prototipo y en la Tabla 5.4 se muestran algunos parámetros de la experiencia.

²⁰Fuente: *Dynamic Spectrum Alliance*.

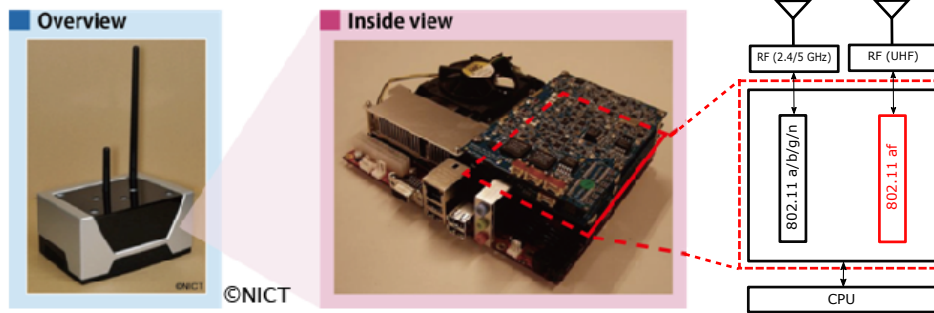


Figura 5.15: Prototipo de IEEE 802.11af [33].

Parámetro	Valor
Frecuencia	470-710 MHz
Ancho de banda del canal	6 MHz
Potencia de transmisión	20 dBm
MCS	BPSK
MAC	IEEE 802.11af Draft Specification (D 2.0)
Ganancia de antena	0 dBi

Tabla 5.4: Características del prototipo IEEE 802.11af.

El 16 de diciembre de 2015, el NICT publica el desarrollo del primer circuito integrado en banda base basado en el estándar IEEE 802.11af. Con el avance del circuito integrado se favorece el desarrollo de dispositivos de comunicación de pequeño porte y bajo consumo de energía, o incluir el circuito integrado en otros dispositivos de comunicación.²¹ Además del integrado, el NICT desarrolló un prototipo de tarjeta en formato *USB-stick* de pequeñas dimensiones y bajo costo, como el que muestra la Fig. 5.16 [37].



Figura 5.16: Prototipo de USB-stick IEEE 802.11af [37].

Entre los logros alcanzados con el circuito integrado de destacan:

- Respecto a los dispositivos desarrollados hasta el momento, se logra una reducción de tamaño de 1/40, reducción del peso de 1/30 y reducción de costo a menos de 1/10.
- El dispositivo fabricado, cuenta con interfaz *Universal Serial Bus* (USB) y puede ser alimentado via USB.
- El dispositivo implementa de forma simple todo el sistema, incluyendo la antena.
- El dispositivo puede ser operado como AP o como una estación de usuario. Esto facilita notoriamente el despliegue de una red en TVWS.

²¹El circuito integrado tiene unos 3 cm de lado.

5.4.2. NICT, Hitachi Kokusai e ISB Corporation: IEEE 802.22

El primer prototipo de red basada en el estándar IEEE 802.22 fue desarrollado en conjunto por el NICT, Hitachi Kokusai Electric Inc. e ISB Corporation, presentado el 23 de Enero de 2013. El diseño consta de una radiobase (RB) y equipos cliente (CPE) capaces de crear una WRAN cumpliendo el estándar IEEE 802.22-2011.

El NICT junto a Hitachi Kokusai Electric Inc. se encargaron de la implementación de lo referente a las capas MAC y PHY, de forma tal de permitir a los dispositivos usar canales de TV vacantes en la banda de 470-710 MHz de acuerdo al estándar. La metodología de acceso al medio se basó en una red punto-multipunto con soporte para diferentes tipos de calidad de servicio, capacidades cognitivas de estimación de la interferencia y acceso a una base de datos (base de datos de espacios en blanco, en inglés *White Space Database* (WSDB)) provista por ISB Corporation que permite evitar la interferencia con emisoras de TV licenciadas [38].

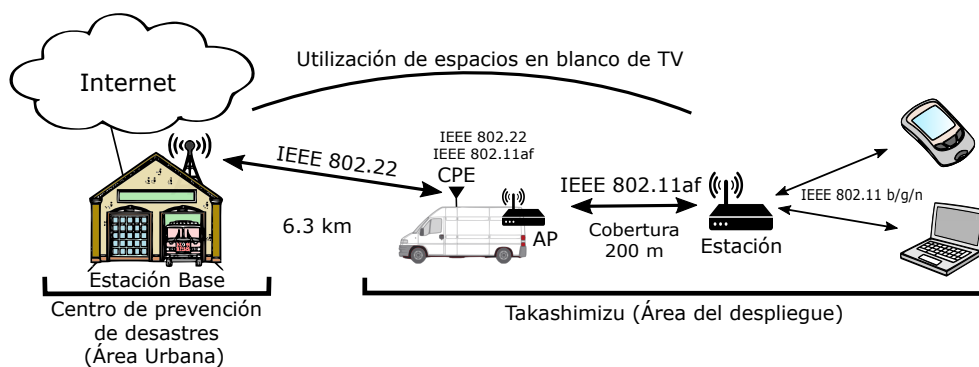


Figura 5.17: Esquema de red multi-salto implementada con estándares IEEE [39].

La experiencia fue calificada por el NICT como exitosa, destacándose los siguientes logros:

- Se implementó un sistema basado en IEEE 802.22 capaz de comunicarse a 12.7 km entre la BS y el CPE.
- Se lograron velocidades de bajada de 5.2 Mbps y de subida de 4.5 Mbps.
- Se utilizó una red multi-salto (ver Fig. 5.17), utilizando el estándar IEEE 802.22 como *backbone* para un repetidor que combina un CPE de IEEE 802.22 y un enrutador inalámbrico IEEE 802.11af. Con el enrutador IEEE 802.11af se logra ampliar el alcance del servicio dado a un radio de 200 m del CPE, también mediante el uso de bandas de TV y radio cognitiva. Luego la señal es finalmente repetida por otro enrutador IEEE 802.11b/g/n, al que dispositivos estándar de usuario (celulares, tabletas, etc.) se conecten probando que es posible la navegación web y las vídeo llamadas telefónicas con el sistema WRAN.
- Se desarrolló una función original basada en IEEE 802.22 que permite operar en dos canales de TV no consecutivos logrando velocidades de bajada de 15.5 Mbps y de subida de 9.0 Mbps.

5.4.3. Ofcom Pilotos TVWS

La Ofcom ha impulsado las tecnologías de TVWS durante los últimos años como forma de propiciar el acceso universal a la banda ancha pero también con vistas a

la nueva tendencia de las comunicaciones máquina a máquina, en inglés *machine to machine communications* (M2M), y también llamado el Internet de las cosas (IoT). Resulta interesante repasar el camino recorrido por la Ofcom para llegar a su situación actual en lo que refiere al uso de los TVWS de forma no licenciada. Los procedimientos que ésta puso en práctica bien podrían ser replicados por otras administraciones que deseen regular este tipo de tecnologías, en particular por la de Uruguay.

El 22 de noviembre de 2012, Ofcom propone una regulación para el uso de dispositivos TVWS y el 26 de abril de 2013 se realiza un llamado a interesados en participar en pilotos para el uso innovador de los TVWS. Ésta sería una de las primeras y más importantes iniciativas en cuanto a Cognitive Radio en Europa. Para el 2 de Octubre de ese mismo año ya habían sido adjudicadas tanto las empresas que llevarían adelante tanto los sistemas pilotos, como las bases de datos de los TVWS necesarias en el Reino Unido para la implementación de la tecnología²². Al 10 de Octubre de 2014 habían siete pilotos implementados en el Reino Unido, con otros pilotos planificados a realizarse en los meses siguientes involucrando organizaciones públicas y privadas para probar diferentes aplicaciones innovadoras en el uso del ERE. Luego de varios pilotos calificados como exitosos y consultas con los actores involucrados, el 12 de febrero de 2015 se da la autorización para que la industria de las telecomunicaciones pueda aprovechar los TVWS en forma compartida sin necesidad de licencias. Finalmente, Ofcom lanza el 18 de diciembre de 2015 un estatuto que regula el uso de los TVWS y se autoriza a cuatro empresas a mantener bases de datos de dispositivos TVWS.

A continuación se describen los mencionados pilotos de CR en el Reino Unido.

Streaming de vídeo en vivo.- Google y el ZSL London Zoo²³, utilizando equipos Mediatel y 6Harmonics, lanzaron un trial que usa una red de TVWS para difundir video en vivo de diferentes animales que viven en el zoológico de Londres. El vídeo fue difundido a través del portal de vídeos YouTube, propiedad de Google. Este piloto utilizó la base de datos de ERE provista por Google y sirvió de prueba para el ZSL London Zoo para un sistema de monitoreo y protección de animales salvajes en peligro.

Defensa contra inundaciones.- Las empresas Love Hz y Nominet tabajaron con la Oxford Flood Network en una red construida por sensores inalámbricos que provee alertas tempranas a la comunidad acerca de inundaciones. Los niveles de agua son monitoreados en tiempo real y enviados a través de los TVWS mediante dispositivos Adaptrum.

Next generation Wi-Fi / ciudad inteligente.- La University of Strathclyde junto con Microsoft, 6Harmonics, MediaTek, Spectrum Bridge y Sky, con el apoyo del gobierno escocés, llevan a cabo un piloto para expandir el acceso a la banda ancha en la ciudad de Glasgow²⁴ así como también utilizar los TVWS para desplegar sensores para crear una “ciudad inteligente”.

²²Entre los asignatarios figuran multinacionales de las telecomunicaciones como Google y Microsoft.

²³<https://www.zsl.org/conservation-initiatives/conservation-technology/whitespaces-for-wildlife>

²⁴La ciudad de Glasgow según estudios es la de menor penetración de servicios de banda ancha en el Reino Unido.

Internet en barcos y botes.- CloudNet IT Solutions, Fairspectrum y Carlson Wireless Technologies utilizan TVWS para brindar acceso a Internet y comunicaciones a transbordadores (en inglés *ferry*) que viajan en las islas Orkney. Estos *ferries* no contaban con acceso de banda ancha. Independientemente en otro proyecto Microsoft, Neul y 6Harmonics trabajan con la operadora Click4Internet en la Isle of Wight para probar cómo esta tecnología puede funcionar con botes en el mar.

5.4.4. Microsoft y Adaptrum Demostración Junta Anual del BID

En marzo de 2012, durante la reunión anual del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) llevada a cabo en la ciudad de Montevideo, Microsoft hizo una demostración de la tecnología de TVWS utilizando equipos Adaptrum. El objetivo de la empresa fue mostrar la utilidad de la tecnología a grupos inversores que puedan llevar a cabo proyectos para el despliegue de servicios de banda ancha en latinoamérica.

La URSEC asignó temporalmente para esta prueba los canales UHF 19 (500-506 MHz) y 27 (548-554 MHz).

Utilizando una BS y un CPE e interactuando con el prototipo de base de datos de espacios en blanco de Microsoft, se estableció una conexión de banda ancha en la que se probó el *streaming* de películas en alta definición, llamadas y navegación por Internet de forma exitosa [40].

5.4.5. Plan Ceibal Piloto TVWS

El Centro Ceibal para el Apoyo a la Educación de la Niñez y la Adolescencia es creado mediante la Ley 18.640 aprobada el 8 de enero de 2010. Este centro se encarga de gestionar el Programa para la Conectividad Educativa de Informática Básica para el Aprendizaje en Línea (llamado Plan Ceibal²⁵), tendiente a promover la inclusión digital para un mayor y mejor acceso a la educación y a la cultura.

Desde 2013 Ceibal se interesó acerca de la tecnología TVWS buscando mejorar sustancialmente el acceso a Internet en entornos rurales, en particular para mejorar la conexión de escuelas rurales con conexión de datos inalámbricos de 2G y/o 3G.

En una primera etapa Ceibal estudia la tecnología y solicita a la URSEC que se le asigne los canales de TV para operar en el piloto. Se planificó un piloto para 5 centros educativos con 3 estaciones base, seleccionándose los productos de 6Harmonics (de la serie GWS, similar al estudiado en la Sección 5.5), de origen canadiense, por considerarse una de las mejores opciones en el mercado por ese entonces.

El diseño del piloto consistió en:

- Un enlace punto a punto en Juan Lacaze, Colonia (desde escuela 21 a un tanque de OSE que contaba con conexión de Ceibal)
- Cuatro escuelas a través de dos sectores instalados en la torre de AFE de Florida (escuelas 18, 56, 61 y 74)

En la Fig. 5.18 se muestran las 4 escuelas a comunicar en Florida.

²⁵<http://www.ceibal.edu.uy/>

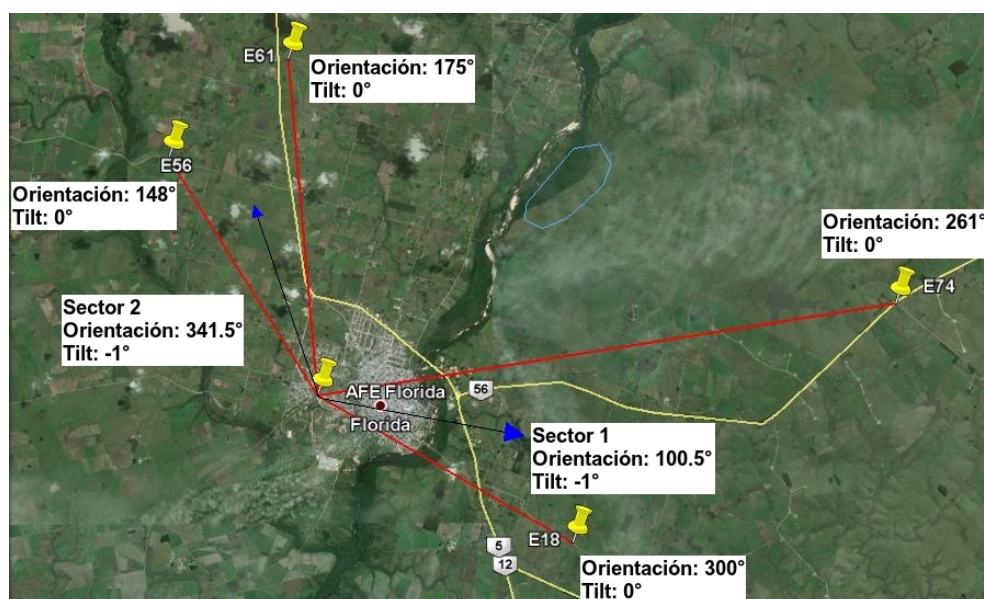


Figura 5.18: Ubicación geográfica de los puntos a comunicar en Florida (Uruguay), en el piloto TVWS de Ceibal²⁶.

La tecnología de TVWS evaluada en el piloto no fue considerada adecuada por el momento para Ceibal dado que las ventajas que ofrece son discutibles y exige un avance en materia regulatoria que no se avisa en el futuro próximo. No obstante, Ceibal reconoce que dado el peso de las empresas interesadas en este tipo de tecnologías (por ejemplo Google, Microsoft o Facebook) se puede pensar que el panorama pueda ser distinto en algunos años.

5.5. Dispositivos CR

Algunos de los dispositivos utilizados en los pilotos que se mencionaron en las secciones anteriores fueron desarrollados como prototipos para esas experiencias. Sin embargo, existen varias empresas que comercializan dispositivos CR, en particular dispositivos que funcionan en los TVWS y se encuentran disponibles para el público.

Es claro que sólo podrán ser utilizados en la medida que el marco regulatorio del país lo permita. Una de las primeras administraciones en interesarse y permitir el uso de los TVWS fue la FCC de Estados Unidos. En la *FCC ID Application Database*²⁷ se pueden encontrar los dispositivos autorizados por dicha administración.

5.5.1. Productos CR Autorizados por la FCC

Al momento de esta investigación, la FCC ha autorizado trece productos diferentes listados en la Tabla 5.5. El FCC ID es una identificación para productos inalámbricos en el mercado estadounidense, asignado por la FCC. Los tres primeros dígitos corresponden a la empresa responsable del producto y los restantes identifican al modelo del producto. Si se hace una búsqueda del FCC ID en la *FCC ID Application Database* se pueden encontrar el rango de frecuencias y potencia de operación aprobados para cada

²⁶Fuente: blogs.ceibal.edu.uy/tecnologia/?page?id=838.

²⁷Disponible en: <https://fccid.io/>

Capítulo 5. Radio Cognitiva

producto, las especificaciones técnicas, manuales de usuario e instalación, fotografías internas y externas del *hardware* y los resultados de las pruebas realizadas por la FCC previo a la autorización del producto.

La autorización de dispositivos que operan en TVWS se encuentra sujeta al cumplimiento del Título 47 Parte 15 Subparte H del código de regulaciones federales, en inglés *Code of Federal Regulations* (CFR)²⁸. Este código establece limitaciones respecto a la potencia PIRE a transmitir, los métodos de protección y evasión de interferencia, los canales permitidos y el uso de las bases de datos de ERE.

Proveedor	Descripción	FCC ID
6Harmonics	Cognitive radio for global WS market	2AASTGWS-3000
Adaptrum	Fixed TV band device	A2UACRS20F
Adaptrum	Personal/portable TV band device	A2UACRS20P1
Adaptrum	TV band device	A2UACRS10
Carlson Wireless Tech.	WS broadband Radio	OPA-RC2-BS
Carlson Wireless Tech.	WS broadband Radio	OPA-RC2-CPE
FCC Laboratory	Test grantee co test	OPS1
Koos Technical Services	Fixed TVDB	ZBGAWR-1
Koos Technical Services	WS radio controlled by database	ZBGAWR2UHF
Meld Technology	Low power fixed TVBD	OKVMT300
Metric Systems Corp.	Broadband VHF/UHF networking radio system	2ABCU-50739
Redline Communications	WS device with geo-location-fixed	QC8-RDL3000RMF
Runcom Technologies	Base station	XYMBTSTVWS-1

Tabla 5.5: Dispositivos autorizados por la FCC.

La base de datos *Google Spectrum Database*²⁹ permite descargar la lista completa de los dispositivos registrados para la operación en los TVWS en Estados Unidos, al momento de esta investigación la lista asciende a los quinientos noventa y cuatro dispositivos. Esta lista se detalla el modelo a través del FCC ID, las coordenadas geográficas del sitio y el número de serie entre otros datos.

Características Técnicas

La Tabla 5.6 muestra una comparación de diferentes características entre los productos de CR autorizados por la FCC. Naturalmente, todos ellos cumplen con la regulación CFR Parte 15 Subparte H, prerequisite para ser autorizados.

La información presentada en la tabla fue obtenida de las hojas de datos de los fabricantes, los sitios web de los fabricantes y de los reportes de las pruebas realizadas por la FCC. Las casillas en blanco implican que esa información no fue encontrada para ese equipo en particular, pero no significa que el equipo no soporte esa funcionalidad.

²⁸Disponible en versión electrónica en: <http://www.ecfr.gov/>

²⁹Accesible en: <http://www.google.com/get/spectrumdatabase/>

5.5. Dispositivos CR

DATOS GENERALES									
Fabricante	ADAPTRUM	6HARMONICS	CARLSON WIRELESS TECH.	CARLSON WIRELESS TECH.	KOOS TECHNICAL SERVICES	KOOS TECHNICAL SERVICES	MELD TECHNOLOGY	METRIC SYSTEMS CORP.	RUNCOM TECHNOLOGIES
Modelo del equipo	ACRS 2.0 BS y CPE	GWS-3000	Rural Connect BS (indoor)	Rural Connect CPE	AWR	AWR-US-U-100	MT300 Pico Broadcaster	Raptor X Part Number 50739	RNU4000BS Base Station
FCC ID	A2UACRS20F	2AASTGWS-3000	OPA-RC2-BS	OPA-RC2-CPE	ZBGAWR-1	ZBGAWR2UHF	OKVMT300	2ABCU-50739	XYMBTSTVWS-1
Clase de dispositivo	BS/CPE	BS/CPE	BS	CPE	BS/CPE	BS/CPE	ATSC Station	BS	BS
Topología	P-MP	P-P P-MP	P-P P-MP	P-P P-MP	P-MP	P-MP	P-MP	P-P P-MP P-P en cadena Mesh	P-MP
Tasa de datos agregada UL/DL	1 - 16 Mbps (6MHz)	16.5Mbps (6MHz)	16 Mbps (6MHz)	16 Mbps (6MHz)	1.5 o 3.1 Mbps	3.125 Mbps		1 - 6 Mbps	
Latencia del sistema			100-120 ms	100-120 ms					
DATOS DE USO DE ERE									
Tecnología	TDD OFDMA		TDD	TDD	TDD	Half-Duplex simplex		Half-duplex, SF o DF	WIMAX
Modulación	64QAM, 16QAM, QPSK		16QAM, QPSK, BPSK	16QAM, QPSK, BPSK	2-FSK, SOQPSK	SOQPSK	VSB		QPSK , 16 QAM, 64 QAM
Banda de operación	UHF	UHF	UHF	UHF	VHF	UHF	UHF	VHF/UHF	VHF/UHF/SHF
Frecuencia de operación	470 MHz – 698 MHz	473-695 MHz	470-698 MHz (US) 470-790 MHz (ETSI)	470-698 MHz (US) 470-790 MHz (ETSI)	173 to 213 MHz	470-698 MHz	512-596 MHz, 620-698 MHz	174 MHz -216 MHz 470 MHz-599 MHz 620-698 MHz	470-698MHz, 700 – 750MHz, 1.6-1.8GHz, 2.3-2.7GHz, 3.3-3.8GHz, 4.9-5.0GHz, 5.0-5.15GHz, 5.7-5.8GHz, 5.9-6.4GHz
Ancho de banda de canal	6, 7 y 8 MHz	6 MHz, 8 MHz	6 MHz, 8 MHz	6 MHz, 8 MHz	6 MHz	6 MHz			3.5 MHz, 5 MHz, 7 MHz, 8.75 MHz, 10 MHz, 20 MHz
'Channel bonding'								Si	
DATOS DE RADIO-FRECUENCIA									
Potencia de transmisión (mW)	20 dBm	20 dBm	26dBm	25dbm	20 dBm	21dBm	11.52 dBm	Adaptiva 28 dBm / 28.8 dBm	24dBm p/antenna en TVWS band
Diversidad								Tx/Rx diversity MIMO	MIMO A/B STC MRC
Emisión en canal adyacente	-55dBc				~-74dBc				
Conexión antena externa	SMA hembra		F hembra 75 Ohms	F hembra 75 Ohms	N hembra 50 Ohms		F hembra 75 Ohms		
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO									
Dimensiones, sin soporte (cm)	21.59 x 19.05 x 3.81	30.5 x 30.5 x 8.5	42.54 x 26.67 x 7.62	19.05 x 8.25 x 22.86	10.16 x 12.7 x 3.56	8.25 x 13.97 x 4.06	Variable, mín. 2 racks		39 x 24 x 12
Volumen cúbico eq. (L)	1.567	7.907	8.645	3.593	0.459	0.468		0.000	11.232
Peso	1.66 Kg		2.72 Kg	2.49 Kg	0.4 Kg	5.44 Kg			5 Kg
Alimentación	48V DC PoE	DC PoE	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	+9 to 14 VDC	+12 to 24 VDC	DC adapter	+12 to 24 VDC	-36 to -72 VDC
Interfaz de datos/control	10/100 Ethernet					10/100 BT Ethernet	Ethernet Serial USB	10/100/1000 BT Ethernet USB	2x10/100 BT, Optional 1xGE and optical interface SX/LX
Soporte PoE	Si	Si		Si		Si			
Resistencia ambiente		IP67							IP66
Temperatura operación			-30 a 55 °C	-30 a 55 °C	-30 a 55 °C	-30 a 60 °C			-40 °C a 55 °C
Humedad máx operación			95%, non-condensing	95%, non-condensing	95%, non-condensing	95%, non-condensing			95%, non-condensing

Tabla 5.6: Cuadro comparativo de equipos de CR homologados por la FCC

La mayoría de los productos estudiados fueron desarrollados para dar conexión de banda ancha inalámbrica en el formato punto-multipunto, es decir con una radiobase (BS) y varios clientes (CPE). Sin embargo, algunos de ellos soportan topologías diferentes como enlaces punto-punto encadenados o incluso redes *mesh*, lo cual agrega

flexibilidad para el diseño de soluciones.

También se observa que la gran mayoría opera en las bandas de TV de UHF, a excepción de tres de ellos que soportan VHF³⁰. Se hace hincapié en este punto fundamentalmente porque en Uruguay los canales de TV analógicos se encuentran en la banda de VHF³¹. Los dispositivos estudiados que soportan VHF son capaces de funcionar en los canales del 7 al 13.

Se destaca también el dispositivo *MT300 Pico Broadcaster* por estar destinado a una aplicación diferente a la de los demás productos. El MT300 utiliza canales disponibles UHF para transmitir una señal de video en HD a un número ilimitado de receptores de TV digital (que sean capaces de recibir en el estándar americano comité para sistemas avanzados de televisión, en inglés *Advanced Television Systems Committee* (ATSC)) en un radio aproximado de 100 m con línea de vista. El contenido a transmitir puede proveerse a través de una PC conectada a la misma red de área local, en inglés *Local Area Network* (LAN) que el MT300. A modo de ejemplo, una aplicación posible es la de colocar TVs distribuidas a lo largo de un estadio, por las que se transmita avisos publicitarios o avisos al público en general, sin la necesidad de tener una infraestructura cableada en el lugar. Si bien este sistema no es compatible con la norma de TV digital adoptada por Uruguay, vale la pena mencionarlo por aportar un enfoque diferente al uso de los TVWS.

Gran parte de estos equipos utilizan modulación adaptiva para optimizar su desempeño, soportando diferentes variantes de *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) y *Phase Shift Keying* (PSK). Con estas modulaciones, alcanzan tasas de datos del entorno de los 16 Mbps permitiéndoles brindar servicios comparables en velocidad a los de xDSL. Dentro del conjunto analizado, se destaca también la variedad de tamaños, potencia, tipo de alimentación, bandas de frecuencia soportadas, etc., factores que agregan flexibilidad a la hora de diseñar soluciones de CR.

5.5.2. Adaptrum ACRS 2.0

Como se vio en la sección anterior, hay una variedad de fabricantes de equipos de CR operando en la banda de televisión. En esta sección se hará una revista de las características del Adaptrum ACRS 2.0, el más reciente dispositivo del fabricante, a modo de ejemplo de un dispositivo de CR. La elección se basa principalmente en que es uno de los primeros dispositivos en ser certificados por la FCC y ha sido probado en campo: la Ofcom publica en su sitio que dispositivos de esta marca fueron utilizados para el piloto realizado en Oxford para la detección de inundaciones, además de ser utilizado en varios proyectos en Estados Unidos.

Características

La interfaz de aire del ACRS 2.0 se basa en el estándar IEEE 802.22 y ha sido certificado por cumplir la regulación establecida en el CFR. Todos los datos presentados sobre este equipo se obtuvieron de la página del fabricante y de la página de la FCC dedicada a este dispositivo. En la Tabla 5.7 se muestran algunas características técnicas.

³⁰Koos Technical Services AWR, Metric Systems Corp. Raptor X 50739 y Runcom Technologies RNU4000BS WiMax BS.

³¹Por ejemplo, en la ciudad de Montevideo solamente los canales 4, 5, 10 y 12 son utilizados para brindar TV analógica.

5.5. Dispositivos CR

Tecnología	TDD OFDMA
Topología de red	Punto-multipunto
CPEs por BS	Hasta 12
Soporte para movilidad	Nomádica y vehículos hasta 40 m/s
Rango de frecuencias	400 - 1000 MHz
Ancho de banda de canal	Soporta canales TV de 6, 7 y 8 MHz
Velocidad capa 2 (subida+bajada) p/6 MHz	1 Mbps – 16 Mbps
Relación subida/bajada	Ajustable o adaptivo
Potencia de Tx	100 mW
Eficiencia del canal	94 %
Emisión en canal adyacente	-55 dBc
Conexión de antena externa	SMA hembra
Interfaz de datos/control	10/100 Ethernet
Alimentación	48 V PoE
Dimensiones físicas	215.9 x 190.5 x 38.1 (cm)
Peso	1.66 kg

Tabla 5.7: Características ACRS 2.0.

El alcance de estos equipos depende fuertemente del terreno y la forestación, además de la frecuencia del canal utilizado y los niveles de ruido del entorno. El fabricante afirma que en la mayoría de los despliegues realizados el alcance típico sin línea de vista es de entre 3 y 8 km. El máximo alcance reportado por los clientes es de 19 km.

En cuanto a la velocidad, con un canal de 6 MHz la velocidad medida a nivel *Transmission Control Protocol* (TCP) es del entorno de 10 Mbps en buenas condiciones de radio. La modulación es adaptativa y se ajusta de forma automática dependiendo de las condiciones del canal. El fabricante provee además información sobre la sensibilidad del receptor y su desempeño en tres diferentes condiciones de radio como se muestra en la Tabla 5.8.

Nivel de señal	Valor	Velocidad de datos
-98 dBm	3.5 dB	2.7 Mbps (QPSK 1/2)
-90 dBm	11.5 dB	7.1 Mbps (16 QAM 2/3)
-81 dBm	20.5 dB	12 Mbps (64 QAM 3/4)

Tabla 5.8: Sensibilidad en recepción ACRS 2.0.

Instalación

Tanto la radiobase (BS) como la estación de cliente (CPE) tienen el mismo formato físico y deben ser instaladas profesionalmente. En la Fig. 5.19 se muestra un ejemplo de instalación en poste del ACRS 2.0 y su antena³².

³²Las figuras presentadas aquí fueron tomadas de <http://www.adaptrum.com/>.



Figura 5.19: Instalación de Adaptrum ACRS 2.0.

Las interconexiones para la instalación varían según si el ACRS 2.0 es radio base o cliente, como se ilustra en la Fig. 5.20³³.

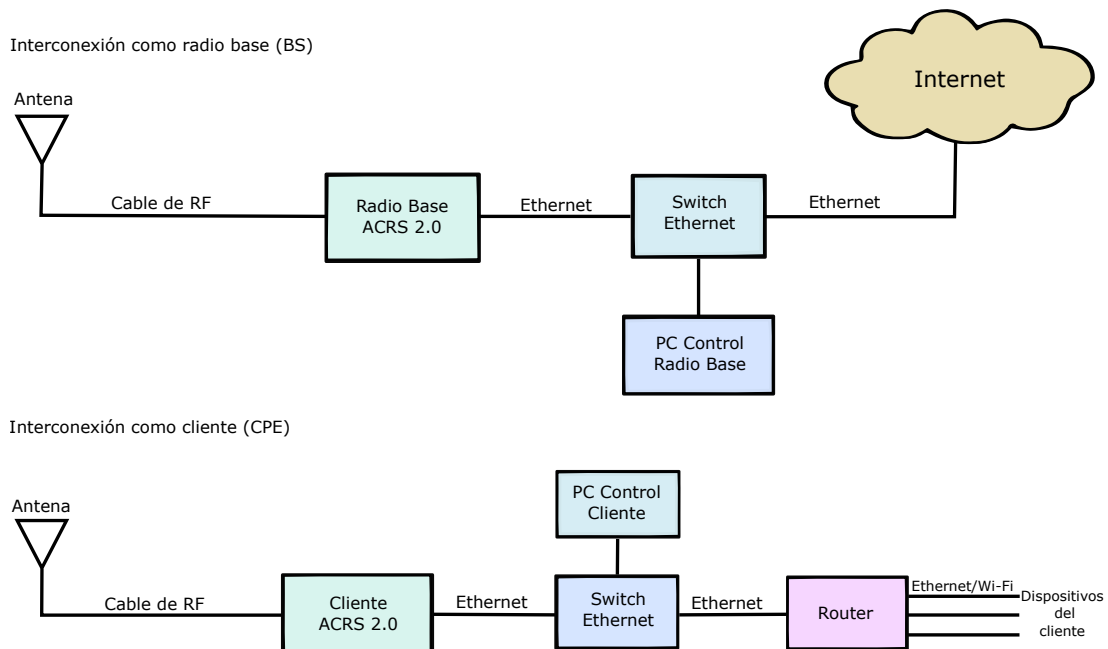


Figura 5.20: Interconexiones.

5.6. Conclusiones

La investigación realizada deja una idea del estado del arte en el tema de radio cognitiva, de cuáles son los enfoques sobre el tema en la actualidad y los actores más importantes para el desarrollo de la tecnología.

El camino que más organizaciones y administraciones han seguido parece ser el de radios cognitivas apoyadas en servicios de base de datos de espectro confiables. Es decir que, el enfoque atómico de un CR capaz de por sí mismo conocer su entorno de radiofrecuencia y operar de forma autónoma parece menos factible por el momento,

³³Fuente: Manual de usuario ACRS 2.0.

dándole lugar al modelo de sensado distribuido a lo largo de la red, con un procesamiento centralizado de la información recabada.

Cabe destacar que si bien el estudio no apunta solamente a las tecnologías de CR para espacios en blanco de televisión (TVWS), el volumen de información disponible referente a esta subclase de CRS es muy superior frente al resto, tanto sea en cuanto a estandarización como experiencias y planes piloto, incluso en equipos desarrollados. En este segmento, las organizaciones no sólo valoran el mejor aprovechamiento del recurso ERE, sino también ven como un aporte significativo el gran alcance de las radiobases o puntos de acceso al utilizar las frecuencias de TV. No sólo la cobertura es más amplia, por ejemplo, con el estándar IEEE 802.22 respecto a las otras tecnologías inalámbricas actuales, sino que se logran mejoras en cuanto a la penetración *indoor* de la señal y la robustez frente a obstáculos y forestación. Se considera como una tecnología que puede aportar a disminuir la llamada “brecha digital” sobre todo en países en desarrollo, donde la banda ancha es un servicio que no se ha masificado aún. Incluso en los países desarrollados se toma en cuenta la tecnología relacionándola con el concepto de “ciudades inteligentes” (como es el caso del proyecto de Ofcom en la ciudad de Glasgow).

En el transcurso de la investigación se encontró que varios actores gubernamentales (FCC, Ofcom o el NICT) así como también importantes empresas del rubro de las tecnologías de la información (como Google, o Microsoft) se encuentran alineados y cooperando para promover el desarrollo de CR.

En lo que refiere a la regulación, se destaca la metodología empleada en la creación de los marcos regulatorios actuales del Reino Unido, realizando una propuesta de regulación y trabajando en conjunto con privados en proyectos piloto que validen la tecnología a lo largo del territorio con aplicaciones innovadoras, para luego y a la luz de los resultados obtenidos habilitar el uso no licenciado de los TVWS.

En cuanto a la parte técnica, se destaca el uso de sistemas OFDM en la mayoría de los estándares estudiados. OFDM aporta la flexibilidad necesaria para la repartición del espectro de manera precisa entre los diferentes CR y al mismo tiempo aporta robustez frente a problemas conocidos en las comunicaciones inalámbricas como el *fading*³⁴. Además, las técnicas OFDM permiten velocidades más altas que un sistema monoportadora funcionando a las bajas frecuencias de las bandas de TV.

Contrariamente a las expectativas los equipos analizados presentan una variedad de prestaciones bastante amplia pese a tratarse de una tecnología relativamente nueva. Los equipos, disponibles comercialmente, permiten dar servicios de banda ancha con velocidades similares a los servicios cableados xDSL a varios kilómetros de la radiobase. Asimismo, hay otros dispositivos que utilizan espectro compartido para aplicaciones diferentes a la de la banda ancha como por ejemplo la transmisión de señales de vídeo HD.

Uno de los principales inconvenientes de los sistemas de CR para los TVWS es la disponibilidad de canales de UHF en las zonas de interés para el desarrollo de dichos sistemas. Los equipos que implementan la norma IEEE 802.22 necesitan de tres canales de 6 MHz vacantes para poder funcionar y esto puede ser un requerimiento muy alto en sitios cercanos a ciudades importantes. Sin embargo, el más importante obstáculo para el desarrollo de los sistemas CR es la falta de una regulación sobre el uso del ERE que incluya la modalidad de uso oportunista de usuarios secundarios del recurso. En

³⁴Este término refiere a las rápidas fluctuaciones de intensidad de señal recibida en intervalos de tiempo cortos causadas principalmente por la interferencia de múltiples copias de la señal transmitida que son recibidas en momentos ligeramente diferentes por el receptor.

Capítulo 5. Radio Cognitiva

particular, el piloto más importante realizado hasta ahora en Uruguay, realizado por Ceibal, expresa que la ausencia de una regulación es una de las principales razones para dejar de considerar por el momento la utilización de CR.

Capítulo 6

Conclusiones

Gestión del Proyecto y Experiencia Adquirida

En lo referente a la gestión del proyecto se considera que los objetivos generales y específicos definidos en la etapa de planificación fueron alcanzados. La definición de objetivos específicos permitió la división del proyecto en las tareas. Las modificaciones realizadas en la planificación de tiempos fueron menores y la dedicación horaria invertida en el proyecto se encuentra dentro de lo previsto. En el estudio de los riesgos se tomó en cuenta la posible falta de disponibilidad de información por lo que no fue necesario realizar modificaciones en la planificación.

Como principales aprendizajes del proyecto *Esopo* se destaca la experiencia generada en la recopilación de información, la elaboración de documentación y el intercambio de conocimientos con personas formadas en aspectos no directamente relacionados con la ingeniería. En este sentido la experiencia ha sido enriquecedora desde varios puntos de vista; la redacción de textos sobre temas técnicos en un lenguaje adecuado para personas de otras especialidades requirió un aprendizaje que probó ser fructífero para poder comunicar de forma eficiente y difundir los conocimientos adquiridos. Queda en evidencia también la importancia de la colaboración interdisciplinaria para el abordaje de temáticas complejas e importantes para la sociedad actual, como lo es la gestión del espectro radioeléctrico y su uso.

Resultados de la Investigación

En cuanto a la gestión del ERE, la investigación permitió conocer las estructuras y mecanismos internacionales y nacionales existentes para tal fin. Se concluye que las administraciones de los diferentes países y las organizaciones regionales e internacionales deben supervisar y administrar el uso del ERE para optimizar la asignación del recurso. Se destaca que el estudio de los antecedentes de la gestión de este recurso en Uruguay permitió comprender con mayor claridad la situación actual. Se espera que esta investigación sea una contribución para una mayor comprensión del marco regulatorio actual y de los aspectos que relacionan este marco con la política a implementar para potenciar el desarrollo de los servicios y beneficios brindados a través del ERE.

Al estudiar el uso actual del ERE en Uruguay, el principal obstáculo encontrado fue la falta de información de asignaciones de frecuencia, es decir la falta del llamado “Registro Nacional de Frecuencia”. Es por eso que la información expuesta aquí acerca del uso del ERE en Uruguay es limitada. La información disponible no se encuentra

ordenada en forma de registro o base de datos. En la planificación estratégica publicada por URSEC para los próximos años se incluye como una línea de acción la publicación de las asignaciones vigentes. Por lo anterior, la información obtenida no permite realizar afirmaciones certeras acerca del grado de utilización de las bandas de frecuencia estudiadas. Sin perjuicio de ello, se puede decir que los problemas de saturación y escasez de ERE que experimentan otros países no afectan actualmente a Uruguay, sin embargo, las tendencias mundiales indican que eventualmente dichos problemas se pueden presentar en la medida que los mecanismos de uso y de gestión no evolucionen para utilizar el recurso de forma más eficiente. Es importante destacar que Uruguay ya ha identificado importantes cantidades de ERE para los servicios de comunicaciones móviles celulares (las IMT), las cuales representan uno de los servicios con mayor crecimiento y relevancia en los últimos tiempos. En el estudio realizado para el caso de las estaciones de TV y FM quedó en evidencia que Uruguay podría contar con espacios en blanco utilizables por nuevas tecnologías de uso oportunista basadas en Radio Cognitiva.

Se estudiaron también nuevas tecnologías diferentes a las tradicionales que permiten que el ERE sea reutilizado geográficamente en mayor medida (MMW o FSL). En general, éstas tecnologías utilizan altas frecuencias del ERE o hasta el espectro visible y posibilitan enlaces más directivos o áreas de cobertura más reducidas, favoreciendo el reuso del recurso al tiempo que liberan bandas de frecuencia menor que se vuelve disponible para otros servicios. Otra tecnología destacada es la de las pequeñas celdas celulares, que permiten aumentar la capacidad de las redes móviles en espacios de alta concentración de usuarios o de difícil acceso en interiores. En este caso también se aumenta el uso del ERE por medio de una reducción del alcance de las radiobases.

La alternativa de uso eficiente del ERE elegida para profundizar fue la Radio Cognitiva (CR). Además de los conceptos básicos de las CR el foco se centró en el estudio de estándares que permitan implementar dicha tecnología, equipos comerciales disponibles y experiencias realizadas por otras organizaciones con sistemas CR. De la investigación se concluyó que el caso más implementado en pilotos y emprendimientos particulares es el de dispositivos CR que se apoyan en bases de datos de utilización de ERE. Las empresas que manejan estas bases de datos deben ser debidamente autorizadas por las administraciones de cada país. Otra tendencia que resultó clara, es la de utilizar las frecuencias conocidas como TVWS tanto para brindar servicios de banda ancha inalámbrica en zonas rurales, como para reforzar la conectividad inalámbrica en proyectos de “ciudades inteligentes”. Otro punto a destacar, evidenciado al estudiar los equipos autorizados por la FCC, es que existen dispositivos CR para aplicaciones no tan ambiciosas como las anteriores pero que igualmente son de utilidad, como por ejemplo el dispositivo *MT300 Pico Broadcaster*.

Un aspecto muy importante es el hecho de que las tecnologías analizadas para el uso oportunista y en carácter secundario del ERE encuentran un obstáculo insalvable en la regulación actual de Uruguay. En las conclusiones de su piloto con tecnologías de CR, Ceibal plantea la preocupación por las limitaciones que esto supone para el desarrollo de la tecnología. En Uruguay se prestan servicios gratuitos de acceso inalámbrico en plazas y centros culturales en los que el uso de CR tendría ventajas importantes dado que, al ser gratuitos, el usuario puede tolerar cierto nivel de fallas en el acceso al medio que se derivan de estar vinculado a un sistema secundario sin compromiso de calidad de servicio.

En la actualidad los fabricantes de equipos han podido acumular algunos años de experiencia, en algunos casos sacando al mercado una segunda generación de sus líneas de productos de Radio Cognitiva y posiblemente las aplicaciones de estas tecnologías

aumenten a medida que nuevos planes piloto y experiencias a lo largo del mundo concluyan. Necesariamente debe realizarse ajustes al marco regulatorio vigente para que se pueda utilizar este tipo de tecnología en el país.

Por ejemplo, las bandas de TV han sido habilitadas para el uso oportunista y libre de licenciamiento en otras partes del mundo como EE.UU. y Reino Unido con buenos resultados y varios de los estándares de Radio Cognitiva actuales¹ soportan la operación en dichas bandas. En este sentido se resalta la estrategia utilizada por Ofcom, comentada en la Sección 5.4.3, para de forma gradual favorecer el interés de la industria a través de una propuesta de regulación con una consulta abierta y posteriormente un llamado a interesados en desarrollar planes piloto de tecnologías TVWS.

Trabajo a Futuro

El proyecto *Esopo* buscó ser un punto de partida para un estudio más profundo de la temática. El alcance del proyecto determinó que algunos temas no se abordaran con la misma profundidad que otros, por ejemplo, de las alternativas para un uso más eficiente del ERE se centró mayormente la atención en la Radio Cognitiva. De cara al futuro, cada uno de estos temas pueden profundizarse en mayor medida dado que muchos de ellos son tan amplios que podrían constituir un proyecto de investigación particular.

Dada la velocidad de los cambios que se producen y se esperan tanto en los requerimientos de los usuarios, como en los modelos de negocio y gestión del recurso, los nuevos estándares y tecnologías y regulaciones al respecto, surge casi naturalmente la idea de crear un “Observatorio de Espectro” en Uruguay, posiblemente en el ámbito académico de la UDELAR. El cometido del observatorio bien podría ser el de estudiar el uso real que se le da al ERE, revisar la regulación vigente y formular propuestas para su modificación o actualización, estudiar nuevas tecnologías o normas que se publiquen en lo referente al tema y su factibilidad técnica en el país, difundir experiencias exitosas de implementación de nuevas tecnologías en el mundo, entre otros.

Finalmente, la página web de difusión elaborada a partir del proyecto actualmente se encuentra en: <https://esopouy.wordpress.com/>. Este grupo se compromete a migrar la página hacia un servidor de la FING en un futuro cercano.

¹En particular los tres estándares analizados en la Sección 5.3.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice A

Espectro Radioeléctrico

A.1. Introducción

El concepto de espectro radioeléctrico (ERE) es fundamental en materia de comunicaciones inalámbricas. Se trata de un recurso intangible por lo que su definición puede resultar un tanto compleja. El poder sintonizar una radio, comunicarse atravesando fronteras en segundos, responder un correo electrónico mediante nuestro teléfono inteligente (o *smartphone*), entre otras acciones, que muchos en el mundo actual consideran de rutina, necesitan del espectro radioeléctrico para funcionar. El desarrollo tecnológico que actualmente nos rodea, crece en base a este recurso que se puede calificar de finito, compartido y escaso.

No se puede hablar de ERE sin mencionar el concepto físico fundamental que existe detrás de él, el concepto de onda electromagnética (OEM). En esta sección se describe brevemente el marco científico-histórico que llevó al descubrimiento de la onda electromagnética y sus aplicaciones, se detallan las características principales de estas ondas para entender porque las usamos cuando hablamos de comunicaciones inalámbricas.

Se define aquí el ERE y sus principales características. Se introducirán los conceptos de modulación y conversión de frecuencia, sus fundamentos y su importancia en las radiocomunicaciones.

A.2. Un Poco de Historia

Electricidad y Magnetismo: Electromagnetismo

La electricidad y el magnetismo fueron dos conceptos que se desarrollaron independientemente uno del otro hasta comienzos del siglo XIX. El conocimiento científico de la relación entre electricidad y magnetismo dio lugar, inmediatamente, a aplicaciones tecnológicas importantes como la radio y la televisión, luego vinieron los teléfonos celulares (y los *smartphones*), entre otras aplicaciones, aún hoy se siguen descubriendo nuevas aplicaciones y nuevas tecnologías que revolucionan el mundo de las comunicaciones a distancia.

En 1820 el físico y químico danés Hans Christian Ørsted descubre los primeros efectos de la acción magnética de las corrientes eléctricas. Ørsted advirtió que una aguja imantada colocada en las proximidades de un conductor por el que circula una corriente eléctrica sufre desviaciones, hecho que, de modo inmediato sugirió la existencia de interacción entre electricidad y magnetismo.

Apéndice A. Espectro Radioeléctrico

Poco tiempo después el físico francés André-Marie Ampère fue capaz de elaborar una amplia base teórica para explicar este nuevo fenómeno. Esta línea de trabajo le llevó a formular la ley empírica del electromagnetismo, conocida como Ley de Ampère (1825), que describe matemáticamente la fuerza magnética existente entre dos conductores por los cuales circula corriente eléctrica.

Basándose en los experimentos de Ørsted, el científico británico Michael Faraday en 1831 comprueba que un campo magnético que varía con el tiempo produce corrientes eléctricas y campos eléctricos, el físico ruso Heinrich Lenz complementa la investigación de Faraday (1833).

A partir de los estudios previos, el físico británico James Clerk Maxwell buscaba justificar matemáticamente conceptos físicos descritos hasta ese momento, con este objeto, logró introducir el concepto de onda electromagnética, que permite una descripción matemática adecuada de la interacción entre electricidad y magnetismo mediante las conocidas ecuaciones de Maxwell, lo que posteriormente supuso el inicio de la era de la comunicación rápida a distancia.

Su teoría sugirió la posibilidad de generar ondas electromagnéticas en el laboratorio, hecho que corroboró Heinrich Hertz (físico alemán) en 1887, Hertz logró transmitir ondas electromagnéticas entre un oscilador (antena emisora) y un resonador (antena receptora), confirmando experimentalmente las teorías del físico James C. Maxwell. Con el descubrimiento de estas ondas que viajan en el espacio a la velocidad de la luz, se ideó la forma de producirlas y recibirlas a través de dispositivos que aprovecharan los fenómenos eléctricos que la física había descubierto.

La unificación del magnetismo y la electricidad, origina la rama de la física que actualmente se conoce como electromagnetismo.

Onda electromagnética y comunicación a distancia

El matemático y físico ruso Alexander S. Popov, al reconocer la importancia del descubrimiento de Hertz en relación a las ondas electromagnéticas, comenzó de inmediato a estudiar métodos para la recepción de dichas ondas a larga distancia. Fue el primero que utilizó una antena receptora, por lo que se le considera su inventor.

Pero, no fue hasta principios del siglo XX, que el ingeniero eléctrico italiano Guillermo Marconi revolucionó el mundo de la comunicación a distancia. Marconi basado en el estudio de las ondas electromagnéticas por parte de Hertz y en el concepto de antena introducido por Popov, luego de varias experiencias logró con éxito enviar una señal entre Europa y América en 1901, lo que sería el origen de la telegrafía sin hilos [41].

Hasta ese momento los medios de comunicación dependían del tendido de un cable para funcionar, como es el caso del telégrafo y el teléfono. La radio (ó Telegrafía sin hilos) fue el primer invento que hizo posible la comunicación sin cables, esto dio lugar al uso de la radio como instrumento de comunicación, por ejemplo, entre barcos. En 1906 el canadiense Reginald Fessenden lleva adelante la primera emisión que se realizó inalámbricamente usando la radiotelefonía¹.

Conforme creció el conocimiento del concepto de onda electromagnética y sus características, ha crecido la tecnología a la cual se aplican estos conceptos. Hoy en día son diversas las aplicaciones de estas ondas como ser en materia de televisión analógica y digital, radar, sistemas de navegación, aeronáutica, comunicaciones móviles y comunicación espacial, entre otras.

¹Más información sobre la historia de las telecomunicaciones se puede encontrar en [70] y [71].

A.3. Ondas Electromagnéticas

El conocimiento que se tiene hoy en día del ERE es muy amplio y sus aplicaciones son cada vez más numerosas. Las OEM y sus aplicaciones nos brindan servicios todos los días, estas ondas son invisibles e imperceptibles en nuestra vida diaria. Actividades que se han vuelto cotidianas tienen como base científica las OEM, la comunicación como la conocemos hoy se hizo parte de nuestras vidas e incluso necesaria, para seguir el ritmo vertiginoso en el que vivimos.

En la edición 348 del 13 de abril de 1967, de la Enciclopedia Estudiantil [42] uno de los artículos es dedicado a las Ondas electromagnéticas e inicia su redacción con el siguiente texto

“Puedo ver a través de los cuerpos y dirigir mi mirada más allá de los obstáculos materiales... Puedo observar con toda claridad paisajes muy lejanos y distinguir objetos distantes a cualquier hora del día y de la noche y con cualquier tiempo... Puedo hablar y hacer que se vean simultáneamente personas situadas hasta a miles de kilómetros de distancia una de la otra...”

¿ Quién es el que así habla? ¿ Un Dios? No, es el hombre. Parecen poderes mágicos, que los magos de las narraciones antiguas concedían a los héroes invencibles. Son, en cambio, conquistas del hombre moderno. Los ‘magos’ que las han realizado son los científicos. Y en particular, las causantes de tales ‘Poderes mágicos’ son las ondas electromagnéticas.”

Para introducir el concepto de OEM se comienza por describir que es una onda y sus principales características.

A.3.1. El Concepto de Onda

Formalmente una onda es una perturbación que se propaga, que transporta energía, pero no transporta masa. Se pueden distinguir dos tipos básicos de ondas [43].

- **Ondas Mecánicas:** Estas ondas necesitan un medio material para propagarse, este medio puede ser gaseoso (aire), líquido (agua) o sólido (cuerdas, resortes, suelo, pared). Un ejemplo de estas ondas son las ondas producidas al dejar caer una piedra en el agua o al agitar una cuerda (Fig. A.1).
- **Ondas Electromagnéticas:** A diferencia de las anteriores, estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden propagarse en el vacío y surgen de la interacción entre electricidad y magnetismo como se verá más adelante. Son ejemplos de estas ondas las ondas de radio, de TV, microondas, radiación infrarroja, visible o ultravioleta; Rayos X y gamma.

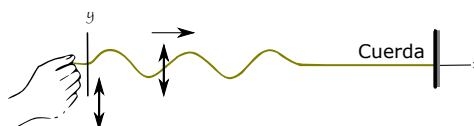


Figura A.1: Onda mecánica propagándose en una cuerda².

Las ondas pueden ser transversales o longitudinales. En las primeras, la excitación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda; en las segundas, la excitación

²Imagen elaborada en base a figuras descargadas de Internet.

Apéndice A. Espectro Radioeléctrico

es paralela a la dirección de propagación de la onda. En la Fig. A.2 se observan ambos tipos de ondas, al perturbar una cuerda en dirección vertical se ve como se propaga una onda en dirección horizontal (Onda Transversal). Al perturbar un resorte en dirección horizontal, se puede ver el desplazamiento de la onda también horizontal (Onda Longitudinal).

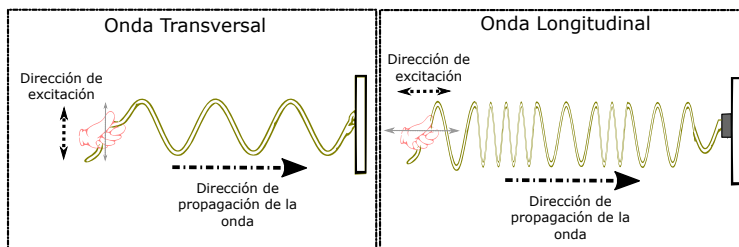


Figura A.2: Onda longitudinal y onda transversal³.

Cualquiera que sea el medio que transmite las ondas, aire, una cuerda tensa, un cable eléctrico o el vacío, todos los movimientos ondulatorios están regidos por una ecuación denominada ecuación de ondas. La parte matemática del problema consiste en resolver esta ecuación imponiendo las condiciones adecuadas al caso en estudio e interpretar su solución apropiadamente. A pesar de la diversidad de las ondas hay muchas características que son comunes a todas ellas.

Para introducir al lector las características de las ondas, a continuación se describen las características básicas de una onda particular (a la cual se denomina periódica), más adelante se aplicarán estas definiciones a las ondas objeto de esta sección: las OEM⁴.

A.3.2. Crestas Valles y Amplitud de una Onda

Previo a la definición de estos conceptos, se define la posición de equilibrio, es aquella en la que no existe ningún tipo de oscilación (reposo). En una onda transversal, las crestas indican el punto más alejado de la posición de equilibrio, suele representarse, por convención, como el punto que se dibuja en la parte de arriba de la onda. El valle también es el punto más alejado de la posición de equilibrio de una onda, pero en el lado opuesto al lugar donde se ubican las crestas. Por lo visto entonces, una onda es una sucesión de crestas y valles como lo ilustra la Fig. A.3 (En una onda longitudinal el monte o cresta recibe el nombre de zona de compresión y el valle se denomina rarefacción).

La amplitud de una onda puede definirse como la distancia vertical entre una cresta y un valle. Ésta es medida en forma perpendicular a la línea que representa la posición de equilibrio con respecto al medio, tal como lo indica la Fig. A.3. La amplitud se mide en unidades de longitud, metro (m) cuando se trata de una onda mecánica, en las ondas acústicas en pascales (Pa) o en decibelios (dB) y en las ondas electromagnéticas en voltios/metro (v/m).

³Imagen elaborada en base a figuras descargadas de Internet.

⁴Bibliografía complementaria, concepto de onda [72].

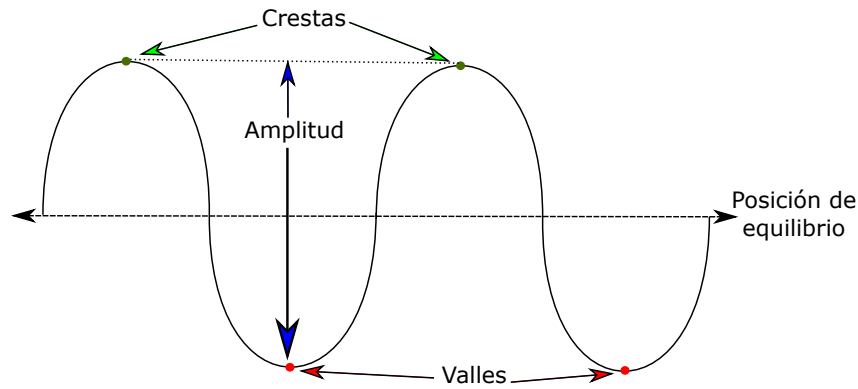


Figura A.3: Crestas, valles y amplitud de una onda periódica.

A.3.3. Longitud de Onda Frecuencia y Velocidad de Propagación

La longitud de onda es la distancia mínima entre dos puntos de la onda que se encuentran en el mismo estado de vibración, esto ocurre por ejemplo, entre dos crestas consecutivas o dos valles sucesivos. La longitud de onda es representada por la letra griega λ (lambda) y es medida en metros (m).

La frecuencia se representa con la letra f y es el número de vibraciones que se producen en una unidad de tiempo. O sea cuántas crestas o valles se repiten en una unidad de tiempo. Si la unidad de tiempo es un segundo entonces la frecuencia se mide en Hertz (Hz).

En el caso indicado en la Fig. A.4 la frecuencia es de 2 ciclos por segundo, esto es 2 Hz. Como se observa, se pueden contar 2 crestas (o 2 valles) en un periodo de tiempo de un segundo.

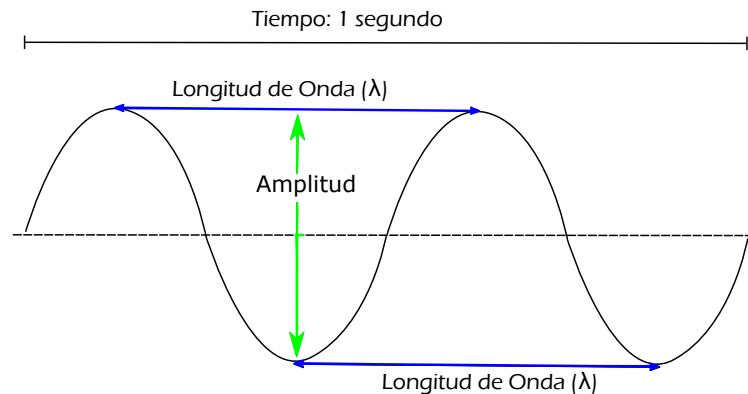


Figura A.4: Longitud de onda y frecuencia en una onda periódica.

La longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) son dos parámetros inversamente proporcionales y relacionados mediante la velocidad de propagación. La velocidad de propagación es la velocidad con la que la onda viaja, se representa con la letra v . La ecuación que vincula estos tres parámetros es $v = f\lambda$.

Entonces, la frecuencia indica cuan rápidas son las oscilaciones o vibraciones de la onda, mientras que la velocidad de propagación es una medida de la velocidad a la que la onda se propaga en el medio. En la Fig. A.5 se muestra un ejemplo de la relación entre longitud de onda y frecuencia.

Apéndice A. Espectro Radioeléctrico

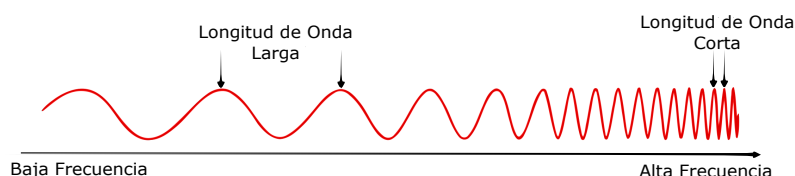


Figura A.5: Relación entre longitud de onda y frecuencia.

Finalmente, el período de una onda es el inverso de la frecuencia, si la frecuencia es medida en Hertz (Hz) entonces, el período es medido en segundos (s).

A.3.4. Ancho de Banda

Generalmente una onda o señal, de cualquier tipo, suele estar compuesta por la suma de ondas de distinta frecuencia y usualmente dicha onda o señal es de amplitud variable. La Fig. A.6, muestra un ejemplo de una onda compuesta.

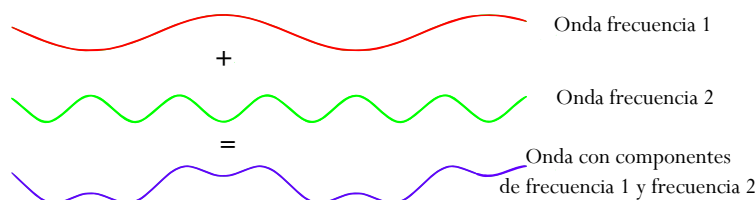


Figura A.6: Forma de onda compuesta.

Dentro de una señal, de cualquier tipo (audio, vídeo, etc.), normalmente hay componentes de muchas frecuencias. Al rango de frecuencias donde se encuentra la señal se le llama ancho de banda de la señal.

Las señales pueden representarse en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, al hablar de telecomunicaciones es usual utilizar la representación en frecuencia ya que proporciona información sobre el ancho de banda en el que esta contenida la señal, el cual será de interés a la hora de transmitir dicha señal.

Para cada señal se tiene una representación temporal que determina la amplitud de la señal para cada instante de tiempo y una función en el dominio de la frecuencia que especifica las frecuencias constitutivas de la señal, esta ultima representación es llamada espectro de la señal. En la Fig. A.7 se pueden observar ambas representaciones de una señal.

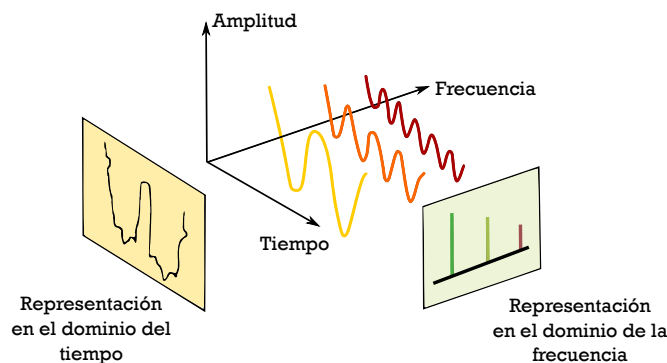


Figura A.7: Representación de una señal en el tiempo y en la frecuencia⁵.

Como se puede ver en la Fig. A.7, la señal en frecuencia tiene tres componentes de frecuencias distintas. El análisis de las señales en frecuencia es amplio, con un profundo contenido matemático, no se pretende en este texto adentrarse en la base teórica matemática detrás del estudio de señales en frecuencia.

Cabe aclarar aquí que el concepto de ancho de banda desarrollado anteriormente refiere al ancho de banda de una señal y no del ancho del canal de comunicaciones, este último puede definirse como la diferencia entre la frecuencia máxima y la mínima que pueden “pasar” por ese canal. El ancho de banda del canal debe ser tal que permita “pasar” sin afectar, todas las frecuencias componentes de la señal que se desea transmitir.

Se han visto los conceptos generales de las ondas, se centrará la atención a continuación en las OEM.

A.3.5. Onda Electromagnética

Como se dijo anteriormente una OEM puede propagarse en el vacío (a la velocidad de la luz: $c = 300000 \text{ km/s}$) sin necesidad de que exista un medio físico como el aire o el agua para el transporte de energía. Las OEM son tridimensionales (por su número de direcciones de propagación) y transversales. En la Fig. A.8 se puede ver un esquema de una OEM.

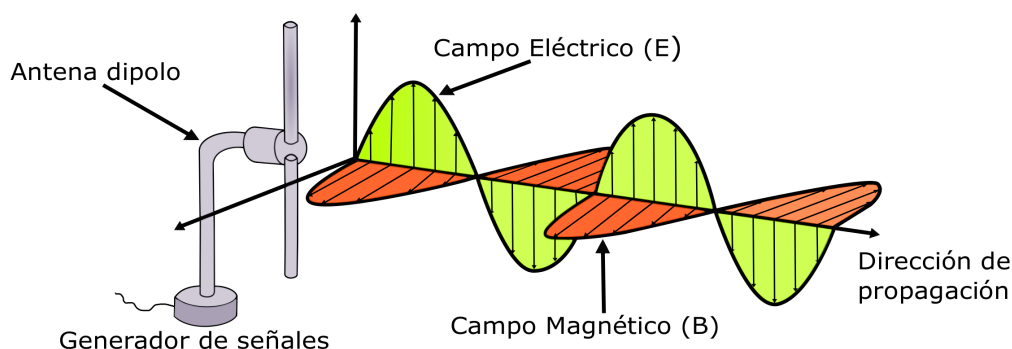


Figura A.8: Onda electromagnética⁶.

La idea principal es que si se hace oscilar cargas eléctricas entre los extremos de una antena, se generan un campo eléctrico E y un campo magnético B , que interactúan entre sí. Las OEM son el resultado de la interacción de estos dos campos.

Las OEM son una forma de transportar señales por un medio como ser el aire o por el vacío, de aquí su gran importancia. Se puede emitir una señal desde un transmisor (donde se genera la onda), enviarla hacia una antena transmisora, propagar la onda generada por el aire hacia una antena receptora, en la antena receptora se recibe la onda y se convierte en una señal eléctrica hacia un receptor (donde se recupera la onda). Esta onda contiene información y una vez recibida por el receptor, se puede procesar esa señal y obtener la información que se envió [44].

Como sabemos, por el aire viajan muchas ondas, ¿Cómo es que se diferencian? ¿Cómo es que, de todas las ondas que viajan por el aire la antena receptora distingue

⁵Imagen elaborada en base a figuras descargadas de Internet.

⁶Imagen elaborada en base a figuras descargadas de Internet.

la OEM que contiene la información transmitida? Es aquí donde juega el papel más importante una de las características de las ondas: su frecuencia, es esta la característica que permite distinguir las OEM.

En la siguiente sección se describe el espectro electromagnético que es el conjunto de todas las frecuencias posibles en las que se produce radiación electromagnética, la radiación se puede definir como energía que viaja en las ondas y se dispersa a lo largo de la distancia⁷.

A.4. Espectro Electromagnético y Espectro Radioeléctrico.

El espectro electromagnético se puede organizar de acuerdo con la frecuencia correspondiente de las ondas que lo integran, o análogamente, de acuerdo con sus longitudes de onda. Hacia un extremo del espectro se agrupan las ondas de frecuencias mas bajas y longitudes de onda más largas, como las correspondientes a frecuencias de sonidos que puede percibir el oído humano, mientras que en el otro extremo se agrupan las ondas más cortas y de mayor frecuencia, como las pertenecientes a las radiaciones gamma y los rayos cósmicos. La diferencia existente entre un grupo de ondas y otras dentro del espectro electromagnético es su frecuencia en Hertz (Hz). Y dada la relación matemática con la longitud de onda, también se pueden diferenciar según su longitud en metros (m) [45].

El espectro electromagnético, como se indicó anteriormente es el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce radiación electromagnética. El límite teórico inferior del espectro electromagnético es 0 Hz (ya que no existen frecuencias negativas) y el teórico superior es infinito.

En la Fig. A.9 se muestran las distintas regiones del espectro en escala logarítmica. En esta escala las ondas de radio y microondas ocupan un amplio espacio y si bien, así podemos ver todas las regiones del espectro, el tamaño relativo de las distintas regiones está muy distorsionado⁸.

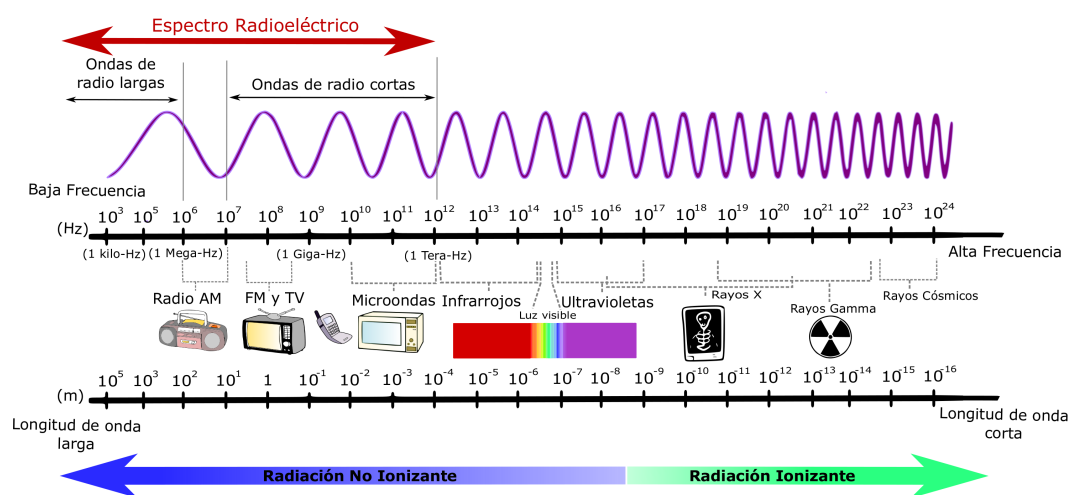


Figura A.9: Espectro electromagnético⁹.

⁷Lecturas complementarias sobre ondas electromagnéticas se encuentran en [73].

⁸La representación en escala logarítmica facilita la visualización de un rango tan amplio de frecuencias.

A.4. Espectro Electromagnético y Espectro Radioeléctrico.

Como se ha visto anteriormente, la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) se relacionan de forma inversamente proporcional, mientras una magnitud aumenta la otra disminuye, mediante la relación $c = f\lambda$ donde c es la velocidad de la luz a la cual se propaga una onda electromagnética. La Fig. A.9 muestra la relación entre ambas a lo largo del espectro electromagnético. No todas las ondas electromagnéticas tienen el mismo comportamiento, por ello el espectro electromagnético se divide convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia. Existen una amplia variedad de aspectos a considerar para establecer las diferentes bandas del espectro electromagnético y para utilizar las diferentes frecuencias para distintas aplicaciones. Entre los elementos a tener en cuenta se encuentran:

- **Atenuación con la frecuencia:** A menos frecuencia generalmente se tiene menor atenuación de la señal y por lo tanto mayor alcance.
- **Factores climatológicos:** Las diferentes frecuencias son afectadas de forma distinta por factores como la lluvia, niebla, calor, etc.
- **Comportamiento frente a obstáculos:** Mecanismos de propagación.
- **Comportamiento frente a las capas de la atmósfera:** Las distintas frecuencias no se comportan igual en la ionosfera o en la troposfera, e incluso hay ondas que se propagan por la superficie terrestre. Existen así diversos modos de propagación de las ondas.

El medio de transmisión influye en la propagación de las ondas electromagnéticas¹⁰ mediante fenómenos físicos como reflexión, refracción, difracción, dispersión o absorción, entre otros [51]. Sus efectos dependen del medio (tipo de terreno, condiciones y capas de la atmósfera), así como de la frecuencia de la onda, entre otros factores. Por ejemplo, a partir de ciertas altas frecuencias las ondas pueden atravesar las capas de la atmósfera, dando lugar a comunicaciones con el espacio exterior empleando satélites espaciales para comunicaciones [52].

El espectro radioeléctrico (ERE) es la parte del espectro electromagnético utilizada principalmente para radiocomunicaciones, dado que no todas las ondas electromagnéticas tienen las características necesarias para ser utilizadas en comunicaciones inalámbricas, solo las que se encuentran en el rango de frecuencias por debajo de 3000 GHz forman el denominado espectro radioeléctrico (ERE)¹¹.

Formalmente y según la UIT el rango de frecuencias que comprende el espectro radioeléctrico es de 0 Hz a 3000 GHz. El RR de la UIT establece las llamadas bandas de frecuencia¹² (Tabla A.1.).

⁹Imagen elaborada en base a figuras descargadas de Internet.

¹⁰<http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiacion-y-propagacion/contenidos/apuntes/presentaciones/rdpr3.pdf>

¹¹http://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf

¹²Artículo 2 - Sección I del RR

Apéndice A. Espectro Radioeléctrico

Núm. banda	Símbolos (en inglés)	Nombre (en inglés)	Rango de frecuencias ¹³	Subdivisión métrica	Abrev. métricas
4	VLF	Very low frequency	3 a 30 kHz	Ondas Miriamétricas	B.Mam
5	LF	Low frequency	30 a 300 kHz	Ondas Kilométricas	B.km
6	MF	Medium frequency	300 a 3,000 kHz	Ondas Hectométricas	B.hm
7	HF	High frequency	3 a 30 MHz	Ondas Decamétricas	B.dam
8	VHF	Very high frequency	30 a 300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	Ultra high frequency	300 a 3,000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	Super high frequency	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	Extremely high frequency	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12			300 a 3,000 GHz	Ondas decimilimétricas	B.dmm

Tabla A.1: Bandas de frecuencia.

El rango teórico de frecuencias está limitado en la práctica. Inferiormente por 9 kHz, estas frecuencias tienen baja capacidad para transportar información y en ellas se producen interferencias considerables, por lo que no se suelen emplear. Por otra parte, las frecuencias más altas del espectro están “poco exploradas”, esto es, la tecnología comercial disponible en la actualidad no es capaz de utilizar de forma efectiva dichas frecuencias. Por tanto, en la práctica, el espectro radioeléctrico se reduce a un recurso que comprende las frecuencias desde 9 kHz hasta 275 GHz. Existen frecuencias fuera de este rango regulado por UIT (por ejemplo, en infrarrojos y en luz visible, frecuencias del orden de centenas de THz) que se emplean también para radiocomunicaciones.

Son muchas las consideraciones a tener en cuenta a la hora de determinar el conjunto de frecuencias aptas para determinado servicio de radiocomunicación. En la Fig. A.10 se muestra como varían la atenuación, la capacidad, la cobertura (alcance) y el coste de equipos con las diferentes bandas de frecuencia.

¹³En los rangos de frecuencia se encuentra excluido el límite inferior, pero incluido el límite superior.

A.4. Espectro Electromagnético y Espectro Radioeléctrico.

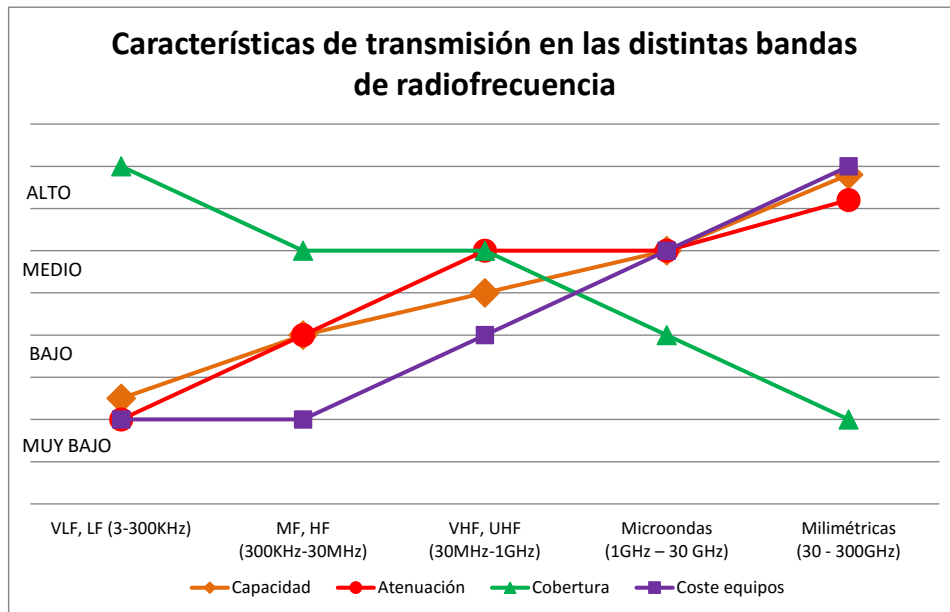


Figura A.10: Características bandas de radiofrecuencia.

Observando la Fig. A.10, se hace notorio que algunas bandas de frecuencia pueden ser más deseables o codiciadas que otras, para ser utilizadas por determinado tipo de servicio, debido a sus características. A bajas frecuencias se tiene bajo coste en los equipos, mayor cobertura, baja atenuación pero baja capacidad para transmitir información. A altas frecuencias se tiene todo lo contrario.

Los mecanismos por los que se propaga una onda, también dependen de la frecuencia de dicha onda, entre otros factores como ser las características eléctricas del terreno y de la atmósfera. Algunos de los mecanismos de propagación de una onda son:

- **Propagación tierra-ionósfera:** las ondas electromagnéticas se propagan dentro del espacio contenido entre la ionósfera y la superficie terrestre.
- **Ondas de superficie:** En este tipo de propagación, las ondas siguen el contorno de la superficie terrestre.
- **Propagación ionosférica:** las diferentes capas de la ionosfera desvían, mediante refracción a la onda electromagnética incidente, generalmente la señal es propagada nuevamente hacia la tierra.
- **Propagación con “línea de vista”:** También denominada LOS (*line-of-sight*)
- **Propagación troposférica:** se basa en reflexiones ocasionadas por discontinuidades debidas a variaciones turbulentas de las constantes físicas de la troposfera (concretamente del índice de refracción)

La Fig. A.11 muestra esquemáticamente los modos de propagación mencionados.

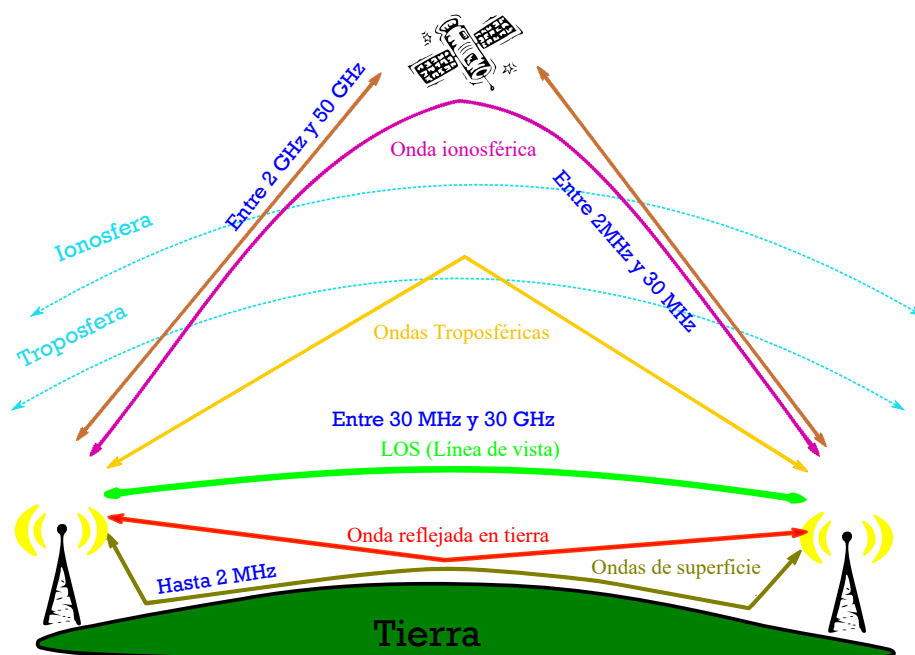


Figura A.11: Mecanismos de propagación de una onda¹⁴.

En la Tabla A.2 se muestran las bandas de frecuencia, sus características de propagación y algunos de los servicios que generalmente se encuentran en cada una de ellas [1].

Banda de Frecuencia	Características de Propagación	Usos Típicos
Frecuencia muy baja, en inglés <i>Very Low Frequency</i> (VLF)	Propagación por onda de superficie (terrestre) con baja atenuación día y noche. Dado el escaso ancho de banda en este rango, únicamente se emplean señales muy simples con muy poca transmisión de datos. La transmisión en esta banda es a velocidades muy bajas (no es posible transmitir señales de audio). Las ondas VLF pueden penetrar el agua a una profundidad de entre 10 y 40 metros.	Enlaces de radio a gran distancia, navegación, comunicación submarina. También se puede utilizar para radiobalizas y para señales horarias. Por debajo de 9 kHz, las frecuencias no están reguladas internacionalmente, por lo que pueden ser utilizadas por algunos países como frecuencias sin licencia.

¹⁴Fuente: <http://es.slideshare.net/nica2009/lecture-3-analisis-radioprop-p1>

A.4. Espectro Electromagnético y Espectro Radioeléctrico.

Baja frecuencia, en inglés <i>Low Frequency</i> (LF)	Sus características de propagación son similares a la banda VLF (poca atenuación, largas distancias, penetración en el agua, propagación por onda de superficie), aunque sus características son menos estables durante el día.	Sistemas de ayuda a la navegación marítima y aeronáutica (radio-faros o radio-balizas), señales horarias, servicios meteorológicos y sistemas de radiodifusión (radio AM). También se emplea para comunicaciones submarinas, servicios de radioaficionados y técnicas de etiquetado RFID de identificación por radiofrecuencia.
Frecuencia media, en inglés <i>Medium Frequency</i> (MF)	Se produce propagación por onda de superficie y la propagación por onda ionosférica prevalece en la noche, obteniéndose grandes distancias. Atenuación elevada durante el día y baja durante la noche.	Servicios marítimos y aeronáuticos. Sistemas de seguridad ante emergencias marítimas. Radiotelefonía y comunicaciones marítimas cercanas a la costa. También se emplea en servicios de radioaficionados en AM.
Alta frecuencia, en inglés <i>High Frequency</i> (HF)	Propagación por onda ionosférica, aunque el alcance de la señal depende de muchos factores (entre ellos la hora del día y la estación del año).	Servicio de radioaficionados. Comunicaciones de media y larga distancia. Comunicación militar. Telefonía.
VHF	Las características de propagación en esta banda la hacen adecuada para comunicaciones terrestres de corta distancia (en general, la ionosfera no refleja las ondas VHF). Ocasionalmente propagación inosférica o Troposférica.	Radiodifusión FM. Sistemas de ayuda al aterrizaje. Radionavegación aérea y control de tráfico aéreo. Comunicación entre buques y control de tráfico marítimo (radar). Servicio de radioaficionados. Televisión analógica.
UHF	Propagación por onda espacial troposférica en línea de visión. El tamaño de las longitudes de onda en UHF permite antenas muy adecuadas para dispositivos portátiles, lo que junto con las características de propagación hacen a esta banda ideal para servicios móviles. Posibilidad de enlaces por reflexión o a través de satélites artificiales.	Servicios de televisión digital terrestre (TDT). Televisión UHF. Servicios de telefonía móvil terrestre (GSM, UMTS, etc.). Tecnologías de redes inalámbricas como Wi-Fi (WLAN) o Bluetooth (WPAN).

SHF	Propagación por onda trayectoria óptica directa.	Radares. Enlaces ascendentes y descendentes de satélites. Radioenlaces del servicio fijo y algunas variantes de tecnologías inalámbricas como Wi-Fi 802.11n.
EHF	Esta banda es muy afectada por la atenuación atmosférica y las condiciones climatológicas.	Se utiliza principalmente en radioastronomía y comunicaciones con satélites (meteorología, exploración de la Tierra, etc.). También se emplea en radiocomunicaciones de corto alcance.

Tabla A.2: Características bandas de frecuencia.

Lo que se ha visto hasta aquí nos ha llevado desde el concepto de onda a la descripción del espectro radioeléctrico y las principales características de las ondas electromagnéticas en las bandas convencionales de radiofrecuencia. Pero para transmitir una señal mediante ondas de radio no alcanza con tomar dicha señal, transformarla en una señal eléctrica y colocarla en una antena para su transmisión por el aire utilizando una porción del espectro, es necesario adaptar dicha señal para que pueda ser enviada, un proceso importante en la adaptación de la señal que contiene la información es llamado modulación. Para finalizar esta sección se verá que es modular y porque es necesario en materia de radiocomunicaciones. Para fijar conceptos se verá como ejemplo de modulación, la conversión de frecuencia.

A.5. Modulación y Conversión de Frecuencia

La transmisión de información de cualquier tipo, puede parecer simple pero es muy compleja teniendo en cuenta la diversidad de escenarios en los que puede ocurrir¹⁵.

Se comienza por definir algunos términos que serán útiles para explicar estos conceptos. Cuando se habla de señal se refiere a señales eléctricas, aunque en su forma original pueden ser de otra naturaleza como por ejemplo, acústicas, mecánicas u ópticas. Éstas pueden convertirse a señales eléctricas mediante transductores¹⁶ adecuados.

En la Fig. A.12 se puede ver un esquema simplificado de un sistema de comunicación donde los tres elementos principales son el transmisor, el canal de comunicación y el receptor.

¹⁵Se puede consultar información adicional en <http://iaci.unq.edu.ar/materias/telecomunicaciones/apuntes.htm>

¹⁶Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. Por ejemplo, un micrófono convierte la energía acústica en eléctrica.

A.5. Modulación y Conversión de Frecuencia

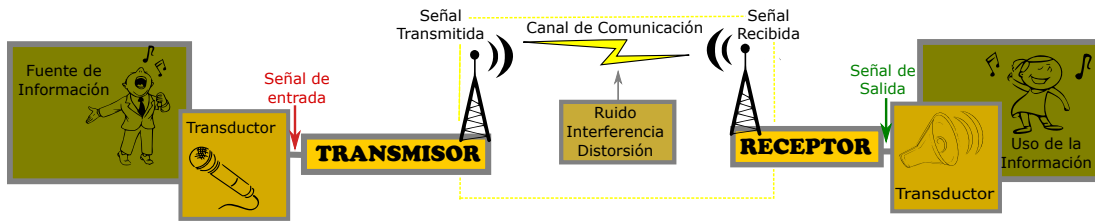


Figura A.12: Esquema de un sistema de comunicación simplificado¹⁷.

El transmisor es el encargado de tomar la señal de entrada y producir la señal a transmitir adecuando la señal de entrada al canal de comunicación, la mayoría de las veces dicha adecuación implica que el transmisor debe modular la señal. Luego de pasar por el canal de comunicación donde la señal es afectada de diversas formas (por ejemplo, se introduce interferencia y ruido que contamina la información que se quiere transmitir), llega al receptor. Las operaciones realizadas en el receptor pueden incluir el filtrado pasabanda (para eliminar otras señales y ruido que no se encuentran en la banda utilizada para transmitir), amplificación (para compensar la pérdida que experimentó la señal tras su pasaje por el canal), de-modulación y de-codificación, esto es el proceso inverso que la señal experimentó en el transmisor.

Las señales pueden ser analógicas o digitales, una señal analógica es una cantidad física que varía con el tiempo de forma continua, por ejemplo, el sonido de la voz humana cuando alguien habla. Una señal digital es aquella que toma determinados valores discretos como por ejemplo la señal transmitida a la computadora al presionar una tecla en el teclado.

Una señal cuyo espectro de frecuencias se extiende desde aproximadamente cero hasta un valor finito positivo, se denomina “señal banda base”. Las señales de banda base generalmente son las señales originales (banda original de frecuencias), que son las generadas por las diferentes fuentes de información (sonido, vídeo, etc.).

La modulación es una operación efectuada en el transmisor mediante un circuito llamado modulador. Hay dos razones principales por las cuales la modulación es necesaria en un sistema de comunicación, en primer lugar es muy difícil irradiar señales de baja frecuencia (como las señales banda base) en forma de energía electromagnética con una antena, en segundo lugar, generalmente las señales que contienen la información a transmitir ocupan la misma banda de frecuencia lo cual implica que si se transmiten al mismo tiempo las señales de dos o más fuentes, éstas interferirían entre sí.

Por ejemplo, las estaciones de radio con FM emiten señales de voz que ocupan la banda de audio frecuencias¹⁸, si todas transmiten en la misma frecuencia el receptor sería incapaz de determinar cual es la señal individual a recibir, por lo tanto estas señales deben ser separadas de alguna forma. En algunos casos se utiliza la técnica llamada conversión de frecuencia que se verá más adelante.

Si bien el propósito principal de modular en un sistema de comunicación es adaptar la señal a transmitir a las características del canal de transmisión, existen otras razones por las cuales la modulación es importante.

Por ejemplo, una parte de la teoría electromagnética, indica que, la radio propagación con línea de vista es eficiente cuando la antena utilizada tiene una dimensión

¹⁷Este esquema representa un tipo de comunicación unidireccional, si se desea un sistema bidireccional se deberá contar con las funciones de transmisor y receptor a ambos lados del canal. Si se desea se puede consultar bibliografía complementaria sobre sistemas de comunicación en [74] y [75].

¹⁸Frecuencias audibles que van desde 300 Hz a 15 kHz aproximadamente.

de al menos $1/10$ de la longitud de onda (λ) que tiene la señal a ser transmitida. Esto implica que, si se desea transmitir una señal de 300 Hz de frecuencia, o sea de 1000 km de longitud de onda¹⁹, la antena a utilizar para lograr una transmisión eficiente es de unos 100 km de largo, lo cual indudablemente es impracticable [46].

En el proceso de modulación interviene una señal llamada **portadora**, se dice que la señal que contiene la información a transmitir modula a la señal portadora cambiando una o más propiedades de ésta última. La señal conteniendo la información a transmitir se denomina señal moduladora.

Existen diversas técnicas de modulación con una amplia base teórica que las hace adecuadas para diferentes aplicaciones y diferentes canales de comunicación. El canal influye fuertemente en la elección del tipo de modulación de un sistema de comunicaciones, además el canal afecta a la señal que se quiere transmitir con factores como atenuación, interferencia y ruido, entre otros. Se debe tener en cuenta que, el tipo de modulación utilizada también puede variar el ancho de banda de la señal que se desea transmitir.

Las técnicas de modulación son muy complejas y sus principios teóricos quedan fuera del alcance de este documento. Para fijar conceptos, se explicará aquí solo el método de conversión de frecuencia, el cual como se ha mencionado es un tipo de modulación.

Pongamos nuevamente el caso de una estación de FM que usualmente transmite voz cuyo rango de frecuencias se encuentra entre 300 Hz y 15 kHz. Como se indicó, si transmitieran todas las estaciones de FM en esa banda se interferían dificultando la recepción de la señal. Por esta razón, cada estación convierte su información a una banda de frecuencia (o canal de frecuencia) distinta y así evita interferencias.

Conversión de frecuencia

La conversión de frecuencia es el proceso mediante el cual la señal es trasladada a una frecuencia mucho mayor para transmitir, con esto se logra, por ejemplo, la reducción en la longitud de la antena para hacerla practicable (ya que disminuye la longitud de onda). En el caso de las estaciones de radio de FM que operan alrededor de 100 MHz, necesitaríamos una antena de al menos $1/10$ de la longitud de onda de estas señales que será de $c = \lambda f \Rightarrow \lambda = 3 \text{ m}$. Por lo tanto se necesitaría una antena de al menos 30 cm para lograr una transmisión eficiente.

Una forma de modular es trasladar la estructura original de la señal a otro punto del espectro de frecuencias. Luego, para poder recibir correctamente la señal, ésta debe ser colocada nuevamente en su posición de frecuencias original. Estos procesos se denominan conversión de frecuencia, en un caso conversión hacia arriba (o ascendente) y en el otro hacia abajo (o descendente). La Fig. A.13 muestra en el eje de frecuencias una representación esquemática de ambos procesos.

¹⁹Relación entre frecuencia y longitud de onda: $c = f\lambda$ con $c = 300000 \text{ km/s}$

A.5. Modulación y Conversión de Frecuencia

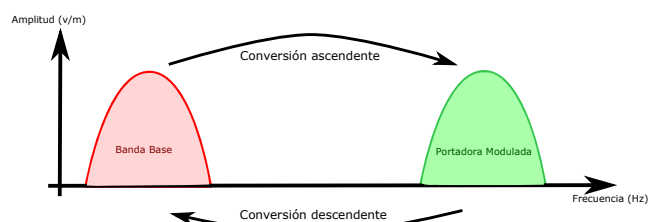


Figura A.13: Conversión de frecuencia.

Básicamente se requiere una *señal portadora* (señal de alta frecuencia) y una *señal moduladora* (la señal banda base que proviene del transductor y contiene la información), la señal de salida del modulador generalmente se llama “señal modulada”. En la Fig. A.14 se muestra un esquema de estas señales.

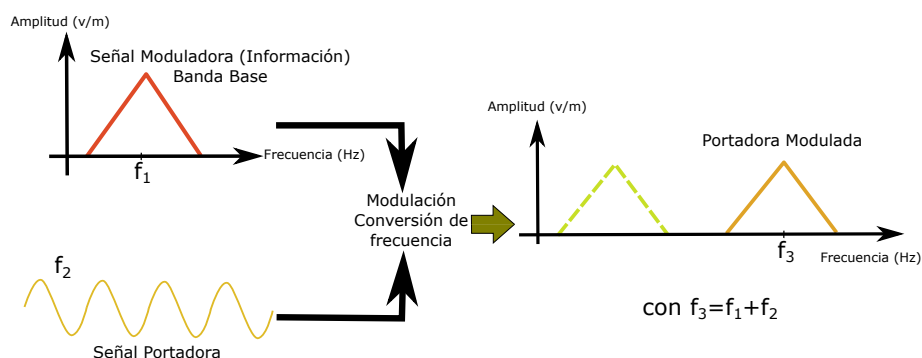


Figura A.14: Esquema de modulación por conversión de frecuencia²⁰.

Existen diversas técnicas de modulación con una amplia base teórica que las hace adecuadas para diferentes aplicaciones y diferentes canales de comunicación. El canal influye fuertemente en la elección del tipo de modulación de un sistema de comunicaciones, además el canal afecta a la señal que se quiere transmitir con factores como atenuación, interferencia y ruido, entre otros. El tipo de modulación utilizada puede variar el ancho de banda de la señal que se desea transmitir.

Para finalizar esta sección, se quieren destacar algunos conceptos, en los cuales no se profundizará pero son relevantes en materia de comunicaciones inalámbricas. Existe una rama científica encargada de estudiar todo lo relacionado con la información como ser la capacidad de transmisión de información de los sistemas de comunicación, procesamiento y transmisión de señales, esta rama es la llamada *Teoría de la Información*²¹, no vamos a adentrarnos en ella dada su complejidad, pero nombraremos aquí, de manera no rigurosa, algunos resultados que se desprenden de ella.

La capacidad de información de un sistema de comunicaciones es una medida de cuánta información de la fuente puede transportarse por el sistema, en un periodo dado de tiempo. La cantidad de información que puede propagarse a través de un sistema de transmisión es una función del ancho de banda del sistema y el tiempo de transmisión.

²⁰En la figura f_1 es la frecuencia central de la señal banda base, f_2 es la frecuencia de la señal portadora y f_3 es la frecuencia central de la señal modulada.

²¹Presentada por Claude E. Shannon y Warren Weaver a finales de la década de los años 1940.

Apéndice A. Espectro Radioeléctrico

Cualquier tipo de información, ya sea voz, datos, imágenes, vídeos, tanto en formato analógico como digital, tiene una característica que las diferencia, la cantidad de información que incorporan por unidad de tiempo. Así, una señal de vídeo compuesta de imágenes es mucho más densa en información que una señal de audio compuesta de sonidos. La medida de la cantidad de información por unidad de tiempo viene dada por el ancho de banda y la velocidad de transmisión que requiere su transporte; a mayor cantidad de información por unidad de tiempo, mayor ancho de banda y velocidad de transmisión requeridos. A modo de ejemplo, un canal telefónico básico (información de audio analógica) requiere algo menos de 4 kHz de ancho de banda, para ser transmitido con una calidad aceptable. En cambio, una señal de televisión analógica requiere un ancho de banda en torno a los 6 MHz, es decir, un canal de capacidad 1500 veces mayor.

Las dos limitaciones mas importantes que tiene un sistema de comunicaciones son el ruido y el ancho de banda. Se denomina ruido a toda señal no deseada que se encuentra dentro de una transmisión y que interfiere con la señal real. En un canal sin ruido el límite de la velocidad de transmisión en dicho canal será una función de su ancho de banda. Mientras que en un canal con ruido, a mayor velocidad de transmisión es mayor el daño que puede introducir el ruido en la comunicación.

Apéndice B

Esquema Organizacional de la UIT

La UIT es la organización más importante de las Naciones Unidas en lo que refiere a las TIC, dentro de sus funciones coordina el cada vez más amplio conjunto de servicios de radiocomunicaciones y se encarga de la gestión internacional del espectro de frecuencias radioeléctricas y las órbitas de los satélites.

En la Fig. B.1 se puede observar el esquema organizacional de la UIT y a continuación se detallan los elementos más relevantes dentro de la organización.



Figura B.1: Estructura UIT¹.

¹Imagen elaborada a partir de la información disponible en el sitio web de UIT.

B.1. La Conferencia de Plenipotenciarios

La Conferencia de Plenipotenciarios es el órgano supremo de la UIT, tiene lugar cada cuatro años con una duración de aproximadamente dos semanas. En ella se establece la política general de la UIT, se aprueban los planes estratégicos y financieros y se eligen los altos cargos de la organización, como los miembros del *Consejo* y los miembros de la *Junta del Reglamento de Radiocomunicaciones*.

La Conferencia de Plenipotenciarios constituye el acontecimiento más importante en el que los Estados Miembros de la UIT deciden el papel que desempeñará la organización en el futuro y con ello determinan la capacidad de la UIT para influir y repercutir en el desarrollo de las TIC en el mundo.

La última conferencia de Plenipotenciarios se llevó a cabo en el mes de octubre del año 2014 en la ciudad de Bexco, República de Corea. La próxima Conferencia de Plenipotenciarios tiene lugar en los Emiratos Árabes Unidos en el año 2018.

B.2. El Consejo de la UIT

El Consejo de la UIT se creó en 1947 con el nombre de Consejo de Administración. Está integrado por el 25 % del número total de Estados Miembros. Sus integrantes son elegidos por la Conferencia de Plenipotenciarios con una distribución equitativa de los puestos entre las cinco regiones del mundo².

Actualmente está integrado por 48 miembros y se realizan reuniones anuales. Su función es examinar, en el intervalo entre conferencias de plenipotenciarios, asuntos generales de política de las telecomunicaciones para garantizar que las actividades, políticas y estrategias de la UIT responden plenamente al entorno actual de las telecomunicaciones, el cual es dinámico y en rápida evolución. Además, prepara un Informe sobre la planificación política y estratégica de la UIT.

La reunión más reciente se realizó del 12 al 21 de mayo del año 2015 en la sede de la UIT, la próxima se celebrará desde el 25 de mayo hasta el 2 de junio del año 2016.

B.3. La Secretaria General

La Secretaria General está dirigida por un secretario y un vicesecretario, ellos tienen entre sus funciones gestionar los aspectos administrativos y financieros de las actividades de la UIT. Esto incluye planificar y organizar las principales reuniones y realizar funciones de secretaría tales como comunicaciones, asesoramiento jurídico, finanzas, personal, servicios comunes, auditoría interna, etc.

B.4. Oficinas Sectoriales

Cada oficina sectorial es responsable de sus recomendaciones sectoriales, conocidas como “normas”: UIT-T, UIT-R, UIT-D. Estas normas son recomendatorias y a diferencia de los instrumentos jurídicos con los que cuenta la UIT no tienen carácter de tratado para los Estados Miembros, son más bien como recomendaciones para cada

²Los Estados Miembros de la UIT están agrupados en 5 regiones, **Región A:** Américas. **Región B:** Europa Occidental. **Región C:** Europa Oriental. **Región D:** África. **Región E:** Asia, Australasia, Oceanía.

sector. Cada oficina actualiza y revisa permanentemente las recomendaciones internacionales sobre su sector. Para esto, se han creado en cada una de ellas comisiones de estudio, en inglés *Study Groups* (SG) y a cada uno de estos grupos se le encarga un campo de estudio.

El UIT-R cuenta con 2 entes adicionales, el Grupo Asesor de Radiocomunicaciones (GAR) y la Junta del Reglamento de Radiocomunicaciones (JRR).

El GAR esta integrado por representantes de las administraciones de los Estados Miembros, representantes de los Miembros del Sector y los Presidentes de las Comisiones de Estudio. Se ocupa de las prioridades, los programas, las cuestiones financieras y las estrategias referentes a las asambleas de radiocomunicaciones, las comisiones de estudio y otros grupos, así como la preparación de las CMR.

La JRR está conformada por 12 miembros, representando cada región administrativa, sus miembros son elegidos durante las Conferencias de Plenipotenciarios³, quienes desempeñan sus funciones de forma independiente y con carácter no permanente. La Junta se reúne 2 o 3 veces por año durante 5 días y se ocupa de estudiar casos particulares de la aplicación del RR.

B.5. Marco Jurídico

Los instrumentos jurídicos⁴ de la UIT, los cuales tienen carácter de tratado, son:

- La Constitución y el Convenio de la UIT.
- Los Reglamentos Administrativos
 - * Reglamento de Radiocomunicaciones (RR).
 - * Reglamento de las Telecomunicaciones Internacionales (RTI)⁵.

Estos instrumentos jurídicos son revisados periódicamente (generalmente cada 4 años) en las conferencias mundiales especializadas nombradas a continuación

- La Constitución y el Convenio son revisados en las Conferencias de Plenipotenciarios.
- El RTI se revisa en la Conferencia Mundial de Telecomunicaciones Internacionales (CMTI).
- El RR es revisado en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR).

³La última Conferencia de Plenipotenciarios eligió para el periodo de enero del 2015 a diciembre del 2018 a Argentina y Estados Unidos como miembros por la región A (Las Américas).

⁴<http://www.itu.int/net/about/legal-es.aspx>

⁵El RTI sirve como tratado mundial vinculante destinado a facilitar la interconexión e interoperabilidad de los servicios de información y comunicación, así como a garantizar su eficiencia y su utilidad.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice C

Breve Historia de las Telecomunicaciones en Uruguay

Principios

El telégrafo se difundió en Uruguay de la mano del ferrocarril, era parte del equipamiento ferroviario para asegurar la conexión entre las estaciones que se encontraban a lo largo del trayecto. En 1887 el Estado intervino en la organización de los servicios telegráficos al apoyar la creación de la compañía del Telégrafo Nacional, se firmó un contrato con el gerente de una empresa británica, Francisco Ana Lanza para construir una cantidad determinada de redes. La actividad sería subsidiada por el Estado, pero administrada, dirigida e inspeccionada por Lanza [47]. En 1892, al caducar el contrato se encomendó la administración del Telégrafo Nacional a la Dirección General de Correos. En 1896 se crea la Dirección General de Correos y Telégrafos órgano del estado con competencias en materia de telecomunicaciones.

El otro novedoso medio de comunicación de la época fue introducido por empresarios privados a nuestro país, el teléfono. Con el creciente avance en materia de telegrafía y telefonía en 1915 se marca el comienzo de una segunda etapa en la historia de las telecomunicaciones por medio de la creación de lo que se denominó Administración General de Correos, Telégrafos y Teléfonos¹, esta administración tendría el monopolio estatal de las tres actividades, aunque se permitiría a las empresas privadas en actividad seguir funcionando².

En 1931 considerando la importancia y el altísimo valor estratégico de las telecomunicaciones para el desarrollo de nuestro país, la Asamblea General Legislativa establece por medio de la Ley N° 8.767 que la Administración General de las Usinas Eléctricas del Estado (UTE) se hará cargo del desarrollo de las comunicaciones telefónicas en Uruguay y ejercerá su monopolio³, pasando a llamarse Administración General de las Usinas y Teléfonos del Estado.

Durante la dictadura militar (años 1973 a 1985)

Durante este período el gobierno Uruguayo toma una serie de decisiones que de-

¹Ley N° 5.356.

²Artículo publicado en la revista Transformación, Estado, Democracia, N° 48, Montevideo, ONSC, 2011; páginas 65 a 78.

³<http://www.antel.com.uy/antel/institucional/nuestra-empresa/Resena-historica>

terminarían los cimientos del desarrollo de las telecomunicaciones en el país. En 1974 se crea ANTEL⁴, bajo la forma jurídica de servicio público descentralizado y se quita la telefonía de las competencias de UTE, la cual vuelve a denominarse Administración nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE). Esto fue importante para el desarrollo de las telecomunicaciones, en ese momento el volumen de trabajo generado por lo relacionado con la energía eléctrica superaba ampliamente a las telecomunicaciones por lo tanto las tareas relacionadas con éstas podían sufrir retrasos.

La creación de ANTEL permitió que las telecomunicaciones siguieran su propio ritmo. Los cometidos de ANTEL incluían la prestación de servicios de telecomunicaciones urbanos y de larga distancia nacional e internacional, el control y administración de toda actividad relacionada a las telecomunicaciones y la administración, defensa y control del espectro radioeléctrico nacional. Por lo que ANTEL en su creación, no sólo era una empresa pública prestadora de servicios de telecomunicaciones sino que también era un agente regulador de telecomunicaciones.

En 1984 se crea la Dirección Nacional de Comunicaciones (DNC)⁵ que funcionaba bajo la órbita del Ministerio de Defensa Nacional. Entre los cometidos de la DNC figuraban asesorar al PE en lo referido a las políticas de telecomunicaciones, coordinar y ejecutar la política de comunicaciones, administrar y controlar el espectro radioeléctrico, autorizar y controlar la instalación de nuevos servicios de comunicaciones, así como fijar precios y tarifas para dichos servicios. Se establecen normas sobre radiodifusión y comienzan a cambiar los cometidos de ANTEL.

Período 2000 - 2010

A partir del año 2000 en todo el mundo surgen, de manera vertiginosa, nuevas tecnologías para mejorar los servicios de telecomunicaciones. El uso masivo de estos servicios y su diversidad, derivó en la necesidad de introducir nuevos actores en la gestión del espectro radioeléctrico en nuestro país.

La Ley N° 17.296 del año 2001 (Ley de presupuesto) introduce cambios en la regulación de las telecomunicaciones. En primer lugar, crea del Artículo N° 70 en adelante la URSEC como un órgano desconcentrado⁶ del PE que reporta directamente al Despacho Presidencial. Dicha Ley estableció que URSEC estaría integrada en parte por la totalidad de los funcionarios de la DNC, por lo que URSEC toma algunas de las funciones de lo que era hasta ese entonces DNC. Con la reforma regulatoria de los servicios públicos, particularmente del sector telecomunicaciones se re-definió el alcance del monopolio de ANTEL. Dicha re-definición implicó abrir sectores a la competencia (móviles, internacionales y datos mientras que la telefonía fija permanece como monopolio de ANTEL), en esta apertura se enmarcaron las llamadas subastas de derechos de uso de espectro radioeléctrico donde Uruguay diseñó un proceso siguiendo lineamientos teóricos de la teoría de subastas y basado en la experiencia de otros países.

Las subastas de licencias para telefonía móvil provocaron una revolución en la teoría de subastas a raíz de las particularidades del objeto a ser subastado⁷. La primera subas-

⁴Por Decreto de Ley N° 14.235 (Art. 20) del 25 de julio de 1974.

⁵Ley N° 14.670 del año 1977 (Decreto 734/78) y Decreto-Ley N° 15.671 del año 1894.

⁶Forma de organización que pertenece a la administración pública para la más eficaz atención y eficiente despacho de los asuntos de su competencia. Los órganos desconcentrados no tienen personalidad jurídica ni patrimonio propio, jerárquicamente están subordinados a las dependencias de la administración pública a que pertenecen, y sus facultades son específicas para resolver sobre la materia y ámbito territorial que se determine en cada caso por la ley.

⁷En [76] se encuentra bibliografía complementaria sobre el diseño de la primera subasta para

ta organizada en nuestro país siguió el esquema básico desarrollado en las subastas de Estados Unidos de 1994 e incorporó las recomendaciones aprendidas de las experiencias de las subastas europeas del año 2000⁸.

La URSEC, además de brindar aportes al gobierno para la formulación e implementación de políticas de telecomunicaciones, autorizar el uso de frecuencias y realizar el control técnico del uso del espectro radioeléctrico (funciones tomadas de la DNC), es encargada de organizar las subastas o procedimientos competitivos para asignar el uso de frecuencias. La primera subasta de espectro radioeléctrico para telecomunicaciones móviles se llevó a cabo a fines del año 2002.

Durante el año 2003 se conforma un nuevo marco regulatorio de las telecomunicaciones conformado por el *Reglamento de Administración y control del espectro radioeléctrico*⁹ y el *Reglamento de Licencias de Telecomunicaciones*¹⁰. Dichos reglamentos están vigentes en la actualidad y se trata sobre ellos en la Sección 2.3.5.

En el año 2005 se crea dentro del MIEM la unidad ejecutora Dirección Nacional de Telecomunicaciones¹¹ y se suprime totalmente la DNC, se determina que la URSEC se vinculará administrativamente con el PE a través del MIEM y actuará con autonomía técnica. La DINATEL tiene entre sus funciones formular y coordinar políticas de Estado sobre telecomunicaciones.

La creación de la URSEC y de la DINATEL marcó el inicio de un gran cambio en lo referente a telecomunicaciones en Uruguay. Varias leyes y decretos han sido de gran importancia para el desarrollo de las telecomunicaciones en Uruguay, por ejemplo, en el año 2007, todas las radios comunitarias se volvieron legales como resultado de la *Ley de Radiodifusión Comunitaria*¹², la cual divide a los medios de comunicación en tres categorías: comerciales, públicos y comunitarios y garantiza el acceso al ERE para todos ellos.

Período 2010 -2014

En el año 2010 con la Ley de presupuesto nacional período 2010 - 2014¹³ se modifica la Ley de creación de la Dirección Nacional de Telecomunicaciones, creando en el ámbito del MIEM, el programa *Administración de la Política de Telecomunicaciones* y la unidad ejecutora DINATEL. Donde la Dirección Nacional de Telecomunicaciones cambia su nombre y sus competencias.

DINATEL en este nuevo período tiene entre sus funciones asesorar al PE en materia de formulación, instrumentación y fijación de la política nacional de telecomunicaciones. URSEC pasa a tener entre sus cometidos el de asesorar al PE y sus organismos competentes aportando insumos para la formulación, instrumentación y aplicación de la política de comunicaciones.

En el año 2014 se aprueba la Ley N° 19.307 que tiene por objeto establecer la regulación de la prestación de servicios de radio, televisión y otros servicios de comunicación

licencias de telefonía móvil para el caso uruguayo.

⁸En [77] se encuentra bibliografía adicional sobre los resultados de la primera subasta en el caso uruguayo.

⁹Decreto N° 114/003 en vigencia.

¹⁰Decreto N° 115/003 el cual está vigente con modificaciones correspondientes a los Decretos N° 83/013, N° 256/012, N° 414/010 y N° 85/009.

¹¹Artículo 171 de la Ley de presupuesto nacional N° 17.930.

¹²Ley N° 18.232.

¹³Ley N° 18.719.

Apéndice C. Breve Historia de las Telecomunicaciones en Uruguay

audiovisual¹⁴.

La nueva matriz tecnológica plantea nuevos retos en lo que refiere a regulación en materia de telecomunicaciones, se necesita de una política estratégica para utilizar de forma eficiente el recurso ERE. Las telecomunicaciones constituyen un área dinámica y relevante a nivel mundial, por lo que las políticas y sus actores involucrados están en constante evolución para adecuarse al contexto actual y que el país pueda acompañar la evolución tecnológica mundial.

Este recorrido breve por la historia de los actores involucrados en la gestión del ERE en nuestro país muestra como han ido variando y evolucionado en cuanto a sus funciones.

¹⁴Ley que aún no esta reglamentada por el PE.

Apéndice D

Proceso de una CMR

En cuanto a la revisión específica del RR y sus Reglas de Procedimiento, las decisiones que adopta la JRR son finales y solo se pueden modificar o eliminar por medio de las CMR, mediante modificaciones y supresiones que resultan de estas conferencias. El objetivo de las CMR es la revisión completa y detallada del RR. Cada CMR esta precedida de un largo y riguroso proceso preparatorio.

La última CMR se realizó en noviembre del año 2015 en Ginebra, Suiza (CMR-15). En el período comprendido entre cada CMR se realizan actividades preparatorias y conferencias regionales. En el caso de las Américas, la CITEL, a través de su comité CCPH, es la organización que lleva a cabo dichas actividades¹.

Las Reuniones Preparatorias de la CMR (RPC) típicamente son dos, una que tiene lugar la semana posterior a la CMR y otra 6 meses antes de la nueva CMR. Las RPC tienen como propósito la asignación de tareas previo a la siguiente CMR, la estructuración de un reporte a presentar para la siguiente CMR, la elección de las personas responsables de coordinar las actividades para integrar la información de cada uno de los capítulos que conforman la estructura de dicho reporte, por capítulo se definen grupos responsables de trabajo que a su vez coordinan a los grupos que realizan contribuciones y a los grupos de interés sobre los temas de cada capítulo, estos grupos trabajan en el tiempo entre cada CMR para elaborar el reporte.

La RPC celebrada la semana posterior a la CMR-15 (la RPC19-1) organizó los estudios preparatorios y propuso una estructura para su reporte a la CMR-19. El reporte resultado de estas reuniones preparatorias representa la mejor información disponible para el momento de su preparación sobre asuntos técnicos, operacionales y de procedimiento regulatorio relevantes del *orden del día de la CMR-19* y provee una buena base para las discusiones en la Conferencia. La semana previa a la CMR, se realiza la Asamblea Mundial de Radiocomunicaciones (AMR), cuyo objetivo es revisar y definir las comisiones de estudio y sus grupos de trabajo².

Los puntos del orden del día para la reciente CMR-15 se pueden resumir en Servicios móviles y de aficionados, temas científicos, temas aeronáuticos, marítimos y de radiolocalización, temas de satélites y temas generales. Cada uno de los puntos fue tratado por un grupo de trabajo al cual se le asignó el tema³.

Luego de la CMR-15 se modificó el RR, las modificaciones reflejan las necesidades

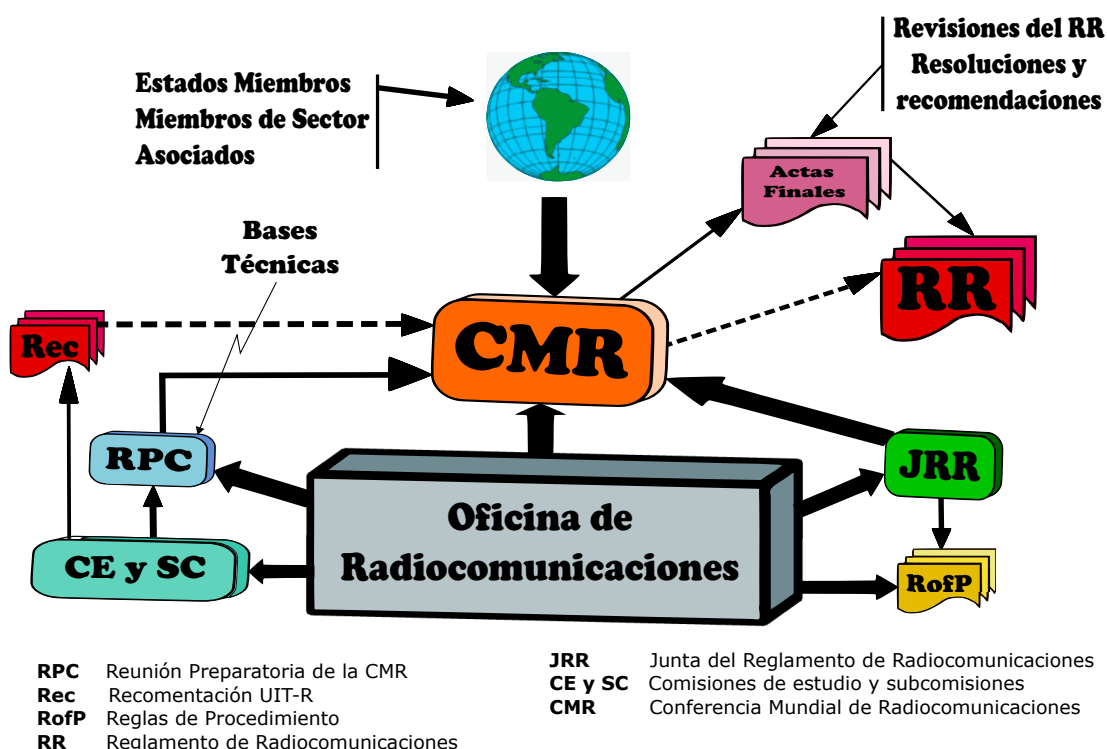
¹<https://www.citel.oas.org/es/paginas/pccii/wrc.aspx>

²Para más información sobre las comisiones de estudio consultar bibliografía complementaria en [78].

³Las actas finales de la CMR-15 están disponibles en <https://www.itu.int/pub/R-ACT-WRC.11-2015/es>.

y cambios de la tecnología en aspectos tan diversos como: exploración de la tierra por satélite, las frecuencias para protección pública y atención de emergencias, así como el seguimiento mundial de aeronaves, comunicaciones para las investigaciones espaciales y aspectos reglamentarios de las comunicaciones satelitales móviles y fijas. Sin embargo, el tema destacado durante la preparación de la Conferencia y durante su desarrollo, fue la identificación de nuevas bandas para las IMT. Una de las decisiones de la CMR-15 en materia de servicios móviles fue la de mantener el uso de la banda de espectro de 470 MHz a 694 MHz para servicios de radiodifusión (televisión) al menos hasta el año 2023⁴.

En la Fig. D.1 se presenta en forma esquemática el proceso preparatorio para una CMR. Se puede apreciar en el esquema la diversidad y cantidad de los aportes a cada CMB.

Figura D.1: Proceso CMR⁵.

El RR es complementado con sus *Reglas de Procedimiento*, aclarando la aplicación de reglas particulares o estableciendo los procedimientos prácticos necesarios que pudieran no estar estipulados en las actuales disposiciones reglamentarias. Estas reglas surgen de un extenso examen y revisión de las *Reglas de Procedimiento* por la JRR, considerando las decisiones de las CMR. Estas reglas son las que deben utilizar las administraciones y la Oficina de Radiocomunicaciones al aplicar el Reglamento de Radiocomunicaciones.

En cuanto a la revisión específica del RR y sus reglas de procedimiento, las decisiones que adopta la JRR son finales y solo se pueden modificar o eliminar por las CMR, mediante modificaciones, agregados y supresiones que resulten de estas conferencias.

⁴Estas bandas de espectro se esperaban fueran liberadas para servicios de banda ancha móvil.

⁵Imagen elaborada en base a información obtenida del sitio web de UIT.

Ese es el objetivo de las *Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones*: la revisión completa y detallada del Reglamento de Radiocomunicaciones.

Las RPC tienen entre sus objetivos la asignación de tareas de cara a la siguiente CMR y la elección de las personas responsables de coordinar las actividades para completar a tiempo las tareas necesarias a realizar antes de la próxima CMR.

En la RPC-19 fueron designados los grupos de estudio de la UIT que son responsables del desarrollo de los documentos técnicos de cada punto de la conferencia que se realizará dentro de 4 años y la agenda de la CMR-19 fue definida de manera definitiva⁶.

⁶Para más información sobre las CMR consultar: <http://www.itu.int/es/ITU-R/conferences/wrc/>.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice E

Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias en Uruguay

	Servicio		Servicio
1	Móvil Aeronáutico	16	Meteorología por Satélite
2	Radionavegación Aeronáutica	17	Radioastronomía
3	Radioaficionados	18	Radiolocalización por Satélite
4	Radiodifusión	19	Operaciones Espaciales
5	Fijo	20	Investigación Espacial
6	Móvil Terrestre	21	Fijo por Satélite
7	Móvil Marítimo	22	Móvil por Satélite
8	Radionavegación Marítima	23	No Atribuible
9	Ayudas a la Meteorología	24	Móvil salvo móvil aeronáutico
10	Móvil	25	Fijo salvo fijo aeronáutico
11	Radiolocalización	26	Radionavegación por satélite
12	Radionavegación	27	Radioaficionados por satélite
13	Frecuencia Patrón y Señales Horarias	28	Radiodifusión por satélite
14	Exploración de la Tierra por Satélite	29	Radiodeterminación
15	Servicio entre Satélites		

Tabla E.1: Referencia CNAF.

Apéndice E. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias en Uruguay

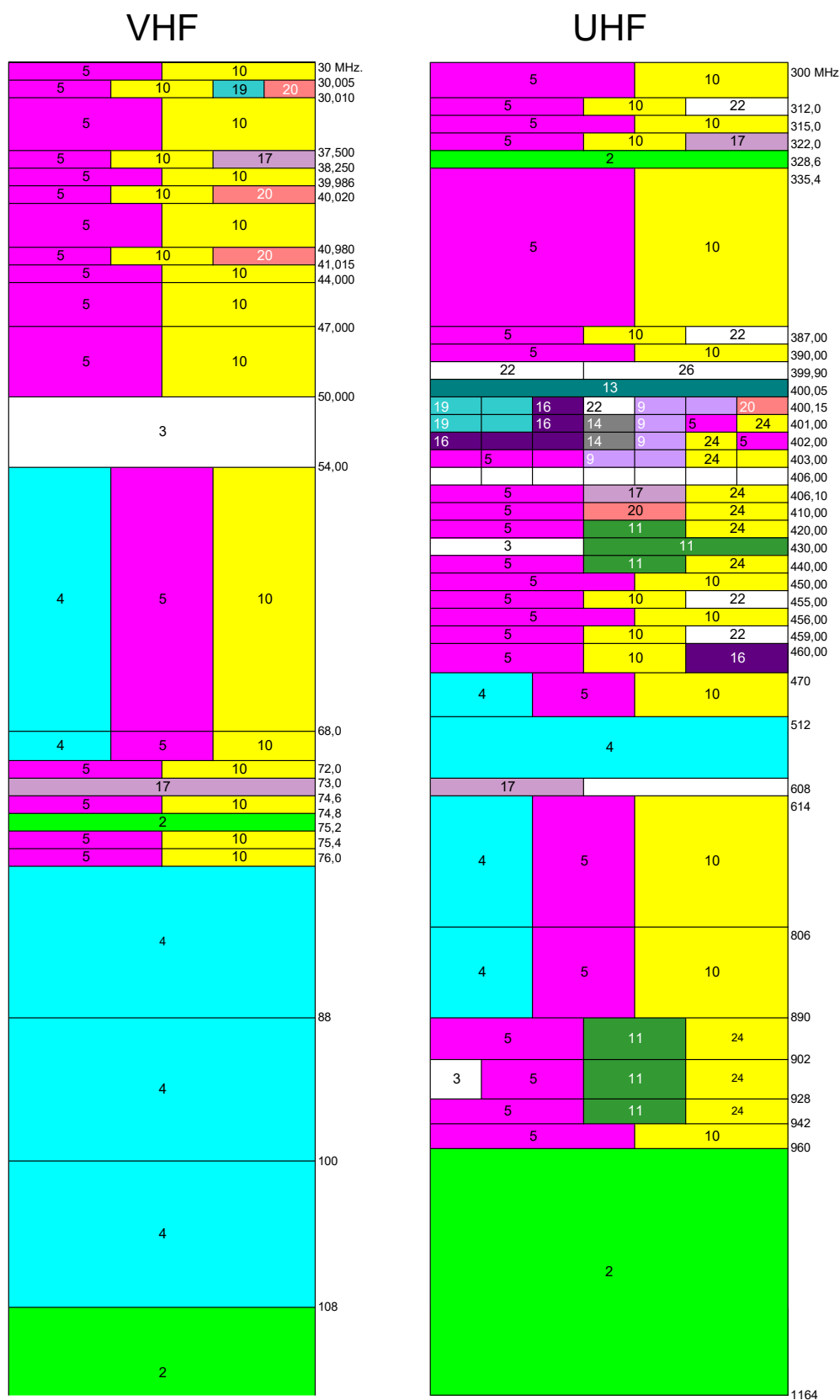


Figura E.1: Cuadro de atribución de URSEC (1).

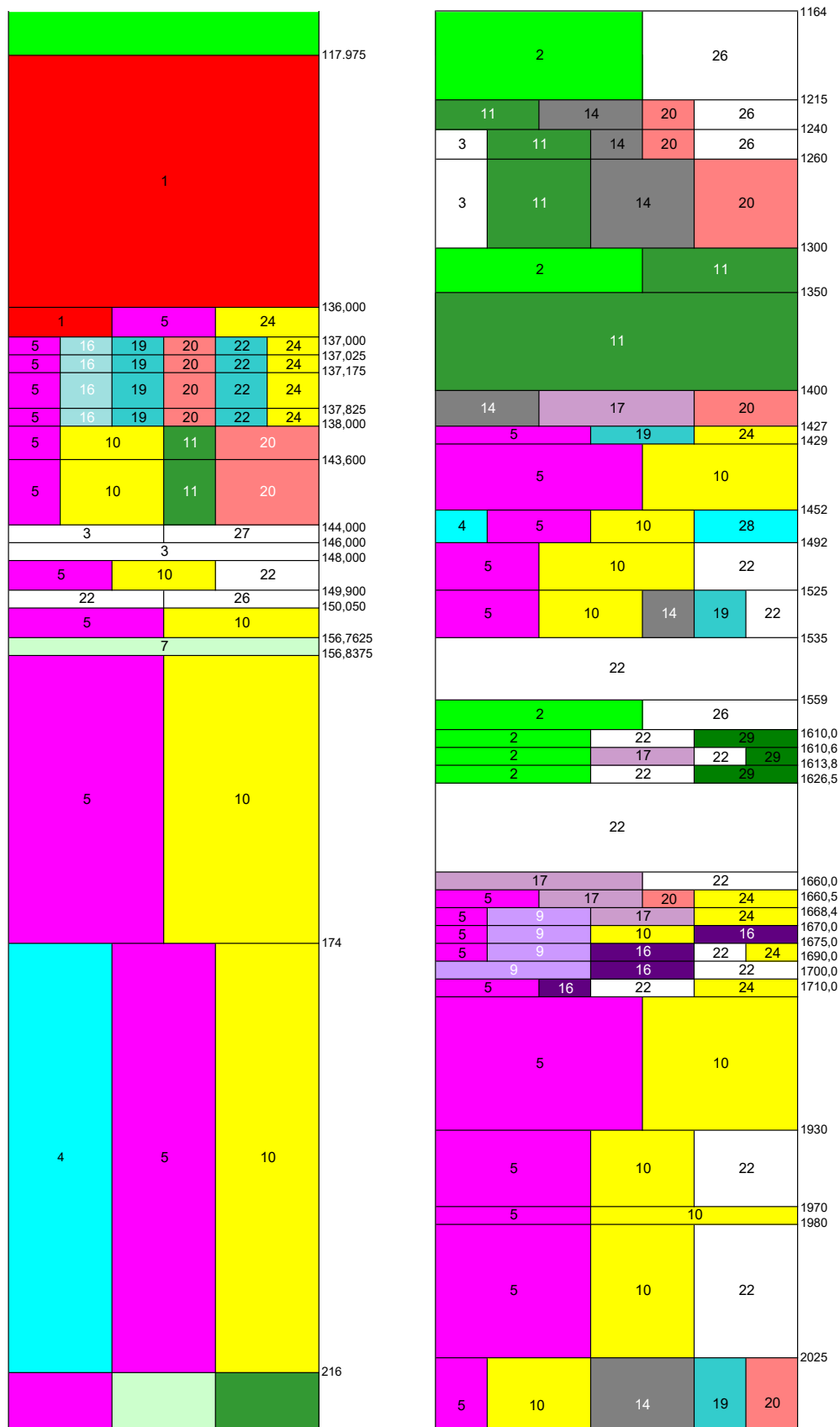


Figura E.2: Cuadro de atribución de URSEC (2).

Apéndice E. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias en Uruguay

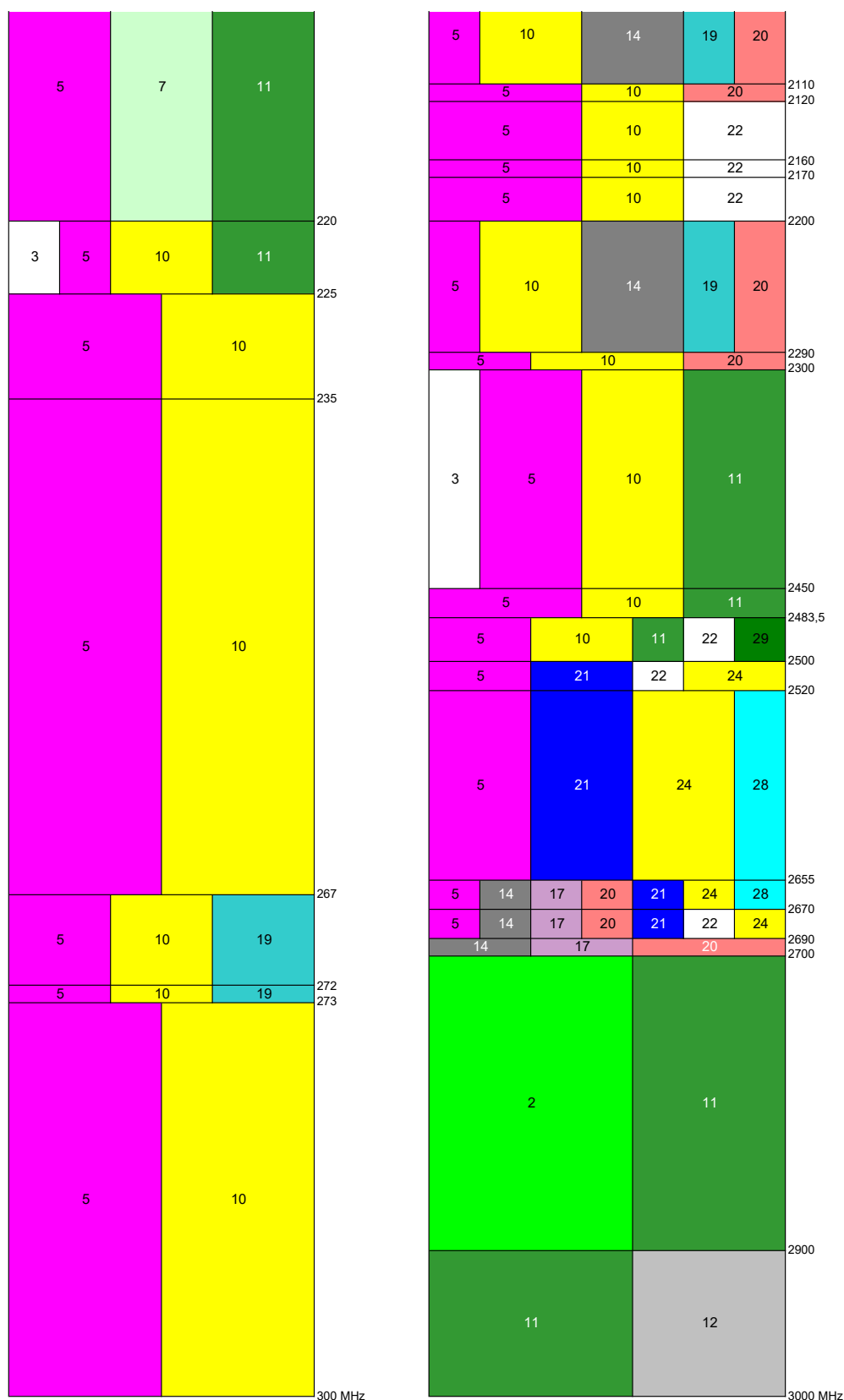


Figura E.3: Cuadro de atribución de URSEC (3).

Apéndice F

Servicios de Radiocomunicaciones Definiciones UIT.

Además de la definición genérica de servicio de radiocomunicaciones, la UIT define diferentes tipos de servicios en el RR. A continuación se incluyen las definiciones para los servicios atribuidos en las bandas VHF y UHF. El número entre paréntesis coincide con el que figura en el cuadro nacional de atribución de frecuencias de la Sección 3.1 (Fig. E.1, E.2 y E.3).

(1) **Móvil Aeronáutico** Servicio móvil entre estaciones aeronáuticas y estaciones de aeronave, o entre estaciones de aeronave, en el que pueden participar las estaciones de embarcación o dispositivo de salvamento; también pueden considerarse incluidas en este servicio las estaciones de radiobaliza de localización de siniestros que operan en frecuencias de socorro y de urgencia designadas. Cuando está reservado a las comunicaciones aeronáuticas relativas a la seguridad y regularidad de los vuelos principalmente en las rutas nacionales o internacionales de la aviación civil se denomina “R”; cuando está destinado a asegurar las comunicaciones, incluyendo las relativas a la coordinación de los vuelos, principalmente fuera de las rutas nacionales e internacionales de la aviación civil se denomina “OR”.

(2) **Radionavegación Aeronáutica** Servicio de radiodeterminación para fines de radionavegación, destinado a las aeronaves y su explotación en condiciones de seguridad.

(3) **Radioaficionados** Servicio de radiocomunicación que tiene por objeto la instrucción individual, la intercomunicación y los estudios técnicos, efectuado por aficionados, esto es, por personas autorizadas que se interesan en la radiotécnica con carácter exclusivamente personal y sin fines de lucro.

(4) **Radiodifusión** Servicio de radiocomunicación cuyas emisiones se destinan a ser recibidas directamente por el público en general. Dicho servicio abarca emisiones sonoras, de televisión o de otro género.

(5) **Fijo** Servicio de radiocomunicación entre puntos fijos determinados.

(6) **Móvil Terrestre** Servicio móvil entre estaciones de base y estaciones móviles terrestres o entre estaciones móviles terrestres.

Apéndice F. Servicios de Radiocomunicaciones Definiciones UIT.

(7) **Móvil Marítimo** Servicio móvil entre estaciones costeras y estaciones de barco, entre estaciones de barco, o entre estaciones de comunicaciones a bordo asociadas; también pueden considerarse incluidas en este servicio las estaciones de embarcación o dispositivos de salvamento y las estaciones de radiobaliza de localización de siniestros.

(8) **Radionavegación Marítima** Servicio de radiodeterminación para fines de radionavegación, destinado a los barcos y su explotación en condiciones de seguridad.

(9) **Ayudas a la Meteorología** Servicio de radiocomunicación destinado a las observaciones y sondeos utilizados en meteorología, con inclusión de la hidrología.

(10) **Móvil** Servicio de radiocomunicación entre estaciones móviles y estaciones terrestres o entre estaciones móviles.

(11) **Radiolocalización** Servicio de radiodeterminación para fines de radiolocalización, es decir, de radiodeterminación utilizada para fines distintos de los de radionavegación.

(12) **Radionavegación** Servicio de radiodeterminación para fines de radionavegación, es decir, radiodeterminación utilizada para fines de navegación, inclusive para señalar la presencia de obstáculos.

(13) **Frecuencia Patrón y Señales Horarias** Servicio de radiocomunicación para la transmisión de frecuencias especificadas, de señales horarias, o de ambas, de reconocida y elevada precisión, para fines científicos, técnicos y de otras clases, destinadas a la recepción general.

(14) **Exploración de la Tierra por Satélite** Servicio de radiocomunicación entre estaciones terrenas y una o varias estaciones espaciales que puede incluir enlaces entre estaciones espaciales y en el que, a) se obtiene información sobre las características de la tierra y sus fenómenos naturales, incluidos datos relativos al estado del medio ambiente, por medio de sensores activos o pasivos a bordo de satélites; b) se reúne información análoga por medio de plataformas situadas en el aire o sobre la superficie de la tierra; c) puede incluirse asimismo la interrogación a las plataformas. Este servicio puede incluir también los enlaces de conexión necesarios para su explotación.

(15) **Servicio entre Satélites** Servicio de radiocomunicación que establece enlaces entre satélites artificiales.

(16) **Meteorología por Satélite** Servicio de exploración de la tierra por satélite con fines meteorológicos.

(17) **Radioastronomía** Servicio que entraña el empleo de la radioastronomía, es decir, de la astronomía basada en la recepción de ondas radioeléctricas de origen cósmico.

(18) **Radiolocalización por Satélite** Servicio de radiodeterminación por satélite utilizado para radiolocalización.

(19) **Operaciones Espaciales** Servicio de radiocomunicación que concierne exclusivamente al funcionamiento de los vehículos espaciales, en particular el seguimiento espacial, la telemida espacial y el telemando espacial. Estas funciones serán normalmente realizadas dentro del servicio en el que funcione la estación espacial.

(20) **Investigación Espacial** Servicio de radiocomunicación que utiliza vehículos espaciales u otros objetos espaciales para fines de investigación científica o tecnológica.

(21) **Fijo por Satélite** Servicio de radiocomunicación entre estaciones situadas en emplazamientos dados cuando se utilizan uno o más satélites; ubicados en un punto fijo determinado o en cualquier punto dentro de una zona determinada. El emplazamiento dado puede ser un punto fijo determinado o cualquier punto fijo situado en una zona determinada. Incluye enlaces entre satélites que pueden realizarse también dentro del servicio entre satélites. También puede incluir enlaces de conexión para otros servicios de radiocomunicación espacial.

(22) **Móvil por Satélite** Servicio de radiocomunicación entre estaciones terrenas móviles y una o varias estaciones espaciales o entre estaciones espaciales utilizadas por este servicio; o entre estaciones terrenas móviles por intermedio de una o varias estaciones espaciales. También pueden considerarse incluidos en este servicio los enlaces de conexión necesarios para su explotación.

(23) **No Atribuible** Este no es un servicio, pero se agrega dado que en el cuadro nacional de atribución de frecuencias de URSEC aparece con el número 23 la leyenda “No atribuible”.

(24) **Móvil salvo móvil aeronáutico** Servicio móvil con excepción de los móvil aeronáutico.

(25) **Fijo salvo fijo aeronáutico** Servicio fijo con excepción de los fijo aeronáutico.

(26) **Radionavegación por satélite** Servicio de radiodeterminación por satélite para fines de radionavegación.

(27) **Radioaficionados por satélite** Servicio de radiocomunicación que utiliza estaciones espaciales situadas en satélites de la tierra para los mismos fines que el servicio de radioaficionados.

(28) **Radiodifusión por satélite** Servicio de radiocomunicación en el cual las señales emitidas o retransmitidas por estaciones espaciales están destinadas a la recepción directa por el público en general.

(29) **Radiodeterminación** Servicio de radiocomunicación para fines de radiodeterminación, es decir, de determinación de la posición, velocidad u otras características de un objeto, u obtención de información relativa a estos parámetros, mediante las propiedades de propagación de las ondas radioeléctricas.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice G

Resoluciones MERCOSUR

A continuación se presentan en orden cronológico las resoluciones tomadas por el GMC que tienen relación con el uso del espectro radioeléctrico en la región. Las descripciones brindadas de cada resolución pretenden ilustrar en qué términos se especifican las resoluciones además de mencionar aspectos técnicos sobre qué bandas de frecuencia involucran y las zonas de coordinación entre países. Se insta al lector a acceder al texto original de las resoluciones en caso de querer profundizar sobre éstas. Los originales son públicos y descargables de la página web del MERCOSUR. Dado que esta parte de la investigación apunta al uso actual del espectro radioeléctrico, se excluyen aquellas resoluciones que se hayan derogado antes de la fecha de elaboración de este documento.

Resolución 17/1994 - Uso de nuevas bandas de frecuencia

En esta resolución se insta a las autoridades competentes de los estados parte a respetar las atribuciones determinadas por la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones de 1992 (CAMR-92).

Resolución 06/1995 - Acuerdo de asignación y uso de las estaciones generadoras y repetidoras de televisión

Se resuelve aprobar el “Acuerdo entre los gobiernos de la República Argentina, la República Federativa del Brasil, de la República del Paraguay y de la República Oriental del Uruguay para la coordinación a los efectos de la asignación y el uso de las estaciones generadoras y repetidoras de televisión en los canales de televisión atribuidos al servicio radiodifusión en la banda de VHF”.

Clasificación de las estaciones Las estaciones se clasifican según sus requisitos máximos como muestra la Tabla G.1.

Clase	HMA (m)	PER (kW)	Contorno de protección (47dB μ V/m) (km)	PER (kW)	Contorno de protección 56dB μ V/m (km)
A	120	20	67	40	60
B	75	5	46	10	40
C	60	1	29	3	29

Tabla G.1: Clasificación de las estaciones de TV.

Apéndice G. Resoluciones MERCOSUR

Zonas de coordinación Las zonas de coordinación son franjas geográficas cuyo ancho se mide desde la frontera de los países. Según la clasificación de la estación el ancho de la zona de coordinación se indica en la Tabla G.2.

Clase	Ancho (km)
A	376
B	303
C	241

Tabla G.2: Zonas de coordinación de estaciones de TV.

Canalización Se presenta la Tabla G.3 con la canalización a ser utilizada.

Banda	Canal	Frecuencias extremos de banda (MHz)	Frecuencia portadora de vídeo (MHz)	Frecuencia portadora de sonido (MHz)
I	2	54-60	55.25	59.75
I	3	60-66	61.25	65.75
I	4	66-72	67.25	71.75
I	5	76-82	77.25	81.75
I	6	82-88	83.25	87.75
II	7	174-180	175.25	179.75
II	8	180-186	181.25	185.75
II	9	186-192	187.25	191.75
II	10	192-198	193.25	197.75
II	11	198-204	199.25	203.75
II	12	204-210	205.25	209.75
II	13	210-216	211.25	215.75

Tabla G.3: Canalización de televisión analógica VHF.

Listado de estaciones Finalmente, en el Apéndice I de la resolución se detallan las estaciones uruguayas que se encuentran en zona de coordinación con Argentina y Brasil, indicando: canal VHF, potencia radiada efectiva, altura media de la antena, coordenadas geográficas y estado (planificada/operativa).

Resolución 68/1997 - Servicios de *Paging* Unidireccional: banda común del MERCOSUR

Se resuelve aprobar en el ámbito del MERCOSUR el uso de la banda 931-932 MHz por parte de los sistemas de *Paging*.

Resolución 69/1997 - Servicios de *Paging* Bidireccional: banda común del MERCOSUR

Se resuelve aprobar en el ámbito del MERCOSUR el uso de la bandas de frecuencia mencionadas a continuación por parte de los sistemas de comunicaciones personales de banda angosta, como el Servicio de *Paging* Bidireccional.

- 901-902 MHz

- 930-931 MHz
- 940-941 MHz

Resolución 70/1997 - Servicios troncalizados: banda común del MERCOSUR

Se resuelve aprobar en el ámbito del MERCOSUR el uso de la bandas de frecuencia recomendadas por el Comité Consultivo Permanente III - Radiocomunicaciones de la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones para sistemas troncalizados. Las bandas adjudicadas son:

- 806-824 MHz
- 851-869 MHz

Además se indica que deberá darse prioridad a los sistemas troncalizados de seguridad pública y de estado en las siguientes sub-bandas:

- 821-824 MHz
- 866-869 MHz

Resolución 71/1997 - Sistema de distribución de señales multipunto multicanal en el MERCOSUR (MMDS)

Se resuelve aprobar el sistema *Multichannel Multipoint Distribution System* (MMDS) en el MERCOSUR y se define la banda (2500-2686 MHz). Además se establecen los procedimientos para el intercambio de información entre las partes necesaria para la coordinación, la canalización a ser utilizada para dicho servicio y en particular la lista de canales de la administración uruguaya.

Si bien MMDS es un sistema de transmisión de datos en general, se especifica que se utilizará para difundir televisión a la hora de canalizar.

Zonas de coordinación Se define una zona de coordinación dentro de cada territorio como una franja geográfica de 107 km de ancho.

Resolución 30/1998 - Disposiciones sobre el servicio móvil marítimo en la banda VHF

Se resuelve la adjudicación de la banda de 156 MHz a 162.050 MHz para uso del servicio móvil marítimo. En el Artículo 2 se maneja un área de coordinación de 100 km desde la frontera hacia el interior de los países.

Resolución 23/1999 - Manual de procedimientos de coordinación de frecuencias de sistemas *Paging* Unidireccional

Se aprueba el “Manual de Procedimientos de Coordinación de Frecuencias de Sistemas *Paging* Unidireccional” y se da las facultades al Subgrupo de Trabajo N° 1 “Comunicaciones” de actualizar este manual de acuerdo con los avances tecnológicos.

En el manual se describen los procedimientos de coordinación entre los países y desde el punto de vista técnico, las bandas de frecuencia, la canalización y las normas técnicas.

Apéndice G. Resoluciones MERCOSUR

Resolución 24/1999 - Manual de procedimientos de coordinación de frecuencias de sistemas troncalizados

Se resuelve aprobar el “Manual de Procedimientos de Coordinación de Frecuencias de Sistemas Troncalizados” y se da las facultades al Subgrupo de Trabajo N° 1 “Comunicaciones” de actualizar este manual de acuerdo con los avances tecnológicos. En el manual se describen los procedimientos de coordinación entre los países y, desde el punto de vista técnico, las bandas de frecuencia y canalización las normas técnicas. En la Tabla G.4 se definen las sub-bandas de frecuencia dentro de la banda ya identificada en la Resolución 70/1997.

Banda	Estación Móvil (EM)(MHz)	Estación Radioeléctrica Central (ERC) (MHz)
A	806-811	851-856
B	811-816	856-861
C	816-818.5	861-863.5
D1	818.5-821	863.6-866
D2	821-824	866-869

Tabla G.4: Bandas adjudicadas para sistemas troncalizados.

Además, para cada una de estas bandas A, B, C y D, la resolución especifica su canalización. No se incluye aquí la resolución por su extensión.

Resolución 19/2001 - Disposiciones generales para el roaming internacional y coordinación de frecuencias del servicio móvil celular en el ámbito del MERCOSUR (Derogación de la res. GMC N° 65/1997)

Se resuelve aprobar las “Disposiciones generales para el roaming internacional y coordinación de frecuencias del servicio móvil” y el “Manual de Procedimientos de Coordinación de Frecuencias en la Banda de 800 MHz”. Se da las facultades al Subgrupo de Trabajo N° 1 “Comunicaciones” de actualizar este manual de acuerdo con los avances tecnológicos. El manual de procedimientos establece los procedimientos de coordinación para la asignación de espectro, la información a intercambiar, plazos y análisis requeridos para la coordinación. Además, se definen las bandas de frecuencia y canalización a utilizar para el servicio de telefonía móvil celular (ver Tabla G.5).

Sub Banda	Transmisión de la estación móvil	Transmisión de la estación radio base
A	824-835 MHz 845-846.5 MHz	869-880 MHz 890-891.5 MHz
B	835-845 MHz 846.5-849 MHz	880-890 MHz 891.5-894 MHz

Tabla G.5: Bandas A y B para servicio de telefonía móvil celular.

Canalización La canalización designada en esta resolución es la correspondiente al sistema AMPS/TDMA y NAMPS y establece un método para distribuir el uso de los canales entre las operadoras de telefonía celular en cada estado parte (para el caso de 2 operadoras, como era en Uruguay en ese entonces y para el caso de 3 operadoras). Además, se dan detalles técnicos acerca de la modulación de la voz y los datos. Las zonas de coordinación se definen como bandas geográficas de 5 km de ancho desde la línea de frontera hacia dentro del país.

Resolución 31/2001 - Marco regulatorio para el servicio de radiodifusión sonora por modulación de frecuencia (FM)

La resolución menciona el “Acuerdo entre el Gobierno de la República Argentina, el Gobierno de la República Federativa del Brasil y el Gobierno de la República Oriental del Uruguay para la coordinación de la asignación y uso de los canales de radiodifusión sonora con modulación de frecuencia en la banda de ondas métricas (88-108 MHz)”, celebrado en 1980. Paraguay no formó parte de este acuerdo, por lo que se menciona la necesidad de un nuevo acuerdo que contemple a todo el MERCOSUR.

La resolución aprueba un nuevo marco regulatorio, encomienda al Subgrupo de Trabajo N° 1 “Comunicaciones” a revisar periódicamente la Lista de Estaciones Coordinadas de FM. El “Marco regulatorio para el servicio de radiodifusión sonora por modulación de Frecuencia” incluye entre otros temas:

- Definiciones de conceptos involucrados en el servicio de radiodifusión sonora FM, entre ellos el de “Sistema Estereofónico de Frecuencia Piloto”.
- Compromiso de las administraciones a atribuir la banda 87.8 - 108 MHz para el servicio, a título primario.
- Establecimiento de las zonas de coordinación entre los países.
- Clasificación de estaciones, según sus parámetros técnicos de potencia, frecuencia y altura de la antena.
- Canalización de canales a utilizar.
- Procedimientos de notificación y consulta frente a nuevas asignaciones y/o modificaciones.

Clasificación de estaciones En la “Norma Técnica del servicio de radiodifusión sonora por modulación de frecuencia (FM)” se establecen formalmente los parámetros máximos que hacen que una estación sea considerada de alta, media o baja potencia (ver Tabla G.6).

Categoría	PER Máxima (kW)	HMA (m)
A	100	300
B	50	150
C	25	120
D	10	100
E	5	75
F	1	75
G	0.5	35

Tabla G.6: Clasificación de estaciones de radiodifusión FM.

Zonas de coordinación Las zonas de coordinación son franjas geográficas cuyo ancho se mide desde la frontera de los países. Según la clasificación de la estación el ancho de la zona de coordinación se indica por la Tabla G.7.

Apéndice G. Resoluciones MERCOSUR

Potencia	Categoría	Z. de Coordinación
ALTA	A y B	375/315 km
MEDIA	C y D	343/223 km
BAJA	E	267/155 km
BAJA	F y G	251/115 km

Tabla G.7: Ancho zona de coordinación estaciones de radiodifusión FM.

El valor menor de la Tabla G.7 corresponde al estimado con las curvas de la FCC F(50,50). Además, en la resolución se incluyen tablas de separación necesaria entre estaciones cocanal, y de canal adyacente, para diferentes categorías de estación.

Canalización La banda para el servicio FM se divide en 101 canales de 200 kHz de ancho de banda como se muestra en la Tabla G.8.

Canal	Frec. (MHz)	Canal	Frec. (MHz)	Canal	Frec. (MHz)
200	87.9	235	94.9	270	101.9
201	88.1	236	95.1	271	102.1
202	88.3	237	95.3	272	102.3
203	88.5	238	95.5	273	102.5
204	88.7	239	95.7	274	102.7
205	88.9	240	95.9	275	102.9
206	89.1	241	96.1	276	103.1
207	89.3	242	96.3	277	103.3
208	89.5	243	96.5	278	103.5
209	89.7	244	96.7	279	103.7
210	89.9	245	96.9	280	103.9
211	90.1	246	97.1	281	104.1
212	90.3	247	97.3	282	104.3
213	90.5	248	97.5	283	104.5
214	90.7	249	97.7	284	104.7
215	90.9	250	97.9	285	104.9
216	91.1	251	98.1	286	105.1
217	91.3	252	98.3	287	105.3
218	91.5	253	98.5	288	105.5
219	91.7	254	98.7	289	105.7
220	91.9	255	98.9	290	105.9
221	92.1	256	99.1	291	106.1
222	92.3	257	99.3	292	106.3
223	92.5	258	99.5	293	106.5
224	92.7	259	99.7	294	106.7
225	92.9	260	99.9	295	106.9
226	93.1	261	100.1	296	107.1
227	93.3	262	100.3	297	107.3
228	93.5	263	100.5	298	107.5
229	93.7	264	100.7	299	107.7
230	93.9	265	100.9	300	107.9
231	94.1	266	101.1		
232	94.3	267	101.3		
233	94.5	268	101.5		
234	94.7	269	101.7		

Tabla G.8: Canalización de FM.

Resolución 05/2002 - Manual de procedimientos de coordinación de frecuencias de sistemas *Paging* Bidireccional

Se resuelve aprobar el “Manual de procedimientos de coordinación de frecuencias de sistemas *Paging* Bidireccional”, y se da las facultades al Subgrupo de Trabajo N° 1 “Comunicaciones” de actualizar este manual de acuerdo con los avances tecnológicos.

El manual establece los métodos y plazos para las solicitudes de coordinación y el intercambio de información.

En cuanto a las especificaciones técnicas el manual describe las bandas a utilizar, la canalización (indicando los canales a utilizar por cada país del MERCOSUR), la

Apéndice G. Resoluciones MERCOSUR

forma de explotación como semiduplex, las potencias radiadas máximas en zona de coordinación y relaciones de protección, entre otros.

Se describe la banda a usar por la estación móvil:

- 901-902 MHz

Se describe la banda a usar por la estación base:

- 930-931 MHz
- 940-941 MHz

Resolución 06/2002 - Frecuencias para uso de estaciones itinerantes

Se resuelve utilizar las siguientes frecuencias para uso de estaciones itinerantes en el MERCOSUR, a título secundario.

- 462.5625 MHz
- 462.5875 MHz
- 462.6125 MHz
- 462.6375 MHz
- 462.6625 MHz
- 462.6875 MHz
- 462.7125 MHz

Resolución 05/2006 - Manual de procedimientos de coordinación de frecuencias en la banda de 1710 MHz a 1990 MHz y de 2100 MHz a 2200 MHz

En esta resolución se aprueba el “Manual de procedimientos de coordinación de frecuencias en la banda de 1710 MHz a 1990 MHz y de 2100 MHz a 2200 MHz”. Se confiere al SGT N° 1 la tarea de mantener el manual actualizado.

En cuanto a los aspectos técnicos se destaca la atribución¹ de las bandas que figuran en el nombre de la resolución, en el caso de Uruguay, como muestra la Tabla G.9.

Servicio	Estación abonado (MHz)	Estación radiobase (MHz)
Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Terrestres	1710-1765 MHz	1805-1860 MHz
Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Terrestres	1850-1910 MHz	1930-1990 MHz
Servicio Telefónico Fijo Conmutado - Acceso Inalámbrico	1910-1930 MHz	
Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Terrestres	1930-1980 MHz	2120-2170 MHz
Sistemas multicanales terrestres	1990-2200 MHz	

Tabla G.9: Bandas atribuidas en Uruguay por la Resolución N° 05/2006.

¹Estas bandas se identifican para el uso de tecnologías IMT-2000 (conocida como 3G Banda I).

Zonas de coordinación Se deberán coordinar toda Estación Base (EB), Estación Radio Base (ERB) o Estación Terrestre (ET), que en la frontera superen el nivel de referencia de 102 dBm. Este valor no incluye los casos de los sistemas fijos punto a punto y móviles. Para estos casos el nivel de señal de referencia deberá ser calculado para compatibilizar las aplicaciones móviles y los enlaces punto a punto existentes. En caso de no acordar los prestadores acerca del método de cálculo, se adoptará como referencia los métodos recomendados por UIT.

Resolución 38/2006 - Manual de procedimientos de coordinación de frecuencias para estaciones del servicio fijo (punto a punto) en frecuencias superiores a 1000 MHz

La resolución establece los procedimientos formales de solicitud de información, para la coordinación de los enlaces fijos punto a punto por encima de 1000 MHz en zona de coordinación o transfronterizos. En el preámbulo se establece que la coordinación de frecuencias se realizará de acuerdo al cuadro de atribución de frecuencias de cada Estado, que la responsabilidad de esta coordinación será de las Administraciones de cada Estado, y que las Administraciones deberá informar a sus pares las modificaciones que realicen en su cuadro de atribución de frecuencias por encima de los 1000 MHz.

Zonas de coordinación Las zonas de coordinación son franjas geográficas cuyo ancho se mide desde la frontera de los países. El ancho de la franja de coordinación se define en esta resolución de forma dependiente de la frecuencia a la que se operará el enlace.

Rango de frecuencias (MHz)	Distancia mínima de coordinación (km)	Distancia máxima de coordinación (km)
$1400 \leq f \leq 2100$	10	180
$2100 \leq f \leq 2700$	10	180
$2700 \leq f \leq 8700$	10	180
$8700 \leq f \leq 13250$	10	180
$13250 \leq f \leq 39200$	5	150

Tabla G.10: Distancias de coordinación para radioenlaces a frecuencia superior a 1 GHz.

Respecto a estas distancias la norma expresa que:

- “Toda estación que se encuentre en una zona inferior al límite de distancia mínima de coordinación, debe ser coordinada.
- Toda estación que se encuentra entre la distancia máxima y mínima de coordinación, se debe coordinar si el nivel de señal en la línea de frontera es mayor o igual que el valor de señal máxima de la Tabla G.11.
- Toda estación que está localizada más allá de la distancia máxima de coordinación no necesita ser coordinada.
- Las distancias tienen como referencia la línea de frontera de los países involucrados.”

Apéndice G. Resoluciones MERCOSUR

Rango de frecuencias (MHz)	Máxima señal en la línea de frontera (dBm)
$1400 \leq f \leq 2100$	-139.5
$2100 \leq f \leq 2700$	-142.5
$2700 \leq f \leq 8700$	-151
$8700 \leq f \leq 13250$	-154
$13250 \leq f \leq 39200$	-145

Tabla G.11: Máxima señal en la línea de frontera.

Apéndice H

Asignaciones por Servicio

En este Apéndice se abordan los diferentes servicios que utilizan las bandas de VHF y UHF para los cuales se cuenta con información pública respecto a la asignación de frecuencias vigente. Para cada uno de estos servicios se realiza una descripción técnica sobre la tecnología aplicada en Uruguay.

La asignación de frecuencias a cada servicio incluye el canal o banda asignado a cada particular así como las condiciones técnicas de operación autorizadas para cada estación. Dado que esta información es extensa¹ aquí se mencionan únicamente los canales que están actualmente asignados a cada servicio sin distinguir a quiénes² se encuentran asignados ni en qué ubicación se encuentra asignado.

Radiodifusión de Televisión Analógica

La radiodifusión de televisión analógica consiste en la transmisión de información de vídeo y de audio por ondas de radiofrecuencia. En Uruguay la radiodifusión de televisión analógica es abierta, es decir, para el público general por lo que este servicio entra en la definición de UIT del servicio de radiodifusión.

Descripción técnica El sistema de codificación de color utilizado para la transmisión de televisión analógica en Uruguay es *Phase Alternating Line* (PAL). Éste consiste en dividir cada cuadro del vídeo en un número finito de líneas, enviando alternadamente la información de luminancia y crominancia de líneas pares e impares. Esta forma de secuenciar la información ayuda a crear la ilusión de movimiento fluido en el vídeo que se envía. En Uruguay³ se utiliza la variante PAL-N que utiliza 625 líneas por cuadro y un subportadora de vídeo de 3.582056 MHz.

En la Tabla H.1 se presentan algunas características para la transmisión de servicios de televisión analógica, mediante el sistema PAL-N, según la recomendación de UIT⁴.

¹Tampoco se encuentra disponible para todos los servicios, por ejemplo la TV digital.

²A excepción de los servicios móviles.

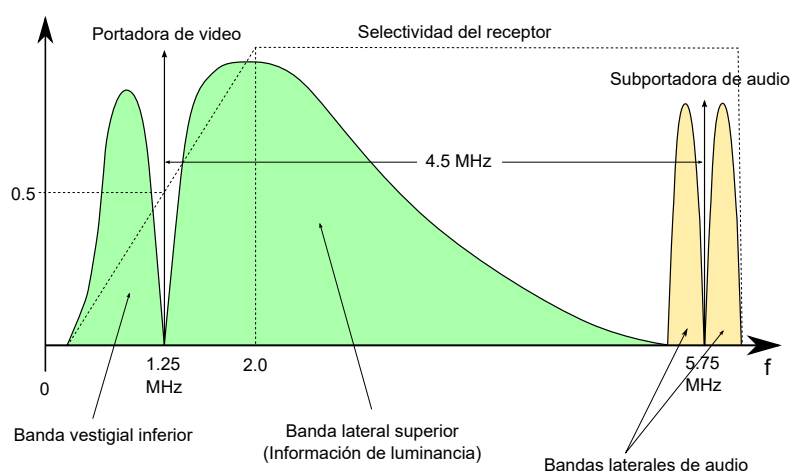
³Así como también en Argentina y Paraguay.

⁴Los valores entre paréntesis se aplican a la combinación PAL utilizada en Argentina.

Característica	PAL-N
Ancho de banda nominal del canal de radiofrecuencia (MHz)	6
Portadora de sonido en relación con la portadora de imagen (MHz)	+4.5
Extremo más próximo del canal en relación con la portadora de imagen (MHz)	-1.25
Ancho nominal de la banda lateral principal (MHz)	4.2
Ancho nominal de la banda lateral vestigial (MHz)	0.75
Tipo y polaridad de las modulaciones de imagen	C3F neg.
Tipo de modulación del sonido	F3E
Desviación de frecuencia (kHz)	± 25
Preacentuación para la modulación (μs)	75
Relación entre las potencias radiadas equivalentes de la señal de imagen (primaria) y de sonido	10/1 a 5/1

Tabla H.1: Características del sistema PAL-N⁵.

En la Fig. H.1 se ilustra como se utiliza el espectro para el caso de un canal de televisión analógica con las características antes mencionadas. Como se observa en la Tabla H.1, la modulación de la información de vídeo es de tipo C3F. Esto significa que el vídeo se modula en amplitud utilizando la técnica de banda lateral vestigial, en inglés *Vestigial Side Band* (VSB). Esta forma de modular en amplitud es particularmente adecuada cuando la señal que se desea transmitir tiene gran ancho de banda e información significativa en las frecuencias bajas, como es el caso del vídeo [79]. Asimismo, la información de audio se modula con F3E, es decir, en FM.


Figura H.1: Uso del espectro para un canal de televisión analógica⁶.

Asignaciones Las estaciones de servicio de radiodifusión de televisión analógica abierta en Uruguay se encuentran asignadas en la banda VHF. Se utilizan los canales VHF del 2 al 13, asignados a estaciones a lo largo del territorio nacional. Vale la pena señalar que los canales VHF son contiguos en el espectro, con la sola excepción de los canales

⁵Recomendación UIT-R BT.1701-1 [48].

⁶Elaboración propia.

6 y 7 entre los cuales hay una banda sin canalizar (entre los 88 MHz y los 174 MHz). La Tabla H.2 muestra las porciones de espectro que ocupa cada canal.

Canal VHF	Frecuencia inferior (MHz)	Frecuencia superior (MHz)
2	54	60
3	60	66
4	66	72
5	76	82
6	82	88
7	174	180
8	180	186
9	186	192
10	192	198
11	198	204
12	204	210
13	210	216

Tabla H.2: Canales asignados a estaciones de televisión analógica abierta.

En el sitio web de la URSEC está disponible la información de qué estaciones están asignadas a los diferentes canales, sus coordenadas geográficas, la PER y la HMA.

Radiodifusión Sonora por Modulación de Frecuencia

La radiodifusión sonora por modulación de frecuencia (FM) consiste en transmitir una señal, generalmente audio en estéreo, mediante la modulación de la frecuencia de una señal portadora sinusoidal.

En Uruguay existen estaciones de FM comerciales y comunitarias. El servicio de radiodifusión comunitaria es un servicio de radiodifusión no estatal de interés público, prestado por asociaciones civiles o grupos organizados sin fines de lucro, orientado a satisfacer las necesidades de comunicación social y a habilitar el ejercicio del derecho a la información y a la libertad de expresión⁷.

Descripción técnica A continuación se listan las características de las transmisiones de FM en Uruguay según lo dicta la norma técnica incluida en la Resolución de la DNC N° 063/999 y en lo que respecta al uso del espectro radioeléctrico.

- La frecuencia central del canal asignado a una estación coincide con la frecuencia de portadora emitida en ausencia de señal modulante.
- Cada canal tiene un ancho de banda de 200 kHz y se designa por un número o por su frecuencia central.
- Se utiliza el sistema estereofónico de frecuencia piloto, que emplea una frecuencia piloto de referencia de 19 kHz y una subportadora de frecuencia doble a la anterior, 38 kHz, modulada en amplitud con portadora suprimida. En la Fig. H.2 se representa como se distribuyen los 200 kHz del canal entre las diferentes portadoras.

⁷La definición completa de lo que se entiende por servicio de radiodifusión comunitaria se puede encontrar en la Ley N° 18.232 de Servicio Radiodifusión Comunitaria.

Apéndice H. Asignaciones por Servicio

- Señal I/D : Señal del canal izquierdo/derecho de un programa estereofónico.
 - Señal M: Señal compatible del canal principal monofónico igual a la semi-suma de las señales I y D: $(I + D)/2$.
 - Señal S: Señal del canal auxiliar de sonido estereofónico comprendido entre las frecuencias de 23 kHz a 53 kHz, producto de las bandas laterales que se obtienen al modular en amplitud (AM) una portadora de 38 kHz por la semidiferencia de las señales I y D: $(I - D)/2$.
- Se define como 100 % de la modulación a una desviación de la frecuencia portadora principal igual a $-/+ 75$ kHz.

Como es de esperar los receptores mono recibirán la señal M, mientras que la señal S solamente podrá ser reconstruida en receptores estereofónicos de la siguiente manera: $I = M + S$, $D = S - M$.

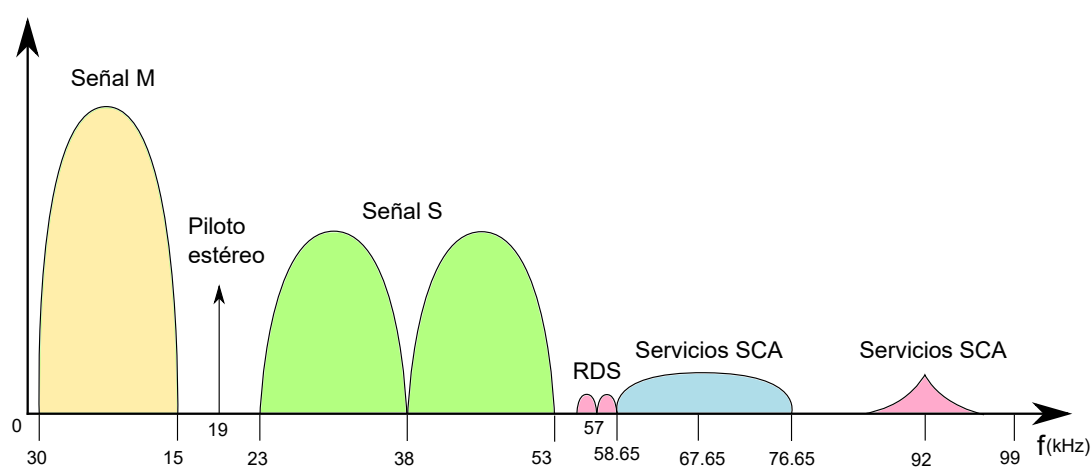


Figura H.2: Uso del espectro para un canal de FM.

Asignaciones Los canales asignados al servicio de radiodifusión FM comercial coinciden con los acordados en el ámbito del MERCOSUR en la Resolución N° 31/2001 de este organismo. En la Tabla H.3 se presenta una lista de los canales con sus respectivas frecuencias centrales. A cada estación de radiodifusión FM del país se le asigna un canal de la lista, pudiendo reutilizarse en caso de que las distancias entre las estaciones y la propagación de sus emisiones del mismo canal así lo permitan.

Para el caso de las estaciones de FM comunitarias, hoy en día URSEC tiene publicadas dos planillas en su página web.

- Listado Datos Técnicos Emisoras⁸: en esta planilla se presentan datos de las estaciones de televisión analógica, radiodifusión AM, FM comercial y comunitaria tales como potencia radiada, altura de antenas, coordenadas geográficas, etc.

⁸<https://www.ursec.gub.uy/inicio/informacion-tecnica/telecomunicaciones/radiodifusion-sonora/2014-listados-radiodifusion/>

- Listado de Emisoras Comunitarias (Asociaciones Civiles y Frecuencias Compartidas)⁹: en esta planilla se presenta un listado de emisoras, también especificando la frecuencia asignada.

En la segunda planilla figuran tres emisoras comunitarias asignadas a frecuencias fuera de lo atribuido en el marco de la Resolución del MERCOSUR y la norma técnica publicada por URSEC para radiodifusión FM. Estas emisoras están asignadas a los canales 198 y 199 de FM (frecuencias 87.5 MHz y 87.7 MHz). A los efectos de este estudio, se tomará en cuenta la primera planilla, dado que la segunda contiene campos que denotan que algunas de ellas no están aún operativas, o están en proceso de instalación y al no tener una fecha de publicación de ninguna de las dos planillas se prefiere utilizar la primera donde se centraliza la información de todos los servicios de televisión analógica y radiodifusión sonora.

Canal	Frecuencia (MHz)	Canal	Frecuencia (MHz)	Canal	Frecuencia (MHz)
200	87.9	235	94.9	270	101.9
201	88.1	236	95.1	271	102.1
202	88.3	237	95.3	272	102.3
203	88.5	238	95.5	273	102.5
204	88.7	239	95.7	274	102.7
205	88.9	240	95.9	275	102.9
206	89.1	241	96.1	276	103.1
207	89.3	242	96.3	277	103.3
208	89.5	243	96.5	278	103.5
209	89.7	244	96.7	279	103.7
210	89.9	245	96.9	280	103.9
211	90.1	246	97.1	281	104.1
212	90.3	247	97.3	282	104.3
213	90.5	248	97.5	283	104.5
214	90.7	249	97.7	284	104.7
215	90.9	250	97.9	285	104.9
216	91.1	251	98.1	286	105.1
217	91.3	252	98.3	287	105.3
218	91.5	253	98.5	288	105.5
219	91.7	254	98.7	289	105.7
220	91.9	255	98.9	290	105.9
221	92.1	256	99.1	291	106.1
222	92.3	257	99.3	292	106.3
223	92.5	258	99.5	293	106.5
224	92.7	259	99.7	294	106.7
225	92.9	260	99.9	295	106.9
226	93.1	261	100.1	296	107.1
227	93.3	262	100.3	297	107.3
228	93.5	263	100.5	298	107.5
229	93.7	264	100.7	299	107.7
230	93.9	265	100.9	300	107.9
231	94.1	266	101.1		
232	94.3	267	101.3		
233	94.5	268	101.5		
234	94.7	269	101.7		

Tabla H.3: Canales de FM asignados en Uruguay.

Finalmente, la porción de espectro asignado para este servicio abarca desde 87.4 MHz hasta los 108 MHz.

⁹<https://www.ursec.gub.uy/inicio/informacion-tecnica/telecomunicaciones/radiodifusion-sonora/radiodifusion-comunitaria/>

Radiodifusión de Televisión Digital

La radiodifusión de TVD es el servicio de radiodifusión que más recientemente ha entrado en funcionamiento en el país. Consiste en enviar audio y vídeo codificado con técnicas digitales, las cuales permiten lograr una mayor eficiencia espectral que la obtenida con la televisión analógica. Con un canal de 6 MHz de ancho de banda¹⁰, las técnicas digitales permiten:

- Recibir vídeo en HD y audio de mejor calidad que la TV analógica.
- Aumentar el número de señales de televisión.
- Recibir televisión en dispositivos móviles.
- Incorporar interactividad al servicio de televisión.

Existe un sitio web publicado por DINATEL llamado Televisión Digital Abierta en Uruguay¹¹ que reúne información sobre varios aspectos de la tecnología (contenidos didácticos, información sobre receptores compatibles, información de la norma ISDB-T, normativa, etc.).

Descripción técnica El estándar adoptado para la radiodifusión de TVD en Uruguay es el ISDB-T, originalmente desarrollado en Japón, modificado en Brasil y adoptado mediante el Decreto N° 77/2011 del 17 de febrero de 2011. A continuación se presentan de forma breve las principales características de la norma.

- **OFDM** El uso de la modulación OFDM le aporta robustez frente a interferencias externas y provocadas por el efecto multicamino. Además es compatible con el concepto de redes de frecuencia simple, en inglés *Single Frequency Networks* (SFN), que permite que varios transmisores emitan la misma señal en forma simultánea por el mismo canal de frecuencia, obteniendo diversidad espacial en recepción.
- **Estructura segmentada** Repartiendo el espectro de un canal UHF de 6 MHz en 13 segmentos de 429 kHz, como muestra la Fig. H.3, se obtiene la flexibilidad de recibir señales de diferente naturaleza (televisión en HD o SD, datos y audio). Aquellas señales que requieren mayor ancho de banda, como el vídeo en HD, utilizarán más segmentos para ser transmitidas.
- **Time Interleaving** En los sistemas de transmisión digital se implementan algoritmos de corrección de errores para reducir la degradación que sufre la señal debido a la interferencia y el ruido. Estos algoritmos muestran buenos resultados contra errores aleatorios como los que provoca el ruido térmico, pero no son tan efectivos cuando los errores se dan en formato de ráfagas (que son frecuentes en ambientes interiores y receptores móviles). Para mejorar este aspecto se aplica la técnica de *Time Interleaving* para aleatorizar el efecto de los errores por ráfagas y así aumentar la robustez de la recepción.

¹⁰Es decir, con igual ancho de banda que un canal de TV convencional.

¹¹<http://www.tvd.gub.uy/>

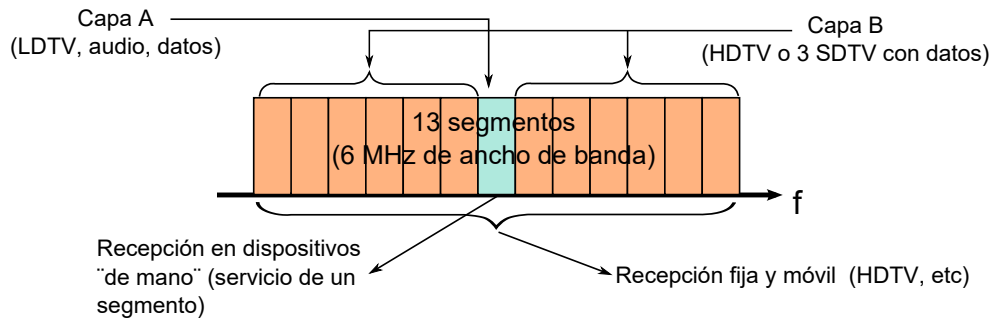


Figura H.3: Canal segmentado ISDB-T¹².

Asignaciones Mediante el Decreto N° 82/2015 se determina la identificación de la sub-banda de 512 MHz a 698 MHz (canales UHF 21 al 51) para el despliegue del servicio de televisión digital en el territorio nacional, con excepción del segmento 608-614 MHz (canal UHF 37) que se encuentra atribuido al servicio de radioastronomía. Esta determinación aumenta la cantidad de espectro identificado para TVD en el país hasta el momento¹³.

La URSEC publica en su sitio web un “Listado Canales TVD-Terrestre Adjudicados”¹⁴. Estrictamente, como se vio al comienzo de esta sección y en la Sección 3.2 el listado contiene asignaciones y no adjudicaciones, dado que relaciona los canales UHF con su titular y la ubicación donde se operaría el servicio.

La Fig. H.4 muestra las frecuencias ocupadas por los canales asignados según dicho listado.

¹²Diagrama basado en el publicado por el Grupo de Expertos en Radiodifusión Digital (<http://www.dibeg.org/>).

¹³En el Decreto N° 153/012, tres años antes se había identificado la banda desde 512 MHz a 638 MHz, también a excepción del canal UHF 37.

¹⁴<https://www.ursec.gub.uy/inicio/informacion-tecnica/telecomunicaciones/radiodifusion-sonora/2014-listados-radiodifusion/>

Apéndice H. Asignaciones por Servicio

Canal UHF	Frecuencia inferior (MHz)	Frecuencia superior (MHz)	Estado
21	512	518	Asignado
22	518	524	No asignado
23	524	530	No asignado
24	530	536	Asignado
25	536	542	Asignado
26	542	548	Asignado
27	548	554	Asignado
28	554	560	Asignado
29	560	566	Asignado
30	566	572	Asignado
31	572	578	Asignado
32	578	584	Asignado
33	584	590	Asignado
34	590	596	No asignado
35	596	602	Asignado
36	602	608	Asignado
38	614	620	Asignado
39	620	626	Asignado
40	626	632	Asignado
41	632	638	Asignado
42	638	644	Asignado
43	644	650	No asignado
44	650	656	No asignado
45	656	662	Asignado
46	662	668	Asignado
47	668	674	No asignado
48	674	680	No asignado
49	680	686	No asignado
50	686	692	No asignado
51	692	698	No asignado

Tabla H.4: Canales asignados a TV digital.

De todos los 30 canales UHF que el decreto destina para TVD, quedan sin asignar únicamente los siguientes canales: 22, 23, 34, 43, 44 y del 46 al 51.

Televisión para Abonados

La TVA consiste en la transmisión de información de vídeo y audio para ser recibida únicamente por aquellos usuarios que se subscriben al servicio, los abonados. Este tipo de servicio no está dentro de los que la UIT define como servicios de radiodifusión porque a diferencia de TV abierta o de la radiodifusión FM, la TVA no está destinada a ser recibida directamente por el público en general¹⁵.

En Uruguay, en las bandas de interés de este proyecto, se utilizan dos modalidades para la transmisión de TVA: MMDS y UHF codificado.

Descripción técnica

- **UHF Codificado** .- Consiste en transmitir un servicio de televisión, ya sea digital o analógica, a través del uso de canales UHF con una etapa de encriptación

¹⁴El canal UHF 37 no se asigna para TVA por estar atribuido al servicio de radioastronomía.

¹⁵Lo que contradice la definición que UIT da para servicios de radiodifusión.

de la señal que es emitida por la estación de TVA, de forma tal que sólo un receptor capaz de descryptar esa señal pueda recuperar la información de vídeo y audio que fue enviada. Es necesario adicionar los dispositivos conocidos como “decodificadores”¹⁶ a los televisores, para que puedan mostrar la información descryptada.

- **MMDS** .- En inglés *Multichannel Multipoint Distribution Service*, con este sistema se pueden enviar múltiples señales de televisión a través de una transmisión del tipo punto-multipunto de microonda¹⁷.

Asignaciones En el sitio web de URSEC existe una lista de Televisión para Abonados¹⁸ actualizada al 22 de enero de 2015. Sin embargo ésta no incluye información sobre las bandas que cada empresa asignataria opera.

UHF Codificado Mediante el Decreto N° 82/2015 se asigna los siguientes canales para operar TVA con UHF codificado. Estas asignaciones tienen validez en determinadas áreas de los departamentos de Montevideo, Canelones y San José¹⁹.

Canal UHF	Frec. inferior (MHz)	Frec. superior (MHz)
35*	596	602
36	602	608
38	614	620
39	620	626
40	626	632
41*	632	638
42	638	644
43	644	650
44	650	656
45	656	662
46	662	668
47	668	674
48	674	680
49	680	686
50	686	692
51	692	698

Tabla H.5: Canales asignados para servicio de TVA.

*Estos canales son asignados a título secundario.

¹⁶La acción de codificar no es técnicamente lo mismo que la acción de encriptar, de allí el entrecomillado. La primera busca representar un mensaje de mediante el uso de un código para una transmisión más eficiente, mientras que la segunda busca modificar el mensaje de forma tal que solamente pueda ser interpretado por ciertos receptores a los que el mensaje va destinado.

¹⁷Se le conoce popularmente como “*Wireless Cable*”, en español “Cable inalámbrico”.

¹⁸<https://www.ursec.gub.uy/inicio/informacion-tecnica/telecomunicaciones/radiodifusion-sonora/inicio-institucional-agentes-regulados-tv-para-abonados/>

¹⁹Las localidades específicas son determinadas por Resolución del Poder Ejecutivo N° 545/993, Resolución del Poder Ejecutivo N° 117/994, Resolución del Poder Ejecutivo N° 214/998 y Resolución de la URSEC N° 413/003.

Apéndice H. Asignaciones por Servicio

MMDS En las Resoluciones N° 129 y 130 de URSEC del año 2011, se modifica la canalización a utilizarse para los sistemas MMDS. Hasta ese momento, el servicio de TVA por MMDS estaba asignado a la banda de 2500 MHz a 2690 MHz. Las resoluciones se enmarcan dentro del Plan de Digitalización y Migración (PlaDiMi), cuyo objetivo es liberar las bandas identificadas para desarrollar tecnologías de IMT: 2500 MHz a 2570 MHz y 2620 MHz a 2690 MHz. El plan establece que a partir del primero de febrero de 2013, los servicios MMDS deberán prestarse de forma digital y asignados en los canales que muestra la Tabla H.6.

Identificación del canal	Frecuencia inferior (MHz)	Frecuencia superior (MHz)	Carácter de operación
S1	2566	2572	Secundario
P1	2572	2578	Primario
P2	2578	2584	Primario
P3	2584	2590	Primario
P4	2590	2596	Primario
P5	2596	2602	Primario
P6	2602	2608	Primario
P7	2608	2614	Primario
P8	2614	2620	Primario
S2	2620	2626	Secundario

Tabla H.6: Canales asignados a TVA por MMDS.

La URSEC no cuenta con un listado público que indique los canales asignados a los diferentes operadores. Por tal motivo no es posible determinar cuáles de estos canales están asignados ni en que zonas están autorizados a funcionar.

Telecomunicaciones Móviles Celulares

Las redes celulares permiten hoy en día enviar y recibir de forma inalámbrica una variedad de contenidos como voz, texto, páginas de Internet, correo electrónico, vídeo, etc. A diferencia de otras redes inalámbricas, donde las estaciones móviles se comunican todas contra una estación base central, en las redes celulares se despliega un número de estaciones base a lo largo del área a cubrir. El nombre de “red celular” proviene de la forma más común de diseñar este tipo de redes, dividiendo la superficie en áreas de cobertura más pequeñas a las que se le llama celdas. Cada celda es cubierta por una estación base.

En Uruguay se han implementado los siguientes sistemas de redes celulares.

- ***Advanced Mobile Phone System (AMPS) (1G)***

Fue el primer sistema utilizado en Uruguay en la primera mitad de los años noventa, actualmente no soportado en el país. Es lo que se denomina como estándar de primera generación de telecomunicaciones móviles celulares. Solamente permitía llamadas de voz, modulando la información con FM y utilizando la técnica de acceso al medio *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*.

- ***Global System for Mobile Communications (GSM) (2G)***

Es el sistema que sucedió a AMPS y fue el primer sistema digital en utilizarse en

Uruguay para redes celulares. Además de llamadas de voz, permite la transmisión de datos y utiliza técnicas de acceso al medio TDMA aumentando así la cantidad de terminales móviles soportados por la tecnología. La transmisión de voz y de datos son ambas orientadas a circuitos. Al día de hoy aún se utiliza, como en muchas otras partes del mundo, como complemento de las redes de $3G$ y $4G$.

- **UMTS ($3G$)**

Es un sistema basado en la técnica de acceso al medio WCDMA. Soporta llamadas de voz con conexiones orientadas a circuitos, pero las conexiones de datos se realizan con el modelo de paquetes. Permite velocidades en conexiones de datos superiores a GSM, además de agregar nuevos servicios como por ejemplo la videoconferencia y los mensajes multimedia. El estándar HSPA complementa a esta generación de tecnologías móviles, mejorando la eficiencia en el envío de paquetes de datos tanto en el enlace descendente, en inglés *downlink* (DL) como en el enlace ascendente, en inglés *uplink* (UL) y agregando nuevos esquemas de modulación.

- **Long Term Evolution (LTE) ($4G$)**

Soporta conexiones orientadas únicamente a paquetes y en caso de soportar voz lo hace con protocolos de voz sobre IP (o VoIP). Esta tecnología representa un gran salto en cuanto a velocidades subida y bajada de datos respecto a las anteriores, además de mejorar su respuesta frente a la movilidad de las estaciones receptoras. Esto se logra en gran medida gracias a las técnicas de acceso al medio OFDM que incorpora.

La Tabla H.7 presenta una comparación de diferentes aspectos técnicos de las tecnologías de redes celulares que coexisten actualmente en el país. Ésta fue elaborada a partir de diferentes tablas publicadas en el libro “*Fundamentals of LTE*” [80].

Apéndice H. Asignaciones por Servicio

	AMPS	GSM	UMTS	HSPA	LTE
Bandas	850 MHz	850/900 MHz, 1.8/1.9 GHz	850/900 MHz, 1.8/1.9/2.1 GHz	850/900 MHz, 1.8/1.9/2.1 GHz	700 MHz, 1.5/1.7/2.1/2.6 GHz
Ancho de banda del canal	30 kHz	200 kHz	5 MHz	5 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15, ó 20 MHz
Número de cana- les	832	-	-	-	-
Técnica de acceso al medio	FDMA	TDMA/FDMA	CDMA	CDMA/TDMA	OFDMA/SC- OFDMA
Modo de dúplex	FDD	FDD	FDD	FDD	FDD
Modulación de voz	FM	GMSK	-	-	-
Modulación de datos	-	-	DS-SS: QPSK	DS-SS: QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM: QPSK, 16QAM, 64QAM
Velocidad pico	-	GPRS: 107 kbps; EDGE: 384 kbps	384–2048 kbps	DL: 3.6– 14.4 Mbps; UL: 2.3–5 Mbps	DL: 150 Mbps (2x2 MIMO, 20 MHz); UL: 75 Mbps (10 MHz)
Velocidad típica de usuario	-	GPRS: 20-40 kbps; EDGE: 80-120 kbps	150–300 kbps	500–700 kbps	-
Latencia en plano de usuario	-	600-700 ms	100–200 ms	70–90 ms	5–15 ms

Tabla H.7: Información comparativa de las tecnologías celulares aplicadas en Uruguay.

Las bandas de frecuencias que pueden ser asignadas a los diferentes sistemas de telecomunicaciones móviles celulares se encuentran normalizados en las especificaciones técnicas del 3GPP²⁰. En la Tabla H.8 se muestran las bandas utilizadas en Uruguay.

Banda	f_{inf} UL (MHz)	f_{sup} UL (MHz)	f_{inf} DL (MHz)	f_{sup} DL (MHz)	Especificación técnica (3GPP)
850	824	849	869	894	TS 25.101
900 GSM	880	915	925	960	TS 45.005
1800 DCS	1710	1785	1805	1880	TS 25.101
1900 PCS	1850	1910	1930	1990	TS 25.101
2100	1920	1980	2110	2170	TS 25.101
AWS	1710	1755	2110	2155	TS 36.101

Tabla H.8: Bandas para sistemas de telecomunicaciones móviles celulares.

²⁰El 3GPP reúne siete organizaciones de desarrollo de estándares (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA y TTC). Sitio web: <http://www.3gpp.org/>

Asignaciones A continuación se presenta un listado de las bandas que han sido asignadas a operadores para su uso en telecomunicaciones móviles celulares. Las asignaciones de este tipo no se encuentran disponibles en la página web de la URSEC. La información de asignación de servicios celulares recopilada en esta sección está basada en los datos cedidos por el grupo de investigación POLIMATE, obtenidos en diálogo con la URSEC y actualizados a setiembre de 2014. Las asignaciones presentadas en la Tabla H.9 se obtienen partiendo de la información cedida por POLIMATE y actualizada según las resoluciones de URSEC posteriores a setiembre de 2014.

Operador	Frecuencia Inicial (MHz)	Frecuencia Final (MHz)	BW (MHz)	Banda
ANTEL	825	835	10	850
MOVISTAR	836	845	9	850
ANTEL	846	847	1	850
MOVISTAR	847	849	2	850
ANTEL	870	880	10	850
MOVISTAR	881	890	9	850
ANTEL	891	892	1	850
MOVISTAR	892	894	2	850
ANTEL	911	915	4	900 GSM
ANTEL	956	960	4	900 GSM
ANTEL	1715	1725	10	1800 DCS
ANTEL	1730	1745	15	AWS
CLARO	1750	1755	5	AWS
ANTEL	1810	1820	10	1800 DCS
CLARO	1860	1865	5	1900 PCS
MOVISTAR	1865	1890	25	1900 PCS
CLARO	1895	1910	15	1900 PCS
ANTEL**	1920	1925	5	2100
ANTEL*	1925	1930	5	2100
ANTEL	1930	1935	5	2100
CLARO	1940	1945	5	1900 PCS
MOVISTAR	1945	1970	25	1900 PCS
CLARO	1975	1990	15	1900 PCS
ANTEL**	2110	2115	5	2100
ANTEL*	2115	2120	5	2100
ANTEL	2120	2125	5	2100
ANTEL	2130	2145	15	AWS
CLARO	2150	2155	5	AWS

Tabla H.9: Asignación para el uso en servicios de telecomunicaciones móviles celulares²¹.

Identificación de espectro para International Mobile Telecommunications (IMT) En vista del creciente desarrollo de las tecnologías que brindan banda ancha inalámbrica, y en consonancia con las recomendaciones de UIT sobre la atribución e identificación de bandas de frecuencias en la región para el despliegue de IMT, el poder ejecutivo resuelve:

²¹ * La Resolución de URSEC N° 291/2014 resuelve asignar a ANTEL los sub-bloques de frecuencia 1920 a 1925 MHz y 2110 a 2115 MHz para la prestación del servicio de telecomunicaciones móviles.

** La Resolución de URSEC N° 141/007 autoriza a ANTEL a operar en forma provisoria en los sub-bloques de frecuencias 1925 a 1930 MHz y 2115 a 2120 MHz hasta tanto culmine la coordinación técnica con la Administración de Argentina para el empleo de las frecuencias 1930 a 1935 MHz y 2120 a 2125 MHz.

Apéndice H. Asignaciones por Servicio

- **Decreto N° 136/011**

Identificar las sub-bandas de 2500-2570 MHz y 2620-2690 MHz para el futuro despliegue de servicios de telecomunicaciones avanzados (Telecomunicaciones Móviles Internacionales - IMT y tecnologías similares).

- **Decreto N° 82/015**

Identificar la sub-banda de 698-806 MHz para el futuro despliegue de servicios de telecomunicaciones avanzados (Telecomunicaciones Móviles Internacionales - IMT y tecnologías similares).

- **Decreto N° 83/015**

Adoptar la canalización de frecuencias de la Comunidad Asia Pacífico (APT-700) para la utilización de la “Banda de 700 MHz” (698-806 MHz) en la modalidad FDD, según el esquema de segmentación A5 de la Recomendación UIT-R M.1036-4, marzo 2012.

Apéndice I

Internet de las Cosas

Los orígenes de IoT se pueden encontrar en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), donde funcionaba el *Centro de investigación Auto-ID*¹. El término de IoT fue introducido en el año 1999 por Kevin Ashton un investigador británico cofundador y director ejecutivo del Centro².

El *Internet Business Solutions Group* de Cisco (IBSG) estima que IoT nació en algún punto entre los años 2008 y 2009 y se estima que en el año 2020 habrá 50 mil millones de dispositivos conectados a Internet (Ver Fig. I.1) [49].

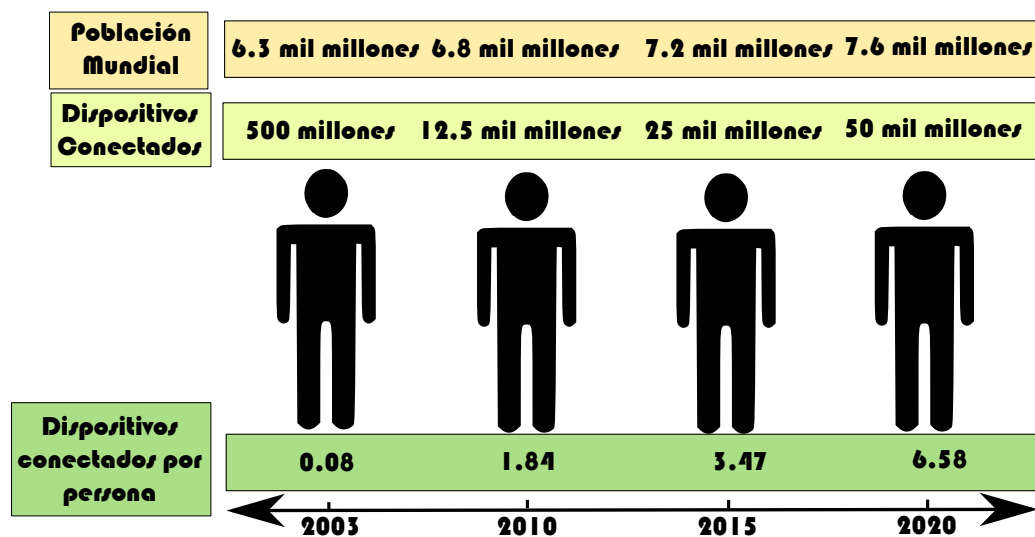


Figura I.1: Evolución prevista de IoT³.

Los países aprovechan este concepto para el desarrollo y la innovación en otros sectores. En la ciudad de Seattle (EE.UU.) los basureros contienen pequeños sensores que reportan qué tan llenos están y de acuerdo a ello se logra un recorrido de recolección

¹Es un grupo de investigación en el campo de la Identificación por radiofrecuencia, en inglés *Radio Frequency Identification* (RFID) y tecnologías de sensores.

²Aunque Kevin Ashton mencionó por primera vez la IoT en el año 1999, la realidad es que había estado en desarrollo durante un tiempo. El primer dispositivo conectado a Internet, fue una máquina de *Coca-Cola* en la Universidad Carnegie Melon a principios del año 1980. Los programadores podían conectarse a la máquina a través de Internet, comprobando el estado de la máquina y determinando si había o no una bebida fría.

³Imagen elaborada en base a previsión realizada por Cisco IBSG en abril del año 2011.

mucho más eficiente. En la provincia de Ontario (Canadá) se instalaron receptores Wi-Fi y *bluetooth* para obtener estadísticas de tráfico en las carreteras⁴ y en otros países se han interconectado elementos para el uso eficiente de la electricidad.

Expertos de la FCC han predicho que no será necesario atribuir espectro adicional expresamente para las comunicaciones de IoT sin embargo IoT añadirá una carga significativa a los servicios existentes, tales como Wi-Fi y redes móviles *4G*. De todas formas IoT indirectamente aumenta la demanda por el espectro radioeléctrico.

Surgen interrogantes acerca de si los operadores móviles están preparados para soportar el uso cada vez más intenso de teléfonos inteligentes, si cuentan con los recursos necesarios para que su red no se vea saturada y son suficientes las tecnologías IMT avanzadas existentes.

Ante este panorama, la combinación del uso de los servicios móviles, con la conexión Wi-Fi y conexión fija por fibra óptica cobra gran importancia para subsanar la posible saturación de las infraestructuras móviles.

Un desarrollo acertado de muchos países ha sido implementar los llamados Wi-Fi *hotspots*⁵, se trata de zonas que se encuentran en lugares públicos como aeropuertos, bares y bibliotecas, donde se permite, a veces gratis y a veces a cambio de una suma de dinero, conectar ordenadores o teléfonos móviles a Internet⁶ [81].

Si bien en la mayoría de los países (principalmente los desarrollados) IoT suele ser un concepto con una gran cantidad de beneficios en materia de desarrollo social y económico, hay autores que plantean los riesgos de este desarrollo en materia de privacidad y seguridad.

Otros autores⁷ indican que en un contexto como el latinoamericano, la idea del IoT puede desembocar fácilmente en formas de discriminación y profundización de la llamada brecha digital⁸. Según la información recolectada, en América Latina el desarrollo de IoT avanza lento y en Uruguay la oferta de IoT está limitada a pocos equipos como los televisores inteligentes (en inglés *smart TV*), los dispositivos usables (en inglés *wearables*, son dispositivos que pueden encontrarse por ejemplo, dentro relojes y pulseras) y domótica⁹.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y el fabricante de equipos *Cisco* describen IoT como una oportunidad fundamental de desarrollo a escala mundial que podría mejorar las vidas de millones de personas y acelerar espectacularmente los avances para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas en su informe *Harnessing the Internet of Things for Global Development* (Aprovechar la Internet de las cosas en pro del desarrollo mundial)¹⁰. En el mencionado informe se aportan pruebas que demuestran que la IoT ya tiene importantes consecuencias para los programas de salud, educación y subsistencia (por ejemplo la productividad agrícola)

⁴<http://www.govtech.com/transportation/Roadside-Bluetooth-Wi-Fi-Systems.html>

⁵Técnicamente son puntos de acceso a Internet inalámbricos.

⁶Con una población de 1300 millones de habitantes, el Gobierno Chino se ha propuesto transformar las cabinas de teléfono públicas en estos puntos para hacer del país una red gigante de acceso Wi-Fi.

⁷Consultar bibliografía en [82].

⁸La brecha digital es una medida de las diferencias en el desarrollo de los ciudadanos o de las regiones que se producen por las desigualdades de acceso a las TIC, consultar http://wikitel.info/wiki/Brecha_Digital

⁹<http://www.elpais.com.uy/el-empresario/ideas-uruguayas-impulsan-despegue-internet.html>

¹⁰<https://www.itu.int/en/action/broadband/Documents/Harnessing-IoT-Global-Development.pdf>

de los países en desarrollo.

La enorme variedad de servicios que ofrece IoT trae consigo una gran cantidad de retos significativos para los cuales deben estar preparados todos los sectores de la industria, la medicina, la sociedad, los gobiernos y los proveedores de servicio a nivel mundial.

La misma infraestructura que permite a las personas crear, almacenar y compartir infinidad de información también puede poner en peligro su privacidad y su seguridad. Toda esta información se podría usar para convertir la llamada *sociedad de la información* en "Vigilancia de la sociedad", para evitarlo los sistemas de gestión de identidad deben mejorar con un énfasis en el anonimato y la protección de los datos personales. La complejidad actual de los sistemas de telecomunicaciones hace que sean difíciles de gestionar con eficacia, para el buen desarrollo de IoT es necesaria una política diseñada con prudencia y un marco regulatorio eficaz, en otro caso esto puede convertirse en un obstáculo para el crecimiento de IoT.

IoT trae consigo desafíos de índole técnica y política. A continuación se enumeran y clasifican estos retos [50].

- **Retos técnicos**

- *Fiabilidad*: los nuevos dispositivos (sensores) deberán estar bien calibrados y proporcionar datos reales sobre los objetos conectados a Internet.
- *Escalabilidad*: la escalabilidad de la red (por ejemplo la conexión de billones en vez de millones de objetos conectados) impone nuevas demandas en los centros de procesamiento de datos (las redes IP deberán ser re-dimensionadas para soportar el gran volumen de datos).
- *Energía*: la alimentación de los dispositivos conectados varía en un amplio rango y con un mayor ancho de banda es necesario que los dispositivos utilicen más potencia.
- *Costo*: costos asociados a los sensores y nuevos dispositivos.
- *Capacitación*: capacitación de técnicos y especialistas en las nuevas tecnologías

- **Retos políticos**

- En materia política IoT trae un gran número de aspectos a considerar. La gestión del ERE (concesión de licencias), las normas, la competencia en los mercados, la seguridad y la privacidad, son algunos de ellos. Generalmente el ente regulador de telecomunicaciones esta familiarizado sólo con algunas de estas cuestiones, en el resto son otros los entes familiarizados con el tema, probablemente IoT requiera que la regulación se lleve adelante mediante una interacción efectiva entre los diferentes organismos, con la idea de que los reguladores de las telecomunicaciones trabajen en conjunto con sus homólogos de protección de datos y seguridad, así como con los organismos competentes en materia de salud, transporte, agua, energía, etc. A nivel internacional deberá existir el mismo tipo de trabajo en conjunto entre regiones y países para permitir que el despliegue y desarrollo de IoT se lleve adelante de manera más eficaz.

- **Retos técnicos y políticos**

- *Interoperabilidad*: El desarrollo de IoT tiene un pilar fundamental en la interoperabilidad. Para que un auto, un avión o cualquier objeto pueda enviar y recibir información es necesario que sea capaz de conectarse con otras redes y sistemas sin problemas y de forma segura. La interoperabilidad es la habilidad de intercambiar datos e información a través de sistemas, aplicaciones o componentes que quizás usen diferentes tipos de tecnologías, protocolos o políticas¹¹, en este sentido el establecimiento de estándares y normas pueden lograr el nivel de interoperabilidad requerido.
- *Seguridad y privacidad*: Como hemos mencionado, las acciones que se tomen en materia de seguridad y privacidad son claves para el desarrollo de IoT.
- *Numeración*: un aspecto fundamental a tomar en cuenta es que IoT tendrá miles de millones de objetos que deben ser identificados de forma única, un desafío que hasta el momento no está superado, no hay ningún acuerdo a nivel internacional, a pesar de que el protocolo de Internet versión 6 (IPv6) se convertirá seguramente en la solución por defecto¹².
- *Demanda de ERE*: la diversidad y cantidad de dispositivos que se estima se conecten a IoT da lugar a una amplia gama de requisitos para la red de telecomunicaciones tanto a nivel nacional, como regional e internacional, este impacto conducirá al aumento en la demanda de espectro para la transmisión inalámbrica de datos. Se estima necesaria la adopción de un régimen flexible para garantizar la innovación y la adopción de IoT.

En conclusión, con esta tendencia hay mucho trabajo por delante tanto por parte de los proveedores de servicios como por parte de los entes reguladores, muchos desafíos se plantean en particular en torno al uso del ERE y a las políticas que lo rodean. Deben darse cambios significativos no solo a nivel tecnológico sino también en la regulación y en las normas para que este desarrollo sea posible¹³.

¹¹Hoy en día existen al menos 115 protocolos diferentes usados por los dispositivos conectados a la llamada *nube*, en otras palabras Internet [83].

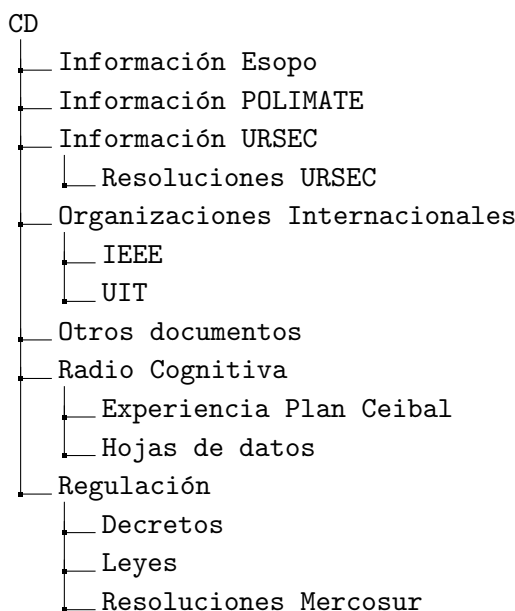
¹²En ese caso la evolución de IPv4 a IPv6 plantea grandes desafíos técnicos.

¹³Para profundizar en la regulación en torno a IoT consultar [84] y [83].

Apéndice J

Contenido del CD

A continuación se detalla la estructura de carpetas del CD y de que forma se referencian los archivos que éste contiene.



Referencias de los archivos

Los archivos se encuentran referenciados con una cadena de caracteres o característica, indicada al comienzo del nombre de cada archivo. A continuación se explica como interpretar las características, donde “x”, “y” y “z” indican dígitos numéricos, mientras que “m” indica una letra mayúscula.

- **Bxx** - Documento citado en la bibliografía con el número “xx”.
- **PxxxPyYLzz** - Documento mencionado por primera vez en la página “xxx”, párrafo “yy” y línea “zz” dentro del párrafo.
- **CxxNyy** - Documento mencionado por primera vez en el Capítulo “xx”, nota al pie “yy”.
- **AmNyy** - Documento mencionado por primera vez en el Apéndice “m”, nota al pie “yy”.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice K

Página web de Esopo

Con el objetivo de favorecer la difusión de la investigación se elabora una página web con un resumen de los temas tratados, los documentos elaborados y enlaces a los sitios de las organizaciones relacionadas a la gestión y el uso del ERE. Al momento de la publicación de este documento, la página web se encuentra en: <https://esopouy.wordpress.com/>

Para mejorar el aspecto visual tanto de los documentos de difusión como de la página web se diseñó un logotipo para el proyecto¹, mostrado en la Fig. K.1. Se busca generar una identidad del proyecto que pueda ser útil a la hora de difundirlo por las diferentes plataformas que existen en la actualidad.



Figura K.1: Logotipo del proyecto Esopo.

En este sentido, también se genera un código QR para identificar fácilmente el sitio desde un dispositivo móvil (ver Fig. K.2).



Figura K.2: Código QR de la página web.

Este grupo de trabajo asume el compromiso de migrar la página web elaborada hacia un servidor de la FING en un futuro cercano.

¹Realizado por Horacio Todeschini (FIC).

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Bibliografía Básica

- [1] H. Herrick. *Radio Communications in the Digital Age VHF/UHF Technology, Volumen 2*. Harris Corporation, 2000.
- [2] G. Sunkel y D. Trucco. *Las tecnologías digitales frente a los desafíos de una educación inclusiva en América Latina. Algunos casos de buenas prácticas*. Publicación de las Naciones Unidas, 2012.
- [3] Ericsson. *Ericsson Mobility Report*. 2015.
- [4] C. Schifer y R. Porto. *Telecomunicaciones. Marco Regulatorio*. Comisión Nacional de Comunicaciones, 1998.
- [5] *Reglamento de Radiocomunicaciones*. UIT, 2012. ISBN: 978-92-61-14023-6.
- [6] McLean Foster y Co. en colaboración con M. Cave y R. W. Jones. *Gestión del espectro radioeléctrico*. Publicación de UIT, 2012. Módulo 5: Conjunto de herramientas para la reglamentación de las TIC.
- [7] G. Gómez Germano y A. L. Rivoir. *Regulación e Inversión en Telecomunicaciones: Estudio de Caso para Uruguay*. Documento electrónico, 2008. Disponible en: <http://dirsi.net/web/>.
- [8] G. Gómez Germano y A. L. Rivoir. *Economía Industrial núm. 393: Regulación y diseño de mercados. Las subastas del espectro radioeléctrico en España*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Gobierno de España, 2014.
- [9] C. A. Afonso. *Uso del espectro en América Latina*. Publicación de APC, 2011. Uso del espectro en América Latina: síntesis complementaria de los informes: Estudios de caso de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. ISBN: 978-92-95096-30-1.
- [10] Foro latinoamericano de entes reguladores de telecomunicaciones (Regulatel). *Modelos de regulación en el sector de las telecomunicaciones y su relación con la aplicación del derecho de la competencia en los países miembros de Regulatel*. Documento electrónico, 2015. Versión borrador del Anexo 10 de la 18ª Asamblea Plenaria Regulatel.
- [11] Grupo de Regulación de las Telecomunicaciones (GRETEL). *La evolución de la gestión del espectro radioeléctrico*. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones (COIT), 2007. ISBN: 978-84-935049-3-9.
- [12] R. Bustillo. *Un modelo institucional para la regulación en materia de convergencia tecnológica en América Latina*. Naciones Unidas, 2011. Estudio producido para la División de Desarrollo Productivo y Empresarial de la Comisión Económica para

Bibliografía Básica

América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco del proyecto *Diálogo político inclusivo e intercambio de experiencias*, del programa Alianza para la Sociedad de la Información 2, cofinanciado por la CEPAL y la Unión Europea.

- [13] Electronic Communications Committee (CEPT). *ECC Report 205*. CEPT, 2014. Disponible en: <http://www.eroocdb.dk/doks/doccategoryecc.aspx?doccatid=4>.
- [14] Resolución 102/2012: Clasificación de información reservada. *URSEC*, julio 2012.
- [15] Decreto 114/003: Reglamento de administración y control del espectro radioeléctrico. *Presidencia de la República Oriental del Uruguay*, marzo 2003.
- [16] Evolución del sector telecomunicaciones en Uruguay. *URSEC*, junio 2015. Disponible en: <https://www.ursec.gub.uy/inicio/novedades/2015-00037-informes-mercado-junio-2015>.
- [17] GSMA. *Una guía para la CMR-15*. <http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2015/07/Guide-to-WRC-15-AI-1.1-SPANISH.pdf>, 2015.
- [18] Optimizing small cells and the heterogeneous network (hetnet). *Viavi Solutions Inc.*, 2015.
- [19] H. Lehpamer. Millimeter-wave radios in backhaul networks. *Communication Infrastructure Corporation*, 2008. Disponible en: <http://www.cicusa.com/publications/>.
- [20] M. Giovanni. L. Frecassetti. *E-Band and V-Band - Survey on status of worldwide regulation*. ETSI (European Telecommunications Standards Institute), 2015. ISBN: 979-10-92620-06-1.
- [21] D. M. Forin et al. *Free Space Optical Technologies, Trends in Telecommunications Technologies*. Ed. Christos J Bouras, 2010. ISBN: 978-953-307-072-8. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunications-technologies/free-space-optical-technologies>.
- [22] J. Wells. *Multi-gigabit Microwave and Millimeter-wave Wireless Communications*. Artech House mobile communications series. Artech House, 2010.
- [23] E. Pietrosevoli et al. *Redes inalámbricas en los países en desarrollo. Cuarta Edición*. Documento electrónico. ISBN-13: 978-1492390855, 2013. Disponible en: <http://wndw.net/>.
- [24] B. Nolé; J. P. García y F. Rodríguez. *Lasers en espacio libre y ondas milimétricas*. Universidad de la República(Uruguay). Facultad de Ingeniería. IIE, 2012. Disponible en: <http://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2012/NGR12>.
- [25] A. Amraoui, B. Benmammar. Dynamic Spectrum Access Techniques State of the art. *HAL*, enero 2013. HAL Id: hal-00777331. Disponible: <https://hal.inria.fr/hal-00777331>.
- [26] Introduction to cognitive radio systems in the land mobile service. *ITU Report ITU-R M.2225*, 2011.
- [27] J. Mitola III, G. Q. Maguire. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), agosto 1999. DOI: 10.1109/MCOM.2002.1007415.

- [28] Definiciones de sistema radioeléctrico determinado por programas informáticos (RDI) y sistema radioeléctrico cognoscitivo (SRC). *ITU Report UIT-R SM.2152*, 2009.
- [29] *Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands*. IEEE standard 802.22, julio 2011. ISBN: 978-0-7381-6723-7.
- [30] M. Delgado, B. Rodríguez. Opportunities for a more Efficient Use of the Spectrum based in Cognitive Radio. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), 2016.
- [31] C. Cordeiro, K. Challapali, and D. Birru. IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios. *Journal of communications*, 1(1), 2006. DOI: 10.4304/jcm.1.1.38-47.
- [32] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Television White Spaces (TVWS) Operation*. IEEE standard 802.11af, diciembre 2013. ISBN: 978-0-7381-8748-8.
- [33] World's First TV White Space WiFi Prototype Based on IEEE 802.11af Draft Standard Developed. *NICT press release*, octubre 2012. Disponible: <http://www.nict.go.jp/en/press/2012/10/17-1.html>.
- [34] C. Eklund, R. B. Marks, K. L. Stanwood, y S. Wang. IEEE standard 802.16: a technical overview of the WirelessMANTM air interface for broadband wireless access. *IEEE Communications Magazine*, 40(6), junio 2012. DOI: 10.1109/MCOM.2002.1007415.
- [35] U. D. Dalal & Y. P. Kosta. *WIMAX New Developments*. Intech, diciembre 2009. ISBN: 978-953-7619-53-4.
- [36] *IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*. IEEE standard 802.16, junio 2012. ISBN: 978-0-7381-7291-0.
- [37] World's First IEEE 802.11af-compatible Baseband IC for TV White-space Wireless LAN Systems. *NICT press release*, diciembre 2015. Disponible: <http://www.nict.go.jp/en/press/2015/12/16-1.html>.
- [38] World's First TV White Space Prototype Based on IEEE 802.22 for Wireless Regional Area Network. *NICT press release*, enero 2013. Disponible: <http://www.nict.go.jp/en/press/2013/01/30-1.html>.
- [39] World's First Breakthrough Achieved for Long-Range Broadband Communications in TV White Space. *NICT press release*, enero 2014. Disponible: <http://www.nict.go.jp/en/press/2014/01/23-1.html>.
- [40] Pilots and Demonstrations - Inter-American Development Bank. *Microsoft Research*, marzo 2012. Disponible en: <http://research.microsoft.com/en-us/projects/spectrum/pilots.aspx>.
- [41] J. Fraile Mora. *Genios de la Ingeniería Eléctrica. De la A a la Z*. Fundación Iberdrola, 2006. Libro de investigación histórica que contiene bibliografías resumidas de algunas de las personas que hicieron importantes contribuciones a la Ingeniería Eléctrica.

Bibliografía Básica

- [42] A. Fedini. *Ondas electromagnéticas*. Enciclopedia Estudiantil, 1967.
- [43] L. I. García. *Ondas. Página Interactiva*. <http://www.sindominio.net/ash>, 2004.
- [44] E. Braun. *Electromagnetismo: de la ciencia a la tecnología*, volume ISBN: 968-16-3742-9. Fondo de la cultura económica (FCE), 1992.
- [45] J. L. Ordóñez. *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*. Revista Digital de ACTA, 2013.
- [46] A. B. Carlson. *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communications - 4th edition. Capítulos 1 y 10*. McGraw-Hill, 2002. ISBN: 0-07-011-127-8.
- [47] D. Piotti. *Historia de las Telecomunicaciones en el Uruguay*. Ediciones de la Guía Financiera, 1997.
- [48] Características de las señales radiadas de los sistemas de televisión analógica convencional. *UIT Recomendación UIT-R BT.1701-1*, 2005.
- [49] D. Evans. *Internet de las cosas: Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*. Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011.
- [50] P. Biggs et al. Harnessing the internet of things for global development. *UIT. Cisco*, 2016. Disponible en: <http://www.coitt.es/res/revistas/11a%20Redes.pdf>.

Bibliografía Complementaria

- [51] J. L. Besada Sanmartín y M. Sierra Castañer. *Propagación de ondas en medio natural*. Universidad Politécnica de Madrid, 2013. Diapositivas del curso Radiación y propagación del Departamento de señales, sistemas y radiocomunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid.
- [52] C. Avallone. *Radio Propagación*. IIE. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República, 2013. Diapositivas de clases pertenecientes al curso Antenas y Propagación de la Facultad de ingeniería de la Universidad de la República de Uruguay.
- [53] Equipo Coordinador e investigadores. *Desarrollo Mediático en Uruguay: diagnóstico, perspectivas y desafíos*. UNESCO, 2015. Este documento presenta los resultados de la primera investigación sobre el desarrollo del sistema de medios de comunicación en Uruguay. El proyecto consiste en la aplicación adaptada a Uruguay de una herramienta para medir el desarrollo del sistema de medios (indicadores internacionales de desarrollo mediático aprobados por UNESCO en el año 2008). En el documento se describen algunos de los aspectos claves en materia de leyes relacionadas con las telecomunicaciones y los organismos competentes en el Uruguay.
- [54] Informe elaborado por Las Fundaciones Open Society. *Trazando un mapa de los medios digitales: Uruguay*. Fundaciones Open Society, 2013. Este es un informe propuesto por las *Open Society Foundations* como parte del Programa de Medios de Comunicación de Open Society y del Programa de Información de Open Society. Se busca generar un sondeo comparado a nivel mundial con más de 60 países asociados para ver el avance, el impulso y los frenos que ha tenido la transición hacia la digitalización de los medios en todo el mundo. El informe resume un panorama actual de la transición hacia los medios digitales en Uruguay y presenta la investigación realizada en materia de regulación.
- [55] UIT-R. *Manual de comprobación técnica del espectro*. Oficina de radiocomunicaciones UIT, 2011. El Manual tiene como objetivo ser utilizado por las administraciones dado que suministra la información más detallada y actualizada posible sobre los aspectos relacionados con el monitoreo del espectro.
- [56] G. Gómez Germano. *La reforma de la regulación de los servicios de comunicación audiovisual*. Fundación Friedrich Ebert en Uruguay, 2013. Este material es un documento de la Fundación Friedrich Ebert en Uruguay (FESUR) que busca cooperar con el debate legislativo acerca de una reforma del sistema de regulación de los medios de comunicación audiovisual en Uruguay.

Bibliografía Complementaria

- [57] Hughes and Hughes Abogados. *Hughes: Ley medios 19.307*. documento electrónico, 2013. Este material es un conjunto de diapositivas elaboradas por *Hughes and Hughes Abogados* como breve resumen informativo acerca de la Ley 19.307.
- [58] A. Elbittar. *Asignación y Administración del Espectro Radioeléctrico en Países de Centroamérica y su Impacto en el Desarrollo del Sector de Servicios de Telecomunicación Móvil*. Documento electrónico. Diálogo Regional sobre Sociedad de la Información (DRSI), 2010. Este documento describe los principales aspectos regulatorios asociados a las políticas de asignación y uso del espectro en los países de la región Centroamericana: Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Nicaragua y Panamá.
- [59] Esta publicación fue realizada como parte de la iniciativa *Espectro abierto para el desarrollo* en el marco del proyecto *Action Research Network* (ARN) de la *Asociación para el Progreso de las Comunicaciones* (APC) con apoyo del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC). *Uso y regulación del espectro en América Latina*. Editorial Quipus, CIESPAL, 2012. Estudios de caso de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. ISBN: 978-92-95096-63-9.
- [60] S. Srikanthswara y B. Badic M. Mueck. *Spectrum Sharing: Licensed Shared Access (LSA) and Spectrum Access System (SAS)*. White paper. Intel, 2015. Este *White paper* da una visión detallada de algunas tecnologías actuales que permiten compartir el espectro y que actualmente están siendo desplegadas. En Europa se trata de las llamadas LSA y en Estados Unidos las denominadas Sistemas de acceso al espectro, en inglés *Spectrum Access Systems* (SAS).
- [61] Reporte elaborado por Deloitte LLP para GSMA. *The Impact of Licensed Shared Use of Spectrum*. GSMA, 2014. Este es un reporte elaborado por Deloitte LLP (www.deloitte.com/tmt) para la GSM Association (GSMA). En este documento se estudia el impacto económico y estratégico de implementar LSA en la industria móvil.
- [62] 4G Americas. *Adjudicación de espectro radioeléctrico en 700 MHz en América Latina*. Documento electrónico, 2015. Este documento presenta la investigación, análisis y conclusiones de 4G Americas referentes a las adjudicaciones y asignaciones en la banda de 700 MHz y la experiencia en la región.
- [63] GSMA y Convergencia Research. *Situación de AWS en las Américas*. Documento electrónico; Investigación Regional, 2014. Este documento presenta la investigación, análisis y conclusiones de GSMA en conjunto con Convergencia Research referentes a la situación de la banda AWS en las Américas.
- [64] R. Chundury. *Mobile broadband backhaul: Addressing the challenge*. *Ericsson review.*, 2008. Este artículo da una perspectiva general del *backhaul* de las redes inalámbricas. Se examinan las principales arquitecturas y opciones en tecnologías.
- [65] F. E. Gardio. About the beginnings of wireless. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, marzo 2011. *Cambridge University Press and the European Microwave Association*. DOI:10.1017-S1759078711000444.
- [66] M. Giovanni. L. Frecassetti. *E-Band and V-Band - Survey on status of worldwide regulation*. ETSI (European Telecommunications Standards Institute), 2015. ISBN: 979-10-92620-06-1.

- [67] N. Vijaykumar Swami. Li-fi (light fidelity) – the changing scenario of wireless communication. Technical report, International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), 2015. eISSN: 2319-1163.
- [68] T. C. Clancy III. Dynamic spectrum access in cognitive radio networks. Master's thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2006. Este documento realiza un repaso por los conceptos teóricos de la Radio Cognitiva. Además, presenta un modelo de temperatura de interferencia, y un esquema de acceso al medio que implementa dicho modelo.
- [69] B. Fette. *Cognitive Radio Technology*. Elsevier, 2006. ISBN: 978-0-7506-7952-7. Este libro cuenta con una historia de la Radio Cognitiva, luego cada capítulo trata la CR desde un ángulo distinto como las tecnologías requeridas, la arquitectura de las redes, el análisis de desempeño de las redes CR, entre otros, y finalmente un sección con los retos y problemas que la Radio Cognitiva trae consigo.
- [70] Espacio Fundación Telefónica. *Historia de las telecomunicaciones*. Colección Histórico Tecnológica de Telefónica, 2013. Este es un cuaderno que forma parte del programa *CONECTAprofes*, que busca ofrecer orientación a los profesores de todas las etapas educativas a través de diversos recursos y del asesoramiento personalizado en torno a las exposiciones del Espacio Fundación Telefónica. En él se puede encontrar un recorrido por la evolución de la comunicación a distancia, con especial atención a la situación de la telefonía en España.
- [71] M. Perroni. *Guía de estudio para una historia de los medios de transporte y comunicación en el Uruguay (1830-1930)*. Proyectos de investigación LICCOM, 2013. Este trabajo de 29 páginas es el resultado de un proyecto de investigación y divulgación de la Sala de Historia de Licenciatura en Ciencias de la Comunicación (LICCOM). En él se puede encontrar una breve historia de las comunicaciones en Uruguay entre los años 1830 y 1930.
- [72] F. S. Crawford. *Volumen III. Ondas y oscilaciones*. Editorial Reverté S.A., 1994. ISBN: 978-84-291-4023-1. Este libro es el volumen III del Curso de física de Berkeley para estudiantes de ciencias e ingeniería. Dicho curso consta de cinco volúmenes en total y dos años de duración. Según su prólogo el curso puede ser seguido por estudiantes con un grado medio de conocimientos de física y debe acompañarse con conocimientos de matemáticas, en particular de cálculo diferencial e integral. Este volumen se centra en el concepto de Onda, en el capítulo 7 se puede encontrar el concepto de onda electromagnética. En el capítulo 9 se encontrará desarrollado el tema de interferencias.
- [73] J. R. Reitz; F. J. Milford y R. W. Christy. *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Addison Wesley Iberoamericana, 1996. ISBN: 968-444-403-6. Es un libro con un importante contenido técnico. El capítulo 16 trata de las llamadas ecuaciones de maxwell y en el capítulo 17 se habla de la propagación de las ondas electromagnéticas.
- [74] A. B. Carlson. *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communications - 4th edition*. McGraw-Hill, 2002. ISBN: 0-07-011-127-8. Este libro contiene una revisión de los sistemas de comunicación, se trata de un texto clásico en el campo de las comunicaciones. En los primeros 3 capítulos se

Bibliografía Complementaria

puede encontrar información detallada sobre los sistemas de comunicación y sobre modulación.

- [75] R. C. Pérez Vega. J. M. Zamanillo Sainz de la Maza. A. Casanueva López. *Sistemas de telecomunicación. Colección: Textos Universitarios*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2007. ISBN: 978-84-8102-454-8. Este libro es el resultado de la compilación de apuntes de clase de la carrera de Ingeniería de Telecomunicación en la Universidad de Cantabria, es una obra destinada no sólo a los estudiantes sino a todos los interesados por iniciarse en algunos aspectos fundamentales de los sistemas de comunicaciones eléctricas, donde se ha prescindido, en la medida de lo posible, de tratamientos matemáticos complicados, buscando un enfoque práctico. Trata temas básicos orientados fundamentalmente a los sistemas radioeléctricos, con un enfoque hacia los sistemas analógicos, aplicables igualmente a los digitales.
- [76] A. Pereyra. *Subasta de telefonía móvil: ¿una experiencia inconclusa en Uruguay?* Documento electrónico, 2002. Este documento presenta un análisis del diseño de la primera subasta de licencias de telefonía móvil desarrollado para Uruguay, la relación con los diseños adoptados en otros países y los detalles de implementación.
- [77] A. Pereyra. *Competencia en telefonía móvil en Uruguay: diseño de subastas, contratos y marco institucional*. Documento electrónico, 2003. Este documento realiza un breve repaso por la historia de la regulación del espectro radioeléctrico en Uruguay hasta el año 2002, intenta explicar la razón del fracaso de la primera subasta de licencias de espectro para telefonía móvil.
- [78] Oficina de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). *Comisiones de estudio de UIT-R*. Documento electrónico, 2010. En este documento se encuentran los datos del sector de Radiocomunicaciones de la UIT, su misión, visión y valores, así como los detalles de sus comisiones de estudio.
- [79] A. B. Carlson. *Communications Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication*. McGraw Hill, 2002. Capítulo 4, sección 4.4. ISBN: 978-0073380407. En la Sec. 4.4 se explican diferentes tipos de modulación lineal, en particular la de banda lateral vestigial, utilizada en la radiodifusión de TV analógica.
- [80] A. Ghosh. J. Zhang. J. G. Andrews. R. Muhamed. *Fundamentals of LTE*. Prentice Hall, 2011. Capítulo 1: *Evolution of Cellular Technologies*. ISBN: 978-0137033119. El Cap. 1 de este libro contiene una revisión histórica de los sistemas de comunicaciones móviles, desde las primeras comunicaciones inalámbricas hasta los sistemas celulares de cuarta generación.
- [81] *El Internet de las Cosas. En un mundo conectado de objetos inteligentes*. Documento electrónico, 2011. Estudio de IoT desarrollado por *Future Trends Forum (FTF)* y la compañía española *Accenture*. El estudio completo se puede solicitar en www.fundacionbankinter.org FTF es el principal proyecto de la Fundación de la Innovación Bankinter, cuya misión es influir en el presente mirando hacia el futuro, estimulando y consolidando la actitud innovadora en el tejido empresarial español.

- [82] C. Cortés. *El Internet de las cosas: más Internet que otra cosa*. Documento electrónico, 2014. Este documento ofrece un panorama del IoT complementando datos de la realidad con la visión del autor.
- [83] *SDG ICT Playbook. From innovation to impact. NetHope. Integrada por 43 líderes internacionales pertenecientes a organizaciones sin fines de lucro y al sector de la tecnología*, 2015. Aquí se encontrará una guía con los últimos objetivos para un desarrollo sostenible de las TIC según los miembros de NetHope. En particular se puede encontrar información sobre conectividad en p. 29 - 31. Información sobre IoT en pag. 32 a 34.
- [84] I. Brown. *Regulation and the Internet of Things. GSR discussion paper*, 2015. Este paper es un trabajo que aún no está terminado y está publicado para su discusión, aquí se examinan las repercusiones del IoT para clientes particulares, empresas y sociedades. En particular se tratan las cuestiones relacionadas con telecomunicaciones y los reguladores.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Glosario

- 3GPP** *the 3rd generation Partnership Project*. 59, 166
- ACS** selección adaptativa de canal, en inglés *Adaptive Channel Selection*. 88
- AFSCA** Autoridad Federal de Servicios de Comunicación Audiovisual. 29
- AM** modulación de amplitud, en inglés *Amplitude Modulation*. 13, 14, 37, 49, 158
- AMPS** *Advanced Mobile Phone System*. 148, 164
- AMR** Asamblea Mundial de Radiocomunicaciones. 133
- ANATEL** Agencia Nacional de Telecomunicaciones. 29
- ANE** Agencia Nacional del Espectro. 29
- ANTEL** Administración Nacional de Telecomunicaciones. 15, 27, 67, 129, 130, 167
- AP** punto de acceso, en inglés *Access Point*. 85, 86, 91
- AP-STA** estación punto de acceso, en inglés *Access Point Station*. 85
- API** interfaz de programación de aplicaciones, en inglés *Application Programming Interface*. 72
- ARIB** asociación de industrias y empresas de radio, en inglés *Association of Radio Industries and Businesses*, (Japón). 166
- ATIS** alianza para las soluciones de las industrias de telecomunicaciones, *Alliance for Telecommunications Industry Solutions*, (EE.UU.). 166
- ATSC** comité para sistemas avanzados de televisión, en inglés *Advanced Television Systems Committee*. 98
- AWS** servicios inalámbricos avanzados, *Advanced Wireless Services*. 166
- BCU** unidades básicas de canal, en inglés *Basic Channel Unit*. 86, 87
- BID** Banco Interamericano de Desarrollo. 94
- BS** estación base, en inglés *Base Station*. 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 88, 92, 94, 99
- BWA** acceso inalámbrico de banda ancha, en inglés *Broadband Wireless Access*. 87
- CAMR** Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones. 145

- CCITT** Comité Consultivo Internacional de Telegrafía y Telefonía. 10
- CCM** Comisión de Comercio del MERCOSUR. 13
- CCPI** Comité Consultivo Permanente I. 12
- CCPII** Comité Consultivo Permanente II. 12, 133
- CCSA** asociación de normas de comunicación de China, *China Communications Standards Association*. 166
- CDMA** *Code Division Multiple Access*. 165
- CEPT** Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones. 32
- CFR** código de regulaciones federales, en inglés *Code of Federal Regulations*. 96, 98
- CHAI** Comisión Honoraria Asesora Independiente. 26
- CHARC** Consejo Honorario Asesor de Radiodifusión Comunitaria. 26
- CHASCA** Comisión Honoraria Asesora de Servicios de Comunicación Audiovisual. 26
- CITEL** Comisión Interamericana de Telecomunicaciones. III, 12, 29, 133
- CMC** Consejo del Mercado Común. 13
- CMDT** Conferencia Mundial de Desarrollo de las Telecomunicaciones. 11
- CMR** Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones. 11, 127, 133, 134, 135, 200
- CMR-19** Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del año 2019. 11, 133, 135
- CMR-15** Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del año 2015. 11, 56, 133
- CMTI** Conferencia Mundial de Telecomunicaciones Internacionales. 11, 127
- CNAF** Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. 22, 26, 29, 35, 36, 35, 38, 137, 197
- CNC** Comisión Nacional de Comunicaciones. 29
- CNE** Comité Nacional del Espectro. 29
- COM/CITEL** Comité Directivo Central. 12
- CONATEL Venezuela** Comisión Nacional de Telecomunicaciones. 29
- CONATEL Ecuador** Consejo Nacional de Telecomunicaciones. 29
- CPE** equipos de cliente, en inglés *Customer Premise Equipment*. 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 88, 92, 94, 99, 197
- CR** radio cognitiva, en inglés *Cognitive Radio*. 1, 3, 4, 56, 66, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 84, 85, 87, 89, 93, 95, 96, 98, 100, 101, 104, 197, 199, 200
- CRR** Conferencias Regionales de Radiocomunicaciones. 11

- CRS** sistemas de radio cognitiva, en inglés *Cognitive Radio Systems*. 70, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 82, 89, 101
- CTAP** Comisión Temática de Asuntos Postales. 13
- CTRc** Comisión Temática de Radiocomunicaciones. 13
- CTRd** Comisión Temática de Radiodifusión. 13
- CTSPT** Comisión Temática de Servicios Públicos de Telecomunicaciones. 13
- DCS** selección dinámica de canal, en inglés *Dynamic Channel Selection*. 88
- DINATEL** Dirección Nacional de Telecomunicaciones y Servicios de Comunicación Audiovisual. 13, 14, 15, 33, 131, 160
- DL** enlace descendente, en inglés *downlink*. 165
- DNC** Dirección Nacional de Comunicaciones. 130, 131, 157
- DS-SS** *Direct Sequence Spread Spectrum*. 165
- DSA** acceso dinámico al espectro, en inglés *Dynamic Spectrum Access*. 31, 69, 70, 199
- EAP-TTLS** *Extensible Authentication Protocol - Tunneled Transport Layer Security*. 79
- EAP-TLS** *Extensible Authentication Protocol - Transport Layer Security*. 79
- EB** Estación Base. 152
- EDGE** *Enhanced Data rates for GSM Evolution*. 165
- EHF** extremadamente alta frecuencia, en inglés *Extremely High Frequency*. 60, 118
- EM** Estación Móvil. 148
- ERB** Estación Radio Base. 152
- ERC** Estación Radioeléctrica Central. 148
- ERE** Espectro Radioeléctrico. IX, XI, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13, 19, 20, 21, 22, 29, 30, 33, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 45, 46, 47, 50, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 62, 64, 66, 68, 69, 70, 73, 75, 76, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88, 89, 93, 96, 101, 103, 104, 105, 107, 108, 115, 131, 132, 171, 172, 175, 197, 199, 200
- ESA** Agencia Espacial Europea, en inglés *European Space Agency*. 64
- ET** Estación Terrestre. 152
- ETSI** instituto europeo de normas de telecomunicaciones, en inglés *The European Telecommunications Standards Institute*. 31, 62, 166
- FCC** comisión federal de comunicaciones, en inglés *Federal Communications Commission* (EE.UU.). 29, 47, 50, 61, 66, 69, 71, 76, 77, 85, 95, 96, 98, 104, 150, 170, 197

- FDD** *Frequency Division Duplex*. 165, 168
- FDMA** *Frequency Division Multiple Access*. 164
- FIC** Facultad de Información y Comunicación. III, 1, 2, 3, 175
- FING** Facultad de Ingeniería. III, 1, 2, 3, 67, 105, 175
- FM** modulación de frecuencia, en inglés *Frequency Modulation*. 13, 14, 19, 37, 41, 49, 50, 103, 121, 122, 149, 150, 156, 157, 158, 159, 162, 164, 197, 199, 200
- FSL** láser en espacio libre, en inglés *Free Space Laser*. 64, 65, 67, 104
- FSO** comunicaciones ópticas en espacio libre, en inglés *Free Space Optics*. 63, 64
- GAR** Grupo Asesor de Radiocomunicaciones. 127
- GDB** base de datos de geolocalización, en inglés *Geolocation Database*. 85, 86, 90
- GMC** Grupo Mercado Común. 13, 40, 145
- GMSK** *Gaussian Minimum Shift Keying*. 165
- GPON** *Gigabit-capable Passive Optical Network*. 77
- GPRS** *General Packet Radio Service*. 165
- GSM** *Global System for Mobile Communications*. 164, 165
- GSMA** Asociación GSM. 55, 56
- HD** alta definición, en inglés *High Definition*. 41, 98, 101, 160
- HetNets** redes heterogéneas, en inglés *Heterogeneous Networks*. 59, 60
- HF** alta frecuencia, en inglés *High Frequency*. 118
- HMA** altura media de antena. 47, 48, 145, 149, 157
- HSPA** *High-Speed Packet Access*. 165
- IARP** permiso internacional de radioaficionado emitido por la Administración de Telecomunicaciones, en inglés *International Amateur Radio Permit*. 25
- IBSG** *Internet Business Solutions Group* de Cisco. 169
- Icesi** Instituto Colombiano de Estudios Superiores de INCOLDA (Centro de Desarrollo de Bogotá). III, 2
- ICM** industriales, científicas y médicas. 20, 28, 45, 62, 89
- IDT** Índice de Desarrollo de las TIC. 7
- IEEE** Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, en inglés *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 3, 4, 28, 64, 77, 78, 79, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 98, 101, 197, 199, 200
- IFP** Instancia Final del Procedimiento. 27

- IIP** Instancia Inicial del Procedimiento. 27
- IMPO** Dirección Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales. 41
- IMT** telecomunicaciones móviles internacionales, en inglés *International Mobile Telecommunications*. 28, 42, 54, 56, 103, 133, 163, 167, 168, 170
- INE** Instituto Nacional de Estadística. 53
- IoT** Internet de las cosas, en inglés *Internet of Things*. 4, 69, 92, 169, 170, 171, 172, 200
- ISDB-T** difusión de servicios digitales integrados, en inglés *Integrated Services Digital Broadcasting*. 41, 160, 200
- JRR** Junta del Reglamento de Radiocomunicaciones. 127, 133, 134
- LAN** red de área local, en inglés *Local Area Network*. 98
- LD** diodo láser, en inglés *Laser Diode*. 64
- LED** diodo emisor de luz, en inglés *Light Emitting Diode*. 64
- LF** baja frecuencia, en inglés *Low Frequency*. 118
- LSA** Licencia de acceso compartido, en inglés *Licensed Shared Access*. 31, 32
- LTE** *Long Term Evolution*. 41, 53, 165
- M2M** *machine to machine communications*. 92
- MAC** *Medium Access Control layer*. 80, 87, 88, 90, 92
- MERCOSUR** Mercado Común del Sur. 3, 4, 13, 18, 19, 29, 39, 40, 47, 49, 54, 145, 146, 147, 148, 151, 152, 158, 159
- MF** frecuencia media, en inglés *Medium Frequency*. 118
- MIEM** Ministerio de Industria, Energía y Minería. 13, 131
- MIFR** registro maestro internacional de frecuencias, en inglés *Master International Frequency Register*. 10
- MiniCom** Ministerio de Comunicaciones. 29
- MinTIC** Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. 29
- MIT** Instituto de Tecnología de Massachusetts. 169
- MMDS** *Multichannel Multipoint Distribution System*. 147, 162, 163
- MMW** ondas milimétricas, en inglés *Millimeter Waves*. 60, 61, 67, 68, 104
- MSO** Observatorio de Espectro de Microsoft, en inglés *Microsoft Spectrum Observatory*. 50
- MTC** Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 29

- NAMPS** *Narrowband Advanced Mobile Phone Service*. 148
- NICT** *National Institute of Information and Communications Technology* (Japón). 90, 91, 92
- non-SSU** usuarios no específicos de espectro, en inglés *non Specific Spectrum Users*. 88
- N-WEST** *National Wireless Electronic Systems Testbed* (EE.UU.). 87
- NASA** Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, en inglés *National Aeronautics and Space Administration*. 64
- NGN** redes de nueva generación, en inglés *Next Generation Networks*. 40
- nonAP-STA** estación de usuario, en inglés *non Access Point Station*. 85
- NPRM** aviso de reglamentación propuesta, en inglés *Notice of Proposed Rulemaking*. 77
- NRI** indicador de disposición de red, en inglés *Networked Readiness Index*. 7, 8
- OEA** Organización de los Estados Americanos. III, 12
- OEM** Onda Electromagnética. 5, 9, 107, 108, 109, 110, 113
- Ofcom** oficina de comunicaciones, en inglés *Office of Communications* (Reino Unido). 66, 76, 85, 92, 93, 98, 101, 105
- OFDM** *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*. 86, 101, 160, 165
- OFDMA** *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*. 80, 165
- OMC** Organización Mundial del Comercio. 29
- OSIPTEL** Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones. 29
- PAL** *Phase Alternating Line*. 155, 197
- PE** Poder Ejecutivo. 13, 14, 22, 23, 24, 26, 27, 29, 130, 131
- PER** Potencia Efectiva Radiada. 47, 48, 145, 149, 157
- PHY** *physical layer*. 86, 87, 90, 92
- PIB** Producto Interno Bruto. 52
- PIRE** Potencia Isotrópica Radiada Efectiva. 80, 96
- POLIMATE** Políticas, Medios Audiovisuales, Tecnologías y Espectro. 2, 3, 42, 54, 167
- PSK** *Phase Shift Keying*. 98
- QAM** *Quadrature Amplitude Modulation*. 98, 165
- QoS** calidad de servicio, en inglés *Quality of Service*. 32, 78

- QPSK** *Quadrature Phase Shift Keying*. 165
- RAT** tecnología de acceso de radio, en inglés *Radio Access Technology*. 75
- RB** Radiobase. 57
- RF** Radiofrecuencia. 72, 73, 74, 199
- RFID** Identificación por radiofrecuencia, en inglés *Radio Frequency Identification*. 169
- RLQP** *Registered Location Query Protocol*. 86
- RLSS** *Registered Location Secure Server*. 85, 86, 90
- RNF** Registro Nacional de Frecuencias. 45
- RPC** Reuniones Preparatorias de la CMR. 133, 135
- RR** Reglamento de Radiocomunicaciones. 6, 11, 15, 14, 15, 16, 17, 18, 28, 31, 35, 37, 38, 115, 127, 133, 134, 141
- RSPG** Grupo de política del espectro radioeléctrico, en inglés *Radio Spectrum Policy Group*. 32
- RTI** Reglamento de las Telecomunicaciones Internacionales. 127
- SC-OFDMA** *Single Carrier Orthogonal Frequency Divison Multiple Access*. 165
- SCH** *Superframe Control Header*. 83
- SD** definición estándar, en inglés *Standard Definition*. 160
- SDR** radio definida por software, en inglés *Software Defined Radio*. 65, 72, 74
- SECOM** Secretaría de Comunicaciones. 29
- SFN** redes de frecuencia simple, en inglés *Single Frequency Networks*. 160
- SG** comisiones de estudio, en inglés *Study Groups*. 126
- SGT** Sub-Grupos de Trabajo. 13
- SHF** super alta frecuencia, en inglés *Super High Frequency*. 60, 118
- SM** gestor de espectro, en inglés *Spectrum Manager*. 82
- SSL** *Secure Sockets Layer*. 79
- SSU** usuarios específicos de espectro, en inglés *Specific Spectrum Users*. 88
- STA** estación, en inglés *station*. 85
- SUPERTEL** Superintendencia de Telecomunicaciones. 29
- TCP** *Transmission Control Protocol*. 99
- TDMA** *Time Division Multiple Access*. 148, 164, 165

- TED** Tecnología, Entretenimiento, Diseño, en inglés *Technology, Entertainment, Design*. 65
- TIC** Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. 1, 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 125, 126, 170
- TSDSI** *Telecommunications Standards Development Society, India*. 166
- TTA** *Telecommunications Technology Association* (Corea). 166
- TTC** *Telecommunication Technology Committee* (Japón). 166
- TV** televisión. 14, 18, 41, 47, 48, 49, 50, 66, 70, 71, 83, 85, 94, 103, 105, 145, 155, 160, 159, 161, 162, 197, 198, 199
- TVA** televisión para abonados. 45, 54, 162, 161, 162, 163, 164, 198
- TVD** televisión digital. 41, 159, 160, 161, 162
- TVWS** espacios en blanco de televisión, en inglés *TV White Spaces*. 70, 77, 84, 85, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 101, 104, 105, 200
- UDELAR** Universidad de la República. III, 2, 67, 105
- UHF** frecuencia ultra alta, en inglés *Ultra High Frequency*. 2, 4, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 45, 46, 54, 60, 76, 77, 85, 87, 98, 118, 141, 155, 160, 161, 162, 163
- UIT** Unión Internacional de Telecomunicaciones. XI, XII, XIII, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 19, 22, 28, 29, 35, 36, 35, 37, 38, 39, 54, 56, 60, 63, 71, 74, 75, 115, 116, 125, 126, 125, 126, 127, 134, 135, 141, 152, 155, 162, 167, 170, 197, 199, 200
- UIT-D** sector de desarrollo de las telecomunicaciones de la UIT. 10, 11, 126
- UIT-T** sector de normalización de las telecomunicaciones de la UIT. 10, 126
- UIT-R** sector de radiocomunicaciones de la UIT. 10, 11, 15, 28, 60, 63, 126, 127
- UL** enlace ascendente, en inglés *uplink*. 165
- UMTS** *Universal Mobile Telecommunications System*. 53, 165
- URSEC** Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones. III, 3, 4, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 35, 36, 35, 37, 39, 41, 42, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 54, 68, 94, 103, 130, 131, 137, 138, 139, 143, 157, 158, 159, 161, 163, 164, 167, 197, 199, 200
- USB** *Universal Serial Bus*. 91
- UTE** administración nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas. 129
- UWB** banda ultra ancha, en inglés *Ultra Wide Band*. 56, 66
- VHF** frecuencia muy alta, en inglés *Very High Frequency*. 2, 4, 18, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 45, 46, 47, 48, 49, 54, 77, 98, 118, 141, 145, 146, 155, 156, 197, 199
- VLC** comunicaciones en luz visible, en inglés *Visible Light Communication*. 64

- VLF** frecuencia muy baja, en inglés *Very Low Frequency*. 118
- VNI** Visual Networking Index de Cisco. 55
- VoIP** voz sobre IP, en inglés *Voice over Internet Protocol*. 165
- VSF** *Vestigial Side Band*. 156
- WCDMA** *Wideband Code Division Multiple Access*. 165
- WIMAX** *Worldwide Interoperability for Microwave Access*. 87, 88
- WLAN** red inalámbrica de área local, en inglés *Wireless Local Area Network*. 77, 85
- WMAN** red inalámbrica de área metropolitana, en inglés *Wireless Metropolitan Area Network*. 77
- WRAN** red inalámbrica de área regional, en inglés *Wireless Regional Area Networks*. 77, 82, 83, 91, 92
- WS** espacios en blanco, en inglés *White Spaces*. 47, 69, 70
- WSDB** base de datos de espacios en blanco, en inglés *White Space Database*. 92
- WSM** mapa de espacios en blanco, en inglés *White Space Map*. 86
- xDSL** *Digital Subscriber Line*. 77, 84, 98, 101

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de tablas

2.1. Adjudicación, Atribución y Asignación.	19
2.2. Servicios que utilizan el ERE.	21
2.3. Clasificación de usos del ERE.	23
2.4. Organismos Reguladores en Latino América ²	30
3.1. Comparación entre atribución de UIT y atribución realizada por URSEC.	38
3.2. Cálculo de contornos de protección, estaciones en canal 2 de TV VHF ³	48
3.3. Cálculo de contornos de protección, estaciones en canal 227 de FM	49
3.4. Parámetros de estación del Observatorio de Espectro de Microsoft.	51
4.1. Clasificación de celdas celulares ⁴	58
5.1. Número de subportadoras por canal.	81
5.2. Umbrales utilizados por el CPE para detectar actividad en un canal dado.	84
5.3. Algunos parámetros temporales del ERE de IEEE 802.22.	84
5.4. Características del prototipo IEEE 802.11af.	91
5.5. Dispositivos autorizados por la FCC.	96
5.6. Cuadro comparativo de equipos de CR homologados por la FCC	97
5.7. Características ACRS 2.0.	99
5.8. Sensibilidad en recepción ACRS 2.0.	99
A.1. Bandas de frecuencia.	116
A.2. Características bandas de frecuencia.	120
E.1. Referencia CNAF.	137
G.1. Clasificación de las estaciones de TV.	145
G.2. Zonas de coordinación de estaciones de TV.	146
G.3. Canalización de televisión analógica VHF.	146
G.4. Bandas adjudicadas para sistemas troncalizados.	148
G.5. Bandas A y B para servicio de telefonía móvil celular.	148
G.6. Clasificación de estaciones de radiodifusión FM.	149
G.7. Ancho zona de coordinación estaciones de radiodifusión FM.	150
G.8. Canalización de FM.	151
G.9. Bandas atribuidas en Uruguay por la Resolución N° 05/2006.	152
G.10. Distancias de coordinación para radioenlaces a frecuencia superior a 1 GHz.	153
G.11. Máxima señal en la línea de frontera.	154
H.1. Características del sistema PAL-N ⁵	156
H.2. Canales asignados a estaciones de televisión analógica abierta.	157

Índice de tablas

H.3. Canales de FM asignados en Uruguay.	159
H.4. Canales asignados a TV digital.	162
H.5. Canales asignados para servicio de TVA.	163
H.6. Canales asignados a TVA por MMDS.	164
H.7. Información comparativa de las tecnologías celulares aplicadas en Uruguay.	166
H.8. Bandas para sistemas de telecomunicaciones móviles celulares.	166
H.9. Asignación para el uso en servicios de telecomunicaciones móviles celulares ⁶	167

Índice de figuras

2.1. Espectro electromagnético ⁷	6
2.2. Características bandas de radiofrecuencia ⁸	7
2.3. Regiones UIT ⁹	16
2.4. Porción del cuadro de atribución de bandas de frecuencia ¹⁰	17
3.1. Cuadro de atribución de URSEC. Referencias: Tabla E.1.	36
3.2. Cantidad de espectro atribuido por servicio en Uruguay (MHz).	37
3.3. Cuadro comparativo entre atribución por servicio de UIT y URSEC.	39
3.4. Comparación de uso del ERE para diferentes sistemas de TV.	41
3.5. Asignaciones recopiladas de página web de la URSEC, decretos PE y POLIMATE.	43
3.6. Utilización de bandas de frecuencia según datos brindados por la URSEC.	44
3.7. Área primaria de servicio de una estación de radiodifusión.	47
3.8. Asignaciones de TV para el canal 2 de VHF.	48
3.9. Asignaciones de TV analógica en Uruguay ¹¹	49
3.10. Asignaciones de FM para el canal 227.	50
3.11. Ocupación máxima de la banda de 54-698 MHz, en base semanal, para Washington DC.	51
3.12. Comparación de participación en el PIB de diferentes sectores productivos.	52
3.13. PIB del sector de telecomunicaciones en Uruguay.	52
3.14. Número de servicios activos de telefonía móvil y fija ¹²	53
3.15. Número de servicios móviles con acceso a conexión de datos de banda ancha.	53
4.1. Estimación de la cantidad de tráfico de servicios móviles periodo 2014-2019 ¹³	56
4.2. Relación entre cobertura y capacidad por usuario en pequeñas celdas ¹⁴	58
4.3. Estimación de la cantidad de pequeñas celdas a nivel global ¹⁵	59
4.4. Representación de una red heterogénea ¹⁶	60
4.5. Situación de la banda-E ¹⁷	63
5.1. Representación del DSA en los espacios en blanco del ERE ¹⁸	70
5.2. Espacios en blanco entre canales de TV ¹⁹	71
5.3. Diagrama funcional de un CR, representando sus capacidades de razonamiento y aprendizaje.	72
5.4. Comparación funcional de los distintos tipos de equipos de RF.	75
5.5. Uso de canales de TV en Estados Unidos ²⁰	78
5.6. Topología de red IEEE 802.22.	79
5.7. Relación con una base de datos externa en IEEE 802.22.	79

Índice de figuras

5.8. Distribución física de red punto-multipunto.	80
5.9. Representación del uso del ERE en la banda de TV.	81
5.10. Estructura general de supertrama.	81
5.11. Topología de red IEEE 802.11af.	86
5.12. Topología de red IEEE 802.16	88
5.13. Ubicación de pilotos CR ²¹	90
5.14. Sistema montado para pruebas con el prototipo de IEEE 802.11af. . . .	90
5.15. Prototipo de IEEE 802.11af.	91
5.16. Prototipo de USB-stick IEEE 802.11af.	91
5.17. Esquema de red multi-salto implementada con estándares IEEE.	92
5.18. Ubicación geográfica de los puntos a comunicar en Florida (Uruguay), en el piloto TVWS de Ceibal ²²	95
5.19. Instalación de Adaptrum ACRS 2.0.	100
5.20. Interconexiones.	100
A.1. Onda mecánica propagándose en una cuerda ²³	109
A.2. Onda longitudinal y onda transversal ²⁴	110
A.3. Crestas, valles y amplitud de una onda periódica.	111
A.4. Longitud de onda y frecuencia en una onda periódica.	111
A.5. Relación entre longitud de onda y frecuencia.	112
A.6. Forma de onda compuesta.	112
A.7. Representación de una señal en el tiempo y en la frecuencia ²⁵	112
A.8. Onda electromagnética ²⁶	113
A.9. Espectro electromagnético ²⁷	114
A.10. Características bandas de radiofrecuencia.	117
A.11. Mecanismos de propagación de una onda ²⁸	118
A.12. Esquema de un sistema de comunicación simplificado ²⁹	121
A.13. Conversión de frecuencia.	123
A.14. Esquema de modulación por conversión de frecuencia ³⁰	123
B.1. Estructura UIT ³¹	125
D.1. Proceso CMR ³²	134
E.1. Cuadro de atribución de URSEC (1).	138
E.2. Cuadro de atribución de URSEC (2).	139
E.3. Cuadro de atribución de URSEC (3).	140
H.1. Uso del espectro para un canal de televisión analógica ³³	156
H.2. Uso del espectro para un canal de FM.	158
H.3. Canal segmentado ISDB-T ³⁴	161
I.1. Evolución prevista de IoT ³⁵	169
K.1. Logotipo del proyecto Esopo.	175
K.2. Código QR de la página web.	175

Esta es la última página.
Compilado el martes 1 noviembre, 2016.
<http://iie.fing.edu.uy/>