

2. Radio Cognitiva

Imagine que un teléfono celular, PALM, laptop, automóvil, o la televisión, por mencionar algunos equipos, que se emplean hoy en día, fueran tan inteligentes como uno deseará, es decir, que tuvieran la capacidad de conocer la rutina diaria de una persona (exactamente como si fueran una persona), que estos dispositivos tuvieran la capacidad de tener cosas listas, tan pronto como uno lo necesitará, casi en anticipación a nuestras necesidades.

Hoy en día, estos dispositivos pueden ayudarnos a localizar personas, programas, diferentes cosas, oportunidades, traducir textos, etc., los cuales permiten completar nuestras tareas a tiempo.

Del mismo modo, si un radio fuera inteligente, este podría aprender los servicios disponibles en redes inalámbricas computacionales localmente accesibles, por lo que no tendría ninguna confusión para encontrar la red inalámbrica correcta para descargar un vídeo, programa, etc. Además, podría utilizar las frecuencias correctas, dando un mejor uso al espectro de radiofrecuencias, minimizando o evitando las interferencias que existen en los sistemas de radiocomunicación.

Por ejemplo, puede ser como tener un amigo, que considere que todo es importante en nuestra vida diaria, o bien, es como si fuera un director de cine con centenares de especialistas que le ayuden con cada tarea, o un ejecutivo con muchos asistentes para encontrar documentos.

Pues bien la Radio Cognitiva es la convergencia de muchos equipos que tienen acceso a redes computacionales locales e inalámbricas. La Radio Cognitiva ofrece beneficios a los usuarios ya que es un radio inteligente¹ capaz de utilizar su capacidad de Radio Cognitiva de manera óptima para interactuar con el medio ambiente que la rodea, empleando el aprendizaje sobre el medio ambiente y utilizando el conocimiento aprendido para mejorar la comunicación, de esta forma ofrece diversas aplicaciones en diferentes sectores para ayudarnos a realizar diferentes tareas, facilitando nuestra vida diaria.

2.1. ¿Qué es la Radio Cognitiva?

La idea de la Radio Cognitiva fue presentada oficialmente por primera vez en el artículo de Joseph Mitola III y Gerald Q. Maguire, Jr. La Radio Cognitiva puede interpretarse de distintas formas, en un inicio se pensó como una ampliación del Radio Definido por Software, también llamada “Radio Cognitiva completa”. Más adelante, se pensó que podía basarse en aplicaciones del Radio Definido por Software. Estas interpretaciones no son incorrectas ya que se puede evolucionar de un Radio Definido por Software a una Radio Cognitiva, y por tanto basarse en sus aplicaciones, lo cierto es que ésta también puede manejarse como un tema completamente independiente, ya que, no necesariamente depende del SDR, sino de cómo se implementé, esto se describirá en el Capítulo 3.

¹ Cabe aclarar que la Radio Cognitiva no es un radio inteligente, la palabra que se encontró durante esta investigación fue smart radio. Sin embargo, es la interpretación más cercana a dicho término.

Dejando de lado esta explicación, la Radio Cognitiva tiene diferentes definiciones, entre estas tenemos que:

La Radio Cognitiva es una forma de la comunicación inalámbrica en la que un transceptor inteligente puede detectar los canales de comunicación que se están utilizando y los que no se están utilizando, y al instante pasar a los canales no empleados, evitando al mismo tiempo los ocupados. Esto optimiza el uso del espectro de radio frecuencia (RF) y la posibilidad de reducir al mínimo la interferencia a otros usuarios.

La Radio Cognitiva es un paradigma de la comunicación inalámbrica en la cual tanto las redes como los mismos nodos inalámbricos cambian los parámetros particulares de transmisión o de recepción para ejecutar su cometido de forma eficiente sin interferir con los usuarios autorizados. Esta alteración de parámetros está basado en la observación de varios factores del entorno interno y externo de la Radio Cognitiva, tales como el espectro de radiofrecuencia, el comportamiento del usuario y el estado de la red.

Existen varios tipos de Radio Cognitiva, las cuales dependen del conjunto de parámetros que se tienen en consideración a la hora de tomar decisiones sobre la alteración de la transmisión y recepción o bien de razones históricas.

Las dos principales son:

- 1) **Radio Cognitiva completa o “Radio de Mitola”.**- Cualquier parámetro observado en un nodo inalámbrico y/o una red se tiene en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre el cambio de parámetros de transmisión y/o recepción.
- 2) **Radio Cognitiva detectora del espectro.**- Es un caso especial de la radio completamente cognitiva en la cual sólo se observa el espectro de radiofrecuencia.

Dependiendo de las partes del espectro disponibles para la Radio Cognitiva es posible distinguir:

- ❖ **Radio Cognitiva de banda bajo licencia.**- Cuando la Radio Cognitiva es capaz de usar bandas asignadas a usuarios bajo licencia, además de la utilización de bandas de libre uso como la banda UNII o la banda ISM. Uno de los sistemas similares a la Radio Cognitiva de banda bajo licencia es la especificación IEEE 802.15.
- ❖ **Radio Cognitiva de banda de libre acceso.**- Cuando la Radio Cognitiva sólo puede utilizar las partes de libre acceso del espectro de radiofrecuencia. Un ejemplo de este tipo de radio es la IEEE 802.19.

La mayor parte del trabajo de investigación está enfocada en la Radio Cognitiva detectora del espectro particularmente la utilización de bandas de TV para la comunicación.

El problema esencial de la Radio Cognitiva detectora del espectro es el diseño de dispositivos detectores de alta calidad y algoritmos para intercambiar los datos de detección del espectro entre los nodos.

Algunas de las aplicaciones de la Radio Cognitiva detectora de espectro incluyen las redes de emergencia y el aumento de la capacidad de las redes WLAN así como la ampliación de la distancia de la transmisión.

2.2. Relación entre la Radio Cognitiva y Radio Definido por Software

La Radio Cognitiva surgió gracias al Radio Definido por Software, ya que ésta emplea un comportamiento similar al SDR, es decir una red inalámbrica totalmente reconfigurable que cambia sus funciones de comunicación dependiendo de las demandas de la red y los usuarios, así mismo la Radio Cognitiva tiene la capacidad de tomar decisiones.

Diferentes Organismos Internacionales de Telecomunicaciones, consideran que el espectro de radiofrecuencia está siendo ineficientemente utilizado. Una atribución de espectro fijo provoca que las frecuencias que rara vez se usan y que están atribuidas a servicios específicos, no puedan ser usadas por usuarios no autorizados, incluso si la transmisión de estos no introduce ninguna interferencia en este servicio previamente desocupado. Esta era la razón que motivaba a usuarios no autorizados o sin licencia a utilizar bandas sujetas a autorización, asumiendo que no provocarían ninguna interferencia.

Por ejemplo, las bandas de la telefonía celular están sobrecargadas en la mayor parte del mundo, pero la banda de los radioaficionados no había confirmado tal observación, esto ha sido determinado por estudios independientes realizados en algunos países y que concluyen que la utilización del espectro depende fuertemente del tiempo, lugar, densidad poblacional y el nivel socioeconómico.

La Radio Cognitiva al actualizar total o parcialmente el hardware en sus equipos, a través de la alteración de programas informáticos, puede:

- Reducir la necesidad de sustitución del hardware
- Menor fabricación de hardware, sustitución, costo y mano de obra
- Facilitar la disponibilidad de las aplicaciones
- Reducir la complejidad de hardware
- Eliminar la cadena de hardware redundante

Con el amplio despliegue de la Radio Cognitiva, cada nodo puede también ser capaz de descargar actualizaciones de software de nodos vecinos. Ellos pueden colaborar entre sí para compartir recursos, hardware, software (ver Figura 1).



Figura 1. Comunicación a través de amplio espectro y de la red

Algunas de las aplicaciones basadas en Radio Definido por Software son:

- 1) La configuración de hardware para funcionar sobre cualquier red. Por ejemplo, un teléfono celular que opera en una red GSM. La red puede establecer la conexión a través de una red de área local inalámbrica (WLAN) en situaciones de emergencia o de otras situaciones.
- 2) La configuración de hardware para funcionar en cualquier frecuencia del espectro. Una vez que la Radio Cognitiva localice una frecuencia más adecuada, intentará acceder ya que puede ajustar sus parámetros de señalización tales como su frecuencia, modulación y codificación, de acuerdo a las condiciones del espectro, dando como resultados la mejora de la calidad de la señal y la reducción de los efectos de interferencia.

La Radio Cognitiva autónoma permite la medición de uso del hardware, a través de un auto diagnóstico, que como resultado detecta la inactividad del equipo, reduciéndola al mínimo, logrando un mejor uso y una buena optimización.

2.3. Aplicaciones comerciales típicas de la Radio Cognitiva

La tecnología va ligada a la aplicación. Uno de los principales motivos para el desarrollo de una nueva tecnología es la invención del hombre, su interminable sed de conocimiento y la constante ambición ilimitada de tener una vida mejor. El otro factor importante es la demanda de los usuarios, la necesidad y el deseo de los usuarios de tener todo en un sólo dispositivo.

La comunicación inalámbrica implica el acceso y la utilización del espectro radioeléctrico con el propósito de tener una mejor comunicación. Más y más dispositivos pueden caer bajo el concepto de "tecnología de comunicación inalámbrica". Por ejemplo, la conexión de una computadora a su teclado y mouse, a través de la radio como medio. Esto puede eliminar la fabricación de hardware logrando así disminuir la contaminación, el costo de la mano de obra para la conexión. Por lo tanto, la tecnología inalámbrica abre un sin fin de mercado logrando obtener diversas aplicaciones para esta tecnología.

La "Radio Cognitiva" en el mundo inalámbrico es relativamente nueva y se compone de dos palabras mágicas que abarcan todo. Es una radio inteligente, capaz de utilizar su capacidad de Radio Cognitiva de la manera óptima para interactuar con el medio ambiente que la rodea, empleando el aprendizaje sobre el medio ambiente y utilizando el conocimiento aprendido para mejorar la comunicación.

La radio tradicional, carece de la inteligencia cognitiva; usos fijos del espectro, para fines especiales de hardware dedicados al espectro y su capacidad se limita al fabricante y una lista de condiciones.

En la comunicación inalámbrica de hoy en día, el poder utilizar las bandas de frecuencia del espectro que no son empleadas en forma continua incrementaría la posibilidad de tener un mayor número de aplicaciones. La Radio Cognitiva podría emplear bandas de frecuencia del espectro que no son utilizadas, identificándolas y empleándolas a través de una radio inteligente y posteriormente liberándolas cuando sea requerido por los usuarios primarios.

La Radio Cognitiva no se limita únicamente a la utilización del espectro no empleado, también es capaz de mejorar toda comunicación total o parcialmente ya que cuenta con las siguientes características:

- 1) Conciencia
- 2) Percepción
- 3) Aprendizaje
- 4) Adaptación

Las aplicaciones de la Radio Cognitiva pueden clasificarse en términos generales: en aquellas que contribuyen a la mejora del rendimiento de los sistemas existentes de comunicaciones inalámbricas, o bien en aquellas en las que puede ser favorable en el establecimiento de nuevas comunicaciones inalámbricas (ver Figura 2).

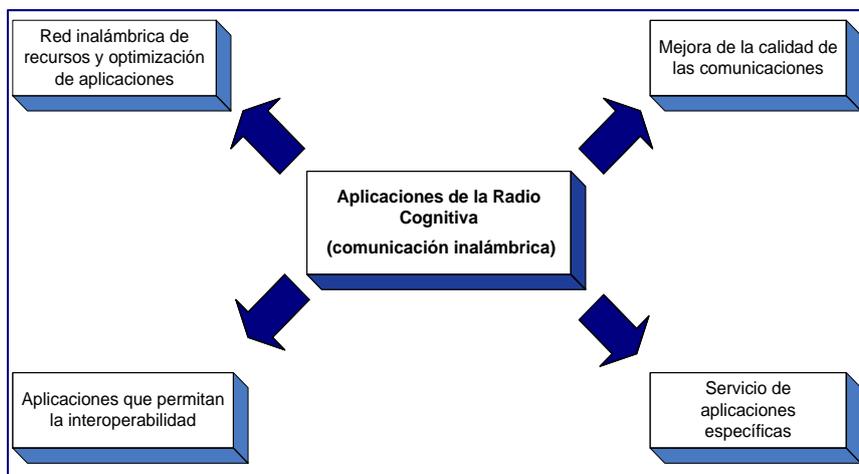


Figura 2. Clasificación de las aplicaciones de la Radio Cognitiva

Esta clasificación se lleva a cabo para una mejor comprensión y organización de cada solicitud y su relación con el "Concepto Cognitivo".

- 1) El primer grupo está compuesto por las aplicaciones de la Radio Cognitiva que contribuyan a la optimización de los diversos recursos inalámbricos.
- 2) El segundo grupo de Radio Cognitiva representa las aplicaciones que contribuyan a la mejora de la calidad de las comunicaciones
- 3) La tercera y cuarta categoría de la Radio Cognitiva reflejan las solicitudes relativas a la interoperabilidad, servicios y productos de consumo final, respectivamente

En general, muchas de estas aplicaciones a través de estos grupos se pueden beneficiar unos a otros, sus territorios pueden superponerse, y pueden ya sea por separado o juntos trabajar en equipo para mejorar la comunicación inalámbrica.

La optimización de recursos y mejora de la calidad de las aplicaciones se agrupan por separado, sin embargo, están estrechamente relacionadas.

Entre las aplicaciones principales de la Radio Cognitiva tenemos:

- 1) Sector privado.
 - Hogar y entorno familiar
 - Entorno Escolar
 - Entorno en la oficina
 - Telefonía celular
 - Comunicación con servicios no cognitivos
 - Interfaz hombre máquina

La tecnología es una parte fundamental en la vida moderna. La calidad del tiempo con la familia ha recuperado su importancia. Como resultado de ello, la diferenciación de la frontera entre el hogar y la oficina está desapareciendo.

Por ejemplo, un empleado de una empresa tal vez desee participar en una video conferencia antes de salir de casa. La conexión puede establecerse a través de una WLAN que transmite en tiempo real la información. Al mismo tiempo, otros vecinos pueden tener acceso a la WLAN para casos similares o por otros motivos. Para evitar esta congestión, la Radio Cognitiva puede identificar las frecuencias del espectro disponible y utilizarlas.

Este espectro disponible puede pertenecer a otros servicios, por ejemplo, seguridad pública o a departamentos de policía.

Si los puntos de acceso se encuentran en zonas menos pobladas, el espectro no utilizado puede emplearse como una banda de TV.

La capacidad cognitiva puede proporcionar el ancho de banda adecuado para la transmisión de la información deseada y elegir la modulación adecuada, las técnicas de codificación para ofrecer una mejor comunicación inalámbrica utilizando el o los espacios no ocupados del espectro.

En las mismas circunstancias una radio tradicional puede ser incapaz de funcionar durante la congestión de acceso a la radio y la persona tendría que sacrificar por completo su conferencia de la mañana.

2) Sector Público de Gobierno (Protección, Seguridad y Seguridad en Casos de Desastre)

La aplicación de la Radio Cognitiva en la seguridad pública y situaciones de desastre puede traer cambios revolucionarios. La Radio Cognitiva permite la creación y el mantenimiento de la comunicación a través de diversas redes y espectros. Esto, a su vez, permite un enlace de comunicación ininterrumpida durante la protección pública y el socorro en situaciones de desastre.

En una situación de desastre, en el sector privado, las redes inalámbricas pueden sufrir complicaciones, por ejemplo, una red celular puede ser inoperable y la seguridad pública del espectro puede ser insegura debido a las numerosas conexiones de emergencia. En virtud de tal situación, la Radio Cognitiva puede utilizar con licencia disponible o sin licencia el espectro completo y los espacios disponibles de la red, así como crear y mantener la conexión temporal de emergencia.

Como un ejemplo, la Radio Cognitiva puede establecer un vínculo más de comunicación para la banda GSM utilizando puntos de acceso WLAN.

- Aplicaciones médicas

La aplicación de la Radio Cognitiva puede aportar mejoras en áreas médicas y biomédicas. En un ambiente de hospital, por ejemplo, un bebé recién nacido debe ser identificado con su madre. Si el personal del hospital realiza una incorrecta identificación visual o manual de cualquier niño, ya que, siempre hay una posibilidad de asociar un bebé con la madre equivocada. A fin de evitar esta lamentable situación, se puede colocar una etiqueta inalámbrica en el cuerpo del bebé, para que tenga como función responder a otra etiqueta colocada en la muñeca de la madre. Esta etiqueta de Radio Cognitiva puede informar a la madre de forma inteligente si el bebé es llevado fuera de los lugares permitidos, por ejemplo, fuera de la sala de bebé del hospital.

Para el caso de pacientes adultos, cada uno puede contar con una etiqueta cognitiva de identificación personal. Mediante una central de control dentro del mismo hospital se puede utilizar, almacenar y actualizar la información de cada paciente y realizar un seguimiento de sus cambios. La etiqueta cognitiva puede registrar los signos vitales del paciente e informar oportunamente a la autoridad correspondiente si detecta una anomalía. Las etiquetas de largo alcance colocadas en el paciente pueden supervisar sus lecturas y transmitir la información al médico, mientras el paciente está fuera del hospital. Hay otras aplicaciones médicas especiales de la Radio Cognitiva y son:

- **Servicios de emergencia médica:** Los servicios de emergencia médica se proporcionan al público, principalmente en dos fases. La primera de ellas es mediante un móvil médico, por ejemplo, una ambulancia. La segunda es en un ambiente controlado con mayor asistencia médica que un hospital metropolitano. Los nuevos avances médicos tienen la capacidad de ofrecer mejores servicios de asistencia médica. Los sistemas médicos personales,

pueden ayudar a transferir la información del paciente mediante un ambiente de control.

La transmisión de información requiere un ancho de banda suficiente, porque puede incluir video y sonido. De este modo, se podrá transmitir la información de una manera más rápida y confiable, ya que así se puede ofrecer un mejor servicio al paciente, por ejemplo, si un paciente necesita un medicamento controlado, se puede tener el medicamento antes de que el paciente llegue allí. Si se requiere una intervención urgente de cualquier tipo, el personal móvil podrá realizarla con la ayuda de especialistas que se encuentran en el ambiente controlado. También es importante que el funcionamiento de los equipos médicos no se afecte o dañe durante la transferencia de información de los dispositivos inalámbricos. La Radio Cognitiva puede ayudar de manera eficiente a los servicios médicos de emergencia, facilitando las tareas del personal médico y salvando vidas humanas.

- **Ingeniería biomédica:** La Ingeniería biomédica puede implicar la inserción o fijación de dispositivos electrónicos en el cuerpo humano, para controlar distintas funciones del cuerpo y poder transmitir la información para dar seguimiento al paciente cuando sea necesario. La Radio Cognitiva puede permitir la detección inteligente de tejidos o de células anormales en la sangre dentro de un cuerpo humano y notificar al médico. Esto puede jugar un papel crucial para salvar vidas humanas.
- **Asistencia a las personas invidentes:** La radio Cognitiva pueden jugar un papel importante al convertirse en los ojos de una persona invidente. Comúnmente un invidente se auxilia de los perros o bastones. La Radio Cognitiva puede sustituir estas guías con información, indicando al usuario, que ruta es la adecuada, el momento en que deben cruzar la calle, indicarle que trayecto es el adecuado para que pueda aprovechar en hacer sus compras también, etc. Dependiendo de las actividades diarias de la persona invidente, la Radio Cognitiva puede adaptarse para personalizarse a las necesidades de cada usuario invidente.

3) Sector Gobierno militar

Entre todas las aplicaciones de la Radio Cognitiva, la aplicación militar es quizás una de las más importantes, en donde los diferentes aspectos de la Radio Cognitiva se han desarrollado desde hace ya un tiempo. El Radio Definido por Software “SPEAKEASY” es un conjunto de sistemas de radio táctica (JTRS) y son algunas de las más importantes tecnologías en el campo militar, que utilizan los conceptos de la Radio Cognitiva.

En la forma más simple, SDR puede definirse como un radio que es controlado y ejecutado por software. Las ventajas de SDR han sido reconocidas por los militares para resolver sus deficiencias de comunicación en tiempo de guerra.

Algunas de estas deficiencias se abordaron en el proyecto SPEAKEASY, el cual es una aplicación avanzada de SDR. Los esfuerzos en SPEAKEASY condujeron a la elaboración del proyecto JTRS.

La situación actual de los militares impone diferentes sistemas de radio que se mantienen y operan manualmente. El proyecto JTRS puede reducir el total de

equipos de comunicación trayendo consigo la eliminación de múltiples sistemas. Algunas de las características significativas de JTRS incluyen una reducción de los costos de mantenimiento y la complejidad, eliminando el exceso de equipos se puede lograr que las comunicaciones militares sean menos vulnerables a la interceptación de enemigos, ya que esto provoca una mejora en el uso del espectro, así como la facilidad de aplicación debido a su compatibilidad con los sistemas actuales (ver Figura 3).

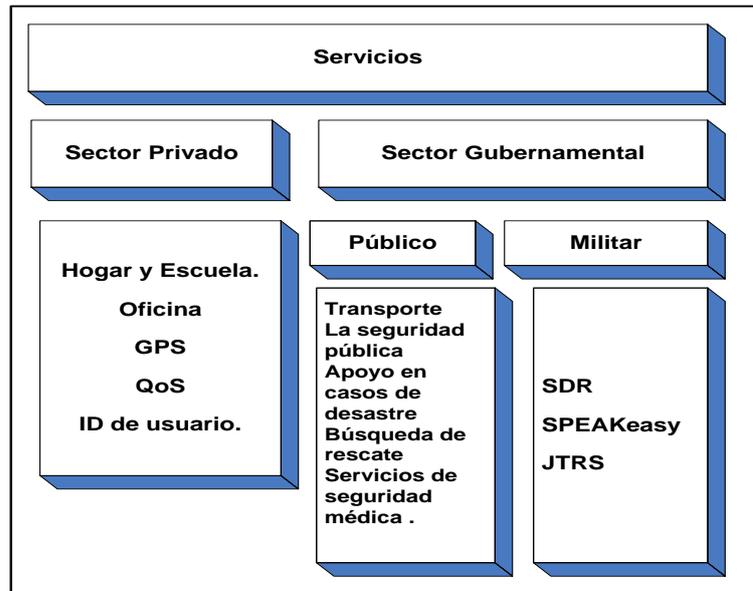


Figura 3. Clasificación de aplicación de servicios específicos

2.4. Principales Funciones de la Radio Cognitiva

Desde inicios del siglo XX el espectro de frecuencias inalámbricas ha sido cuidadosamente controlado por los reguladores gubernamentales de cada país.

En respuesta a los recientes avances en tecnología de radio, el espectro disponible se ha abierto en algunas partes para el uso sin licencia. Además, se han reformado las tradicionales políticas de mando y control para la regulación de las transmisiones a través del ancho de banda del espectro no utilizado con licencia, para usuarios secundarios en determinados momentos y lugares.

Este cambio de paradigma puede conducir a una mayor flexibilidad y eficacia de reparto del espectro en un futuro próximo debido a la naturaleza dinámica de reparto del espectro, es difícil de analizar y proporcionar sistemas de gestión del espectro. Varios investigadores se basan en la teoría de juegos, que es una herramienta adecuada para la elaboración de modelos estratégicos, los cuales realizan interacciones para tomar decisiones racionales (por ejemplo, el reparto del espectro en las redes inalámbricas).

Las principales funciones de la Radio Cognitiva pueden resumirse de la siguiente manera:

- 1) Detección de espectro.-** Un requisito muy importante para el correcto funcionamiento de la Radio Cognitiva, es la capacidad de detección del espectro

desaprovechado, empleándolo sin provocar interferencias negativas a otros usuarios. La mejor manera para encontrar agujeros o huecos en el espectro, es detectando a los usuarios principales (legítimos). Las técnicas para detectar el espectro se pueden dividir en tres categorías:

- **Detección de transmisiones.** La Radio Cognitiva debe tener la capacidad de determinar si hay una señal de algún usuario utilizando una parte específica del espectro.
- **Detección cooperativa.** Diferentes usuarios de la Radio Cognitiva puedan intercambian periódicamente información sobre la detección de usuarios principales.
- **Detección basada en interferencias**

2) Gestión del espectro.- Utilizar el ancho de banda que mejor se acople con el QoS que el usuario necesite de entre todas las frecuencias disponibles. La administración o gestión del espectro consta de dos pasos: El "Análisis del espectro" y la "Decisión del espectro".

- **Análisis del espectro.** Consiste en identificar las características de cada banda disponible para saber las ventajas o inconvenientes de utilizarlo (retardo, probabilidad de error, etc.)
- **Decisión del espectro.** Compara las características de cada una de las bandas con las requeridas por el usuario y valora cual es la mejor opción

3) Movilidad del espectro.- Es el proceso con el que la Radio Cognitiva cambia su frecuencia de transmisión o recepción. La Radio Cognitiva está ideada para cambiar de banda constantemente (a otras mejores) de una forma imperceptible para el usuario.

4) Compartición del espectro.- Consiste en encontrar un método esquemático de distribución del espectro que sea equitativo y justo para todos los usuarios de la Radio Cognitiva sin interferir en las transmisiones de los usuarios con licencia. Éste es uno de los mayores retos a la hora de diseñar Radios Cognitivas. Es parecido a los problemas genéricos de acceso al medio (MAC) en los sistemas de hoy en día.

1.4.1 Detección de Espectro

La Radio Cognitiva nos ofrece una alternativa para tener un uso eficiente del espectro radioeléctrico. El objetivo de la Radio Cognitiva, consiste en detectar qué parte del espectro no está siendo ocupado, para después hacer la transmisión en esa banda de frecuencia.

Para ello existe una clasificación de usuarios que son primarios y secundarios. Los usuarios secundarios pueden tener acceso y compartir el espectro sólo si la interferencia que causan es mínima para los usuarios primarios, o cuando los usuarios primarios están inactivos.

La primera tarea de la Radio Cognitiva consiste en detectar correctamente la actividad que se realiza en el espectro.

Existen diferentes métodos para que la detección cooperativa sea más exacta que los esquemas no cooperativos.

La siguiente figura muestra la detección cooperativa del espectro y agrupa a los usuarios secundarios para detectar la presencia de usuarios primarios (ver Figura 4).

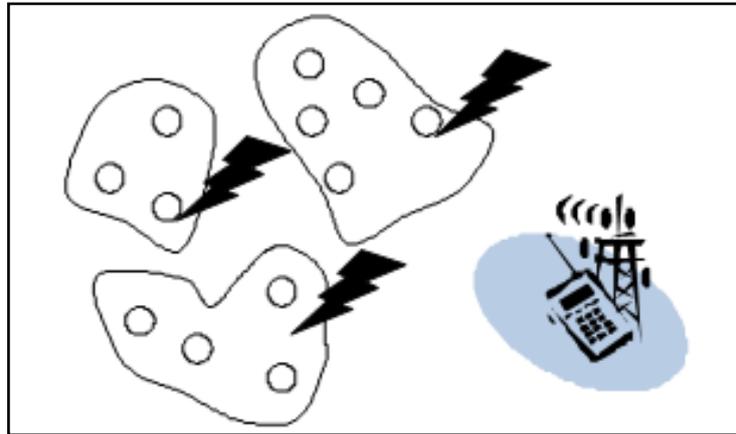


Figura 4. Detección cooperativa del espectro

Después de las detecciones de espectro, los usuarios secundarios conformando un grupo intercambian la información antes de tomar decisiones finales. La decisión se basa generalmente en la votación por mayoría, así que la probabilidad de una falsa alarma y de la falta de una banda disponible es menor comparada a que la toma de decisión la hiciera un solo usuario.

Sin embargo, el espectro cooperativo que detecta esquemas es desafiado generalmente en dos aspectos:

- El Consumo de energía
- El Retardo de la detección causado por la cooperación

El retardo de la detección es más crítico porque las situaciones de los usuarios primarios pudieron haber cambiado ya, durante el proceso de decisión, así como el espectro del ancho de banda que detecta.

La figura que se muestra a continuación muestra un ejemplo de los problemas que el retardo de la detección puede causar (ver Figura 5).

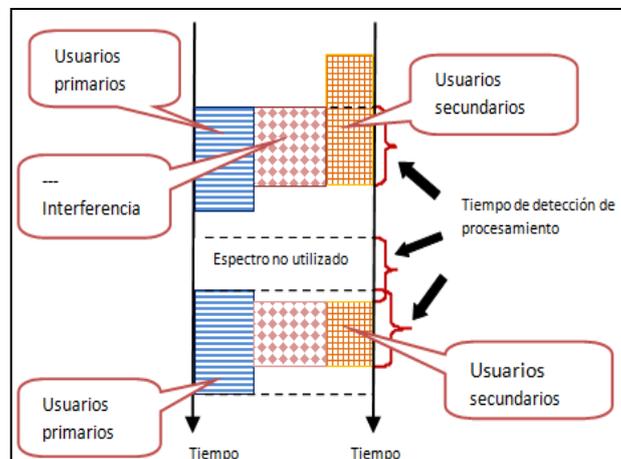


Figura 5. Ejemplo que muestra los problemas causados por el retardo de la detección del espectro

Al principio, los usuarios secundarios piensan que no hay un usuario primario y comienzan a tener acceso al espectro, hasta que ellos encuentran la presencia de los usuarios primarios. Sin embargo, debido al retardo del proceso, los usuarios secundarios causan interferencia a los usuarios primarios aun cuando el retardo de propagación no está considerado.

Después de que los usuarios primarios están en un estado inactivo, tarda cierto tiempo antes de que los usuarios secundarios encuentren el espectro disponible otra vez. Esto causa el desaprovechamiento del uso del espectro.

2.4.1.1 Métodos de acceso múltiple

Los métodos de acceso múltiple actualmente disponibles incluyen el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), el acceso múltiple por división por frecuencia (FDMA), y el espectro disperso por salto de frecuencia (FHSS).

TDMA asigna a cada usuario un “espacio” temporal, durante la cual se transfiere la información que le corresponde. Los demás usuarios no pueden transmitir hasta que les toca su propio espacio (slot). Este proceso es similar en recepción. FDMA, asigna a cada usuario bandas de frecuencia distintas, sin traslapo a transmitir. FHSS, cada usuario comparte todas las bandas de frecuencia saltando a diversas bandas en diferentes tiempos.

Los métodos de acceso múltiple (TDMA, FDMA y FHS), así como los métodos de acceso asimétricos, han demostrado ser métodos eficientes para la detección del espectro.

2.4.1.2 Detección del espectro inspirada por el acceso múltiple

Puesto que se relacionan con el uso del espectro, se hace referencia al espectro cooperativo, el cual detecta problemas mediante el acceso múltiple. Las soluciones de acceso múltiple sirven como una solución para poder compartir el espectro radioeléctrico.

Existen diferentes propuestas para la detección del espectro y estas son:

- Los usuarios no necesitan de la detección de frecuencias disponibles. Este proceso es similar a la filtración del ancho banda, pero localizan a cada usuario o a cada grupo como filtro en lugar del otro.
- La detección del espectro puede ser solucionado. Sin embargo, los métodos tienen algunas desventajas tales como, pérdida de tiempo, ya que la información necesita ser intercambiada al final de cada intervalo de la detección.

A continuación se describen seis diferentes técnicas de los métodos de acceso múltiple para la detección del espectro de cooperación, por lo que cada una de ellas tiene un uso

específico, destinado a resolver cuestiones de demora o problemas de detección de frecuencias en el espectro.

2.4.1.2.1. *Detección Cooperativa del espectro por división de tiempo (TD-CSS)*

El primer paso de este método consiste en dividir a los usuarios cooperativos en varios grupos. Este método se puede utilizar para solucionar el retardo en tiempo, así como la detección cooperativa del espectro.

TD-CSS se divide en grupos, los cuales alternadamente detectan la presencia de usuarios primarios. Mientras que un grupo está procesando la detección y está intercambiando la información, otros grupos aguardan para detectar el espectro.

Al final de la detección, se intercambia la información, aquí es cuando los usuarios cooperativos se sincronizan para mantener el correcto orden de la sincronización y de detección. El método de TD-CSS, está compuesto por bloques con diversos estilos que representan a diversos grupos. La longitud del bloque D representa el tiempo transcurrido en la detección (ver Figura 6).

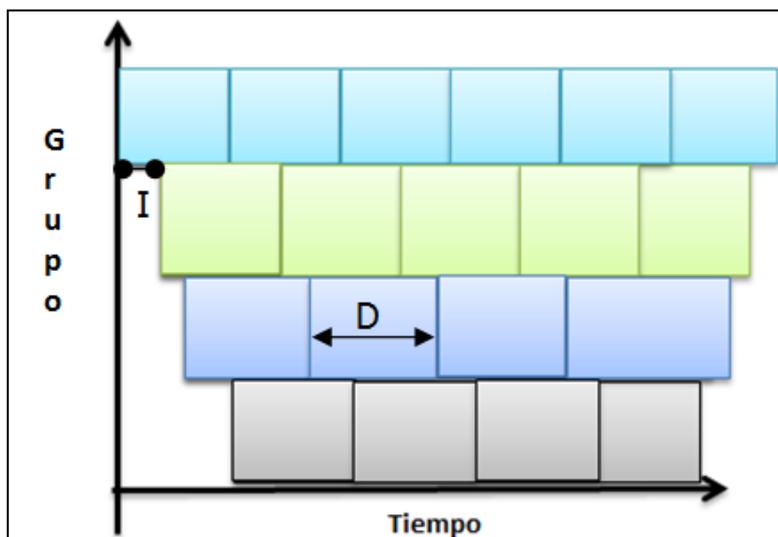


Figura 6. TD-CSS

Para llevar a cabo la agrupación surgen las siguientes preguntas:

¿En cuántos grupos deben ser divididos los usuarios? La respuesta depende de cuánto tiempo tarda en realizar la detección. Donde D representa el tiempo de detección cooperativo, I es el intervalo de la detección subsecuente y N es el número de grupos.

$$I \cdot N > D \left(N > \frac{D}{I} \right), I < D$$

¿Cómo agrupar a esos usuarios? Se debe analizar si los usuarios cooperativos están lejos entre sí, con la intención de evitar afectaciones al mismo tiempo, y así se puede ir mejorando el funcionamiento total. Sin embargo, una comunicación más cercana puede ahorrar el consumo de energía de la transmisión (ver Figura 7).

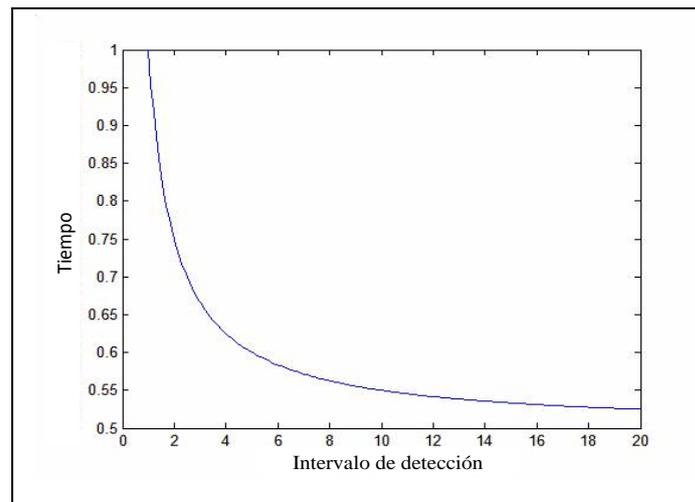


Figura 7. Uso de mejoras TD-CSS

Una vez que un grupo detecta el espectro, con la fórmula de detección cooperativa del espectro, comparte los resultados a otros grupos. El tiempo de espera más largo es $2 \cdot D$.

Cuando la detección del espectro se traslapa, el tiempo de espera es más largo. Usando el método TD-CSS y aplicando la detección tradicional del espectro se puede ahorrar cerca del 20% al 40% de tiempo, dependiendo de los valores relativos del tiempo de detección, del intervalo de la detección, y del número de grupos.

También es posible mejorar el funcionamiento de este método usando técnicas avanzadas. Esto se logra con usuarios primarios, estos detectan el espectro e informan a otros grupos (conformados por usuarios secundarios) sobre la detección del espectro, la información entonces se intercambia entre los grupos. Se requiere intercambiar la información puesto que ningún grupo ha decidido que frecuencia ocupar. Suponga que hay dos grupos, el grupo A y el grupo B, el grupo A está procesando la detección cuando el grupo B informa al grupo A que puede haber un usuario primario. Entonces el grupo A se prepara para hacer uso del espectro inmediatamente en cuanto reciba una confirmación adicional, o incluye la opinión del grupo B para la toma de decisión. El ejemplo anterior puede ser demasiado conservador, pero es un buen mecanismo para combinar la información y tomar mejores decisiones.

2.4.1.2.2. Detección Cooperativa del espectro por división de frecuencia (FD-CSS)

Este método se puede emplear también para la detección del espectro y consiste en que diferentes grupos detecten diferentes frecuencias. A continuación se muestra cómo funciona el método el FD-CSS (ver Figura 8).

A diferencia de la Figura 6, el eje “y” representa ahora las bandas de frecuencia, no los diferentes grupos. En este método se asigna un coordinador (que será aquel usuario que tenga mejor fácil acceso a todos los usuarios), este rol puede ser turnado con la finalidad de disminuir la carga de trabajo a un mismo usuario.

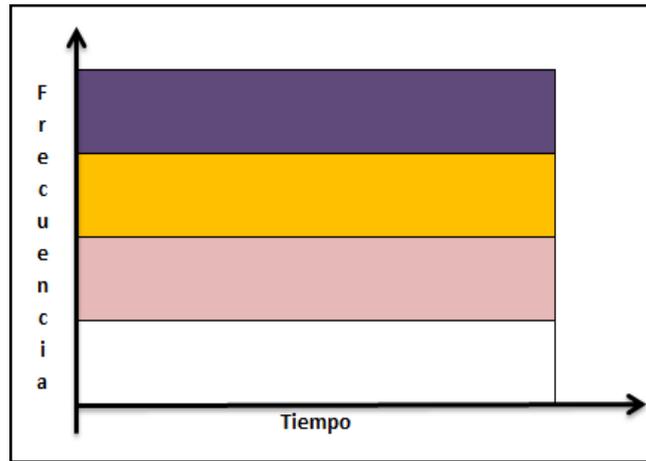


Figura 8. FD-CSS

Mientras un grupo detecta la presencia de los principales usuarios, los otros usuarios se encargan de informar a todos los usuarios que esta frecuencia ha sido ocupada.

En el método FD-CSS, la agrupación se basa en los lugares geométricos. Los usuarios pueden agruparse para detectar la misma banda de la frecuencia. Este método se basa en el ancho de banda total B y el número de grupos N , entonces cada grupo detecta el ancho de banda W .

$$W = B / N$$

Se debe elegir el valor más alto de N , cuando W es pequeña, la detección del espectro es más rápida. Está disponible un sistema avanzado para que varios grupos puedan detectar mejores frecuencias. Sin embargo, esto significa que se debe contar con un número significativo de grupos. Para la asignación de la banda de frecuencia algunos grupos son mejores candidatos que otros para detectar algunas bandas de frecuencia porque detectan menos ruido.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N1} & \cdots & C_{NN} \end{bmatrix}$$

Donde C_{nm} representa al medio de la condición del canal, n^{th} es el grupo y m^{th} es la banda de frecuencia. Basándose en todas las condiciones para cada canal de grupo, es posible encontrar una mejor combinación.

Existen bandas de N frecuencias y N grupos, de modo que tenemos $N!$ posibles opciones. La función de costo puede escribirse como:

$$\sum_{i=1}^N a_i c_i$$

Donde C_i se obtiene de $(C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{iN})$ y α_i los coeficientes. La optimización del problema puede ser resuelta en tiempo real por el coordinador de asignación de bandas de manera simple.

2.4.1.2.3. Detección Cooperativa del espectro por división de frecuencia escalonada (SFD-CSS)

Este método es similar al de división por frecuencia, sólo que la detección de diferentes bandas de frecuencia comienza en diferentes tiempos. La siguiente figura muestra un método más avanzado para detectar una banda de frecuencias en zonas horarias consecutivas. Esto evita el ruido transitorio o desvanecimiento repentino del espectro (ver Figura 9).

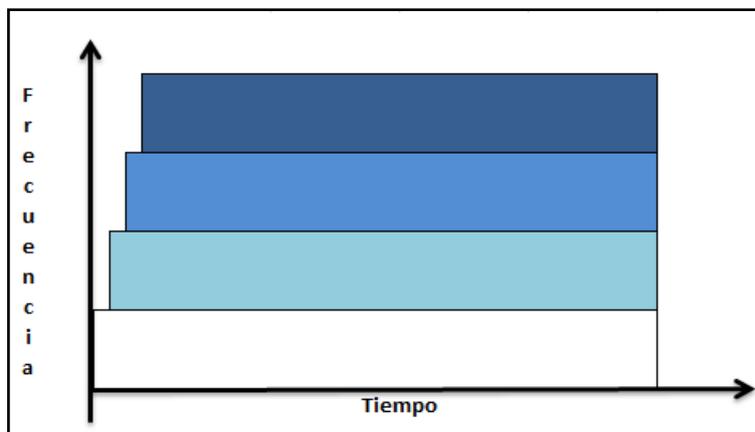


Figura 9. SFD-CSS

En la siguiente figura se muestra el método SFD-CSS, el cual se basa en el hecho de que un usuario principal utiliza bandas de frecuencia mayores, por lo tanto un usuario secundario logra encontrar más bandas, mediante la aplicación de este sistema, aumentando la tasa de detección (ver Figura 10).

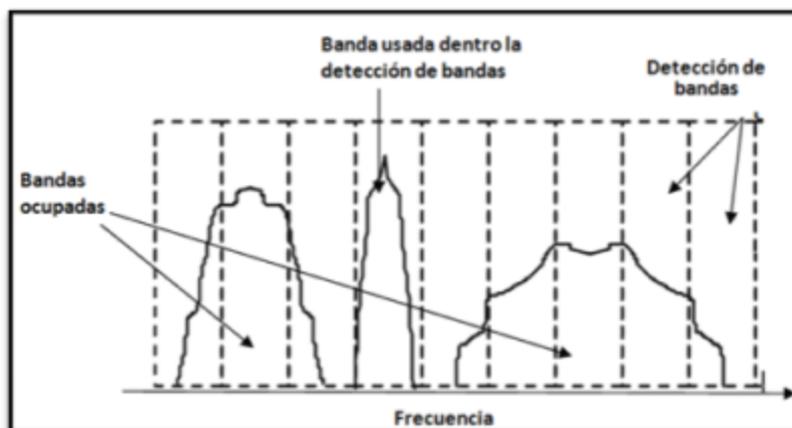


Figura 10. Detección de más bandas empleando SFD-CSS

2.4.1.2.4. *Detección Cooperativa del espectro con saltos de frecuencia (FH-CSS)*

En el método FH-CSS cada grupo detecta una banda de frecuencia. Es probable que algunos grupos sufran un desvanecimiento profundo de algunas bandas de frecuencias en el espectro de detección y los resultados no estén disponibles.

Si se dispone de información, es posible utilizar grupos con mejores condiciones para detectar los canales principales que utilizan los usuarios primarios. Lamentablemente, la localización de este canal puede ser difícil de encontrar. Para resolver este problema, se deja al azar la detección de las bandas de frecuencias a diferentes grupos.

Como resultado, al menos uno de los grupos es capaz de detectar los principales usuarios y compartir los resultados colectivos de detección a través de varios saltos entre los intervalos, los cuales pueden ser considerados antes de tomar la decisión. Cada grupo tiene un salto de frecuencia determinado, este régimen es pseudoaleatorio.

La Figura 11 muestra el funcionamiento del método FH-CSS. El inconveniente del salto de frecuencia es que cada grupo tiene que cambiar a una frecuencia distinta, en otro espacio de tiempo, el cual es difícil de lograr en muy poco tiempo. Para evitar un exceso de conmutación, cada grupo puede permanecer en su frecuencia original asignada, sólo si las actividades de los usuarios primarios no cambian muy a menudo.

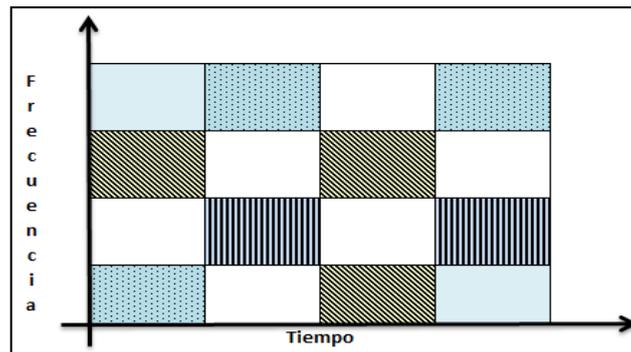


Figura 11. FH-CSS

2.4.1.2.5. *Detección Cooperativa del espectro de bandas no uniformes (IS-CSS)*

El método IS-CSS es similar al método FD-CSS, sólo que el ancho de banda que detecta cada grupo es diferente, el ancho de banda es ocupado por las bandas de frecuencia no uniformes (ver Figura 12).

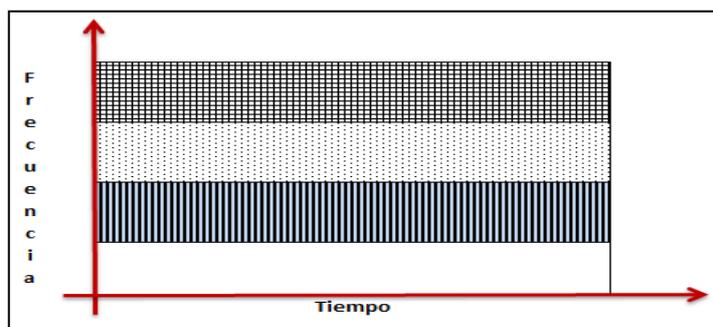


Figura 12. IS-CSS

Con la asignación de la banda de frecuencia no uniforme, la detección se puede realizar con mayor precisión y eficiencia (ver Figura 13).

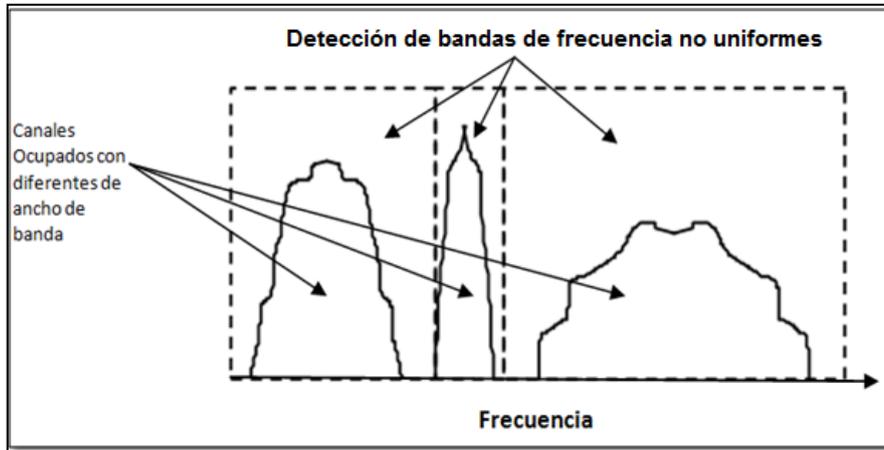


Figura 13. IS-CSS

La asignación de bandas de frecuencia no uniformes en el método IS-CSS, plantea la cuestión de cómo definir el límite de detección de bandas de frecuencias. Cuando los usuarios del espectro tienen distintas capacidades de detección, es decir, cuando la percepción para la detección del espectro de todos los usuarios es diferente, IS-CSS es esencialmente práctica. Si los usuarios son capaces de adaptarse para detectar diferentes bandas, se proponen tres métodos. El primer método propuesto es utilizar CSS- FD para encontrar los bordes y luego cambiar a IS-CSS más tarde.

En el primer método, los usuarios detectan el mismo ancho de banda, después de eso, tienen una idea de la forma en que el espectro se aparece, y en consecuencia reasignan la detección de sus bandas. El segundo método es el más sencillo de implementar. Por último, el tercer método es el más complejo por los cálculos que requiere.

2.4.1.2.6. Detección Cooperativa del espectro con sub bandas no uniformes escalonadas (SIS-CSS)

Con el mismo concepto que SFD-CSS, la superposición puede aplicarse a la detección de bandas irregulares en forma escalonada (ver Figura 14).

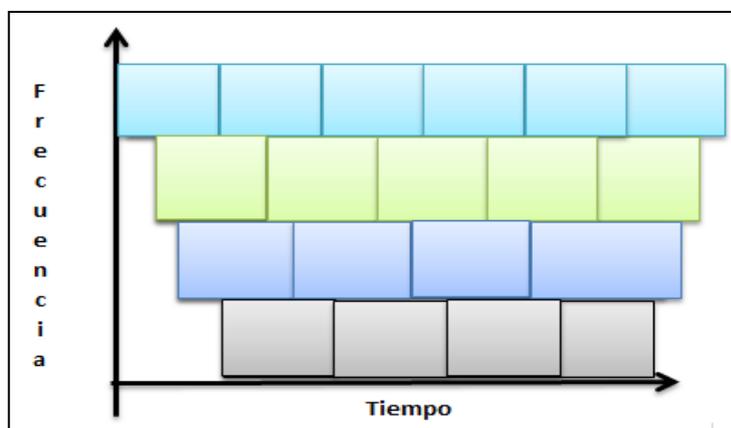


Figura 14. SIS-CSS

En este método, distintos grupos detectan diferentes bandas de frecuencia en diferentes zonas horarias. Similar al SFD-CSS, varios grupos se pueden usar para detectar una sola banda en diferentes tiempos para evitar interferencias. La siguiente figura muestra un escenario donde la detección del ancho de banda es menor a los canales ocupados con diferentes anchos de banda (ver Figura 15).

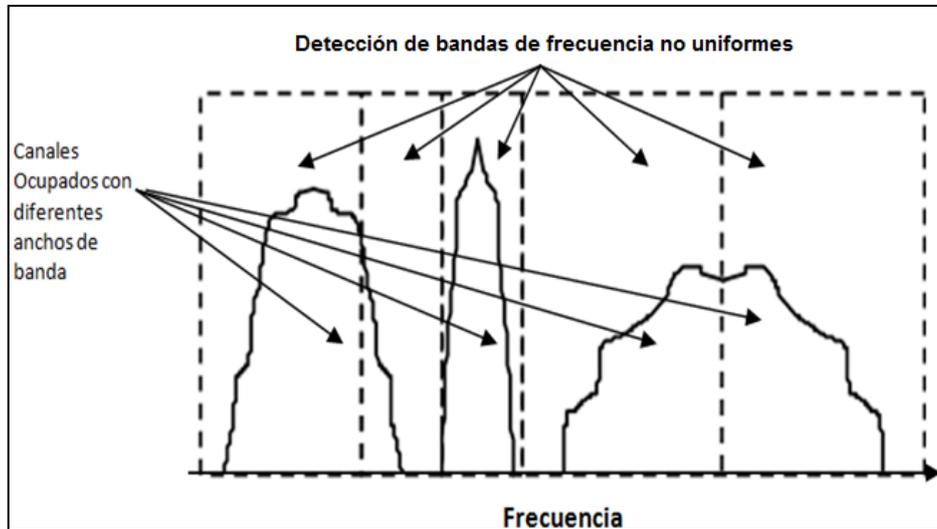


Figura 15. SIS-CSS

2.4.1.2.7. Comparación de las técnicas propuestas para la de detección de cooperación de espectro

Cada una de las seis técnicas propuestas para la detección por cooperación del espectro tiene sus pros y sus contras.

Por ejemplo, TD-CSS en los resultados de detección del espectro muestra muy poco retraso. En el método FH-CSS se aborda la detección de un problema secundario cuando cada usuario tiene limitaciones en la capacidad de la antena para la detección de ancho de banda. FH-CSS también se puede aplicar a la detección del ancho de banda, especialmente cuando las condiciones del canal se desconocen. Sin embargo, los usuarios deben tener una rápida capacidad para la conmutación de las frecuencias.

El método IS-CSS es más eficaz cuando se ocupan bandas de frecuencia no uniformes. SFD-CSS y SIS tratan de resolver el problema de detección del espectro, lo más pronto posible, mientras que FH-CSS y CSS ofrecen mejores ventajas.

La siguiente tabla muestra un resumen de ventajas y desventajas entre los diferentes métodos, donde B es el ancho de banda detectado, N es el número de grupos, D es el tiempo de detección y para el valor * depende del uso que los usuarios primarios le estén dando al espectro (ver Tabla 3).

Tabla 1. Comparación de las propuestas de los sistemas de detección del espectro de cooperación

Plan de respuesta	Tamaño del Ancho de banda	Tiempo de Respuesta	Características del canal	Ancho de banda disponible para cada campo	Tiempo de Respuesta	Cambios
TD	Estrecho	Rápido	Ninguno	B	D/N	Limitado por el tiempo de detección
FD	Ancho	Lenta	Excepto cuando detectan muchas bandas de frecuencia	B/N	D	Condición, el canal debe estar disponible
SFD	Medio	Medio	Desvanecimiento Repentino profundo	B/N	D/N <D*	Condición, el canal debe estar disponible
FH	Ancho	Lento	Desvanecimiento estático	B/N	D	Necesidad de conmutación rápida de las frecuencias
IS	Ancho (bandas irregulares)	Lento	Desvanecimiento lento	B/N <B*	D	Necesidad de encontrar algoritmos para la detección de bordes de bandas de frecuencia
SIS	Medio (bandas irregulares)	Medio	Desvanecimiento repentino	B/N <B*	D/N <D*	Necesidad de encontrar algoritmos para la detección de bordes de bandas de frecuencia

2.4.2. Gestión del espectro radioeléctrico

En esta tesis se muestra un ejemplo de cómo Inglaterra lleva a cabo la gestión del espectro, con el fin de tener un uso más liberalizado del espectro.

También se describe acerca del "Dividendo por la Digitalización" que es la próxima liberación del espectro radioeléctrico como resultado de la migración de la TV analógica a digital, actualmente el espectro radioeléctrico presenta muchas aplicaciones, así como usuarios.

El Organismo que regula las Telecomunicaciones en Inglaterra es conocido como OFCOM y tiene como finalidad, darle el mejor uso al espectro radioeléctrico, de este modo se pretende reducir al mínimo la interferencia entre las señales, así como ofrecer un mejor servicio a la sociedad.

A continuación se muestra como se lleva a cabo la Gestión del espectro radioeléctrico en Inglaterra (ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Regulación del espectro

<p>Ofcom es el organismo regulador de las Telecomunicaciones y sus responsabilidades son las siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Asegurar que el espectro se utilice acorde a los intereses de los ciudadanos y los consumidores. 2) Emplear los mecanismos de mercado, en su caso, garantizar un uso óptimo de los recursos del espectro. 3) Para los organismos del sector público (tales como el Ministerio de Defensa y la Autoridad de Aviación Civil), la gestión del espectro para la defensa, la aviación, la navegación, la ciencia y la seguridad pública, la asignación del espectro se realizará empleando las normas internacionales. 4) Negociar y adherirse a acuerdos internacionales. <p>A nivel internacional.</p> <p>La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es un Organismo de las Naciones Unidas, la asignación del uso del espectro de radioeléctrico, para diferentes servicios, como por ejemplo; la telefonía celular, comunicaciones por satélite, radiodifusión, etc., se realizan mediante convenios entre diferentes países.</p> <p>El uso del espectro radioeléctrico, es regulado también por la Unión Europea (UE), por lo tanto Inglaterra debe respetar dichas decisiones acerca del uso o distribución del espectro.</p> <p>CEPT4 es un organismo conformado por 48 países europeos, los cuales se encargan de coordinar, regular, y desarrollar recomendaciones para la gestión del espectro para Europa.</p> <p>Inglaterra es uno de los primeros miembros de la Unión Europea para comenzar la liberalización del espectro. Muchos otros tienen la idea de continuar con estilos tradicionales para la regulación del espectro.</p>

2.4.2.1. Subastas

En 1998, se autorizó en Inglaterra una ley “WT”, que permite la realización de subastas para la concesión de licencias, cuando proceda. Para algunos servicios, tales como los servicios de emergencia, las subastas no son adecuadas. Algunos dispositivos (tales como Wifi y Bluetooth), están exentos de licencia, ya que operan a bajas potencias, estos representan más del 6% espectro radioeléctrico de Inglaterra. La primera subasta de espectro de Inglaterra se efectuó en el año 2000 para licencias de telefonía móvil 3G y costaron 22 mil millones de euros.

Existen dos limitaciones principales, para la realización de subastas del espectro radioeléctrico:

- 1) **Certificados.**- Estos podían ser utilizados sólo para la tecnología de telefonía móvil de 3G, y los concesionarios tuvieron que proporcionar la recepción de al menos el 80% de la población del Inglaterra a finales del 2007.
- 2) **Liberalización.**- Después de la ley de Comunicaciones del 2003 y del 2004 el regulador OFCOM de Inglaterra tiene un enfoque más liberalizado, que consiste en la eliminar las subastas para la concesión de licencias siempre que sea posible, por lo que el regulador OFCOM estableció tres reglas:
 - **Tecnología y neutralidad del servicio.**- Las empresas pueden utilizar el espectro para cualquier propósito compatible a la tecnología y pueden cambiar como lo consideren oportuno.

- El comercio del espectro y de arrendamiento.- Los certificados pueden ser negociados, de modo que los usuarios que carecen de espectro puedan arrendar o comprar espectro de los demás.
- Incentivos de precios administrados (AIP).- La Ley de Telegrafía Inalámbrica se introdujo en 1998, AIP tiene como objetivo fomentar un uso más eficiente del espectro.

Uno de los objetivos de liberalización para el uso del espectro se rige en gran medida por las fuerzas del mercado.

OFCOM dice que las empresas están en mejores condiciones para decidir como el espectro debe ser utilizado y para qué, a pesar de algunas limitaciones técnicas para evitar interferencias ya que son inevitables. Se dice que la liberalización debería ayudar a las nuevas tecnologías y a las empresas para tener acceso al espectro, con la finalidad de crear innovación.

Existe un amplio apoyo a estas políticas, aunque la industria y los organismos de radiodifusión coinciden en que hay todavía un papel importante para llamar a la regulación “respaldo financiero”.

No obstante, muchos comentaristas de la industria de radiodifusión aceptan que, si bien las subastas no siempre pueden garantizar el uso óptimo del espectro, es la forma más justa para ofrecer a los usuarios. La subasta del Dividendo por la Digitalización o DD fue objeto de una consulta, mostrando los siguientes resultados (ver Cuadro 2).

Cuadro 2. Dividendo por la Digitalización

<p>Dividendo por la Digitalización (DD)</p> <p>El DD habla acerca del espectro que se liberará en el rango de 470-862MHz, ya que la TV analógica cambio a televisión digital. Este rango de frecuencia, resulta atractivo, ya que combina una alta velocidad de transmisión de datos (Figura 1) con una gran cobertura. Esto hace que la cobertura nacional sea factible. Los servicios de telefonía móvil, televisión local, conexión inalámbrica de banda ancha, estándar y TV de alta definición, compiten por dicho rango de frecuencia.</p> <p>El rango de frecuencias se divide en "canales", del número 21 al 69. De ellos, 32 canales se reservan para la televisión digital terrestre (TDT), o "Freeview". Dieciséis canales pueden ser liberados a través de una subasta, tal como se propone OFCOM en el dividendo digital Review (DDR). Como la conversión tiene lugar a partir del 2008 al 2012, los canales estarán disponibles. El DD ocurre en muchos países, pero los planes para la reutilización del espectro pueden variar. Por ejemplo, Francia reserva la mayoría de los canales liberados en el espectro, para la Televisión de Alta definición.</p>

2.4.2.2. Cuestiones

En el pasado, la armonización se ha generado por los defensores de la Unión Europea (ver Cuadro 1), estableciendo los siguientes beneficios:

- Permitir a los consumidores que cuentan con dispositivos móviles navegar a través de las fronteras (como es el caso del teléfono móvil después del "GSM" estándar ver Cuadro 3).

- Los costos de fabricación son más baratos, ya que los dispositivos pueden ser vendidos en toda la Unión Europea.

Aunque la tecnología y la neutralidad del servicio tienen muchos beneficios, puede conducir a las mismas frecuencias que se utilizan para diferentes servicios en diferentes países. Esto podría dificultar la armonización. Muchos fabricantes temen que los beneficios de la producción a gran escala para un mercado de dimensión europea no podrán ser realizados sin una armonización. Otros opinan que el costo del celular y otros dispositivos podrían aumentar significativamente. OFCOM menciona que el enfoque de mercado debe ser equilibrado con una cierta regulación.

Sin embargo, otros argumentan que la recolección de tecnologías específicas podría obstaculizar la competencia y que la armonización debe lograrse a través de las fuerzas del mercado.

Una manera de lograr los beneficios de la armonización, consiste en evitar al mismo tiempo la inflexibilidad, es a través de la “zonificación” en el que la Unión Europea exige que los canales específicos estén a disposición de determinadas tecnologías, pero no necesariamente estén reservadas exclusivamente para estas.

Por ejemplo, un grupo de tareas del CEPT4 podrá recomendar que los canales 60 al 69 del Dividendo por la Digitalización estén disponibles para los servicios móviles. Esto podría ayudar a los fabricantes a planificar el futuro. La armonización también es debatida a nivel internacional (ver Cuadro 3).

Cuadro 3. Propuesta para lograr una armonización internacional del espectro de RF

<p>Neutralidad tecnológica y política internacional</p> <p>Los debates están surgiendo sobre la forma de armonizaciones internacionales, sobre la gestión del espectro entre la Unión Europea e Inglaterra.</p> <p>La expansión de las redes móviles en la India y China.</p> <p>Muchas de las nuevas normas se han establecido para las tecnologías móviles en la India y China, donde los mercados se están expandiendo rápidamente, aquí se debate sobre la importancia de la armonización comunitaria, para permitir que la Unión Europea pueda competir con otros mercados.</p> <p>Banda del Espectro de 2.6GHz</p> <p>La banda de espectro de 2.6GHz (que está fuera de la DD) ha sido identificada por la UIT para el uso móvil de 3G. Sin embargo, OFCOM tiene planes para esta subasta en Inglaterra, así como la tecnología y el servicio neutral. Esta banda es de interés para WiMax (una forma de acceso inalámbrico de banda ancha), así como para los operadores móviles. Ofcom propone dividir el grupo en sub-bandas.</p> <p>Liberalización de GSM</p> <p>Los operadores de redes móviles operan en tres diferentes bandas de frecuencia. Dos son para telefonía móvil GSM certificados, expedidos por períodos indefinidos. GSM es la tecnología de 2ª generación (2G) de telefonía móvil. La tercera es para licencias de 3G, la subasta se público en el 2000. Esta última subasta es la más cara de todas.</p> <p>OFCOM considera la posibilidad de reducir los costos para los operadores de 3G, utilizando las frecuencias GSM. Este movimiento pronto será permitido por la Unión Europea, pero Inglaterra, aun analiza como llevarlo a cabo.</p>

2.4.2.3. Interferencias perjudiciales

En el pasado, los reguladores conocían el tipo de equipo y la frecuencia en la que transmite dependiendo de la zona geográfica. La interferencia fue gestionada para especificar restricciones técnicas en el equipo como parte de las condiciones de la licencia. Los actuales cambios se complican, porque resulta difícil conocer la ubicación

y frecuencia en la que operan los dispositivos, dado que estos equipos pueden no son exclusivos a una zona geográfica. Esto podría provocar interferencias en la gestión del espectro, OFCOM está introduciendo los derechos para el uso adecuado del espectro. Los derechos del uso del espectro imponen restricciones genéricas en la potencia de las transmisiones para usuarios con licencia, así como su ubicación, independientemente al tipo de transmisor, ya sea un transmisor de radiodifusión, radio taxi o teléfono móvil. Algunos dicen que la responsabilidad jurídica para evitar interferencias y que se cumpla con los costos asociados en caso de que se produzca dicho problema, debe establecerse antes de que se otorgue la licencia.

2.4.2.4. *Dificultades con las subastas*

Cada tecnología tiene diferentes necesidades del espectro. Algunos dispositivos (como los celulares), requieren de frecuencias separadas para transmitir y recibir, mientras que otros, (como equipos de radiodifusión), sólo transmiten, esta cuestión, resulta ser un problema, ya que la manera en que se llevan a cabo las subastas del espectro, no considera las necesidades que tienen las diferentes tecnologías. Se proponen algunas medidas para abordar esta cuestión en la subasta del rango de frecuencia de 2.6GHz (Cuadro 3), cabe mencionar que el momento de la subasta es un factor crítico.

2.4.2.5. *Incentivos de Precios Administrados (AIP)*

AIP consiste en proporcionar a determinados usuarios del espectro que actualmente no compiten por el uso del espectro, los incentivos para utilizarlo de manera más eficiente. OFCOM llevo a la práctica este término debido a un estudio de mercado, también conocido como “costo de oportunidad”, con la finalidad de aumentar el precio de la licencia, por ejemplo; todo el espectro liberado por los concesionarios (p.e, invertir en equipos más eficientes espectralmente), pueden ser arrendadas o comercializadas a diferentes organizaciones, a fin de aumentar los ingresos. Existe un amplio apoyo para AIP, aunque aun no determinar con exactitud los precios para la asignación de licencias. Los incentivos de precios administrados (AIP) se aplican tanto al sector público y privado.

Sin embargo, algunos economistas creen que esto no es exactamente una cantidad considerable. Otros dicen que es un equilibrio entre lo permitido, y que esto va a motivar un mejor uso del espectro.

2.4.2.6. *Ministerio de Defensa (MOD)*

El Ministerio de Defensa gestiona el 30% del espectro radioeléctrico de Inglaterra y paga 55 millones de libras esterlinas por año. Este precio incrementará significativamente después de una revisión independiente del gobierno. El Ministerio de Defensa recomendó una auditoría completa de la utilización del espectro, la cual ya ha comenzado.

Para identificar los posibles excedentes del uso del espectro. AIP ya se aplica en el Ministerio de Defensa, el Ministerio de Defensa dice que se hará extensivo a otras entidades, según corresponda. El Ministerio de Defensa está actuando acorde a diversas recomendaciones, tales como la facilitación de oportunidades para los mercados secundarios que requieren el uso del espectro.

2.4.2.7. *Autoridad de Aviación Civil (CAA)*

La Autoridad de Aviación Civil es un regulador independiente (similar a OFCOM), que regula los planes de asignación del espectro para todos los usos aeronáuticos de Inglaterra. AIP aún no se ha aplicado al sector de la aviación; OFCOM planea intervenir en este tema. La Autoridad de Aviación Civil considera que AIP es una herramienta que sirve para fomentar la eficiencia del uso del espectro de RF y los derechos de licencia para los usuarios.

Sin embargo, la Autoridad de Aviación Civil se opone a que se asignen licencias a usuarios que necesiten servicios de aviación, aun cuando haya frecuencias no utilizadas. La Autoridad de Aviación Civil destaca también, que las obligaciones internacionales no deben ser comprometidas y que se debe aprobar el arrendamiento del espectro liberado sólo si hay garantías para evitar interferencias.

OFCOM está consultando si los usuarios con licencia de la aviación, deben permitir el comercio o el arrendamiento del espectro para otras aplicaciones, reconociendo que las obligaciones internacionales y la interferencia son cuestiones que se deben analizar detalladamente.

OFCOM, los Organismos de radiodifusión y el gobierno de Inglaterra creen que AIP debería aplicarse a los servicios públicos de radiodifusión como por ejemplo; a RSP (BBC, ITV, Canal 4 y 5), por lo que estos servicios podrían enfrentarse a un aumento sustancial económico y argumentan que:

- AIP no es necesario como un incentivo para tener un uso eficiente del espectro.
- La calidad de los programas y la cobertura podrían disminuir debido a que ese dinero que se invierte en ellos, sería desviado para cubrir los costos del uso espectro. OFCOM ha decidido que AIP debería aplicarse a la radiodifusión de televisión digital a partir de 2014, las decisiones sobre la fijación de precios se revisarán cuando estén más próximos a su resolución ya que los motivos de preocupación también se han expresado sobre el impacto que representa AIP en la industria de la radio comercial.

2.4.2.8. *Cuestiones Dividendo por la Digitalización*

2.4.2.8.1. *Televisión de Alta Definición (HDTV)*

HDTV tiene una mejor calidad de imagen comparada con la TV de definición estándar (SDTV). Las ventas de HDTV van en aumento, Sky, BBC y la ITV han invertido en programas de HD, ya que muchos mercados extranjeros requieren este formato. HDTV requiere mucho más espectro que SDTV. Los organismos de radiodifusión terrestre no tienen suficiente espectro para ofrecer, de modo que actualmente sólo está disponible mediante el uso de satélites y canales por cable.

OFCOM estima que después de la conversión de la TV analógica a digital, habrá suficiente capacidad (ver Cuadro 2) por un período de cuatro canales nacionales terrestres de HD. Sin embargo, muchos radiodifusores comerciales y RSP no creen que haya suficiente capacidad para atender a la demanda de los canales terrestres de HD. RSP sostiene que existen importantes dificultades económicas y legales, ya que comentan que el usuario que desee el servicio de HD tendrá que invertir en un nuevo aparato televisivo que sea compatible con el formato de HD.

OFCOM dice que el RSP puede garantizar el espacio libre del espectro para la TV de HD en una subasta, pero dicen que RSP no podría financiar una oferta competitiva contra los operadores comerciales.

2.4.2.8.2. Programa para apoyar eventos especiales (PMSE)

Algunas frecuencias en el espectro de televisión analógica, se han utilizado para apoyar diferentes servicios, por ejemplo; cámaras inalámbricas, monitores y sistemas, a diferentes grupos. Este apoyo va desde las 24 horas de noticias a estaciones de los teatros del West End, etc. JFMG es un grupo de gestión del espectro que administra el programa que apoya a eventos especiales. OFCOM sugirió la idea de subastar este espacio dedicado a causas benéficas, a pesar de esto, los usuarios muy pronto podrían ver que dicho espacio se subaste.

OFCOM propuso a PMSE el acceso al espectro hasta el año 2018. Sin embargo, el acceso al espacio con el que cuentan, se reducirá de su forma actual. Muy pronto PMSE y usuarios perderán el acceso a frecuencias de 2.6GHz, ya que dicha frecuencia será subastada (ver Cuadro 3).

Algunos usuarios opinan que esta subasta puede afectar acontecimientos futuros, y afirman que en Inglaterra no tendrá suficiente espectro para los juegos olímpicos de Londres, el Tour de Francia, etc.

Canal 36 y Tv Local

El Canal 36 y TV local están considerados dentro del Dividendo por la Digitalización (DD), sin embargo, está en debate la posibilidad de revocar la licencia del Canal 36 y TV local en el año 2009, por lo que podría estar disponible a nivel nacional, la liberación del resto del DD, para otros usos, las empresas están interesadas en utilizarla para ofrecer TV móvil.

Las empresas comentan que si se realiza una pronta subasta darían tiempo para desarrollar la red de TV móvil, así como para preparar las campañas del lanzamiento del producto. Sin embargo, con la evolución de la Unión Europea a la zona del DD, algunas empresas están en contra de la libertad anticipada. La TV local es un posible usuario del Dividendo por la Digitalización. Muchos dicen que ofrece algunos beneficios sociales que la televisión nacional no ofrece. También existe la preocupación de que los canales de TV locales no serán competitivos en un proceso de subasta.

2.4.2.8.3. Juegos Olímpicos y Paralímpicos de Londres 2012

El gobierno de Inglaterra garantiza que habrá el suficiente espectro para la cobertura de

los medios de comunicación de todo el mundo. Sin embargo, PMSE requerirá de espectro adicional y JFMG dice que la cobertura de grandes eventos ha dependido de préstamos del espectro de otros sectores, pero aun no está claro si realizará esta práctica a futuro.

Descripción general sobre la planificación del espectro para los Juegos Olímpicos

- Inglaterra se ha inclinado a un enfoque más liberal para gestión del espectro radioeléctrico. OFCOM tiene por objeto optimizar la utilización del espectro para garantizar el mejor uso para la sociedad.
- Planteamiento de cuestiones para lograr un equilibrio entre la flexibilidad y la armonización internacional, a fin de evitar interferencias perjudiciales y la manera de garantizar una utilización eficaz del espectro por los organismos públicos.
- Previsión por parte de la industria sobre las fechas de subasta, este punto es crucial para la planificación del uso del espectro.

La siguiente figura muestra el porcentaje empleado del espectro para distintos servicios en Inglaterra (ver Figura 16).

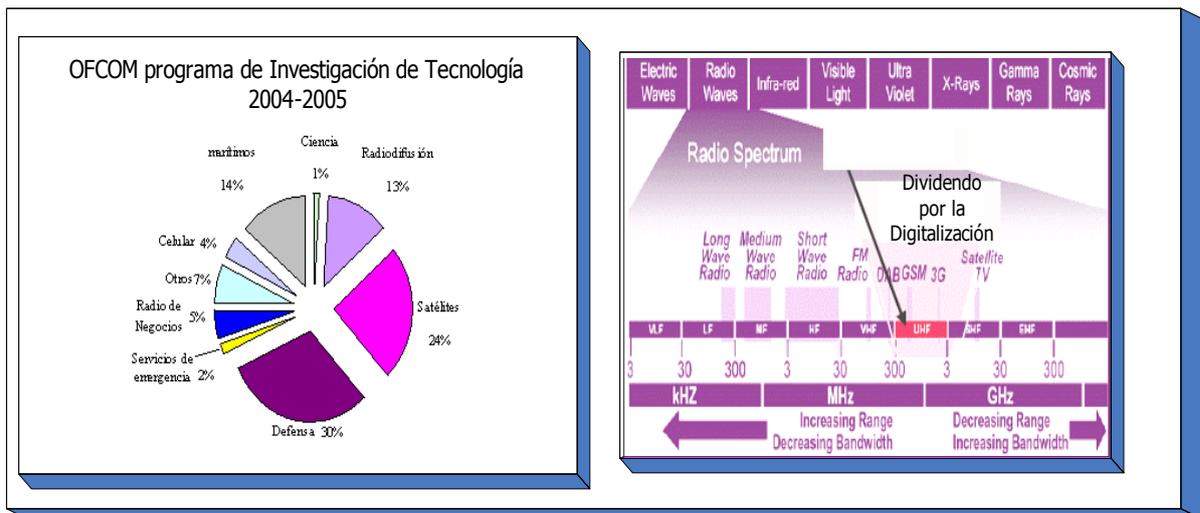


Figura 16. Porcentaje empleado del espectro para distintos servicios en Inglaterra

2.4.3. Movilidad en el Espectro

La movilidad en el espectro tiene como función asegurarse que la Radio Cognitiva se traslade a un mejor canal, es decir, las bandas disponibles del espectro dependerán de factores como lugar y tiempo, se tendrá que desocupar la banda actual si la banda no está disponible por razones como; si un usuario principal está activo, o si causa

interferencias, etc. La movilidad del espectro consiste en la pronta detección de frecuencias en el espectro de radiofrecuencias para que exista un desplazamiento rápido de la Radio Cognitiva entre las diferentes frecuencias que se detecten, con la finalidad de evitar que esta se quede sin frecuencia.

El proceso que efectúa la Radio Cognitiva para desocupar la banda actual del espectro y realizar el cambio a la nueva banda del espectro disponible se llama handoff de espectro.

Durante el handoff de espectro, las amenazas a la seguridad son más serias. Por ejemplo; si se presenta un error, tomaría mucho tiempo para que se reanudara la comunicación. Desafortunadamente un atacante puede inducir un espectro no handoff, fingiendo ser un usuario principal, obligando a desocupar la actual banda a la Radio Cognitiva, provocando atascos, de este modo el proceso de selección se vuelve más lento, y existe mayor dificultad para encontrar una nueva banda disponible, por lo que se algunas veces puede fracasar la comunicación.

Por ejemplo, algunos de los mensajes son de uso común para el control del canal, el atacante puede enviar mensajes erróneos o bien, puede modificar la información para interferir con los usuarios primarios. Es por esto que es importante contar con la movilidad del espectro.

2.4.4. Compartición del espectro

Para poder realizar la compartición del espectro existen diversas propuestas que tienen como objetivo desarrollar un sistema que sea capaz de satisfacer en un futuro todas las necesidades del usuario en áreas metropolitanas. Por esta razón surge el sistema europeo llamado WINNER.

Para que el sistema WINNER pueda satisfacer las necesidades de los usuarios requiere de una gran eficacia para poder compartir el espectro, logrando así coexistir de una manera eficiente, dicho concepto tiene considerados dos mecanismos principales para compartir el espectro.

- 1) La eficacia total del sistema en el uso del espectro.
- 2) La flexibilidad del uso del espectro.

A continuación se muestra con más detalle cómo funciona el sistema WINNER.

2.4.4.1. Requerimientos del sistema WINNER para la compartición del espectro

Los sistemas de B3G (sistemas más allá de la 3G), tendrán mayor demanda para las comunicaciones móviles personales en términos de funcionamiento, uso y tráfico.

ITU-R M.1645 recomienda lo siguiente para los nuevos sistemas de acceso a la radio de B3G:

- Acceso móvil inalámbrico con una transferencia de datos de hasta aproximadamente 100 Mbps.

- Acceso inalámbrico nómada, es decir la localización del equipo del usuario puede estar en diversos lugares pero inmóvil mientras esté funcionando, con una transferencia de datos de hasta 1Gbps.

Comúnmente la transferencia de datos se encuentra dentro del rango de 10 a 20 Mbps y se consideraba ser suficiente, pero los cálculos actuales, demuestran que la demanda de transferencia de datos suele ser muy alto, el sistema WINNER comenta que puede haber casos en el que el usuario requiere de hasta 50 Mbps por servicio. Tomando en cuenta esto, se plantea que la transferencia se incremente a 100 Mbps en un medio compartido.

Aunque hay otro tipo de servicios que requieren de una transferencia de hasta 1Gbps, el transferir datos de este tamaño ha implicado imponer requisitos específicos para el uso del sistema WINNER:

La gama de frecuencias conveniente para la operación del sistema WINNER está de 2.7 a 5.0 Gbps. Sin embargo, todas las bandas en este rango, han sido ya asignadas y además la mayor parte de ellas a más de un servicio. Por lo que es muy probable que en esta gama de frecuencias pueda trabajar u operar el sistema WINNER. Para que dicho sistema pueda coexistir, se requiere de mecanismos que ayuden al control entre los diferentes servicios, los cuales se muestran a continuación.

2.4.4.1.1. Mecanismos para la compartición del espectro

Algunos de los servicios que tienen en común la compartición del espectro y que por tanto pertenecen a un mismo mecanismo, pueden ser categorizados. Esto es determinado mediante una red, que regula el entorno empresarial, ya que algunas de estas tecnologías al compartir la misma banda de frecuencia del espectro, interactúan entre sí.

Dependiendo de las posibilidades de la coordinación entre las redes implicadas y sus prioridades relativas, la distribución del espectro puede ser clasificado de la siguiente manera:

- **Distribución horizontal:** Las redes implicadas en la banda de frecuencia compartida tienen un estado regulador igual, es decir, ningún sistema tiene prioridad sobre el otro para el acceso del espectro.
- **Distribución vertical:** En esta modalidad, la distribución del espectro se realiza con prioridades establecidas. La red primaria tiene una preferencia en el acceso del espectro y la red secundaria puede utilizar el espectro siempre y cuando no cause interferencia perjudicial al usuario primario.

Estas dos categorías se pueden dividir en dos subcategorías, las cuales son:

◦ **Distribución horizontal sin coordinación**

Aquí, los sistemas con acceso a la radio pueden usar dos o más redes y funcionar en la misma banda de frecuencia sin la necesidad de coordinar el acceso al espectro. Esto significa que ninguno de los sistemas está consciente de la localización y del estado actual de los otros sistemas. No hay señalización posible entre los sistemas implicados, por ejemplo, el uso de la licencia de la banda de 2.4 GHz por la red de área local inalámbrica y Bluetooth.

Sin la señalización, generalmente no es posible prevenir la interferencia. La interferencia puede ser el mayor impacto para el deterioro del sistema WINNER, que tiene como objetivo cumplir con los requisitos del sistema de B3G.

Sin embargo, la única posibilidad para restringir los efectos de interferencia mutua consiste en una alta atenuación entre el transmisor interferente y el receptor, mediante el uso de antenas direccionales.

Hoy en día analizan el impacto que puede causar un sistema de banda ultra ancha que funcione simultáneamente con un sistema de B3G.

Los sistemas B3G podrían ser susceptibles puesto que maximizan su rendimiento de procesamiento usando métodos de transmisión que se adaptan al canal de radio, e interferencia.

Los sistemas de operación no coordinados en varias redes en la misma banda de frecuencia, pueden hacer muy poco para prevenir la interferencia.

° **Distribución horizontal coordinada**

Los sistemas de acceso a la radio que requieren coordinación para el acceso al espectro, están basados en un sistema de las reglas predefinidas (es decir, etiqueta del espectro) en donde las todas las redes se adhieren. Esto requiere la señalización o por lo menos la detección de las otras redes, por lo que existe un amplio panorama de posibilidades para manejar el espectro existente.

Uno los acercamientos más genéricos se describe en el programa de la próxima generación (XG) el cual se basa en el acceso oportunista del espectro, es decir, en la capacidad de los dispositivos de radio para detectar y transmitir en las frecuencias del espectro que no están siendo utilizadas, con la ayuda del Radio Definido por Software.

Sin embargo, la visión de XG va un paso más adelante, porque además de la agilidad para detectar el espectro, requiere de la noción de las políticas del uso del espectro, es decir el sistema debe analizar y determinar al momento de detectar un espacio libre del espectro, si es posible utilizar la banda, esto acorde a las políticas, es por ello que los fabricantes deben esperar. Los reguladores para concluir sus dispositivos y los reguladores deben basar sus políticas en la tecnología establecida.

En lugar de los protocolos y la política del uso del espectro se definen los comportamientos abstractos, que determinan lo que hacen los dispositivos de radio ante una política dada. En este modelo, las políticas del espectro no definen los protocolos de radio.

Existen varias soluciones para la cooperación de las redes en la detección del espectro y proporcionan otra posibilidad para una coordinación necesaria para la compartición del espectro, estas soluciones sirven para la distribución horizontal del espectro. Las soluciones cooperativas de RRM (Gestión de los recursos de la radio) incluyen RRM común y RRM concurrente, para mencionar algunos.

° **Distribución vertical: Donde el sistema WINNER es la RED primaria**

El sistema WINNER puede ayudar a las redes secundarias señalando los recursos libres del espectro, mientras que guarda el control para la utilización del espectro. Sin embargo, para que el sistema WINNER realice estas tareas, requiere de incentivos, que pueden incluir lo siguiente:

Honorarios de las redes secundarias para el “alquiler con opción a compra” del espectro. La red del sistema WINNER puede incluir una cierta información en el canal de difusión que indica cuándo y cómo los sistemas secundarios pueden utilizar el espectro. Preferencia por la red WINNER sobre otras redes que se dediquen a la detección de bandas de frecuencias libres debido a la capacidad de coexistir mejor con las redes secundarias.

La red del sistema WINNER puede tener mecanismos para concentrar sus transmisiones en una porción de esta banda dedicada del espectro y crear así una gran banda contigua del espectro en desuso para el uso de usuarios secundarios. Así como contar con la capacidad de crear algoritmos que ayuden a disminuir la interferencia creando sistemas más simples y eficientes. El grado de colaboración dependerá de los incentivos, por lo que puede alcanzar probablemente un canal de difusión activo y la capacidad de crear “espacios vacíos” para los usuarios secundarios.

° **Distribución vertical donde el sistema WINNER es la red secundaria**

En este panorama, la red del sistema WINNER tiene que controlar sus emisiones (es decir, en la estación base y para todo el UT) para evitar interferencia a la red primaria. Esto requiere un gran conocimiento sobre la red primaria detectada. En este caso, algunas partes del sistema WINNER funcionan en una banda de frecuencia que se asigna a una red primaria, posiblemente una red principal. Este mecanismo debe funcionar de una manera en la que se evite causar interferencia a los usuarios primarios.

La diferencia a los panoramas de distribución horizontal, es que la red primaria, tiene preferencia en el acceso del espectro y la red secundaria del sistema WINNER no tiene permitido generar interferencia, mientras que la red primaria tiene permitido interferir con la red secundaria.

El desafío para la red secundaria del sistema WINNER, consiste en hacer el mejor uso de los “espacios disponibles” a tiempo, de la frecuencia y del espacio, y transmitirlo sólo en espacios disponibles, sin la generación de interferencia perjudicial a la red primaria. Para detectar los espacios disponibles, estos tienen que ser identificados primero. Este paso de identificación puede consistir en varios componentes:

- 1) Transferencia directa a una base de datos.
- 2) Recuperación de la información y envío de ésta a una central de radio regulador.
- 3) Información ofrecida por la red primaria
- 4) Medidas en tiempo real

La combinación de estos componentes crea una confiabilidad al proceso de la identificación. Esta confiabilidad depende en gran medida de las características de la red primaria. Es mucho más fácil identificar los espacios disponibles, si el sistema primario está estático, así como la frecuencia y el espacio (es decir, localización espacial).

La detección confiable de espacios disponibles, es un problema duro y complejo por la capacidad de determinar las características de la red primaria.

Cuando los sistemas primarios sean casi estáticos, existen varios casos viables que pueden ser identificados como:

- El sistema primario es un sistema fijo con densidad geográfica baja

- El sistema primario es un servicio de expiración
- Si el sistema primario no está en operación, el espectro puede ser utilizado por el secundario. Si el primario nunca llega a ser operativo, no hay restricciones para el secundario.

La siguiente figura describe un panorama con el sistema WINNER en la posición de sistema secundario (ver Figura 17).

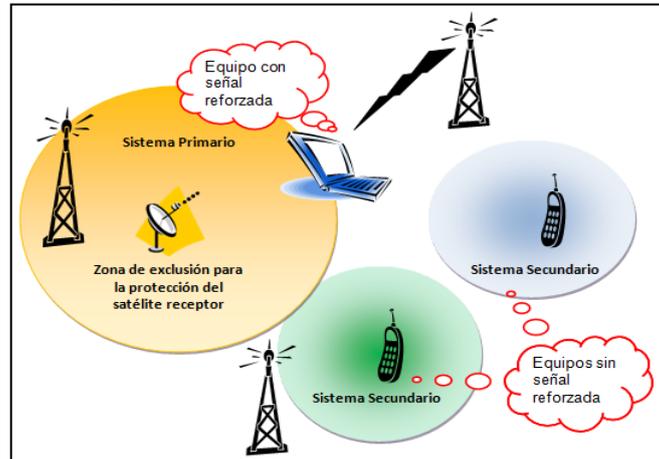


Figura 17. Ejemplo donde el sistema primario y un sistema receptor se basan en los satélites del sistema WINNER secundario (no se permite ninguna emisión del sistema secundario hacia la zona de la exclusión)

El sistema primario, corresponde a un espacio para servicios satelitales, donde el sistema primario requiere de protección alrededor de los receptores satélites, puesto que estos receptores no se están moviendo y su susceptibilidad a la interferencia es grande, la distribución del espectro es posible si la red secundaria tiene la capacidad para detectar y respetar las zonas exclusión.

Para las redes primarias, que utilicen el espectro de manera esporádica, puede haber incentivos, estos son:

- Seguridad pública y servicios de emergencia
- Comunicación militar

En este caso, la red secundaria debe garantizar una rápida liberación del espectro disponible, ya que los requisitos son rigurosos, en cuanto al tiempo en el proceso de identificación. Por una parte, puede existir la posibilidad en que los sistemas primarios indiquen su presencia usando un faro, por así decirlo, para que así se pueda facilitar la identificación del espacio por la red secundaria.

Si no hay un faro de señalización disponible, la distribución del espectro puede ser todavía posible, pero los requisitos en la capacidad de la detección de la red secundaria serán mucho más rigurosos (ver Figura 26).

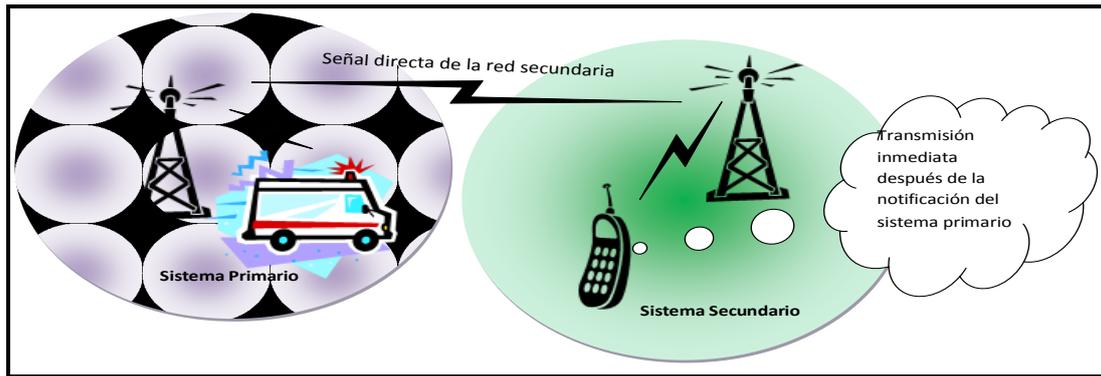


Figura 18. Ejemplo de un sistema primario que utilice el espectro de manera esporádica. El uso del espectro secundario puede ser facilitado mediante el envío de una señal del usuario primario.

Un requisito fundamental para permitir la distribución del espectro es que el sistema sea capaz de controlar no sólo sus propias emisiones, sino también las emisiones de todo el sistema. Por otra parte, no se permite transmitir si el sistema primario se encuentra todavía dentro de la red.

2.4.4.1.2. Oportunidades para compartir el espectro usando el sistema WINNER

El requisito para compartir el espectro usando el sistema WINNER, consiste en la capacidad que este tiene para comportarse como una red primaria o secundaria, si el sistema respeta el comportamiento que debe tener la red según sea el caso, el sistema puede funcionar.

El comportamiento del sistema WINNER puede proveer a diversos sistemas una información más exacta para la compartición del espectro, esto es posible sólo con el uso de dispositivos especializados.

Sin embargo, se tiene que monitorear que la operación de la compartición del espectro sea conforme a un número de incentivos mínimos, es decir, cuando el sistema WINNER actúa como una red secundaria, esta ofrece incentivos a las redes primarias, éstas liberan el espectro de manera más rápida.

El sistema WINNER ayuda a cumplir con los requisitos de sistema, especialmente con las garantías de la calidad de servicio y la operación de la compartición del espectro.

2.4.4.1.3. Control del espectro usando el sistema WINNER

Administración de recursos para el control del espectro

El concepto del sistema WINNER compromete varias funciones de control implicadas en la distribución del espectro. Para un plan de control mediante un enlace por radio, las funciones se almacenan en los servicios del sistema de control del espectro para evitar algún tipo de congestión.

La capa MAC, contiene los servicios para el control del espectro y control de carga. El control del espectro es la entidad principal de RRM para coordinar el FSU (Uso Flexible

del Espectro) y compartirlo entre las redes del sistema WINNER y con los sistemas de acceso a la radio y usar alguna otra red. Para facilitar el control del espectro, este se divide en dos componentes:

El control del espectro comparte con otros sistemas que desean usar la red, la funcionalidad que proporciona para la asignación del espectro es flexible para las múltiples redes del sistema WINNER. A continuación se muestra como lleva a cabo el control del espectro el sistema WINNER (ver Figura 19).

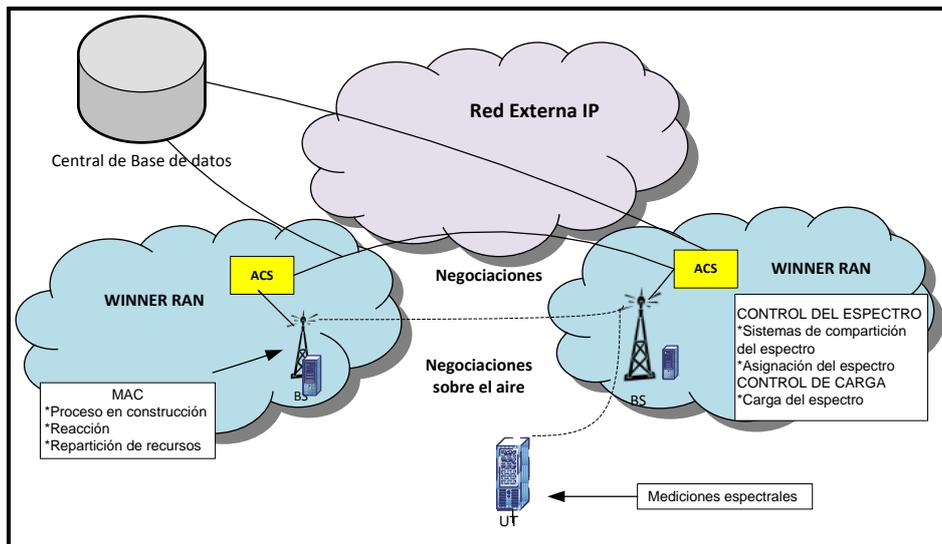


Figura 19. Ejemplo de la localización de las funciones de control del espectro, mediante una arquitectura lógica del nodo del sistema WINNER

Se puede observar en la Figura 19, una arquitectura (con algunos elementos omitidos) que muestra la distribución y la asignación del espectro, así como, la distribución de carga, los cuales se localizan mediante un servidor que lleva el control de acceso a la compartición del espectro y que se define como un nodo de red lógico que coordina y reparte los recursos para evitar interferencias. La única entidad central sobre las múltiples redes del sistema WINNER es una base de datos central regulada por una entidad confiable, la base de datos se maneja mediante una IP.

La señalización entre la red del sistema WINNER puede emplear una IP externa y/o sobre la señalización del aire entre la estación base.

El sistema WINNER para la compartición del espectro cuenta con los mecanismos de:

- Distribución horizontal con coordinación
- Distribución vertical con el sistema WINNER como red primaria
- Distribución vertical con el sistema WINNER como red secundaria

El mecanismo más complejo y más importante es la distribución vertical con el sistema WINNER como red secundaria, este mecanismo, consiste en identificar de manera confiable los “espacios disponibles” del espectro en desuso y después determinar las ventajas de transmitir usando el sistema WINNER. La identificación de los espacios disponibles puede estar basada en la información proporcionada por una central de radio o una base de datos del espectro.

La funcionalidad de coordinación para el control del espectro determina los resultados para calcular los espacios disponibles del espectro.