



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

CONSIDERACIONES DE DISPOSITIVOS SDR Y ASIGNACIÓN
DINÁMICA DE ESPECTRO COMO ALTERNATIVA PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE REDES MÓVILES DE BANDA ANCHA

Ana Lucía Cabrera Catalán

Asesorada por Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, mayo de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CONSIDERACIONES DE DISPOSITIVOS SDR Y ASIGNACIÓN DINÁMICA DE
ESPECTRO COMO ALTERNATIVA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES
MÓVILES DE BANDA ANCHA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANA LUCÍA CABRERA CATALÁN

ASESORADO POR ING. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, MAYO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| VOCAL I | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL II | Lic. Amahán Sánchez Álvarez |
| VOCAL III | Ing. Julio David Galicia Celada |
| VOCAL IV | Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz |
| VOCAL V | Br. Elisa Yazminda Vides Leiva |
| SECRETARIO | Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| EXAMINADOR | Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo |
| EXAMINADOR | Ing. Julio César Solares Peñate |
| EXAMINADOR | Ing. Manuel Fernando Barrera Pérez |
| SECRETARIO | Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CONSIDERACIONES DE DISPOSITIVOS SDR Y ASIGNACIÓN DINÁMICA DE
ESPECTRO COMO ALTERNATIVA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES
MÓVILES DE BANDA ANCHA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 3 de septiembre de 2004

Ana Lucía Cabrera Catalán

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | VII |
| GLOSARIO | X |
| RESUMEN | XV |
| OBJETIVOS | XVI |
| INTRODUCCION | XVII |
| 1. REDES MÓVILES | |
| 1.1 Sistema híbridos | 1 |
| 1.1.1 Selección del sistema de acceso | 2 |
| 1.1.2 Combinación del sistema de acceso | 3 |
| 1.1.3 Diversidad de servicios de acceso local | 3 |
| 1.2 Funciones de <i>multicast</i> móvil | 4 |
| 1.2.1 Administración de grupo | 5 |
| 1.2.1.1 Funciones de la administración de movilidad de grupo | 6 |
| 1.2.2 Administración de movilidad <i>multicast</i> | 7 |
| 1.2.2.1 Túneles bidireccionales | 8 |
| 1.2.2.2 Suscripción remota | 9 |
| 1.2.2.3 Funciones de la administración de movilidad <i>multicast</i> | 9 |
| 1.2.3 Enrutadores móviles | 13 |
| 1.2.3.1 Administración de movilidad | 14 |
| 1.3 Asignación dinámica de espectro | 15 |
| 1.3.1 Definición de entidades | 15 |
| 1.3.2 Requerimientos de servicios de ADE | 16 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.3.2.1 | Tipos de servicios | 16 |
| 1.3.2.2 | Servicios soportados por las diferentes RAN | 18 |
| 1.3.2.3 | Aspectos de cobertura espacial para RAN y servicios | 19 |
| 1.3.2.4 | Regiones geográficas divididas en áreas ADE | 19 |
| 1.3.3 | Características y extensiones de los sistemas ADE | 21 |
| 1.3.3.1 | Espectro | 21 |
| 1.3.3.2 | Cooperación de la red | 22 |
| 2. | ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO | |
| 2.1 | Inicios de ADE, proyecto DRiVE | 23 |
| 2.1.1 | ADE temporal | 24 |
| 2.1.1.1 | ADE con predicción perfecta de carga | 25 |
| 2.1.1.2 | ADE con predicción imperfecta de carga | 26 |
| 2.1.2 | ADE espacial | 27 |
| 2.1.2.1 | Modelos de simulación | 28 |
| 2.2 | Análisis del proyecto DRiVE | 29 |
| 2.2.1 | ADE Temporal | 29 |
| 2.2.1.1 | Liberación de portadoras | 30 |
| 2.2.1.2 | Predicción de carga | 31 |
| 2.2.1.3 | Dependencia de RAN adyacente | 31 |
| 2.2.1.4 | No adaptación de ADE espacial | 32 |
| 2.2.1.5 | Utilización de dos RAN | 32 |
| 2.2.1.6 | Cantidad de espectro y ancho de banda de las portadoras | 32 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.2.1.7 | Algoritmos de asignación | 33 |
| 2.2.1.8 | Desempeño ante altas cargas | 33 |
| 2.2.1.9 | Establecimiento del periodo de asignación | 34 |
| 2.2.1.10 | Interactuando con el control de tráfico | 34 |
| 2.2.2 | ADE espacial | 35 |
| 2.2.2.1 | Inserción del espectro sin uso | 35 |
| 2.2.2.2 | Falta de datos espaciales reales | 36 |
| 2.2.2.3 | Asignaciones arbitrarias de espectro | 36 |
| 2.2.2.4 | No adaptación temporal | 36 |
| 2.2.2.5 | Simplificación de los modelos de tráfico | 37 |
| 2.2.2.6 | Falta de verificación del desempeño de las RAN | 37 |
| 2.2.2.7 | Consideración de 2 RAN | 37 |
| 2.3 | Aspectos generales de DRiVE | 38 |
| 2.3.1 | Implicación de redes y terminales | 38 |
| 2.3.2 | Consideraciones de espectro de enlace de subida | 39 |
| 2.3.3 | Aspectos de cobertura de red | 39 |
| 2.4 | Proyecto OverDRiVE | 40 |
| 2.4.1 | ADE temporal | 42 |
| 2.4.2 | ADE espacial | 44 |
| 3. | ALGORITMOS PARA ADE | |
| 3.1 | Algoritmos para ADE temporal | 47 |
| 3.1.1 | Limitaciones de operación | 47 |
| 3.1.2 | Diagrama de bloques funcional | 49 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 3.1.2.1 | Disparo de ADE | 51 |
| 3.1.2.2 | Control de tráfico de portadoras | 51 |
| 3.1.2.3 | Medida y predicción de carga | 52 |
| 3.1.2.4 | Cálculo de requerimientos de portadoras | 52 |
| 3.1.2.5 | Asignación de portadoras | 52 |
| 3.2 | Algoritmos para ADE espacial | 56 |
| 3.2.1 | Limitaciones de operación | 56 |
| 3.2.2 | Diagrama de bloques funcional | 58 |
| 3.2.2.1 | Medida y predicción de carga | 59 |
| 3.2.2.2 | Cálculo de requerimiento de portadoras | 59 |
| 3.2.2.3 | Procedimiento de asignación de portadoras | 59 |
| 3.2.2.3.1 | Asignación de portadoras para dos RAN | 60 |
| 3.2.2.3.2 | Asignación de portadoras para tres RAN | 64 |
| 4. | FUNCIONES REQUERIDAS EN LA CAPA FÍSICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ADE | |
| 4.1 | Funciones requeridas en la capa física | 68 |
| 4.1.1 | Rango de frecuencias | 68 |
| 4.1.2 | Resolución de sintonización espectral | 69 |
| 4.1.3 | Coexistencia espectral | 70 |
| 4.1.4 | Conmutación de frecuencias | 71 |
| 4.2 | Funciones a nivel de red | 72 |
| 4.3 | Reconfiguraciones basadas en las tecnologías disponibles para soportar las funciones de ADE en la capa física | 72 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 4.3.1 | Arquitectura de los tranceptores | 74 |
| 4.3.1.1 | Arquitectura tradicional | 76 |
| 4.3.1.2 | Arquitectura SR pura | 77 |
| 4.3.1.3 | Arquitectura SDR como alternativa | 78 |
| 4.3.1.3.1 | Arquitectura súper heterodina parcialmente digital | 78 |
| 4.3.1.3.2 | Arquitectura de conversión de bajada | 80 |
| 4.4 | Tecnología disponible y emergente para las arquitecturas SDR | 81 |
| 4.4.1 | Antenas | 81 |
| 4.4.2 | Módulos de RF <i>front-end</i> | 82 |
| 4.4.2.1 | Filtrado flexible | 82 |
| 4.4.2.2 | Amplificación flexible | 84 |
| 4.4.2.3 | Síntesis de frecuencias flexibles | 85 |
| 4.4.2.4 | Mezclado flexible | 86 |
| 4.4.3 | CAD, convertidores análogos digital | 87 |
| 4.4.4 | Procesamiento digital | 88 |
| 4.5 | Dispositivos SDR | 89 |
| 4.5.1 | <i>Radio software download</i> | 90 |
| 4.5.2 | Definiciones adicionales | 91 |
| 5. | HARDWARE DE RADIO PARA ADE | |
| 5.1 | Diseño del transmisor | 93 |
| 5.1.1 | Estructura tradicional de un transmisor | 95 |
| 5.1.2 | Estructura SDR de un transmisor | 97 |
| 5.2 | Diseño del receptor | 98 |
| 5.2.1 | Estructura tradicional de un receptor | 99 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.2.1.1 | Algunos aspectos importantes | 101 |
| 5.2.2 | Estructura SDR de un receptor | 103 |
| 5.3 | Consideraciones en el diseño de <i>hardware</i> de radio de ADE | 104 |
| 6. | SOFTWARE DE RADIO PARA ADE | |
| 6.1 | Mezcladores | 107 |
| 6.2 | Amplificadores | 108 |
| 6.3 | Filtros | 108 |
| 6.3.1 | Aspectos generales de filtros de respuesta infinita al impulso (IIR) | 110 |
| 6.3.2 | Aspectos generales de filtros de respuesta finita al impulso (FIR) | 116 |
| 6.3.3 | Implementación de los filtros | 120 |
| 7. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | |
| 7.1 | Análisis de <i>hardware</i> de radio | 124 |
| 7.2 | Análisis de <i>software</i> de radio | 124 |
| | CONCLUSIONES | 127 |
| | RECOMENDACIONES | 128 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 129 |
| | APÉNDICE | 131 |

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Diagrama de bloques funcional de ADE temporal; adaptación de la figura 17 “ <i>Top-level algorithm functional blocks for temporal DSA</i> ” del documento 13 de OverDRiVE | 50 |
| 2 | Diagrama de bloques funcional de ADE espacial; adaptación de la figura 29 “ <i>Top-level algorithm functional blocks for spatial DSA</i> ” del documento 13 de OverDRiVE | 58 |
| 3 | Arquitectura tradicional de banda única; adaptación de la figura 11 “ <i>Super heterodyne architecture with two stages for single band receiver</i> ” del documento 11 de OverDRiVE | 76 |
| 4 | Arquitectura tradicional de múltiples bandas; adaptación de la figura 12 “ <i>Super heterodyne architecture with two stages for traditional multi-bands receiver</i> ” del documento 11 de OverDRiVE | 77 |
| 5 | Arquitectura SR pura; adaptación de la figura 13 “ <i>Pure SR receiver architecture</i> ” del documento 11 de OverDRiVE | 78 |
| 6 | Arquitectura súper heterodina parcialmente digital; adaptación de la figura 14 “ <i>Super Heterodyne architecture with 2 stages for 4 band receivers</i> ” del documento 11 de OverDRiVE | 79 |

| | | |
|----|--|-----|
| 7 | Arquitectura de conversión de bajada; adaptación de la figura 15 “ <i>Direct down conversion architecture for traditional single band receiver</i> ” del documento 11 de OverDRiVE | 80 |
| 8 | Estructura tradicional de un transmisor; adaptación de la figura 1.14 “ <i>Typical transmitter architecture</i> ”. página 38, “ <i>RF Design Guide: systems, circuits and equation</i> ” | 95 |
| 9 | Estructura SDR de un transmisor | 97 |
| 10 | Estructura tradicional de un receptor; adaptación de la figura 1.1 “ <i>Typical dual conversión receiver</i> ”, página 7, “ <i>RF Design Guide: systems, circuits and equation</i> ” | 99 |
| 11 | Estructura SDR de un receptor | 103 |
| 12 | Función de transferencia del filtro de respuesta infinita a) en tiempo continuo b) en tiempo discreto | 111 |
| 13 | Vista de la función de transferencia del filtro de respuesta infinita en la banda de paso | 112 |
| 14 | Filtro de respuesta infinita a) Función de transferencia desplazada b) Vista de la banda de paso | 113 |
| 15 | Señal de prueba | 114 |
| 16 | Espectro de la señal de salida utilizando 250 muestras para el filtro de respuesta infinita | 114 |
| 17 | Espectro de la señal de salida utilizando 500 muestras para el filtro de respuesta infinita | 115 |
| 18 | Espectro de la señal de salida utilizando 1000 muestras para el filtro de respuesta infinita | 115 |
| 19 | Función de transferencia del filtro de respuesta finita a) en todo el espectro b) banda de paso | 118 |
| 20 | Espectro de la señal de salida utilizando 250 muestras para el filtro de respuesta finita | 119 |

| | | |
|----|--|-----|
| 21 | Espectro de la señal de salida utilizando 500 muestras para el filtro de respuesta finita | 119 |
| 22 | Espectro de la señal de salida utilizando 100 muestras para el filtro de respuesta finita | 119 |
| 23 | Espectro de la señal de salida utilizando 1000 muestras para el filtro de respuesta finita | 120 |

TABLAS

| | | |
|---|----------------------|-----|
| I | Resultados obtenidos | 121 |
|---|----------------------|-----|

GLOSARIO

| | |
|--------------------|--|
| ADE | Asignación dinámica de espectro. |
| Banda | Transmisión de señales sin modulación. |
| Base | |
| Broadcast | Difusión, dirección que alude a todas las entidades de un dominio. |
| Capa | Grupo de servicios, funciones y protocolos que se definen totalmente desde un punto de vista conceptual, que constituye uno de entre conjuntos de grupos dispuestos jerárquicamente, y que se extiende a través de todos los sistemas que conforman la arquitectura de la red. |
| Capa Física | Capa relacionada con aspectos eléctricos, mecánicos y de temporización de la transmisión de una señal en un medio. |
| CDMA | <i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso múltiple por diferenciación de códigos. |
| CoA | <i>Care-of-Address</i> , Abreviatura utilizada para referirse a la movilidad del nodo y refleja el punto actual de movilidad del punto de unión. Un nodo móvil puede usar varios CoA al mismo tiempo. |

| | |
|------------------|---|
| DAB | <i>Digital Audio Broadcasting</i> , estándar para la transmisión digital de audio. |
| Datagrama | Un paquete independiente de los otros paquetes, que lleva información suficiente para enrutar desde el equipo terminal de datos de origen hasta el destino. |
| dB | Decibelios, Medida de la intensidad relativa de dos señales. |
| DDS | <i>Direct Digital Synthesis</i> , síntesis digital directa. |
| DSP | <i>Digital Signal Processing</i> , procesamiento digital de señal |
| DRiVE | <i>Dynamic Radio for IP-Services in Vehicular Environments</i> |
| Duplex | Transmisión de datos en ambas direcciones |
| DVB-T | <i>Digital Video Broadcasting Terrestrial</i> , Estándar de transmisión digital de video. |
| Enrutador | Dispositivo de red que conecta dos redes de computadores. Usa un protocolo de Internet y asume que todos los dispositivos conectados a la red usan la misma arquitectura y protocolos de red. |
| Espectro | Rango absoluto de frecuencias |
| FDD | <i>Frequency Division Duplex</i> , acceso al espectro por dos |

| | |
|--------------------------|--|
| | frecuencias distintas. |
| GHz | Giga Hertz 10 ⁹ Hertz |
| GSM | <i>Global System for Mobile Communication</i> , Estándar de segunda generación de comunicaciones móviles |
| Handover | Es el proceso en el cual la red de radio acceso cambia de radiotransmisor o modo de radio acceso o sistema de radio para proveer los servicios. |
| Handover vertical | Cuando un nodo tiene diferentes nodos de unión, un handover vertical es el proceso de mover el flujo de tráfico de un enlace a otro. Puede ser realizado por un anfitrión o por una red. |
| Hardware | Circuitaria y estructuras físicas de un sistema |
| Internet | Protocolo de interconexión entre redes que proporciona servicios sin conexión a través de varias redes de conmutación de paquetes. |
| IP | <i>Internet Protocol</i> , protocolo de Internet. |
| Ipv6 | Protocolo de Internet versión 6, con espacio de direcciones ampliado, mecanismos de opciones mejorado, direcciones de auto configuración, aumento de la flexibilidad de direccionamiento y facilidad para la asignación de recursos. |

| | |
|-------------------------|--|
| MHz | Mega Hertz 10^6 Hertz |
| Multiacceso | Capacidad de conectar la terminal a varios puntos de red de diferentes tecnologías, para obtener acceso simultaneo al mismo servicio. |
| <i>Multicast</i> | Múltidestino, dirección que se refiere a un subconjunto específico de unidades |
| Nodo | Es una entidad capaz de red. |
| OFDM | <i>Orthogonal Frequency Multiple Access</i> , Acceso múltiple por frecuencias ortogonales. |
| OverDRiVE | <i>Spectrum Efficient Uni- and Multicast Services over Dynamic Multi-Radio Networks in Vehicular Environments.</i> |
| Paquete | Grupo de bits que incluyen datos e información adicional de control. Generalmente se refiere a una unidad de datos del protocolo de la capa de red. |
| Portadora | Frecuencia continua capaz de ser modulada o readaptada por una segunda señal. |
| Protocolo | Conjunto de reglas que gobiernan la operación de unidades funcionales que lleva a cabo la comunicación. |

| | |
|-------------------------|--|
| RAN | <i>Radio Access Network</i> , una red de acceso inalámbrico que comprende de trancceptores y estaciones bases conectadas con infraestructura de red de radio excluyendo el núcleo de la red. |
| RF back-end | Segmento de radio que incluye principalmente el procesamiento de señal en banda base. |
| RF front-end | Segmento principal de radio, en él se incluyen el filtrado, la amplificación, síntesis de frecuencia y mezclado. |
| Roaming | El cambio de punto de unión de un nodo móvil mientras cruza el borde de dominios administrativos. |
| Rx | Receptor |
| SDR | <i>Software Defined Radio</i> |
| Simplex | Transmisión de datos solamente en una dirección preasignada |
| Sistema híbrido | Sistema resultado de la combinación de varios sistemas de acceso |
| Software | Conjunto de código y programas de un sistema |
| SR | <i>Software Radio</i> , arquitectura definida únicamente con software. |

| | |
|-----------------|---|
| Terminal | Equipo que provee las funciones usadas por el usuario para la red y servicio de acceso |
| Tx | Transmisor |
| UMTS | <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> , estándar de tercera generación de comunicaciones móviles |

RESUMEN

En el presente trabajo se hace un análisis general de los dispositivos SDR y la asignación dinámica de espectro para la implementación de las redes móviles de banda ancha.

Inicialmente, se describen en términos generales, los aspectos más importantes de la estructura y algunas características de los sistemas empleados para ofrecer servicios de banda ancha en redes móviles; conociendo los requerimientos básicos, se introduce la asignación dinámica de espectro como una alternativa para solucionar este problema.

A continuación, se describen brevemente dos proyectos que han planteado los modelos teóricos de la asignación dinámica: DRiVE y OverDRiVE y se analizan los diagramas funcionales de bloques y se describen en términos muy generales algunos algoritmos.

Finalmente, se describen algunos aspectos que se deberían modificar de las redes actuales, las características generales de los dispositivos SDR y un breve análisis de la estructura general de estos dispositivos.

OBJETIVOS

General

Analizar la viabilidad de los dispositivos SDR configurados para asignación dinámica de espectro en la implementación de las redes móviles de banda ancha.

Específicos

1. Describir las características generales de las redes móviles
2. Describir resultados obtenidos en las investigaciones de asignación dinámica de espectro.
3. Describir los algoritmos propuestos para implementar la asignación dinámica de espectro.
4. Describir las reconfiguraciones necesarias para implementar la asignación dinámica de espectro.
5. Describir las características generales de los dispositivos SDR.
6. Analizar las características de diseño de los dispositivos SDR para asignación dinámica de espectro.

INTRODUCCIÓN

El acelerado desarrollo tecnológico masificó el acceso a servicios de telecomunicaciones, inicialmente implementados en las tradicionales redes alámbricas, para luego implementar la movilidad.

Muchos de los servicios ofrecidos están mejorando sus características que se traducen en un considerable aumento en el ancho de banda que las redes fijas pueden soportar ampliando sus capacidades.

Desafortunadamente, el espectro es un recurso limitado, y aunque se ofrecen algunos servicios en las redes móviles, eventualmente será necesaria la implementación de servicios de banda ancha para garantizar flexibilidad, versatilidad y transparencia en los sistemas de comunicación.

Aunque existen muchas alternativas para solucionar las demandas de ancho de banda, la asignación dinámica de espectro puede complementar los sistemas de acceso múltiple actuales para minimizar este problema.

1. REDES MÓVILES

1.1 Sistemas híbridos

Las redes móviles en un futuro próximo deben implementar varias formas de transporte, entre ellas la transmisión de *broadcast* de radio y televisión de la red pública, datagramas de IP para dispositivos móviles, transmisión *unicast*, transmisión *multicast* por IP (múltiprotocolo de encapsulado), etc. La transmisión cíclica de datos en modo *multicast* es usada como protocolo de red para transferir información a los elementos móviles.

Los servicios existentes tienen altos requerimientos en términos de asimetría, interactividad, tiempo real y comunicación *multicast*. Ante esta demanda, se combinan y coordinan sistemas, obteniendo sistemas multiacceso. El multiacceso es la capacidad de conectar la terminal a varios puntos de red de diferentes tecnologías para obtener acceso simultáneo al mismo servicio.

Hay varias formas de explotar la capacidad de los sistemas celulares y de *broadcast* al combinarlos, y se obtienen sistemas híbridos que ofrecen altos anchos de banda asimétricos para el enlace de bajada y comunicación interactiva entre los canales. Entre estos sistemas podemos mencionar MEMO (DAB y GSM), SABINA (DVB-T y GSM) y BRAIN (UMTS y WLAN).

Los servicios disponibles para los usuarios finales de sistemas de acceso híbridos pueden clasificarse en servicios *unicast* y *multicast*. Las celdas del sistema de acceso proveen la cobertura de capas y su estructura es jerárquica.

Los requerimientos generales son particularmente soportados por los sistemas híbridos en tres formas diferentes:

1. Selección del sistema de acceso, enlace de bajada complementario; en el que se selecciona el mejor sistema de acceso para el tráfico de multimedia
2. Combinación del sistema de acceso, servicio complementario; la aplicación emplea varios sistemas de acceso simultáneamente.
3. Diversidad de sistemas de acceso local, cobertura complementaria; un servicio disponible por un sistema de acceso puede desviarse a otro.

1.1.1 Selección del sistema de acceso

El enlace de bajada complementario ocurre cuando el servicio de *multicast* es enrutado y proveído por el enlace de bajada más conveniente.

Tanto el sistema como el receptor puede seleccionar, dependiendo de varios factores, el mejor enlace de bajada. Esta puede ser una selección controlada por red o conducida por el receptor, la selección del sistema de acceso es un aspecto importante en la continuidad de servicio. En estas decisiones es importante considerar la adaptación de las condiciones de transporte de media. La selección de sistema de acceso y de media es básicamente diferente, pues están ubicadas en diferentes capas del sistema de comunicación.

1.1.2 Combinación del sistema de acceso

Para determinados servicios, puede ser necesario combinar varios sistemas de accesos con diferentes características, estos se complementan unos con otros para proveer un mejor servicio. Por lo tanto, el servicio complementario ocurre cuando varios enlaces son necesarios simultáneamente para proveer un servicio.

La selección controlada por red y conducida por receptor también es válida para la combinación de sistemas de acceso, pero el sistema de acceso que distribuye las respuestas a estas solicitudes es seleccionado por una entidad de red.

1.1.3 Diversidad de servicios de acceso local

La selección y combinación de sistemas de acceso depende de los sistemas de acceso locales disponibles. Por un lado, esto está restringido si el sistema de acceso predeterminado no está disponible, y por el otro, es extendido si el ambiente local soporta sistemas de acceso adicionales. La cobertura complementaria ocurre cuando un servicio se hace disponible por las facilidades de comunicación de una región específica.

Desde que los diferentes sistemas de acceso tienen diferentes soporte de calidad de servicio, la media debe adaptarse a estas condiciones. Como el receptor está en movimiento, cuando queda fuera del área de cobertura de un sistema de acceso, selecciona el nuevo sistema que utilizará. Entre las diferentes regiones, los sistemas disponibles pueden variar dependiendo de los ambientes locales.

1.2 Funciones de *multicast* móvil

Las funciones de *multicast* móvil se pueden dividir en tres:

1. **Administración de grupo;** divide grupos en subgrupos o integra varios grupos. Este es principalmente un proceso de decisión, que provee entradas para la administración de movilidad

2. **Movilidad;** realiza el movimiento individual o de grupo de un punto de unión a otro.

3. **Ruteo;** los componentes de ruteo mantienen el árbol de *multicast* y se encargan de la replica de paquetes y el reparto.

1.2.1 Administración de grupo

La tarea del administrador de grupo es mantener la información de afiliación por grupo. Actualmente, la administración de grupos no considera múltiples direcciones inalámbricas, en estos casos un nodo móvil puede ser conectado por una interfase alternativa y enlazar con un grupo *multicast*.

Es necesario que varios enlaces sean posibles entre los enrutadores *multicast* dedicados y los miembros de un grupo, en donde cada enlace tendrá diferentes características y propiedades.

Debido a la movilidad de los miembros, un sistema óptimo cambia continuamente y los miembros deben agruparse periódicamente. La optimización se logra al dividir los miembros del mismo grupo *multicast* dentro de grupos más pequeños o uniéndolos en grupos más grandes.

Un parámetro importante para la división de miembros es la ubicación geográfica. El criterio de optimización es para instancias de utilización, *multicast* o portadoras de *broadcast*, con lo que el contenido es transmitido una sola vez.

1.2.1.1 Funciones de la administración de movilidad de grupo

La administración de grupo debe dividir los usuarios en grupos *multicast*, dependiendo de las capacidades de la terminal, conectividad del usuario y conectividad alternativa, densidad de usuarios en determinada área y acuerdos de nivel de servicio. La administración de grupo puede considerar las diferentes capacidades de los dispositivos y reasignarlos en otros subgrupos, y las terminales con redes de acceso similares pueden permanecer en el mismo subgrupo.

La administración de grupo debe, además, seleccionar el sistema de acceso apropiado y decidir cuándo es requerida una entrega. La eficiencia del sistema depende de la capacidad de servir un gran número de usuarios con el mismo flujo de datos. El conocimiento de la jerarquía de las celdas y de la topología de la red es importante para incrementar la eficiencia.

La administración de grupo decide qué red de acceso y qué nivel jerárquico de celda es más conveniente para servir a los subgrupos con más eficiencia, y cuándo manejar los usuarios individuales o subgrupos completos para incrementar la eficiencia.

En ciertas áreas en la que la baja densidad de usuarios no justifique utilizar recursos de *multicast* o *broadcast* se pueden ubicar usuarios entre los niveles jerárquicos o mover los usuarios a portadoras punto a punto para incrementar la eficiencia. Las funciones para seleccionar apropiadamente la red de acceso o el nivel jerárquico de la celda puede ser realizado por la red o por el usuario, esto implica que la arquitectura de la administración de grupo *multicast* puede ser distribuida dentro de la red.

La administración de grupo *multicast* necesita tener acceso a las capacidades de las terminales de un usuario individual. (tamaño de despliegue, capacidad de proceso, limitaciones de memoria), los sistemas de acceso disponibles y posibles para un usuario individual. (niveles de jerarquía), las redes de acceso disponibles para los subgrupos completos y al número de usuarios para un grupo *multicast* dado por celda.

1.2.2 Administración de movilidad *multicast*

Los servicios de IP *multicast* tienen el potencial de soportar los requerimientos de las crecientes aplicaciones multipartitas, pueden ser soportados en redes híbridas con varias tecnologías de acceso y deben ser capaces de operar en ambientes con alta movilidad. Los algoritmos actuales de IP *multicast* están diseñados para usuarios estáticos, y deben extenderse para soportar movilidad. Esto implica que los algoritmos de enrutado *multicast* deben tratar con las ubicaciones dinámicas de los dispositivos móviles junto a los grupos dinámicos afiliados.

Los estándares actuales de IPv6 móvil se enfocan en tráfico *unicast*, pero no se especifica el direccionamiento necesario para IP *multicast*. Dos diferentes enfoques han sido identificados para desarrollar IP *multicast*: túneles bidireccionales y suscripción remota.

1.2.2.1 Túneles bidireccionales

El propósito de los túneles bidireccionales es que los nodos móviles se suscriban a grupos *multicast* a través de su red local, por los túneles bidireccionales de su agente local.

La principal ventaja es que no se requiere ninguna reconstrucción del árbol de *multicast* mientras los nodos móviles cambien su ubicación; el tráfico *multicast* será automáticamente transmitido por el nuevo túnel bidireccional cuando el nodo móvil envíe una nueva solicitud al agente local. Además, es simple de implementar y logra verdadera transparencia en la movilidad de la fuente o receptores para el resto del árbol *multicast*, desde que la dirección local es usada para la sesión *multicast* siempre que el anfitrión móvil es ubicado; pero el túnel bidireccional rompe la naturaleza *multicast* del tráfico IP *multicast* transmitido, que resulta en uso no óptimo de los recursos.

1.2.2.2 Suscripción remota

Propone que los nodos móviles se unan a un grupo *multicast* por un enrutador *multicast* local a un enlace externo. El nodo móvil usará su CoA como la fuente de direcciones Ipv6 del control de mensajes del grupo *multicast* afiliado. Este enfoque facilita el enrutado óptimo desde que el árbol de reparto *multicast* es reconstruido para enrutar los paquetes desde la fuente a los receptores rápidamente. Además, se optimiza el uso de recursos de la red pues los nodos móviles suscritos al mismo enlace externo o mismo grupo no requieren duplicar los paquetes, pero la reconstrucción del árbol *multicast* en cada movimiento introduce una latencia adicional debido a la resuscripción del grupo y la propagación de la suscripción por el árbol; además, la suscripción remota es vulnerable a frecuentes entregas que posiblemente introducirán largas interrupciones a la sesión *multicast*.

Estas opciones no ofrecen soluciones definitivas para el soporte de movilidad *multicast*, por lo que aún es necesario analizarlas y evaluar cual es la más adecuada.

1.2.2.3 Funciones de la administración de movilidad *multicast*

Considerando las limitaciones de los protocolos actuales de IP *multicast*, es necesario analizar y optimizar el soporte *multicast* de las redes móviles híbridas.

El primer objetivo es soportar la infraestructura IP que soporta la movilidad de receptores entre varios sistemas de acceso mientras se mantienen sesiones de *multicast*. Dependiendo de las condiciones, las entregas las controlará la red o el usuario, y la movilidad de IP *multicast* deberá ser capaz de soportar la movilidad de sesiones *multicast* en ambos casos. Además, desde que el acceso al sistema controlado por la red se relaciona con la administración de grupo, la administración de movilidad *multicast* debe ser capaz de mover los flujos recibidos por el mismo nodo.

El proceso de movilidad en la recepción puede ser considerado por la administración de movilidad de *multicast* o puede trasladarse la sesión a un nuevo acceso sin ayuda de la terminal. Otro objetivo importante es asegurarse que la naturaleza *multicast* de una sesión *multicast* IP debe ser preservada tanto como sea posible por la ruta de la fuente a los receptores.

La administración de movilidad *multicast* de IP influirá en el desarrollo de los estándares y se enfocará en los aspectos dinámicos de movilidad ínter símbolo dentro de un escenario, y debe ser capaz de soportar nodos y redes móviles. El complejo patrón de movilidad creado por los nodos móviles y las redes móviles visitando otras redes móviles crea un ambiente sustancialmente desafiante, especialmente por la inoperabilidad con los mecanismos de movilidad de las redes y los espacios potenciales para mejorar la operación de movilidad *multicast*.

Básicamente, los requerimientos de la administración de movilidad *multicast* son:

1. Soportar movilidad entre nodos entre subredes IP mientras se mantienen sesiones activas.
2. Soportar movilidad entre redes y subredes IP mientras se mantienen sesiones de IP *multicast* para cualquier nodo en una red en movimiento.
3. Soportar nodos móviles dentro y fuera de una red móvil mientras se mantiene una sesión IP *multicast*.
4. Soportar requerimientos previos de movilidad relacionados con IP *multicast* para IP *multicast* informales.
5. Soportar requerimientos previos de movilidad relacionados con IP *multicast* para receptores móviles de IP *multicast*.
6. Soportar simultáneamente sesiones de IP *unicast* e IP *multicast* para nodos móviles, con posibles sesiones *unicast* y *multicast* enrutadas a través de diferentes redes de acceso.

7. Soportar entregas separadas para sesiones de IP *unicast* e IP *multicast* que están disponible para mover sesiones IP *multicast* entre dos diferentes redes de acceso mientras mantiene sesiones IP *unicast* en el mismo acceso.
8. Soportar entregas por flujo para sesiones IP *multicast*.
9. Mantener tanto como sea posible la naturaleza *multicast* de una sesión *multicast* IP por toda la ruta desde la fuente hasta los receptores.
10. Proveer entregas invisibles para las sesiones IP *multicast* entre varios sistemas de acceso para minimizar el impacto en las aplicaciones de las entregas.
11. Disimular la interoperabilidad entre los protocolos existentes.
12. No introducir puntos vulnerables o inseguros.
13. Ser escalable y tolerante a las fallas.

1.2.3 Enrutadores móviles

Los requerimientos de un enrutador van a depender de las condiciones de operación y los diferentes escenarios. Sin embargo deben considerarse algunos requerimientos generales, entre ellos:

- Reuso de los protocolos existentes; los conceptos y protocolos existentes pueden utilizarse para evitar trabajo duplicado.
- Escalabilidad, deben poder escalarse un buen número de nodos móviles.
- Uso eficiente de los recursos de radio, se debe prevenir el uso innecesario de recursos para evitar excesivo encabezado de señalización.
- Sin cambios en el mundo externo, no se debe requerir cambios en los sistemas de acceso.
- Semántica *end-to-end*, la solución debe mantener el principio de Internet de *end-to-end*. Debe prevenir el despliegue de funcionalidad en los elementos internos de la red, que pueden ser manejados en los anfitriones móviles con similar eficiencia.

1.2.3.1 Administración de movilidad

Es un marco de funcionalidades que administra la movilidad de IP dentro de la arquitectura de Internet. La funcionalidad de enrutadores móviles a alto nivel va más allá que el envío normal de paquetes IP y aún más allá de movilidad para anfitriones. Los protocolos de movilidad para anfitriones han constituido una extensa área de investigación y actualmente se maneja con una pila TCP/IP que provee soluciones en varias capas de la pila y asume disponibilidad de varios tipos de servicios.

Un mecanismo simple de IP móvil asigna una dirección local que será más permanente que cualquier otra asignada por el anfitrión mientras se cambien los puntos de unión IP. Las direcciones temporales están asociadas con CoA y representan la ubicación actual de cada nodo. La movilidad IP jerárquica y los registros regionales direccionan los largos retrasos inducidos por las actualizaciones de los agentes locales en cada cambio entre los dominios visitados, e introducen nuevas entidades de los protocolos más cercanos a los puntos de unión. Estas características de los protocolos de movilidad IP exponen importantes dificultades en la adaptación de la funcionalidad de los enrutadores móviles.

1.3 Asignación dinámica de espectro

La asignación dinámica de espectro es una alternativa para optimizar la implementación de las características de los sistemas móviles. Su principio de operación es la variación de la carga de las diferentes RAN que comparten el espectro, para reasignarlo y maximizar la capacidad del sistema. Estas variaciones pueden ser en el tiempo o en el espacio.

Para poder analizar su operabilidad es necesario definir las entidades que estarán involucradas, los tipos de servicios disponibles, las características de acceso ante diferentes redes de radio, las entregas entre diferentes sistemas y finalmente, las extensiones requeridas de los sistemas actuales.

1.3.1 Definición de entidades

Las entidades involucradas son:

1. Proveedor de servicio, en forma de aplicaciones por RAN.
2. Coordinador de espectro

3. Núcleo de red, que vincula diferentes RAN para crear un ambiente múltiradio y permite la cooperación entre diferentes RAN. Además, comparte el tráfico entre diferentes sistemas de acceso basándose en reglas específicas, y optimiza el enrutamiento de tráfico por el sistema de acceso más apropiado.
4. RAN, diferentes sistemas disponibles para distribuir servicios.
5. Usuario

1.3.2 Requerimientos de servicios de ADE

La ADE puede ser operada en cualquier escenario con diferentes RAN y servicios. Sin embargo, para lograr la máxima ganancia espectral, es necesario considerar ciertos requerimientos en los servicios en los que se compartirá en espectro.

1.3.2.1 Tipos de servicio

En general se pueden asumir tres servicios básicos: telefonía, acceso a Internet y video, distribuido por *unicast* y/o *multicast*.

Estos servicios tienen diferentes patrones de carga que varían en el tiempo y en el espacio. Para la operación efectiva de ADE es necesario que cada escenario posea diferentes tipos de servicios con patrones de carga significativamente diferentes.

Un aspecto que determina la forma del patrón de tráfico es el propósito del servicio, trabajo o entretenimiento, tanto en el tiempo como en el espacio. Generalmente los servicios con propósitos de trabajo predominan durante el día en áreas con alta densidad comercial y los servicios de entretenimiento durante las noches en las áreas residenciales.

El mayor problema en las investigaciones de ADE está relacionado con las variaciones de tiempo y espacio de los servicios y la obtención de datos de tráfico reales de ambientes móviles. A excepción de telefonía, el acceso a Internet y video son servicios implementados recientemente, y los patrones de tráfico que se pueden obtener son en su mayoría de acceso estático.

Para las variaciones temporales, se puede asumir que los futuros patrones de telefonía serán similares a los actuales, los patrones de video mantendrán los patrones de los actuales hábitos televisivos y finalmente, se analizará el acceso a Internet con las estadísticas de acceso actuales de los principales servidores. Obviamente, en los tres casos se realizan aproximaciones muy generales de la demanda de los servicios.

Para las variaciones espaciales, se pueden identificar diferentes regiones, y sus variaciones de tráfico, como áreas rurales, áreas industriales y de negocios, áreas comerciales, áreas residenciales, etc. Luego, analizando datos reales de cada área y la demanda de tráfico por territorio ocupado, se pueden obtener patrones de variación de las regiones en consideración.

1.3.2.2 Servicios soportados en las diferentes RAN

A pesar de las variaciones de tráfico en los servicios, los sistemas ADE no pueden asignar aleatoriamente el espectro para diferentes servicios. En su lugar, la ADE necesita asignar el espectro para una RAN en particular y usar esto para soportar un servicio determinado. Por lo tanto, es necesario que haya una relación entre las diferentes redes y los servicios que ofrecen e identifican el servicio dominante

Los patrones de tráfico de los servicios no corresponden necesariamente con los patrones de carga en las RAN, pues puede haber una serie de mezclas en los patrones si diferentes servicios son soportados en más de una RAN. Si todos los servicios se ofrecieran en todas las RAN y todas las cargas fueran distribuidas, los patrones de tráfico variarían en el tiempo y en el espacio de forma muy similar, y no se podría reasignar el espectro. Por lo tanto, es un requerimiento básico para ADE que esto no suceda. Sin embargo, la mayoría de servicios se distribuyen mejor solamente en una RAN, y se pueden utilizar otras como respaldo en caso de algún problema de congestionamiento o cobertura, esta es la flexibilidad de utilizar ambientes múltiradio, sin comprometer la flexibilidad de ADE.

1.3.2.3 Aspectos de cobertura espacial para RAN y servicios

La distribución espacial de las demandas de tráfico depende no solamente del servicio considerado, sino también de la red que soporta este servicio, por lo que será necesario caracterizar cada servicio con una distribución espacial diferente para que cada red sea capaz de soportarlo.

1.3.2.4 Regiones geográficas divididas en áreas ADE

La demanda de servicios entre diferentes RAN varía por lo general regionalmente. Las áreas con mayor demanda de tráfico determinan la demanda de espectro para todas las RAN, por lo que sin una adaptación regional de la ADE se desperdiciaría espectro en varias regiones. Por lo tanto, se analiza la adaptación de asignaciones de espectro entre las redes de radio consideradas para seguir las variaciones regionales de las demandas de tráfico de los servicios soportados por medio de áreas ADE.

Para desarrollar el concepto de áreas ADE se debe definir la resolución espacial, que sigue la definición del área en la que la demanda de tráfico es considerada uniformemente distribuida, un área ADE.

La demanda de tráfico puede considerarse constante en el tiempo o con variaciones temporales. Si es constante en el tiempo, la asignación de espectro debe ser adaptada regionalmente a la demanda de tráfico. Si tiene variaciones temporales, las asignaciones temporales deben adaptarse adicionalmente a las fluctuaciones temporales de tráfico. Estas áreas pueden ser guiadas por la distribución geográfica del equipo de control ADE en una RAN real, pues a pesar de la cantidad de señalización ADE es aparentemente más conveniente asignar solamente unos nodos ADE a cada área ADE.

Desde que las demandas de tráfico están caracterizadas actualmente por las fluctuaciones espaciales dentro de un área ADE, esto puede causar desperdicio de espectro pues las asignaciones de espectro consideran la demanda de tráfico uniformemente distribuida dentro de un área.

La definición de las dimensiones de un área ADE se vuelve muy importante, pues es necesario definir pequeñas áreas para reducir la cantidad de espectro desperdiciado, pero no se pueden realizar adaptaciones regionales de la asignación de espectro con una resolución espacial muy fina.

La adaptación regional de las asignaciones de espectro se puede realizar proveyendo a cada área ADE la posibilidad de tener asignaciones de espectro independientes, siguiendo sus demandas de tráfico, y además coordinar las asignaciones de espectro entre diferentes áreas para evitar la interferencia.

1.3.3 Características y extensiones de los sistemas ADE

A continuación se describen las características de los sistemas ADE y las extensiones necesarias a los sistemas actuales para poder operar.

1.3.3.1 Espectro

En ADE, un bloque de espectro será repartido entre múltiples sistemas de radio, pero ningún bloque en particular será especificado explícitamente; se mantendrá neutralidad en seleccionar qué bloque se utilizará.

En la práctica, serán necesarias simulaciones de ADE, y con esto algunos modelos de propagación. Estos modelos de propagación son función de varios parámetros, entre los cuales se encuentra la frecuencia de operación. Por lo tanto, todas las simulaciones a realizar deben considerar una banda de frecuencia como entrada.

Otro aspecto a considerar es el tamaño total de los bloques de espectro disponibles para los propósitos de ADE; esto tiene un impacto importante en la operación. Debe tener tamaño suficiente para que las RAN compartiendo el espectro puedan tener un número considerable de portadoras dentro de este bloque, pero no debe ser tan grande para requerir un elevado número de portadoras para llenarlo.

Además, un bloque pequeño introduce bajo desempeño de ADE para compartir el espectro y con bloques grandes se puede tener mayor flexibilidad en la asignación, logrando mayor eficiencia.

Desde que ningún bloque se identifica para ADE, no es posible conocer cuán grande será el bloque de espectro asignado. Por lo tanto, debe especificar el tamaño total del bloque de espectro para investigar los efectos de utilizar diferentes tamaños.

1.3.3.2 Cooperación de la red

Es necesaria la cooperación de múltiples RAN para lograr el ambiente múltiradio. En términos de ADE, varios aspectos específicos de la cooperación de las redes son requeridos para lograr la operación óptima de ADE. Una operación fundamental es desactivar portadoras de una RAN y reactivarla en otra. Esta es la forma básica en la que el espectro puede ser compartido y la operación de ADE recae en esto. Sin embargo, pueden haber varias restricciones en esta operación, que puede limitar la operación de ADE reducir su desempeño.

Una restricción importante es que una portadora solamente puede ser tomada de una RAN si no está en uso. Aunque para aumentar el desempeño de todo el sistema, no siempre es necesario aplicar esta restricción y es necesario que varias redes cooperen para que se pueda controlar la distribución de uso y así beneficiar la operación de ADE.

2. ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO

2.1 Inicios de ADE, proyecto DRiVE

Este proyecto buscaba implementar la asignación dinámica entre dos RAN; el esquema desarrollado se introdujo como ADE continua. Con este tópicó se iniciaron las investigaciones de asignación dinámica de espectro, y propusieron esquemas bastante sencillos que permitieran comprobar la versatilidad de esta técnica sin profundizar en sistemas muy complejos. La asignación continua utiliza bloque continuos de espectro asignados a diferentes RAN, con su respectiva banda de guarda. El ancho del bloque de espectro asignado a cada RAN varía dependiendo de las cambiantes demandas de ancho de banda. Si alguna RAN dispone de recursos, agrega más portadoras a la RAN que lo necesita.

Esta técnica tiene muchas ventajas. Es el sistema más sencillo de asignación después de la asignación estática y es fácil controlar la interferencia, pues solo se debe controlar el ancho de la banda de guarda y requiere mínima coordinación entre RAN. Sin embargo, tiene algunas desventajas. Este esquema solo permite variar la partición de espectro con las RAN adyacentes y sino están en capacidad de liberar recursos no podrán aumentar la capacidad de la red que solicita más, pero provee buenas ventajas cuando la RAN adyacente no está trabajando en su capacidad máxima.

La asignación continua utiliza bloques continuos de espectro asignado para las diferentes RAN, separados por la mínima banda de guarda permitida. El ancho utilizado de bloque de espectro que es reasignado puede variar para permitir incrementar o reducir la demanda. Cada RAN tiene un punto de inicio en el espectro, y las portadoras son agregadas a partir de este punto en cada reasignación de espectro. Cuando la demanda en las RAN es máxima, y los bloques de espectro asignado están separados solamente por la mínima banda de guarda, los siguientes incrementos se deben hacer sacrificando una portadora de la RAN adyacente, en este caso, debe haber un algoritmo capaz de decidir que RAN tiene mayor necesidad de aumentar su ancho de banda. Además, se asumió que el tamaño de la banda de guarda no esta basada en la medida actual de interferencia, sino la utilizada para el peor valor de interferencia.

2.1.1 ADE temporal

El algoritmo diseñado para implementar ADE temporal continuo se ejecuta en un periodo establecido, el cálculo del requerimiento de espectro de cada RAN está basado en la predicción que ofrece la carga esperada hasta la siguiente reasignación.

La predicción de carga forma parte fundamental del esquema de ADE temporal. Se consideraron dos aspectos importantes: 1) El historial de carga que permite predecir el tráfico esperado dependiendo de la demanda promedio en cada parte del día, aunque se deben considerar eventos fortuitos que no se pueden predecir basados en este historial, y 2) predicción de tiempo en serie.

De la predicción de carga, se calcula como se distribuirán las portadoras disponibles; cuando una RAN reporta una portadora libre, el asignador dinámico analiza las RAN adyacentes y ubica las que han demandado más ancho de banda, de esto, y dependiendo de la predicción de carga, asigna las portadoras disponibles. Esta distribución se mantiene hasta ejecutar de nuevo el algoritmo de asignación dinámica.

Para asegurar que el máximo número de portadoras esté disponible para reasignar, todas las nuevas llamadas son soportadas más allá de las bandas de guarda entre las RAN, y son entregadas siempre que sea posible, haciendo que las bandas de guarda cercanas estén libres para reasignación.

La operación de los sistemas de ADE temporal se basa en los patrones de variación de tráfico en el tiempo totalmente no correlacionados o negativamente correlacionados entre las diferentes RAN. Esto permite maximizar el funcionamiento del sistema y aplicar las técnicas de predicción de carga pues los patrones de variación de tráfico en el tiempo se ajustan a los requerimientos de ADE.

2.1.1.1 ADE con predicción perfecta de carga

La primera simulación de ADE temporal se realizó con predicción perfecta de carga, es decir, sin ningún evento inesperado en el comportamiento promedio del tráfico.

Esto mejoró la eficiencia del sistema durante el primer intervalo de tiempo, pues maximizó la capacidad de cada RAN permitiendo ofrecer mejor servicio. Sin embargo, luego hubo una caída dramática en el desempeño de la asignación dinámica y tuvo un rendimiento inferior al de la asignación estática. Esto fue ocasionado por los largos intervalos de tiempo en los que se ejecutaba el algoritmo de asignación dinámica, pues eran mucho mayor que los tiempos de variación de tráfico.

Luego, se analizó un sistema cuyas RAN tuvieran patrones de variación de tráfico muy correlacionados, y básicamente se obtuvo el mismo resultado que con asignación estática.

2.1.1.2 ADE con predicción imperfecta de carga

Aunque es muy probable que un sistema se ajuste al comportamiento descrito por el historial de carga, pueden haber circunstancias especiales que se deben considerar.

Simulando que alguna de las RAN tiene un pico inusual de demanda, se consideraron tres esquemas de predicción para solventar esta situación. El primer esquema toma el valor del historial de carga, sin importarle las variaciones. Los otros dos analizan el historial de carga y si no está dentro de un 5% de lo esperado proceden a calcular con predicciones de tiempo en serie para estimar futuras cargas.

El primero linealiza las últimas dos cargas recibidas y extrapola el siguiente valor. El segundo encuentra la mejor curva exponencial a través de las tres últimas muestras, y obtiene así el siguiente valor. El esquema que se basa en la predicción del historial de carga no obtuvo mejoras significativas contra la asignación estática. Los esquemas de predicción en serie obtuvieron muy buenos resultados, aunque debe sacrificarse el desempeño de la RAN adyacente para poder responder solventar mejor el problema.

Hay tres aspectos principales en los algoritmos de ADE temporal: El intervalo de tiempo entre reasignaciones, la medida y predicción de carga y el esquema de asignación de portadoras.

Se concluyó que es importante manejar intervalos de tiempo relativamente pequeños, pues así tiene una mejor respuesta con las variaciones de tráfico. También se concluyó que es importante tener una base de datos que se actualice constantemente del historial de carga, además de realizar predicciones en serie para estimar el valor inmediato de carga.

2.1.2 ADE espacial

Además de las variaciones temporales del uso del espectro, se deben considerar las variaciones por áreas. Los servicios varían dependiendo de las actividades que se realicen en cada sector, por lo que es necesario realizar asignación de espectro con adaptación regional.

Se clasifican las áreas con asignación uniforme de espectro en las regiones, y se llaman áreas ADE en las que el tráfico es constante en el espacio sin que necesariamente sea constante en el tiempo. La estrategia considerada para la asignación de espectro de diferentes RAN se basa en evitar el traslape con las áreas ADE adyacentes considerando un crecimiento no coordinado de las RAN; esto previene interferencias entre las redes operando en el mismo espectro.

La asignación dinámica de espectro espacial fue planteada como un problema de optimización matemática, en el que se intenta asignarle espectro a cada RAN dentro de una área ADE sin traslapar con las RAN de las áreas ADE adyacentes. Dentro de este planteamiento el objetivo principal es maximizar el grado de servicio en cada RAN. El grado de servicio de determinada área y la determinada RAN es función del máximo tráfico que puede ser manejado por el espectro asignado y la demanda de tráfico. Aunque las características específicas son función de la tecnología de la RAN considerada y el tipo de servicio. Se asume que en cada RAN la capacidad de tráfico es proporcional al espectro asignado.

2.1.2.1 Modelos de simulación

El hecho de que cada área ADE comparta bordes con otras áreas ADE adyacentes incrementa el nivel de complejidad del diseño, pues las bandas de guarda y la autonomía de cada red se deben mantener.

En las investigaciones realizadas, el área modelo se cubría con una malla que tenía 36 áreas hexagonales ADE con igual área, por lo tanto, cada área ADE tenía 6 áreas adyacentes. El modelo de tráfico utilizada en ambas RAN era idéntico. Las demandas de tráfico fueron modeladas como distribuciones normales truncadas y la desviación estándar de la distribución normal era un parámetro de investigación.

La implementación de ADE espacial permite homogenizar el grado de servicio de un área determinada, pues mejora el servicio de los sectores con poco acceso a expensas de los que tienen alto nivel de servicio, sin reducir la calidad de servicio de los sectores con alto grado de servicio.

2.2 Análisis del proyecto DRiVE

Aunque introdujo conceptos importantes para la implementación de ADE, tuvo algunas limitaciones que permitieron definir el punto de partida para las siguientes investigaciones..

2.2.1 ADE temporal

Teóricamente, la implementación de ADE temporal en dos RAN correlacionadas en -1 debe ser capaz de incrementar la ganancia en un 100%, pues ambas redes duplicarían momentáneamente su ancho de banda disponible.

Sin embargo, no lograron obtener este resultado, aún al analizar dos RAN correlacionadas en -1 la ganancia máxima obtenida fue de 40%. A continuación se identifican y describen brevemente algunas de las razones de este comportamiento.

2.2.1.1 Liberación de portadoras

Es complicado liberar una portadora de una RAN para reasignarla, por lo que disminuye la eficiencia de la ADE. Sin embargo, aún al liberar una portadora, es difícil predecir qué RAN es la que podrá mejorar su rendimiento para aumentar la eficiencia del sistema. Además, dentro del esquema planteado en DRiVE, solamente se pueden liberar portadoras que no estén en uso.

Para mejorar el rendimiento del sistema, es necesario mantener un constante análisis de la demanda de las RAN dentro del sistema para estar en la capacidad de mantener un grado de servicio homogéneo, aunque esto implique sacrificar algunas llamadas de una de las redes para liberar portadoras y asignarlas a otra RAN con mayor demanda.

2.2.1.2 Predicción de carga

Es sumamente importante considerar las variaciones de carga que tiene cada red, basándose en la historia y en algoritmos de predicción de carga, pues una errónea asignación reduce el rendimiento aún por debajo de la asignación estática.

Además, el equipo empleado tiene grandes limitaciones para realizar análisis y reasignaciones instantáneas de espectro, por los constantes cambios de frecuencias que implica.

2.2.1.3 Dependencia de RAN adyacentes

Este punto está estrechamente relacionado con la liberación de portadoras, pues todo el desempeño de ADE depende de la disponibilidad de las redes adyacentes para liberar recursos; que colapsa si alguna las redes adyacentes no están en capacidad de liberar portadoras.

Además, al forzar la ampliación de espectro de alguna red con portadoras de diferentes redes existe una considerable pérdida de espectro al definir varias bandas de guarda.

2.2.1.4 No adaptación de ADE espacial

Todo el análisis que plantea DRiVE para ADE temporal es realizado en un área aislada, no se plantea la implementación de ADE temporal y espacial simultáneamente. Para realizar esto, es necesario aumentar la comunicación y señalización en el sistema, que obviamente aumenta la complejidad de éste, además de permitir la adaptación espacial de ADE temporal.

2.2.1.5 Utilización de dos RAN

La mayoría de pruebas e investigaciones realizadas se basan en dos RAN, no consideran una visión más global de un sistema que implemente ADE en todo el sistema.

2.2.1.6 Cantidad de espectro y ancho de banda de las portadoras

Las pruebas realizadas en DRiVE estuvieron limitadas a unas cuantas portadoras, con características y demandas similares, por lo que no lograron observar todo el desempeño que se puede llegar a obtener al disponer de una mayor cantidad de espectro, ni consideraron el aumento de complejidad del sistema.

Además, las portadoras y bandas de guarda tenían el mismo ancho de banda, que si bien puede ejemplificar las mejoras que se lograrán al implementar ADE, no afrontaron problemas que surgirán al compartir el espectro entre diferentes redes con característica y demandas de espectro diferentes.

2.2.1.7 Algoritmos de asignación

El algoritmo de asignación de espectro utilizado en DRiVE es bastante simple pero efectivo, básicamente evalúa la cantidad de portadoras que posee cada RAN contra la demanda que tiene, y así reasigna dependiendo de las variaciones de llamadas de las redes adyacentes. Sin embargo, al diseñar algoritmos deben sopesar dos aspectos: una distribución equitativa contra un óptimo desempeño del sistema. DRiVE optimiza rendimiento pero no realiza una distribución “justa” de recursos. Y aunque la distribución equitativa de recursos es un concepto más abstracto, no es conveniente medir la eficiencia del sistema en un concepto global aunque esto implique un pobre rendimiento y un bajo grado de servicio de una servicio con menor demanda.

2.2.1.8 Desempeño ante altas cargas

Relacionando los problemas de predicción de carga y los algoritmos de asignación, es importante considerar las situaciones en las que se presenta alta demanda en algunas RAN, pues se debe evitar utilizar todo el espectro disponible sacrificando el desempeño de otras redes.

2.2.1.9 Establecimiento del periodo de reasignación

En DRiVE utilizaron periodos de reasignación de 30 minutos, que ofreció un buen desempeño. Para la implementación de ADE, es necesario realizar reasignaciones de espectro en menores periodos de tiempo para compensar variaciones de carga. Pero esto tiene dos problemas: el equipo debe adaptarse a las nuevas condiciones de la RAN y la señalización de la carga. El equipo empleado para implementar ADE debe tener gran adaptabilidad y debe actualizar la señalización de cada servicio, pues al variar su ubicación en el espectro se debe actualizar todo el equipo involucrado para no perder información

2.2.1.10 Interactuando con el control de tráfico

El control de tráfico garantiza que los usuarios estarán conectados a la mejor RAN dependiendo del servicio que demanden. La ADE no solo realiza un constante análisis de la demanda de las redes para realizar una correcta reasignación de espectro, sino además controla el tráfico en los ambientes de múlti-radio. Uno de los problemas la interacción de ADE y control de tráfico es la diferencia en la forma en que maneja la demanda del sistema.

La ADE distribuye las portadoras de todas las RAN dependiendo de la historia de carga, mejorando el desempeño general del sistema.

Por otro lado, el control de tráfico equilibra la carga de una RAN entre todas las portadoras disponibles, para garantizar un alto grado y calidad de servicio, es decir, si una portadora tiene un bajo nivel de carga y otra tiene un nivel medio alto de carga, busca equilibrar ambas portadoras en un nivel medio, aunque hubiera podido llevar la segunda a su máxima capacidad para liberar la primera para reasignarla. Este problema se puede solventar modificando los algoritmos de control de tráfico, aunque implique algunos problemas como *handovers* ínter frecuencias e ínter sistemas y otros que aún no se pueden predecir.

2.2.2 ADE espacial

Al igual que ADE temporal, a pesar que se esperaban ganancias de 100%, se observaron ganancias de aproximadamente 40% en las simulaciones que realizaron. A continuación, se describen los aspectos que limitaron el desempeño de ADE espacial.

2.2.2.1 Inserción de espectro sin uso

Para implementar ADE espacial es fundamental mantener bandas de guarda apropiadas para evitar la interferencia entre diferentes sistemas, y a medida que se utilizan sectores más alejados, esto puede llegar a incrementar considerablemente el espectro que no es utilizado, pero que debe ser asignado para mantener la coexistencia de sistemas. Esto se puede mejorar al optimizar los algoritmos de ADE.

2.2.2.2 Falta de datos espaciales reales

A diferencia de la asignación temporal, no hay datos que describan las variaciones del uso del espectro en el espacio, éste constituye aún un tópico de investigación. Además, las simulaciones realizadas en DRiVE no definen el tamaño de cada área o como se deben dividir las regiones.

2.2.2.3 Asignaciones arbitrarias de espectro

Para demostrar la flexibilidad de la ADE espacial, se asignaron arbitrariamente bloques de espectro entre RAN, sin verificar si se ajustaba a la demanda que necesitaban o cuantas portadoras se lograban asignar.

2.2.2.4 No adaptación temporal

El análisis temporal que se realizó en DRiVE fue simplemente recalcular el espectro asignado a cada área, en intervalos de tiempo definidos. No se realizaron pruebas en combinación de ambos esquemas, aunque previeron una reducción en el desempeño total del sistema.

2.2.2.5 Simplificaciones de los modelos de tráfico

Todas las pruebas realizadas en ADE espacial asumen condiciones favorables e ideales de tráfico, en donde la máxima demanda de la red ocurre dentro de los límites establecidos. Además, asumieron que la correlación entre la demanda de dos RAN era de -1 , que no se puede considerar como un parámetro realista.

2.2.2.6 Falta de verificación del desempeño de las RAN

Las simulaciones realizadas pueden ser abstractas, pues no utilizaron los elementos apropiados para realizar las simulaciones, por lo que aún los resultados obtenidos no son representativos.

2.2.2.7 Consideración de 2 RAN

Al igual que ADE temporal, los resultados obtenidos son subjetivos, pues se basan exclusivamente en el desempeño de dos RAN.

2.3 Aspectos generales de DRiVE

A continuación se mencionan algunos aspectos importantes de ADE, no específicos de DRiVE, pero generales para los sistemas de asignación dinámica de espectro.

2.3.1 Implicaciones de redes y terminales

- ✓ Los análisis hechos en DRiVE asumen que todo el equipo en uso es capaz de reconfigurarse y realizar *handovers* entre diferentes portadoras de la misma RAN sin dificultad, que no es necesariamente cierto.

- ✓ Aunque ADE no necesita realizar *handovers* entre diferentes sistemas, el control de tráfico sí.

- ✓ Se consideró un tiempo de reconfiguración del equipo, pero no se estimó cuanto para permitir un buen desempeño del sistema.

- ✓ La señalización entre redes que deben mantener el sistema para permitir la correcta operación de ADE no está definida. Se desconoce el procedimiento para control de frecuencias

2.3.2 Consideraciones de espectro de enlaces de subida

La mayoría de redes de acceso inalámbrico se caracterizan por una demanda asimétrica de espectro que tiene mayor carga en los enlaces de bajada. Sin embargo, el objetivo de DRiVE era optimizar los esquemas de acceso al espectro para permitir solventar la demanda de los sistemas y aumentar la calidad y el grado de servicio, que básicamente se orientó a la mejorar la forma en que se realizan los enlaces de bajada.

Sin embargo, descuidaron los aspectos relacionados con los enlaces de subida, que aunque no manejan la misma carga tienen el mismo comportamiento aleatorio que eventualmente provocaría un mal uso del espectro si les asignan portadoras estáticas que no siempre están en uso.

Esta consideración aumenta considerablemente la complejidad de los sistemas, para futuros esquemas de ADE.

2.3.3 Aspectos de cobertura de red

Se debe considerar el efecto que puede tener la ADE en las redes estáticas al cambiar constantemente la frecuencia de operación. Aparentemente, el control de potencia debe variar de acuerdo con las variaciones de frecuencias.

2.4 Proyecto OverDRiVE

Este proyecto inicia sus investigaciones de los esquemas desarrollados en DRiVE. Y se enfoca en dos aspectos:

- 1) Generalizar los esquemas planteados en DRiVE para cualquier sistema.
- 2) Mejorar los esquemas de asignación para hacerlos más flexibles

Con base en la estructura definida en el proyecto DRiVE, OverDRiVE busca desarrollar un esquema de asignación dinámica de espectro más flexible y general, en el que la ADE no esté restringida a dos RAN, pues probablemente el mejor esquema para dos RAN sea ADE continuo.

Un sistema más general es más complejo, pues debe considerar más bordes de espectro y decidir que RAN aprovecha mejor el espectro asignado. Como ADE continuo se utilizará únicamente para dos RAN, se debe plantear un nuevo esquema de asignación dinámica de espectro.

Para encontrar la asignación flexible, es necesario un esquema que permita dividir dinámicamente el espectro sin depender de las RAN adyacentes, pero incrementa la complejidad del control y optimización.

La generalización de los esquemas de ADE libera varias limitaciones asumidas en DRiVE, aunque probablemente siempre habrá aspectos que no se cubran en el desarrollo de los nuevos algoritmos de ADE.

Este nuevo esquema de asignación se llama ADE fragmentado. El espectro es tratado como un solo bloque y cada RAN puede ser asignada a cualquier espacio arbitrario en cualquier lugar del bloque. Las RAN no dependen del espectro de los vecinos, incrementando considerablemente la capacidad de ADE continua, pues la expansión del espectro de una RAN no se ve limitada por la liberación del espectro de las RAN adyacentes, lo que producirá gran flexibilidad de asignación. La principal desventaja de ADE fragmentado son las múltiples bandas de guarda que deben colocarse a través del espectro, las que deben controlarse continuamente para mantener los niveles de interferencia bajos y eventualmente, deben realizarse asignaciones dinámicas de bandas de guarda, si alguna red tiene altos niveles de interferencia. Al fragmentar el espectro excesivamente, es probable que alguna RAN tengan asignados espacios adyacentes, con bandas de guarda entre ellos, pudiendo minimizar las bandas de guarda al usar un solo de bloque de espectro y maximizar así la eficiencia del espectro.

La asignación dinámica de espectro fragmentada aumentará considerablemente la eficiencia en el uso del espectro, pero también aumenta considerablemente la complejidad del sistema.

2.4.1 ADE temporal

De acuerdo con los esquemas analizados en DRiVE, los objetivos de ADE temporal se listan a continuación:

- 1) **Límites teóricos de ADE;** comparar y analizar los resultados para poder identificar los límites en el desempeño y enfocarse en los aspectos más importantes.

- 2) **Liberación de portadoras;** evaluar algunos algoritmos para proveer portadoras libres para poder realizar la reasignación.

- 3) **Algoritmo de asignación “justo”;** mejorar los algoritmos existentes y validarlos para situaciones de alta carga y congestión. Es un problema complejo y difícil de cuantificar.

- 4) **Predicción de carga;** evaluar algoritmos más complejos de predicción de carga. Comparar los resultados de los algoritmos de predicción de carga perfecta contra los nuevos diseñados para juzgar si la ganancia aumenta para justificarla complejidad de los esquemas de predicción.

- 5) **El tamaño total del bloque de espectro;** calcular el tamaño de los bloques de espectro y la disponibilidad que deben tener para afectar los resultados deseados de ADE.

- 6) **Anchos de banda variables de las portadoras;** investigar el impacto que tiene en el desempeño de ADE utilizar portadoras con diferentes anchos de banda.

- 7) **ADE para tres RAN;** adaptar las investigaciones de DRiVE a tres RAN y luego extenderlo a esquemas de ADE fragmentado, para luego implementar un algoritmo que decida como asignar el espectro para optimizar el rendimiento total.

En ADE temporal fragmentado, observamos que potencialmente se mejorarán los resultados obtenidos con ADE continuo; principalmente porque no se está limitado a la disponibilidad de espectro de los vecinos. Con ADE temporal se lleva un control periódico de la cantidad de portadoras que necesita y las que ha liberado cada red y se espera que la gran flexibilidad de esquema fragmentado permita mejorar este desempeño.

2.4.2 ADE espacial

Desde que las investigaciones en el espacio son con tiempo estático, no se consideran variaciones dependiendo de las fluctuaciones temporales de las demandas de tráfico, como portadoras libres. La asignación se realiza únicamente tomando en cuenta el número de portadoras requeridas por cada RAN para satisfacer su demanda de tráfico.

Cuando muchas áreas son tomadas en cuenta, el problema es la coordinación de la asignación de espectro entre áreas adyacentes, siendo más crítica cuando el espectro a asignar no es continuo. Esto incrementa las bandas de guarda necesarias para evitar el traslape entre diferentes redes, que incrementa la cantidad de espectro sin uso. Por esta razón, en ADE espacial, solamente se considerará la asignación continua, pero se optimizarán los algoritmos para trabajar con tres RAN.

Los objetivos de ADE espacial en OverDRiVE se listan a continuación:

- 1) **Simulador de red de radio;** validar los resultados obtenidos en DRiVE con un simulador de red de radio, evaluando el impacto de los anchos de banda de portadoras reales en el desempeño de los esquemas de ADE.
- 2) **Desarrollar nuevos algoritmos de asignación;** analizar los resultados de las simulaciones reales para refinar los algoritmos actuales.

- 3) **Limitaciones de la inserción del espectro sin uso;** considerar la inserción de áreas de guarda en las que se asignen bandas de guarda extra para que actúe como interfase en la coordinación de la asignación de espectro entre áreas ADE que se caracterizan por tener diferentes demandas de espectro. Los estudios de coexistencia proveerán retroalimentación de cómo son afectadas por la interferencia las áreas ADE para dimensionar apropiadamente estas áreas de guarda.

- 4) **Correlación de la demanda de tráfico;** examinar los algoritmos utilizados en DRiVE al variar la correlación entre las demandas de tráfico de los dos sistemas simulados.

- 5) **Comportamiento ante altas cargas**

- 6) **Distribución espacial del grado de servicio;** observar el grado de servicio para verificar si mantiene un comportamiento homogéneo aún mejorando los resultados anteriores si no se provee una ganancia sustancial respecto de la asignación estática de espectro.

- 7) **Inserción de la tercera RAN;** generalizar el desarrollo de los esquemas de DRiVE para hacerlos más flexibles para manejar tres RAN.

3. ALGORITMOS PARA ADE

3.1 Algoritmos para ADE temporal

3.1.1 Limitaciones de operación

Como primer criterio, la asignación dinámica no debe causar desmedida interferencia entre las redes que comparten el espectro, esto es un aspecto muy importante desde el punto de vista regulatorio. Las limitaciones de operación son:

1. **Patrones de variación de carga en el tiempo;** para optimizar significativamente la eficiencia del espectro, las RAN deben tener distintos patrones de variación de carga en el tiempo que puedan ser modelados y utilizados para verificar y medir el desempeño de los esquemas de ADE.
2. **Predicción de carga;** el espectro debe ser asignado de acuerdo con las variaciones de carga esperadas en un futuro inmediato. Debe considerarse un intervalo de tiempo real en el que se reasignará el espectro.

3. **Tiempo entre las reasignaciones de espectro;** para una operación eficiente, las reasignaciones deben realizarse suficientemente rápido para seguir las variaciones de carga de cada red. Sin embargo, esto implica una alta demanda en la red por el tiempo que le toma ajustar las frecuencias en las que debe operar y en reordenar la señalización en la carga. Además, el esquema que se defina para la predicción de carga depende directamente del intervalo de tiempo que se defina.

4. **Unidades mínimas de intercambio de espectro;** como el espectro no puede asignarse arbitrariamente, es necesario definir una unidad básica para el intercambio de espectro para que se ajuste a los requerimientos de todas las redes del sistema.

5. **Eliminación de llamadas;** no se pueden eliminar llamadas en el sistema para reasignar el espectro a otra red, pero se incrementa el desempeño de la reasignación al permitir eliminación selectiva de llamadas.

6. **Handovers entre frecuencias;** asumiendo que las redes y el equipo terminal son capaces de realizar *handovers* entre frecuencias dentro del esquema de acceso múltiple utilizado sin perder la continuidad de servicio, se puede esperar la flexibilidad de la asignación. Sin embargo, los *handovers* entre diferentes redes no son simple, y es uno de los propósitos que debe justificar ADE.

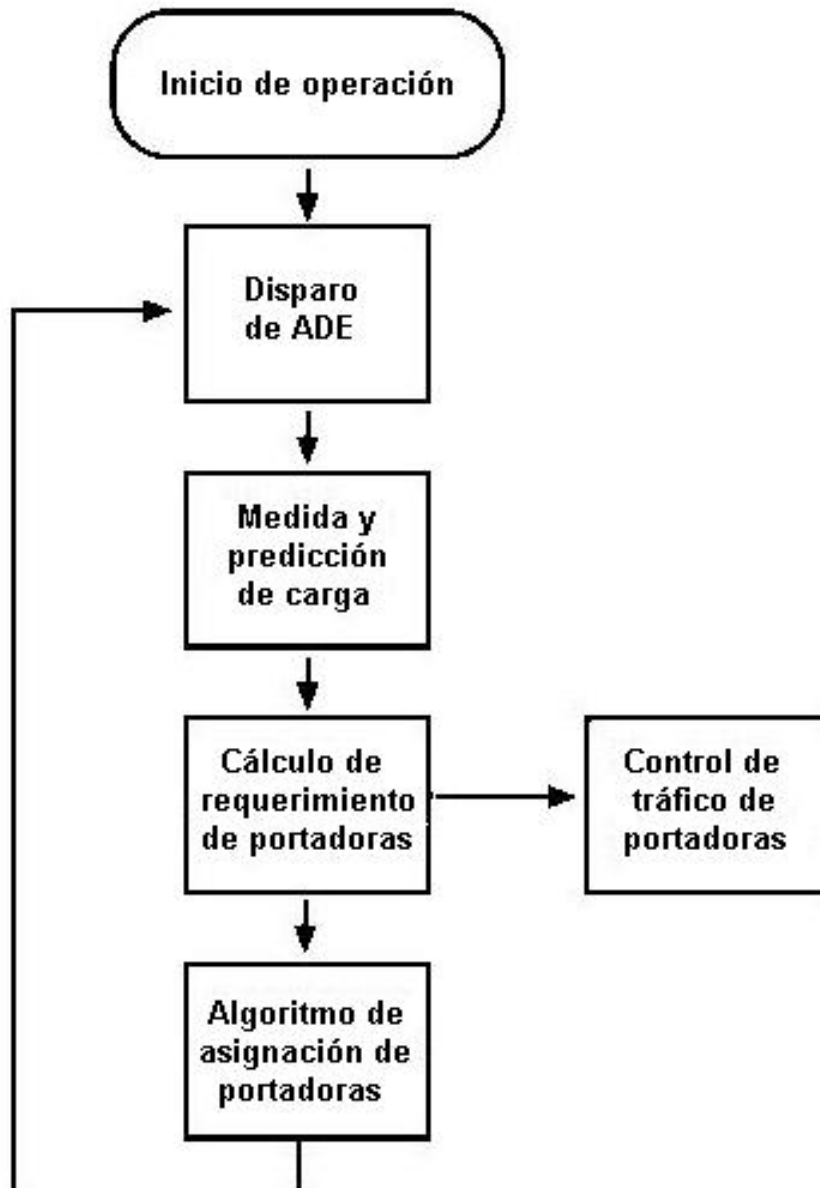
7. **Número de redes compartiendo el espectro;** uno de los propósitos principales de OverDRiVE es generalizar la ADE a varias redes. Inicialmente debe ser evaluado para tres RAN, pero no debe delimitarse a algún número particular de RAN.

8. **Adaptación espacial de ADE;** durante el desarrollo de los algoritmos de ADE temporal debe considerarse la posterior adaptación espacial que no limita el desarrollo de ADE temporal, pero debe incluirse.

3.1.2 Diagrama de bloques funcional

Los diagramas de bloques funcionales de OverDRiVE parten de los esquemas desarrollados en DRiVE. La principal diferencia radica en los algoritmos utilizados para la asignación de portadoras.

Figura 1 Diagrama de bloques funcional de ADE temporal; adaptación de la figura 17 “*Top-level algorithm functional blocks for temporal DSA*” del documento 13 de OverDRiVE *



* Véase la bibliografía

3.1.2.1 Disparo de ADE

Este bloque es el que monitorea el tiempo desde la última reasignación e inicia el proceso para que se realice la reasignación de espectro en los periodos establecidos. Esta funcionalidad puede hacerse más compleja al agregar un mecanismo que se active de acuerdo con las demandas de la red. Este bloque requiere enlaces a la sección de requerimiento de portadoras.

3.1.2.2 Control del tráfico de portadoras

Este bloque incrementa la liberación de portadoras en las RAN. Esto se realiza aislando una portadora para priorizar la reasignación o evaluando el número de llamadas de cada RAN activa para determinar si la eficiencia del espectro se mejora al botar algunas llamadas para liberar una portadora.

Además, este bloque se encarga de maximizar la cantidad de llamadas empaquetadas en cada portadora para liberar tantas como sea posible. Además, un sistema más complejo puede determinar cuando son necesarias los *handovers* entre redes. Este bloque requiere como entrada los requerimientos de portadoras además de un vínculo con el bloque de disparo.

3.1.2.3 Medida y predicción de carga

La predicción se basa en una combinación de predicción en serie e historia de carga. La historia de carga es una base de datos de la carga vista en el pasado de cada RAN, y permite a los esquemas de predicción hacer uso de esta información para decidir la próxima predicción. Además, se desarrollaran algoritmos más complejos para mejorar la ganancia.

3.1.2.4 Cálculo de requerimientos de portadoras

En este bloque se traslada el número de portadoras que necesitará cada RAN dependiendo de la predicción de carga. Aquí se refleja la necesidad de un algoritmos más complejo de reasignación de portadoras.

3.1.2.5 Asignación de portadoras

Este es el bloque más importante dentro de las investigaciones de OverDRiVE. Como éste es un aspecto que debe tener distribución equitativa, generalidad y flexibilidad, se utilizarán varios algoritmos para asignar portadoras. El desarrollo de estos algoritmos es uno de los aspectos más interesantes, y se divide inicialmente es dos categorías: optimización de los algoritmos vistos en DRiVE para mejorar la distribución de portadoras haciendo la distribución más justa y desarrollo de algoritmos que consideren tres RAN.

Se espera que extendiendo ambas investigaciones se desarrollen algoritmos encargado de realizar la asignación fragmentada y que puedan decidir como se realizarán las reasignaciones de espectro, para asignar las portadoras disponibles a la RAN que hará mejor uso de ésta, hasta que ya no haya RAN demandando más espectro o portadoras disponibles.

De la primara categoría, en la que se optimizarán los algoritmos de DRiVE, observamos que cuando se congestionaba el sistema, una de las redes que compartía el espectro bajaba su rendimiento por debajo de la asignación estática, que obviamente reflejaba una distribución injusta de recursos, por lo que se desarrollaron tres nuevos algoritmos que garantizan que en altas demandas el rendimiento del sistema se mantendrá al menos igual que el rendimiento observado con la asignación estática, entre ellos:

- **Algoritmo de requerimiento de portadoras fraccionadas;** inicialmente se calculaba el número de portadoras que se reasignarán basándose en el número de portadoras que demandaban. Este algoritmo utiliza el número de portadoras que se demandan para realizar un estimado fraccional de cuántas portadoras se utilizarán realmente y que RAN hará un mejor uso de ellas, de esta forma, seleccione a quien se le asignan las portadoras disponibles. Este algoritmo optimiza la asignación dinámica, pero no está muy claro el comportamiento que tendrá con altas cargas.

- **Algoritmo de esquemas de operación conmutados;** utiliza dos algoritmos, uno con buen desempeño para bajas cargas y otro con distribución justa para altas cargas. El algoritmo de requerimiento de portadoras fraccionadas puede tener un buen desempeño para bajas cargas; mientras que para altas cargas se podría utilizar un algoritmo que asigne las portadoras dependiendo de cuantas tienen asignadas actualmente cada RAN. Incluso, en situaciones de alto congestionamiento, se puede conmutar a la asignación de espectro estática.
- **Algoritmo de parámetros de peso;** intenta implementar, al igual que el algoritmo de esquemas de conmutación, una solución para bajas y altas cargas. Sin embargo, este utiliza dos parámetros importantes para calcular la asignación de portadoras: el número de portadoras requeridas y el número de portadoras en uso. De esta forma se satisfacen la demanda para bajas cargas utilizando el número de portadoras requeridas y la demanda para altas cargas utilizando el número de portadoras utilizadas por cada RAN. Esto se realiza evaluando una ecuación en la que se asocia un “peso” a cada uno de los parámetros definidos, y finalmente se asigna la portadora a la RAN de mayor peso.

Dentro de la segunda categoría, se desarrollan algoritmos que consideren tres RAN, que se subdividen en dos tipos: los que buscan generalizar los esquemas de ADE continuo para tres RAN y los que desarrollan esquemas de ADE fragmentado.

El esquema de ADE continuo tiene una característica muy destacada, solo necesitará de dos bandas de guarda. Sin embargo hay tres aspectos muy importantes por resolver antes de considerar este escenario: 1) El orden en que las RAN deben asignarse en el espectro, pues la RAN central tiene la ventaja de poder crecer para ambos lados. 2) Cómo determinar qué portadoras liberar y cómo controlar las llamadas y 3) Cómo asignar una portadora liberada en un extremo del espectro al otro extremo del espectro, pues aún al realizar un *handover* en la RAN intermedia, no se garantiza que al intercambiar portadoras tengan el mismo ancho de banda.

Por el desarrollo que han tenido los algoritmos de ADE, la evolución a ADE fragmentado es el próximo paso. Por ejemplo, en el tercer aspecto considerado en la asignación continua de tres RAN, para asignar una portadora liberada en un extremo del espectro al otro extremo, basta con verificar que haya espacio para otra banda de guarda y asignar la portadora; pero también se introducen otros aspectos relacionados con control. Se incrementa el espectro sin uso en bandas de guarda, que disminuye la eficiencia del espectro y se debe garantizar que cada RAN reubicará sus portadoras al tener espacio disponible adyacente para mantener un esquema continuo que ofrece mayor eficiencia.

3.2 Algoritmos para ADE espacial

3.2.1 Limitaciones de operación

La principal limitación de ADE espacial es la interferencia que se puede crear los bordes de las de las áreas ADE vecinas, por lo que un buen principio de ADE espacial es la coordinación entre áreas y la inserción de bandas de guarda. Otras limitaciones de ADE espacial son:

1. **Patrones de tráfico de variación en el espacio;** para mejorar la ganancia de la eficiencia del espectro respecto a la asignación estática, es necesario analizar las variaciones en el espacio del tráfico con asignación estática, para luego medir y verificar el desempeño del sistema con asignación dinámica.
2. **Intercambio de unidades mínimas de espectro;** al igual que en ADE temporal, debe definirse la unidad que se intercambiará entre RAN, pues deben tomarse en cuenta los requerimientos de espectro de cada RAN.

3. **Adaptación espacial de la granularidad del espectro;** la resolución espacial con la cual se hará la asignación del espectro en la adaptación regional debe definirse. La resolución espacial cubre la definición de la dimensión de las áreas ADE, que es el área en la que la demanda de tráfico se considera constante en el espacio.

4. **Relación entre áreas ADE y celdas de RAN;** las áreas ADE cubren una distribución geográfica con equipo ADE en una RAN, pues es conveniente asignarse un solo nodo ADE a un área ADE. Por lo que la dimensión mínima de un área ADE es la dimensión de la mayor celda dentro del sistema de radio considerado.

5. **Compartiendo las medidas de carga de tráfico entre diferentes áreas ADE;** para que la asignación de espectro sea eficiente y no redundante, es necesario que cada área ADE tenga conocimiento del tráfico que manejan sus vecinos.

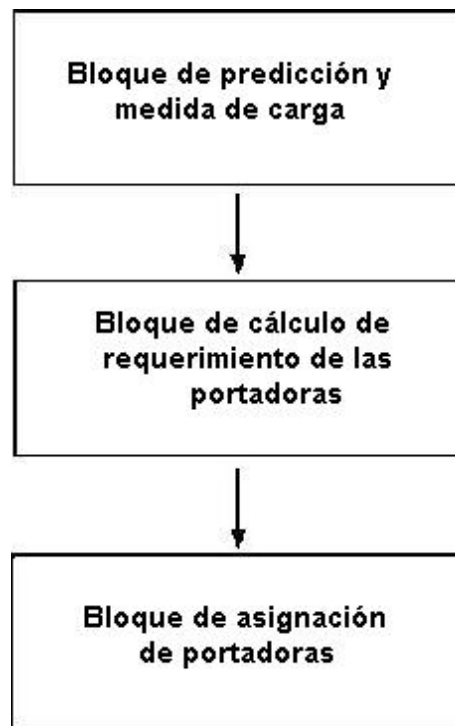
6. **Nodo inteligente de ADE;** es necesario que cada área ADE cree bandas de guarda para limitar la inserción de espectro sin uso, por lo que se deben realizar reasignaciones de espectro dentro de la misma área ADE, para celdas dentro de un borde externo del área ADE o para aquellas en la parte interna.

7. **Número de RAN compartiendo el espectro;** como se planteó al inicio de OverDRiVE, el objetivo es generalizar los esquemas para un número variable de RAN.

3.2.2 Diagrama de bloques funcional

El esquema ADE espacial puede ser descrito con el siguiente diagrama de bloques.

Figura 2 Diagrama de bloques funcional de ADE espacial; adaptación de la figura 29 “*Top-level algorithm functional blocks for spatial DSA*” del documento 13 de OverDRiVE *



* Véase la bibliografía

3.2.2.1 Medida y predicción de carga

Las investigaciones realizadas suponen que los esquemas espaciales tienen una predicción perfecta de carga provista por el valor actual de carga de tráfico, pues el tiempo es estático y no es posible realizar predicciones. Las variaciones de carga se manejan introduciendo un error aditivo.

3.2.2.2 Cálculo de requerimientos de portadoras

Se encarga de calcular cuántas portadoras se demandan para que el bloque de asignación de portadoras los procese.

3.2.2.3 Procedimiento de asignación de portadoras

Los algoritmos utilizados tendrán consideraciones más realistas. Además de utilizar algoritmos más complejos que considere más de dos RAN.

3.2.2.3.1 Asignación de portadoras para dos RAN

La base común de todos los esquemas que se plantean es la coordinación de la asignación de espectro entre diferentes áreas ADE al insertar bandas de guarda extras. Esto se hace para evitar el traslape en la misma porción de espectro en bordes de varias áreas vecinas. Esta consideración establece un número limitado de portadoras que pueden ser reasignadas entre las RAN compartiendo el espectro, y no asignar tantas portadoras como permita el espectro disponible. Este número limitado de portadoras permite realizar una asignación inteligente para aumentar el número de usuarios satisfechos.

Todos los algoritmos que se plantearán resuelven un problema de optimización en el que se deben determinar el número de portadoras de cada RAN que pueden ser asignadas, que implica un control en la inserción de las bandas de guarda.

Los algoritmos que se presentan se pueden dividir en dos grupos: los que introducen bandas de guarda en toda el área ADE y los que solamente las introducen en el “área de guarda”. A continuación se describen brevemente algunos esquemas de asignación:

1. **Límite ad hoc del número de portadoras asignables;** este límite se representa por el total de espectro disponible para ADE que puede ser asignado a los dos sistemas, una vez se ha definido el ancho de las bandas de guarda, usado para coordinar las asignaciones de espectro entre áreas ADE adyacentes. Dentro de este método, cada área ADE calcula los límites tomando en cuenta los requerimientos de portadora de los dos sistemas de las áreas adyacentes.
 - a. Cada área ADE calcula la potencial área de traslape entre cada RAN.
 - b. La demanda de portadoras de cada RAN se reduce por el potencial traslape que pueda causar.
 - c. El límite puede obtenerse de la suma de estas demandas de portadoras reducidas.

Con el propósito de limitar la asignación de portadoras para evitar el traslape entre áreas ADE adyacentes, una vez la asignación de portadoras es realizada. Cada área ADE será caracterizada por un número diferente de portadoras que pueden ser compartidas por ambos sistemas, dependiendo de la distribución espacial de carga de tráfico considerada.

2. **Límite común del número de portadoras asignables;** este esquema es una variación del anterior, pues calcula los límites para todas las áreas simuladas.

3. **Límite de portadoras asignables de acuerdo con el espectro disponible;** aquí se calcula el límite con base en el espectro disponible, pero no toma en cuenta los posibles traslapes. Inicialmente; se realiza una “asignación preeliminar de espectro”, en la que puede haber traslapes entre vecinos, y usa la probabilidad de que el sistema elimine estos traslapes reduciendo el número de asignaciones realizadas por área. Este proceso puede llamarse “eliminación centralizada de traslape entre portadoras”, por lo que es posible que cada asignación se reduzca más de lo necesario para evitar traslape y aumentar la eficiencia. Luego, la “asignación final de espectro” ejecuta el proceso de asignación sobre todas las áreas e incrementa en donde sea posible el número de portadoras asignadas, sin causar traslape. Este último proceso se llama “optimización centralizada de asignación de portadoras”.

4. **Límite ad hoc del número de portadoras asignables con el proceso de optimización de asignación de portadoras centralizadas;** el esquema anterior es una versión optimizada del primer esquema introduciendo el proceso de optimización de portadoras centralizadas. Dentro del primer esquema se calculaba el límite considerando el potencial traslape entre la demanda de portadoras.

Este esquema realiza el mismo proceso, pero la asignación es menos prudente, por lo que es posible que haya algunos traslapes después de la “asignación preeliminar”, y se hace necesario aplicar la eliminación centralizada de traslapes. Al igual que el esquema anterior, este algoritmo utiliza la optimización de asignación de portadoras centralizadas.

5. **Límite ad hoc del número de portadoras e introducción del área de guarda;** este esquema es similar al primero, pero limita la asignación de bandas de guarda al área de guarda.

6. **Límite común del número de portadoras asignables e introducción del área de guarda;** este esquema es similar al segundo, pero limita la asignación de bandas de guarda al área de guarda.

7. **Límite de portadoras asignables de acuerdo con el espectro disponible e introducción de la banda de guarda;** este esquema es similar al tercero, pero limita la asignación de bandas de guarda al área de guarda.

8. **Límite ad hoc del número de portadoras asignables con el proceso de optimización de asignación de portadoras centralizadas e introducción del área de guarda;** este esquema es similar al cuarto, pero limita la asignación de bandas de guarda al área de guarda.

3.2.2.3.2 Asignación de portadoras para tres RAN

Este es un proceso en el que se deben extender los modelos matemáticos definidos, por lo que se parte de los esquemas de control de bandas de guarda de dos RAN. Los algoritmos propuestos establecen el número de portadoras asignables dependiendo del espectro disponible, luego determinan la “asignación preeliminar de espectro” resolviendo la extensión del modelo matemático planteado. Los esquemas de ADE propuestos difieren entre ellos en la implementación de la “eliminación centralizada del traslape entre portadoras”, necesario para eliminar posibles traslapes entre portadoras. La “asignación final de espectro” se realiza ejecutando la “optimización centralizada de asignación de portadoras” después de la eliminación de traslapes en las áreas ADE. Algunos esquemas de asignación son:

1. **Eliminación total de traslape entre portadoras;** luego de la eliminación preeliminar de espectro, los traslapes en cada área se determinan realizando un proceso de evaluación que provee la cantidad de espectro que se traslapa en las tres RAN; se realiza la eliminación de áreas de traslape reduciendo la cantidad de portadoras de cada red. Aquí se sobreestiman los traslapes, y se basan en este criterio para ejecutar una sola vez el algoritmo de eliminación de traslapes.

2. **Eliminación progresiva de traslapes en el espectro;** en el esquema anterior, se realiza la asignación preeliminar y luego se eliminan los traslapes. Aquí, se evalúan los traslapes y se eliminan. Cuando se considera la siguiente área ADE, la evaluación de traslapes se realiza tomando en cuenta la eliminación previa.

3. **Eliminación progresiva de espectro reduciendo el número de portadoras asignables en las áreas adyacentes;** realiza una estimación correcta de las áreas de traslape, y limitando las portadoras de las adyacentes; evita traslapar de nuevo.

4. **Eliminación total de traslape entre portadoras e introducción de la banda de guarda;** este esquema es similar al primero, pero limita la asignación de bandas de guarda al área de guarda.

5. **Eliminación progresiva de traslapes en el espectro e introducción de la banda de guarda;** este esquema es similar al segundo, pero limita la asignación de bandas de guarda al área de guarda.

6. **Eliminación progresiva de espectro reduciendo el número de portadoras asignables en las áreas adyacentes e introducción de la banda de guarda;** este esquema es similar al tercero, pero limita la asignación de bandas de guarda al área de guarda.

4. FUNCIONES REQUERIDAS EN LA CAPA FÍSICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ADE

Desde el punto de vista de segmento de radio, la operación de ADE impacta el control tradicional del espectro, pues requiere que los equipos de radio, las terminales de los usuarios y los puntos de acceso de las redes de radio, tengan capacidad de manejar múltiples bandas. Desde el punto de vista del segmento de red, la operación de ADE tiene un impacto significativo en la operación de la red, pues todos los procesos necesarios para la operación de ADE se realizan a nivel de red.

Los procesos de reconfiguración están principalmente asociados con la coordinación de operación temporal y espacial de ADE. Estos diferentes procesos pueden requerir algunas entidades adicionales para soportar los mecanismos de reconfiguración. Este proceso de coordinación se puede realizar en un solo sistema (proceso vertical) o en todo el sistema (proceso horizontal).

- La administración de procesos horizontales permite la toma de decisiones y el proceso de administración derivada, soportando estas decisiones entre varios sistemas participantes en ADE.

- De acuerdo con el proceso de toma de decisiones, la administración de configuraciones verticales es un proceso en el que el sistema en el que se aplica ADE debe asegurar el monto necesario de espectro para cada equipo.

4.1 Funciones requeridas en la capa física

Es importante identificar las funciones requeridas de la capa física para soportar los requerimientos de múltibandas. De las capacidades múltibandas se debe analizar los rangos de frecuencia, la resolución espectral, la coexistencia espectral y los puntos de conmutación.

4.1.1 Rango de frecuencia

Desde el punto de vista de la capa física, cuanto más espacio se designe para operar ADE, mayor es el rango de frecuencia que deben soportar los equipos de radio, pues si se logrará integrar ADE en todo el espectro, el rango de frecuencia podría ser de hasta 5 GHz.

De los requerimientos del rango de frecuencias, uno importante es la capacidad de intervalo *duplex* variable que todos los equipos operando basados en FDD deben disponer para soportar la operación de ADE.

De hecho, cualquier esquema de ADE puede asignar simultáneamente portadoras para enlaces de subida y bajada que estén completamente separadas en el espectro.

4.1.2 Resolución de sintonización espectral

Dado el ambiente para el espectro en ADE asociado a cada sistema de radio, se debe analizar la capacidad de los equipos de radio de sintetizar portadoras con una resolución espectral dada. Básicamente, los requerimientos de resolución espectral son para operar en una portadora definida o en cualquier portadora.

Los mecanismos de ADE especifican la portadora en la que cada sistema debe operar, y esto está centralizado y basado en la información de la red. Es decir, los equipos de radio no contribuyen en el proceso y no requieren capacidades extras de la capa física para encontrarlas portadoras disponibles. La resolución espectral es inversamente proporcional al ancho de banda del sistema, y todas las cuantificaciones básicas se hacen en la asunción que la resolución espectral es discreta y que el equipo de radio operará con portadoras predefinidas y que no toma en cuenta su propio espectro. Además, el número de portadoras se puede incrementar considerablemente si se considera una resolución espectral continua. El adecuado intercambio de bloques de espectro entre los sistemas requiere un proceso de coordinación entre estos, que aún no se ha desarrollado.

4.1.3 Coexistencia espectral

La división del espectro derivada de los procesos ADE puede permitir que cualquier sistema de radio opere adyacente a cualquier otro sistema de radio. Esta coexistencia se puede lograr de forma apropiada si se asignan las bandas de guarda apropiadas. Los requerimientos de bandas de guarda son más importantes en algunas situaciones críticas, como en el proceso de ADE fragmentado o en los bordes.

Esta situación crítica ocurre cuando algún sistema adyacente puede coexistir solamente a expensas de una banda de guarda muy grande, que inevitablemente reduce la eficiencia. Se han definido los requerimientos básicos de los diferentes sistemas para asignar las bandas de guarda y permitir la coexistencia, particularmente en los enlaces de bajada. Es importante notar que la definición del tamaño de la banda de guarda es más importante que el espectro asignado para el sistema, pues una banda de guarda inadecuada reduce considerablemente la eficiencia del uso del espectro. La definición de la banda de guarda de dos sistemas está estrechamente conectada con el diseño conjunto de las mascararas del transmisor y receptor de los filtros de los equipos de radio. La operación de ADE respecto de la administración de bandas de guarda tiene dos requerimientos en el diseño de máscaras:

1. El diseño de la mascara global del filtro Tx / Rx tiene que ser angosta para que el espectro utilizado en bandas de guarda sea mínimo.

2. Las máscaras de los filtros de Tx y Rx deben ser reconfigurables. Esto significa que estas máscaras deben ser capaces de re-diseñarse dinámicamente para adaptarse a diferentes limitaciones en la coexistencia cuando un sistema adyacente cambie. También implica que los filtros deben poder transponerse a cualquier frecuencia.

El tamaño de las bandas de guarda es el resultado de la implementación práctica de la ACIR requerido en las máscaras de diseño del Tx y Rx de los equipos de radio. La ACIR es una atenuación global que asegura una capacidad de satisfacción dada y niveles de calidad de servicio para los sistemas que operan en las bandas adyacentes. Se espera que los requerimientos de selectividad en el diseño sean más importantes en los equipos de radio de las estaciones que en los usuarios, pues un filtro con un diseño muy selectivo requiere tecnología más cara.

4.1.4 Conmutación de frecuencias

Si hubiera predicción perfecta de carga, los resultados de ADE para esquemas de ADE temporal la asignación se podría mantener por largos intervalos de tiempo. Pero con predicción imperfecta de carga, los resultados de los esquemas de ADE temporal son más sensibles, pero se realizan las reasignaciones en intervalos medios de tiempo, con lo que podemos concluir que las variaciones temporales de los sistemas son mayores que el tiempo que necesitan para reasignar el espectro y permitir las conmutaciones entre portadoras en la capa física. Por lo tanto, la operación de los sistemas ADE no es relevante para la operación de los equipos de radio.

4.2 Funciones a nivel de red

Los principales requerimientos de ADE recaen en la reconfiguración concerniente a la terminal y al nivel de reconfigurabilidad que esta necesita; además hay varios requerimientos asociados con la reconfigurabilidad soportada dentro de la red.

Los cambios en los esquemas de transmisión de una banda a otra resultan en un cambio en los requerimientos de los *throughput* de la red y de retrasos, sin embargo no afecta considerablemente al analizar todo el ambiente. La red no es afectada significativamente por la reconfiguración de radio, pero aún así necesitan proveer los mecanismos básicos para facilitar la reconfiguración de los equipos de radio como la reasignación de recursos de radio, como las reasignaciones de portadoras en ADE.

4.3 Reconfiguraciones basadas en las tecnologías disponibles para soportar las funciones de ADE en la capa física

Es importante identificar las diferentes funciones necesarias de la capa física para operar ADE. Principalmente se analizará la implementación de estas funciones utilizando las tecnologías existentes considerando la capacidad de reconfiguración de las redes actuales. No todos los equipos de radio necesitan el mismo nivel de integración en las funciones de agilidad de radio frecuencias, diferentes criterios pueden ser utilizados para seleccionarlás, principalmente está conducida por:

- El grado de flexibilidad en la reconfiguración soportada por la agilidad de radio frecuencias
- El tipo de equipo de radio y sus requerimientos respectivos
- La capacidad de la tecnología disponible

La implementación de la agilidad requiere algunas reconfiguraciones en las capacidades de los equipos de radio para conmutar dinámicamente de una portadora a otra. Los requerimientos en la reconfiguración dependen principalmente de la complejidad, recayendo principalmente en el número de frecuencias a sintetizar. Las principales motivaciones para reconfiguraciones más flexibles son:

- A mayor número de frecuencias soportadas, más flexible debe ser la implementación para evitar implementar tantas rutas de radio como portadoras requeridas.
- Las frecuencias en las que los equipos de radio que operan con ADE no son conocidas necesariamente al diseñarlos y producirlo, y el espectro en el que se operará ADE puede incrementarse después de producido el equipo, por lo que es necesario que el equipo soporte grandes bloques de espectro para operar con ADE.

La implementación de los requerimientos de ADE no es la misma para los equipos de usuarios y los puntos de acceso a la red, pues los requerimientos para la comercialización de los equipos de usuarios son muy importantes, y es esencial que tengan bajo precio, tamaño reducido y bajo consumo de potencia.

Respecto de los tipos de equipos de radio y las capacidades de las tecnologías disponibles, los requerimientos en la agilidad de frecuencia impactan la elección de la arquitectura de los trancceptores apropiados.

4.3.1 Arquitectura de los trancceptores

Básicamente se divide en dos segmentos, tanto como para los equipos de usuario como para los puntos de acceso a la red, el radio *front-end* y el radio *back-end*.

El radio *front-end* incluye las funciones de frecuencias soportadas por los transmisores y receptores. El radio *back-end* incluye típicamente las funciones de procesamiento de la señal en banda base. Es importante notar que ADE se enfoca en las capacidades múltibandas de los equipos y no en los múltimodos, por esta razón la arquitectura genérica de los trancceptores impacta principalmente los RF *front-end* pues los RF *back-end* se relacionan con los múltimodos.

Las funciones básicas que los trancceptores de RF *front-end* deben soportar son:

- Las conversiones de subida y bajada

- La selección de canal

- El rechazo de interferencia

- La amplificación de señal

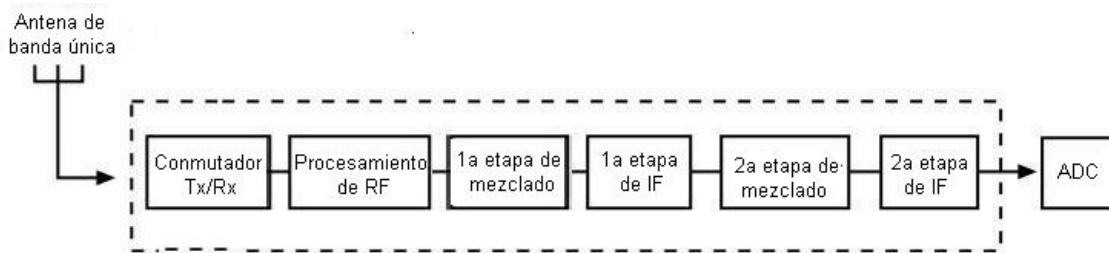
En la arquitectura tradicional de los trancceptores, el RF *front-end* es dominado por los componentes de *hardware*, pero esto provee poca flexibilidad. En el otro extremo, en una arquitectura solamente de *software* (SR, *software radio*), el RF *front-end* está dominado por *software* y los elementos de *hardware* juegan un papel de soporte; la digitalización se realiza cerca de la antena y es necesario un poderoso procesador para realizar todas las tareas requeridas, esto provee total flexibilidad para la reconfiguración.

Sin embargo, previo a alcanzar una arquitectura SR pura, es necesario utilizar arquitecturas intermedias mientras la tecnología avanza, estas arquitecturas están basadas en *software-defined radio* (SDR). La transición de SDR a SR es función del avance que se logre, y algunos grados de flexibilidad son gradualmente introducidos.

4.3.1.1 Arquitectura tradicional

Es arquitectura súper-heterodina. En el receptor, esta arquitectura toma dos o más conversiones de bajada de las etapas de frecuencia intermedia. La complejidad asociada con ésta incrementa con el número de pasos para conversiones de bajada. La implementación tradicional no provee flexibilidad múltibandas, pues los proceso de RF e IF utilizan elementos análogos estáticos. Generalmente, se consideran dos etapas en la operación de una sola banda.

Figura 3 **Arquitectura tradicional de banda única; adaptación de la figura 11 “Super heterodyne architecture with two stages for single band receiver” del documento 11 de OverDRiVE***



Desde el punto de Rx, cada etapa de conversión de bajada convierte una señal débil de RF a una frecuencia menor. A este nivel, los filtros realizan el rechazo de ruido interno y externo previo a la etapa de amplificación. La selección de canal se realiza por los filtros que eliminan los canales no deseados antes de llevar la señal de RF a banda base para procesarla. Partiendo de esto, una arquitectura súper heterodina de múltibandas implica tantas rutas de radio como bandas deseen ser cubiertas.

* Véase la bibliografía

Figura 4 **Arquitectura tradicional de múltiples bandas; adaptación de la figura 12 “Super heterodyne architecture with two stages for traditional multi-bands receiver” del documento 11 de OverDRIVE ***

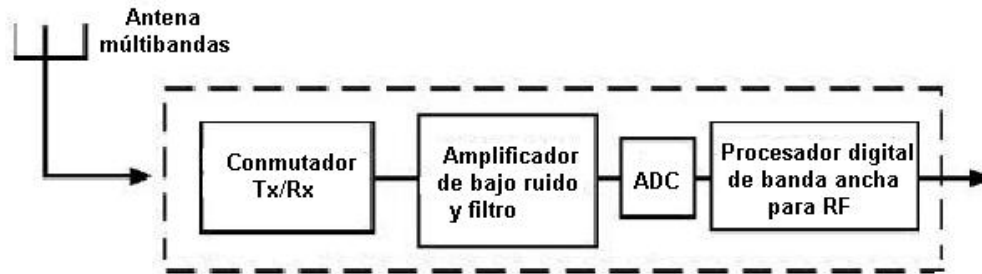


4.3.1.2 Arquitectura SR pura

La figura describe una arquitectura SR ideal. La digitalización se realiza justo después de la antena, y todos los procesos se realizan con procesamiento digital. Previo a la digitalización, un amplificador reduce la figura de ruido. Los filtros de antisolapamiento funcionan como filtros de preselección previos a la digitalización. Esta arquitectura provee agilidad de radio total y flexibilidad, pues todo está bajo control de *software*.

* Véase la bibliografía

Figura 5 Arquitectura SR pura; adaptación de la figura 13 “*Pure SR receiver architecture*” del documento 11 de OverDRIVE *



Sin embargo, partiendo de la tecnología disponible, es muy difícil realizarla y comercializarla a corto plazo pues requiere procesadores digitales muy rápidos y tienen alto consumo de potencia.

4.3.1.3 Arquitectura SDR como alternativa

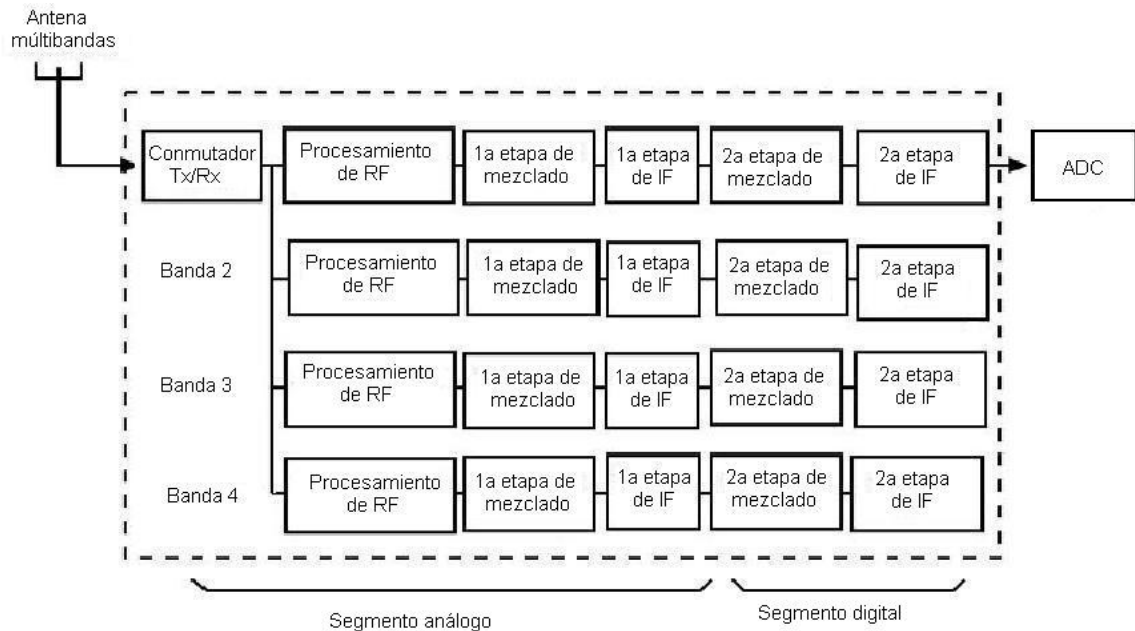
Considerando las limitaciones actuales para implementar la arquitectura SR, existen diferentes alternativas para implementar las propiedades múltibandas en los equipos de radio.

4.3.1.3.1 Arquitectura súper heterodina parcialmente digital.

Esta arquitectura está parcialmente digitalizada, realizando la segunda etapa de IP digitalmente.

* Véase la bibliografía

Figura 6 Arquitectura súper heterodina parcialmente digital; adaptación de la figura 14 “*Super Heterodyne architecture with 2 stages for 4 band receivers*” del documento 11 de OverDRIVE *



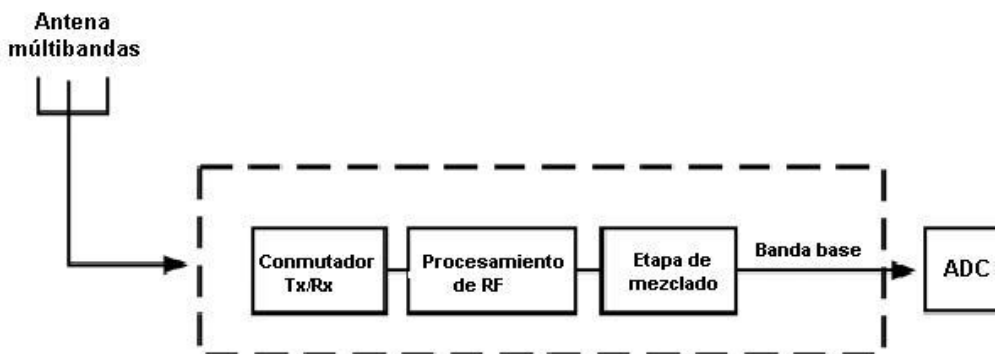
Ofrece buena calidad de selectividad debido a la presencia de la preselección y los filtros de canales, la ganancia es distribuida en varios amplificadores operando en diferentes bandas y la conversión de señales se realiza digitalmente en una frecuencia establecida. Sin embargo, presenta algunas desventajas, pues la complejidad es importante, pueden ser necesarios varios osciladores en la parte análoga y algunos filtros de IF especiales pueden necesitarse con lo que no se puede integrar esta arquitectura en un solo integrado.

* Véase la bibliografía

4.3.1.3.2 Arquitectura de conversión de bajada

Se denomina arquitectura homodina o IF cero. Podemos observar la conversión directa en el receptor en la que la señal de RF se convierte directamente a banda base.

Figura 7 Arquitectura de conversión de bajada; adaptación de la figura 15 “*Direct down conversion architecture for traditional single band receiver*” del documento 11 de OverDRiVE *



Principalmente ofrece baja complejidad, bajos requerimientos en el filtrado y se suprimen las imágenes de las señales pues se evitan las etapas de IF. Sin embargo, la conversión de frecuencias es bastante compleja y para suprimir las imágenes de las señales el oscilador local debe ser una señal compleja pues los componentes deben tener una cuadratura de fase precisa y un preciso balance de fase, y para soportar una ancha banda de operación el oscilador local de cuadratura debe ser de banda ancha.

* Véase la bibliografía

El convertidor análogo digital debe operar con una alta tasa de muestreo con buena resolución. El oscilador local radiará desde la antena y reflejará hacia el receptor, este problema se denomina “variación temporal” de conversión de bajada y es uno de los aspectos más importantes a considerar. Alguna distorsión de segundo orden se generan en la banda que se desea utilizar. Esta arquitectura está muy limitada en el segmento análogo, y es muy difícil unificarlo con las tecnologías disponibles.

4.4 Tecnología disponible y emergente para las arquitecturas SDR

Las investigaciones de la capa física dependen de las funciones soportadas por las arquitecturas que se empleen, como las antenas, el *front-end*, los convertidores análogo digital y los procesadores digitales. A continuación se describen las tecnologías disponibles y emergentes que pueden soportar la operación de ADE.

4.4.1 Antenas

La antena es un elemento clave en la operación de ADE; considerando la operación múltibandas, la flexibilidad consiste en operar en un amplio rango de frecuencias

Para poder operar ADE en un amplio rango de frecuencias, las antenas tienen tres requerimientos básicos: múltibandas, miniaturización y banda ancha.

Aunque hay tres aspectos importantes que se deben considerar en la realización física, que algunas veces no se ajustan a los requerimientos previamente definidos:

1. Directividad de la antena, esto es más importante que el tamaño
2. Ganancia de la antena, es proporcional al tamaño de la antena
3. Ancho de banda de la antena, es inversamente proporcional al tamaño de la antena

4.4.2 Módulos de RF *front-end*

Este es el segmento que representa más desafíos para la reconfiguración de *hardware*. Aquí se debe incluir filtrado flexible, amplificación flexible, mezclado flexible y síntesis de frecuencias de banda ancha.

4.4.2.1 Filtrado flexible

Este es la capacidad de filtrar señales en un ancho rango de frecuencias. Los filtros pasa bandas son usualmente los más caros y proveen poca flexibilidad. Las especificaciones técnicas para los receptores son:

- Proteger los amplificadores y mezcladores de la primera etapa de una señal con sobrecarga de la antena.
- Filtrar las imágenes en las arquitecturas superheterodinas.
- Eliminar las señales *out-band* para evitar que eventualmente se conviertan en señales *in-band*.
- La canalización

En un gran rango de operación de ADE, es necesario que en los receptores se mantenga una banda de IF tan alta como sea posible para permitir la cobertura de varias bandas de frecuencia. La linealización del amplificador de bajo ruido y el primer mezclador se debe mantener alta hasta que se realice la canalización.

Los filtros de imagen se pueden lograr mezclando filtros rechaza banda o con los apropiados filtros de preselección. Dos aproximaciones son posibles para realizar estos filtros de preselección:

1. El uso de banco de filtros

2. El uso de dispositivos electrónicos reconfigurables como filtros sintonizados.

Los filtros electrónicos sintonizados tradicionales consisten en diseños analógicos realizados con varactores o componentes distribuidos, los que emplean varactores introducen distorsión debido a la no-linealidad de sus componentes y los que emplean componentes distribuidos son diseñados para determinadas frecuencias. Por la flexibilidad que ofrecen los filtros electrónicos sintonizados se han analizado diferentes soluciones, entre ellas:

- Construcción de filtros en un sustrato que posea una constante dieléctrica que pueda ser variada electrónicamente
- Conmutadores en las líneas de transmisión para variar las características de los filtros.

4.4.2.2 Amplificación flexible

La amplificación es implementada al principio del segmento de RF y en la etapa de IF en la arquitectura súper heterodina. Independientemente de la arquitectura, en el receptor se realiza la amplificación de bajo ruido y en el transmisor la amplificación de potencia.

- ✓ **Amplificador de potencia;** se pueden considerar varias clases de amplificadores de potencia, entre ellos: amplificadores de potencia de banda ancha, amplificadores de potencia que cubren parcial y continuamente el ancho de banda y amplificadores de potencia que cubren parcial y fragmentadamente el ancho de banda.

- ✓ **Amplificadores de bajo ruido;** el ancho de banda de los amplificadores de bajo ruido es usualmente ancho y su potencia de salida puede ser extendida fácilmente con poco impacto en los requerimientos de los dispositivos.

Los amplificadores análogos operan arriba de los 40 GHz y pueden lograrse con la tecnología emergente de silicio-germanio. Actualmente, los amplificadores de potencia análogos de tecnología ultra lineal permiten soportar señales de múltiples bandas de diferentes transmisores agregando además alta fidelidad.

4.4.2.3 Síntesis de frecuencias flexibles

El oscilador local realiza la síntesis de frecuencias. El oscilador es usado dentro de los pasos de conversión para tener la señal a una etapa de IF. El oscilador genera la referencia de frecuencia como una entrada al mezclador para hacer la conversión de señales. El oscilador provee flexibilidad si es capaz de sintetizar varias portadoras con una resolución espectral fina.

Existen básicamente dos tipos de osciladores: Los osciladores de fase cerrada (VCO) y los osciladores de frecuencia estática.

4.4.2.4 Mezclado flexible

Desde el punto de vista del receptor, el mezclador convierte una señal de entrada a una banda menor. La señal de entrada y la banda menor dependen de la arquitectura. El mezclado consiste en realizar multiplicaciones entre las señales de entrada y el oscilador local. Existen básicamente dos tipos de mezcladores:

1. Mezcladores análogos; la multiplicación se realiza en forma analógica y usualmente consumen alta potencia y se basan en MMIC. Debido a la no-linealidad de los componentes, se introduce un poco de distorsión (productos de intermodulación). Por lo tanto la operación del mezclador se limita a operaciones de banda angosta. En la practica, para cubrir un ancho banda de frecuencia se utilizan varios mezcladores y un conmutador entre las diferentes entradas y salidas para cubrir toda la banda.

Las técnicas actuales de linealización basadas en mezcladores análogos no soportan simultáneamente baja distorsión, banda ancha y bajo ruido.

2. Mezcladores digitales; la multiplicación se realiza en forma numérica y es digitalmente reconfigurado con lo que se minimiza el número de VCO necesarios para las conversiones. La multiplicación puede realizarse con DDS (Síntesis digital directa) o DSP (Procesamiento digital de señal). Estas tecnologías permiten una máxima salida de frecuencia igual a la mitad de la frecuencia que se aplica con el reloj; esta frecuencia es suficiente para cubrir un amplio rango de anchos de banda

4.4.3 CAD, convertidores análogos digital

La digitalización es la clave de la reconfiguración en los equipos de radio SDR, pues las aplicaciones SDR requieren un rango dinámico elevado de operaciones con un gran ancho de banda. Es necesaria la eficiente conversión análoga a digital y digital a análoga. El desempeño del CAD determina qué tan cerca de la antena se puede ubicar. Dependiendo de la arquitectura, el CAD es el encargado de muestrear y del proceso de digitalización en las etapas de RF e IF.

Respecto del teorema de *Nyquist*, la digitalización directa consiste en muestrear la entrada análoga de RF al menos dos veces más rápido que la componente de frecuencia más alta. La portadora más alta de una señal de entrada de RF necesitará la mayor tasa de muestreo para digitalización directa. En la práctica, la realización de digitalización directa se acopla con un filtro antisolapamiento. Si la señal de RF es sobre muestreada, los requerimientos de los filtros antisolapamiento son menos exigentes.

Es importante notar que la tasa de muestreo de un CAD es cuatro veces más alta que la mayor componente de frecuencia, así la digitalización directa es más fácil.

La digitalización por cuadratura se realiza cuando la entrada análoga se divide en dos señales. Debido a que las señales tienen la mitad de ancho de banda de la señal original, estas señales pueden ser digitalizadas con la mitad de tasa de muestreo que la requerida para la señal original.

Cuando la digitalización se realiza en la etapa IF, la técnica de digitalización se denomina submuestreo. En la etapa de IF, el teorema de Nyquist también se aplica para señales de banda de paso.

4.4.4 Procesamiento digital

Dependiendo de la arquitectura, la digitalización se realiza más o menos cerca de la antena. Mientras más cerca este de la antena, mayor será el proceso realizado digitalmente. Las soluciones con arquitecturas digitales tienen la ventaja que proveen flexibilidad si las operaciones digitales pueden ser conducidas por *software* e integradas en el *hardware*.

El procesamiento digital de las operaciones en el *front-end* de RF para conversiones de arquitecturas requiere un gran número de instrucciones desde que las operaciones son realizadas a nivel de banda base.

Un sistema que opere a 2.5 GHz digitalizará directamente a 5 GHz; en este caso serán necesarias aproximadamente 600 instrucciones, por lo que se necesitaría un procesador digital que opere a 3000 GHz, que aún está lejos de las capacidades actuales. Esto es aún sin considerar las características de bandas múltiples.

Para el procesamiento digital, diferentes requerimientos en la reconfiguración pueden considerarse dependiendo de las características de los equipos de radio. Tres clases de reconfiguraciones se consideran:

1. Configurable, configuración en el proceso de fabricación
2. Reconfigurable, reconfiguración cuando se inicia y no durante la transmisión
3. Reconfiguración dinámica, reconfiguración cuando se inicia y durante la transmisión

4.5 Dispositivos SDR

Son elementos de redes inalámbricas cuyos modos de operación y parámetros pueden ser modificados post-fabricación por medio de *software*.

Con plataformas de *software* y *hardware* flexibles para manejar la constante evolución e innovaciones técnicas en la industria inalámbrica, como técnicas de modulación, protocolos, servicios y estándares, además de permitirle al usuario mantenerse comunicado en diferentes ambientes de redes inalámbricas.

En el contexto de SDR se extienden los límites tradicionales de los dispositivos de radio, a través y más allá de las infraestructuras de las redes y soportando subsistemas y sistemas. Y se unifican diferentes tecnologías y servicios de redes de radio. En general, SDR encierra una amplia gama de dispositivos con la habilidad de cambiar sus parámetros de operación y comportamiento vía *software*, por lo que no se puede concretar una definición específica de SDR, pues depende del nivel de variación de los parámetros de cada dispositivo. Algunas interpretaciones de SDR no solamente requieren un amplio rango de flexibilidad, sino que los dispositivos tengan suficiente inteligencia para buscar y monitorear la situación del espectro existente y reconfigurarse para tomar la máxima ventaja de cada situación.

4.5.1 Radio software download

Es el proceso por el cual se reparten datos de reconfiguración y/o nuevo código ejecutable a los dispositivos SDR para modificar su operación y desempeño, como técnicas de modulación, nuevos niveles de potencia, nuevas frecuencias para operar o cualquier otro parámetro que haya sido instalado en el dispositivo SDR.

Todo el *software* que se puede descargar, como información gratuita o por suscripción, datos propietarios, correo electrónico y material de multimedia se denomina *non-radio software download*.

Las regulaciones a definirse deben considerar la reconfiguración de datos y código ejecutable que afecta las características de operación de RF como las aplicaciones de usuario. La definición de estándares incluye las especificaciones para un protocolo *end-to-end*, que incluya el proceso de autenticación, reparto, verificación, transacción de acceso entre otros pues estas características están enfocadas en RSD a la reconfiguración de datos y código ejecutable que afecta los parámetros claves de RF dentro de los sistemas de radio.

4.5.2 Definiciones adicionales

Para poder analizar mejor la funcionalidad de los dispositivos SDR y de los proceso de RSD, se establecen dos definiciones adicionales:

Hardware de Radio Es el *hardware* básico dentro de un dispositivo inalámbrico que realiza las funciones de interfase de radio que incluye el procesamiento de la señal en banda base.

Software de Radio Es el *software* principal dentro de un dispositivo inalámbrico que está acoplado con el *hardware* de radio para lograr la funcionalidad de radio total. Los dispositivos SDR ofrecen grandes oportunidades de reconfiguración, vía RSD, de las funciones de radio; que se refiere a las terminales y a las estaciones bases.

5. *HARDWARE* DE RADIO PARA ADE

5.1 Diseño del transmisor

Este sistema es encargado de colocar la señal de banda base deseada en alguna frecuencia definida, agregando distorsión mínima y codificando la información. Algunos aspectos que determinan el desempeño del transmisor son:

1. **Potencia de salida:** es un parámetro fundamental de los sistemas de comunicación. Define los parámetros de alimentación y cobertura.
2. **Tiempo de encendido del transmisor:** generalmente, el transmisor se encuentra apagado para evitar pérdida de energía, por lo que es importante establecer un límite máximo para no introducir retardos en la transmisión.
3. **Load pull:** son los desfases de frecuencia en el transmisor como resultado de los cambios de potencia de la antena o del transmisor.

4. **Salidas espurias:** son frecuencias de salida indeseadas, generalmente son armónicos.

5. **Relación de señal al ruido:** describe el ratio de variación de la señal respecto del ruido

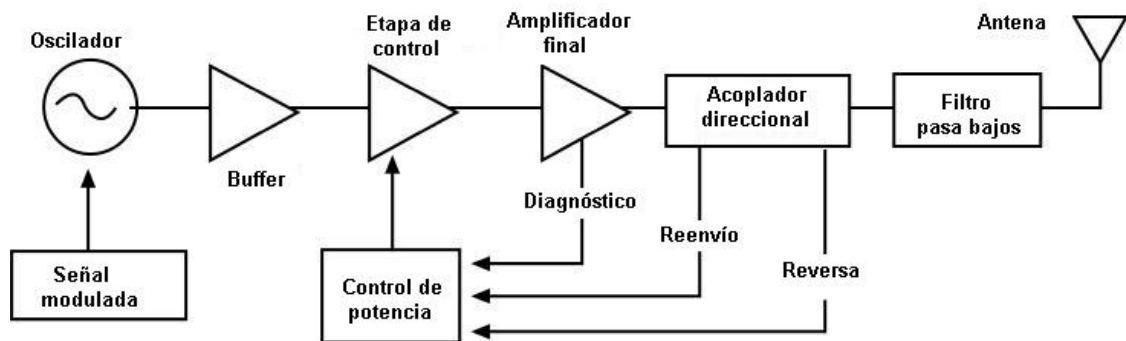
6. **Potencia de los canales adyacentes:** generalmente se debe a alto ruido de fase de los osciladores de los canales adyacentes.

7. **Estabilidad de frecuencia:** es importante, pues permite mantener, monitorear y regular los parámetros de transmisión.

8. **Distorsión de intermodulación:** se produce cuando se toma una señal por la antena del transmisor y mezcla los productos y se retransmiten.

5.1.1 Estructura tradicional de un transmisor

Figura 8 Estructura tradicional de un transmisor; adaptación de la figura 1.14 “*Typical transmitter architecture*”. página 38, “*RF Design Guide: systems, circuits and equation*” *



- Entrada modulada
- Oscilador
- La amplificación requerida por la etapa del buffer es principalmente función de la potencia de entrada disponible y la potencia de salida requerida. Si se desea minimizar la *load-pull* y aumentar el aislamiento entre el oscilador y la carga variable, se colocan varios buffers con atenuadores entre ellos, aunque se aumenta el ruido de banda ancha.

* Véase la bibliografía

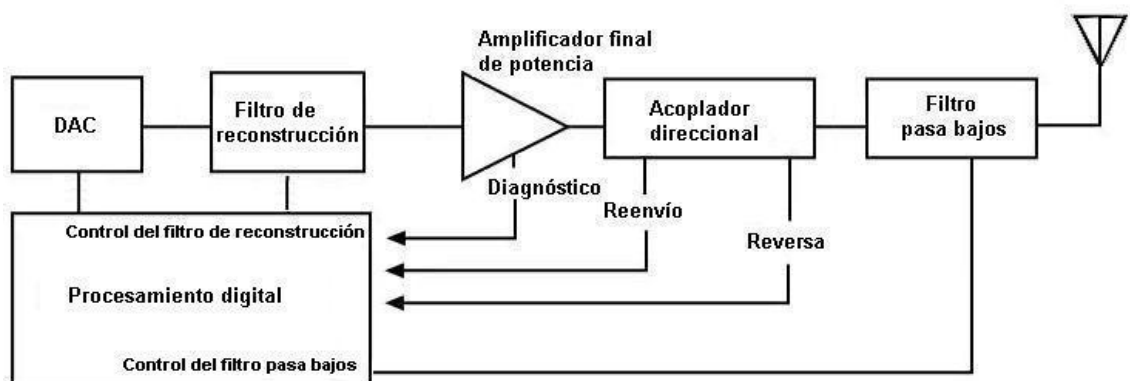
- La dirección relativa del acoplador direccional o sensor de potencia, y el filtro pasa bajos puede ser importante para operar en un amplio rango de potencias de salida. El factor de acople en el acoplador direccional debe ser suficientemente alto para permitir que una muestra con baja potencia pueda ser acoplada de nuevo en una salida con la máxima potencia establecida.
- La señal de diagnóstico en el amplificador de alta potencia usualmente incluye un dispositivo final de corriente, temperatura y manejo de la etapa de voltaje controlado; además de varios lazos de retroalimentación para controlar y muestrear todos los parámetros y no introducir inestabilidad de baja frecuencia en los lazos de control.
- El lazo de control de potencia es frecuentemente usado para controlar los encendidos y apagados del transmisor para minimizar la generación de componentes espectrales en canales adyacentes.
- El propósito del filtro pasa bajos es atenuar los armónicos de la señal transmitida; evitando la reflexión en los dispositivos y remezclarlos.
- Antena

El principal desafío de los circuitos de modulación es proveer modulación constante en un amplio rango de frecuencias de RF como en las frecuencias de banda base.

5.1.2 Estructura SDR de un transmisor

Como se puede observar en el diseño tradicional de un transmisor, los elementos y etapas necesarias para modular la señal y transmitirla no son extremadamente complicados. En la gráfica se muestra un bosquejo general del diagrama de bloques que se obtendría al incluir procesamiento digital para realizar algunas tareas.

Figura 9 Estructura SDR de un transmisor



Como se puede observar, los dispositivos de la etapa final mantienen su carácter análogo, solamente incluyen una línea de control para variar la frecuencia en la que operan.

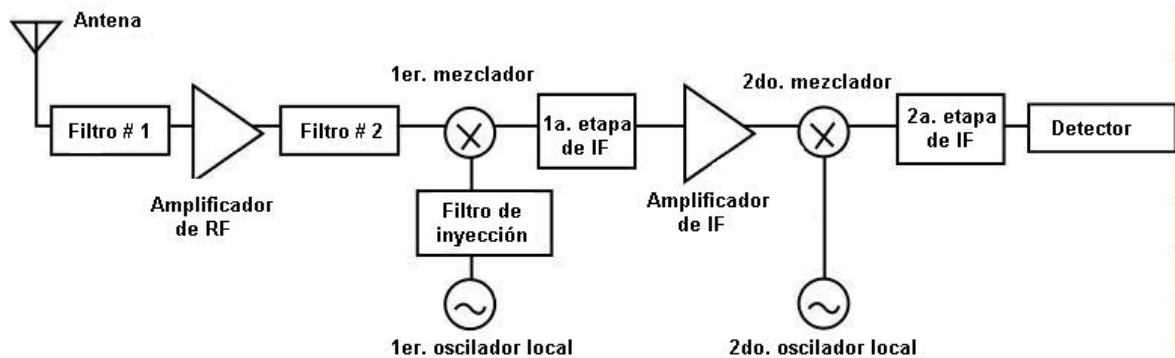
5.2 Diseño del receptor

Algunos aspectos que determinan el desempeño del receptor son:

1. **Sensitividad del receptor:** se refiere a la habilidad del receptor de responder a señales débiles en las que únicamente se considera el ruido térmico.
2. **Selectividad del receptor:** la capacidad del receptor de rechazar señales indeseadas de canales adyacentes.
3. **Rechazo de respuestas espurias:** la antena que se emplea generalmente responde a un rango mayor de frecuencias del que nos interesa, por eso es necesario que el receptor sea capaz de rechazar cualquier frecuencia indeseada.
4. **Rechazo de intermodulación:** mide la tendencia del receptor de generar su propia interferencia.
5. **Self-quieting del receptor:** se refiere a la reducción de la sensibilidad para prevenir la inhibición de señales débiles generadas por el receptor.

5.2.1 Estructura tradicional de un receptor

Figura 10 Estructura tradicional de un receptor; adaptación de la figura 1.1 “*Typical dual conversion receiver*”, página 7, “*RF Design Guide: systems, circuits and equation*” *



- Antena
- Filtro 1, usualmente denominado preselector y realiza tres funciones básicas: limitar el ancho de banda del espectro que llega al amplificador de RF y al mezclador para minimizar la distorsión de IM, atenuar las respuestas espurias, y suprimir la energía originada en el oscilador local del receptor.
- Amplificador de RF de figura de ruido, la ganancia y punto de intercepción son establecidos por los requerimientos de desempeño del receptor. Es importante que tenga alto aislamiento inverso para atenuar la energía del oscilador local y aislar los filtros 1 y 2.

* Véase la bibliografía

- Filtro 2, atenúa las respuestas de frecuencias espurias del receptor, los picos de frecuencia intermedia, el ruido y la frecuencia imagen originada o amplificada en la etapa RF y también suprime la segunda armónica originada en el amplificador de RF.
- El 1^{er} mezclador es por definición un dispositivo no lineal, por lo general necesita tener un alto punto de intercepción. El filtro de inyección puede ser requerido para atenuar ruido de banda ancha alrededor de la frecuencia del oscilador local y sus armónicos y para atenuar el segundo armónico en orden de no degradar el punto de intercepción de segundo orden del mezclador. Una propiedad importante del primer oscilador local es la banda lateral única de fase de ruido y oscilar independientemente de las variaciones de temperatura y potencia suministrada.
- El primer filtro de IF (usualmente un cristal) protege las siguientes etapas de las señales IM cercanas, provee selectividad de canal adyacente y atenúa la segunda imagen. El ancho de banda equivalente del ruido de una cadena de IF es una propiedad importante de los receptores, pues determina cuanto ruido alcanza el detector y determina el ancho de banda de modulación que puede ser recibido.
- El amplificador de IF es usualmente una etapa de alta ganancia. Su punto de intercepción debe ser alto si sigue directamente al mezclador.

Definidas estas etapas, el proceso es iterativo, aunque se pueden introducir algunas variaciones dependiendo de requerimientos específicos. El proceso de demodulación se asume en un circuito integrado con buen desempeño.

5.2.2.1 Algunos aspectos importantes

- Se debe realizar un estimado general de ganancias, pérdidas y puntos de intercepción para analizar si los requerimientos del sistema de sensibilidad y rechazo de IM son realizables.

- La selección de las frecuencias de IF determinará las especificaciones de los filtros, pues determina la ubicación de la imagen y la mitad de las respuestas de frecuencias espurias.

- La selección de la frecuencia del primer oscilador debe hacerse con tres consideraciones:
 1. Respuesta espuria de alto orden y frecuencia de “*self-quieting*” pueden favorecer una o más bandas de inyección, una vez que la frecuencia de IF ha sido seleccionada.

2. Los osciladores de alta frecuencia típicamente tienen mala fase de ruido de banda lateral única, y los rangos de sintonización de los VCO utilizados son menores para las bandas de inyección superiores que para los inferiores. El mezclador utilizado debe operar en un rango limitado de frecuencias, forzando la inyección de la banda lateral inferior.

 3. Un oscilador local de baja frecuencia que es multiplicado en la frecuencia, ofrece algunas veces más ventajas que un oscilador local de alta frecuencia sin multiplicación de frecuencia.
- El desempeño del mezclador es probablemente el factor más importante del desempeño del receptor.

 - El balance de ruido del mezclador determinará si es necesario un filtro de inyección.

 - Los requerimiento del filtro de RF se determinan al escoger las frecuencias de IF y la banda de inyección del primer oscilador local.

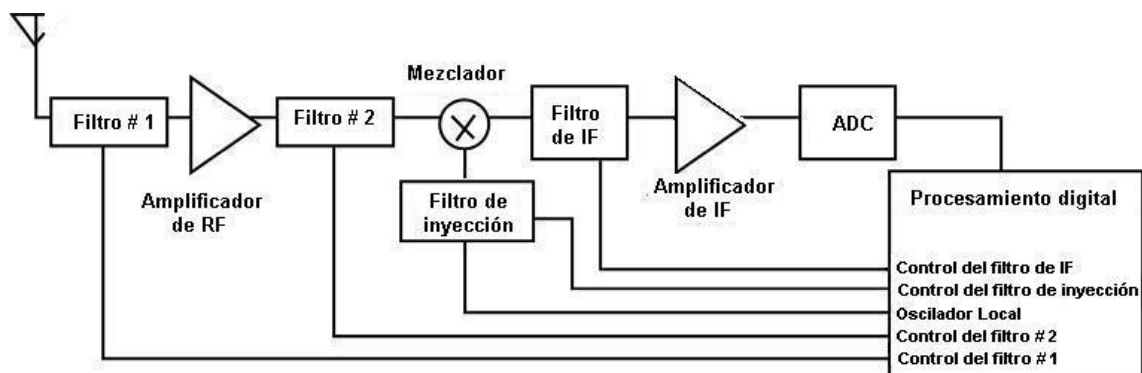
 - Típicamente la ganancia del amplificador de RF se sintoniza después que las propiedades de los otros circuitos son conocidas.

- La primera etapa del receptor tiene un diseño crítico, las posteriores tienen menos requerimientos.

5.2.2 Estructura SDR de un receptor

Como se observa en el diseño tradicional de los receptores, la complejidad del diseño puede aumentar dependiendo de la cantidad de etapas que se definan o de calidad de respuesta que se demande para poder recuperar la señal. Basándonos en la especificación para receptores SDR definida en el capítulo anterior, se presenta un diagrama de bloques general de un receptor SDR.

Figura 11 Estructura SDR de un receptor



Considerando los aspectos importantes definidos en el apartado anterior, el diseño de un receptor SDR para ADE tiene alta complejidad, pues la selección de frecuencias en las que se opera no es aleatoria, sino debe cumplir con ciertos requisitos para lograr recuperar la señal.

El circuito integrado encargado del procesamiento digital además de realizar las etapas correspondientes de recuperación de la señal a banda base, debe analizar si el *hardware* de la etapa análoga tiene capacidad para operar en la frecuencia y ancho de banda especificado antes de aceptar el cambio, realizar la recuperación de la señal en banda base, analizar y reparar errores por mencionar algunas funciones.

5.3 Consideraciones en el diseño de *hardware* de radio de ADE

El principal problema al diseñar *hardware* de radio para ADE son los filtros, pues deben operar en un amplio rango de frecuencias. Las consideraciones de diseño de los mezcladores y los amplificadores también son importantes, pues deben tomar en cuenta la respuesta en frecuencia y analizar todas las fuentes probables de señales indeseadas.

Para diseñar filtros que mantengan una buena respuesta y una función de transferencia aproximadamente constante se puede considerar:

1. Control mecánico de filtros por medio de dispositivos pasivos variables. Esta representa una alternativa sencilla de implementar, aunque será necesario diseñar una etapa con dispositivos activos para estabilizar la señal con un amplio ancho de banda. Además, aún con un diseño óptimo y miniaturizado, la etapa de control necesitará calibración y tendrá un margen de error muy alto.

2. Matrices de filtros en circuitos integrados. Aunque en algunas pruebas iniciales esta representa una buena alternativa para poder implementar un sistema de ADE en un amplio rango del espectro, sería necesario incluir un elevado número de filtros que reducirían significativamente la funcionalidad del sistema.

3. Filtros programables. Esta opción se puede considerar dentro de la arquitectura SR pura, pues aún no se dispone de la tecnología que haga rentable implementarlos. Sin embargo, si se diseñan filtros que tengan capacidad de variar sus parámetros de pasivos o etapas de filtros digitales independientes con capacidad de sintetizar la frecuencia del reloj que emplee el microprocesador principal para operar a cualquier frecuencia, se puede considerar un rango espectral más amplio.

Los dispositivos que se seleccionen para realizar las tareas de *hardware* de radio deben ser capaces reconfigurarse rápidamente para mantener calidad y grado de servicio, y tener bajo consumo de potencia.

6. SOFTWARE DE RADIO PARA ADE

El análisis y control por *software* de señales y sistemas simplifica considerablemente este proceso, pues generalmente se pueden implementar de una mejor forma los modelos matemáticos diseñados, aunque no se logran resultados ideales por las pérdidas que se introducen en la digitalización de la señal.

Las etapas de *hardware* del sistema son controladas por una etapa posterior que se encarga del control total del sistema, por lo que se puede considerar que los mezcladores, amplificadores y filtros análogos presentan un desempeño óptimo en todas las frecuencias que se programen.

6.1 Mezcladores

Los mezcladores utilizados en sistemas análogos son aproximaciones de modelos matemáticos que se utilizan para modificar la frecuencia de una señal. La mayoría de los dispositivos que se emplean agregan armónicos y componentes en frecuencias indeseadas, además que tienen un alto consumo de potencia.

El proceso digital de mezclado se reduce a algunas operaciones matemáticas, en las que fácilmente se pueden suprimir las señales indeseadas.

6.2 Amplificadores

La función teórica de un amplificador análogo es multiplicar una señal, dependiendo del dispositivo que se emplee se modifican algunas características de la señal, como amplitud y fase. Estas variaciones son indeseadas y se deben tener en cuenta las siguientes etapas del sistema.

El proceso digital de amplificaciones también se reduce a algunas operaciones matemáticas, aún más simples que el proceso de mezclado.

6.3 Filtros

Los filtros son sistemas con una función de transferencia selectiva en frecuencia, su realización física se basa en aproximación de modelos matemáticos y están limitados por las características de los dispositivos empleados para realizarlos.

Juegan un papel muy importante en el sistema, pues aunque la señal ya está limitada a un rango de frecuencias por las etapas de *hardware* de radio, aún se deben delimitar las frecuencias de la señal que nos interesa.

Al igual que en la etapa de *hardware* de radio, se deben diseñar filtros pasa banda en los que se pueda modificar la frecuencia a la que operan con ancho de banda constante, aunque la variación del ancho de banda es una tarea mucho más sencilla que en los filtros análogos.

Es importante tomar en cuenta que los sistemas digitales pueden representar una gran variedad de redes análogas con la misma función de transferencia. Es importante realizar un diseño óptimo y un análisis profundo de los filtros que se utilizarán, pues al aumentar las operaciones que se realizan o los elementos necesarios para obtener una respuesta con una margen tolerable de error puede implicar un aumento desmedido de los elementos de memoria o del tiempo de computo empleado.

Existen dos clasificaciones principales para los filtros digitales, los filtros de respuesta infinita al impulso y los filtros de respuesta finita al impulso. A continuación se presenta un análisis general de los requerimientos de los filtros ante las demandas de ADE y la implementación en dispositivos SDR.

Para realizar este análisis asumiremos que la señal que se digitaliza proveniente de la etapa análoga de mezclado varía de 200 a 1200 MHz y que el ancho de banda del canal es de 5 MHz. Inicialmente, se plantearon las funciones matemáticas que describirían los filtros con *Mathematica 4.1.1.0 para estudiantes*, el código utilizado está incluido en el Apendice 1. Luego se implementaron esas funciones en C++ 7.0 para analizar el tiempo de ejecución y la demanda de memoria que tiene el programa, el código utilizado está incluido en el Apendice 2.

6.3.1 Aspectos generales de filtros de respuesta infinita al impulso (IIR)

Para diseñar filtros IIR se emplean transformaciones de filtros en tiempo continuo a tiempo discreto. El diseño de filtros en tiempo continuo está muy desarrollado y los modelos matemáticos existentes generan funciones discretas simples en forma cerrada que preservan la respuesta en frecuencia de los filtros en tiempo continuo.

Aunque existen varias alternativas para diseñar esta clase de filtros, utilizaremos la invarianza al impulso con un filtro *Butterworth* y la aproximación de banda angosta de filtros en tiempo continuo.

La invarianza al impulso proporciona un método directo para calcular muestras de la salida de un sistema en tiempo continuo de banda limitada cuando las señales de entrada son de banda limitada y para obtener un sistema en tiempo discreto cuya respuesta en frecuencia está determinada por la respuesta en frecuencia de un sistema en tiempo continuo.

La curva de respuesta en magnitud de un filtro *Butterworth* exhibe una transmisión que decrece en forma monótona. La respuesta en frecuencia tiene una máxima desviación en la transmisión de banda pasante, una respuesta muy plana cerca de cero que se denomina de respuesta máximamente plana. El grado de planeidad de la banda pasante aumenta a medida que aumenta el orden del filtro.

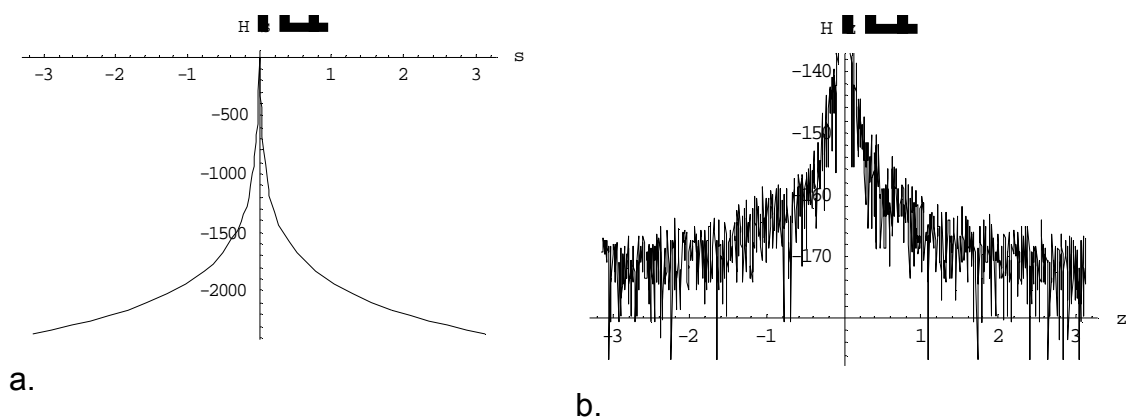
En la aproximación de banda angosta de filtros en tiempo continuo, se realizan simplificaciones y aproximaciones que resultan en una función de transferencia con las mismas características de una función más complicada. Además, la forma general de la función obtenida es muy similar a un filtro pasa bajos desplazado en frecuencia, tomando en cuenta la simetría de las funciones, por lo que se puede mantener relativamente estable la amplitud y ancho de banda del filtro pues no varían significativamente con frecuencia en que opere, como un filtro pasa bandas.

Las especificaciones del filtro son:

$$H(j\Omega) = \begin{cases} 0.95 & 0 \leq |\Omega| \leq F1 \\ 0.05 & F2 \leq |\Omega| \leq \pi \end{cases}$$

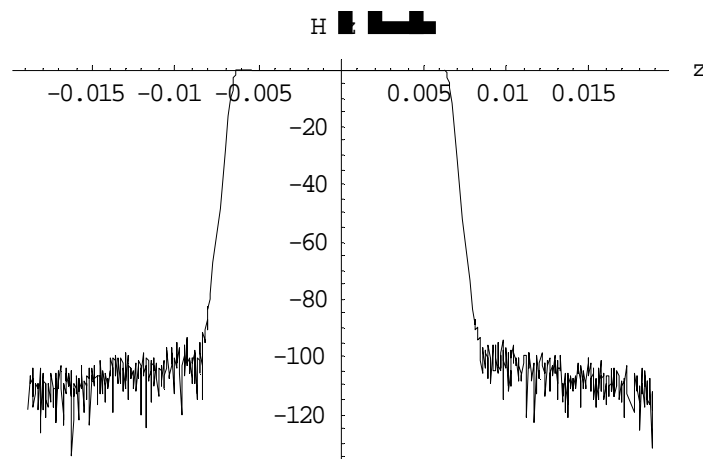
Al plantear el filtro *Butterworth*, se obtiene un filtro con $N = 44$ y la frecuencia de corte obtenida es el 97% de la especificada.

Figura 12 Función de transferencia del filtro de respuesta infinita a) tiempo continuo b) tiempo discreto



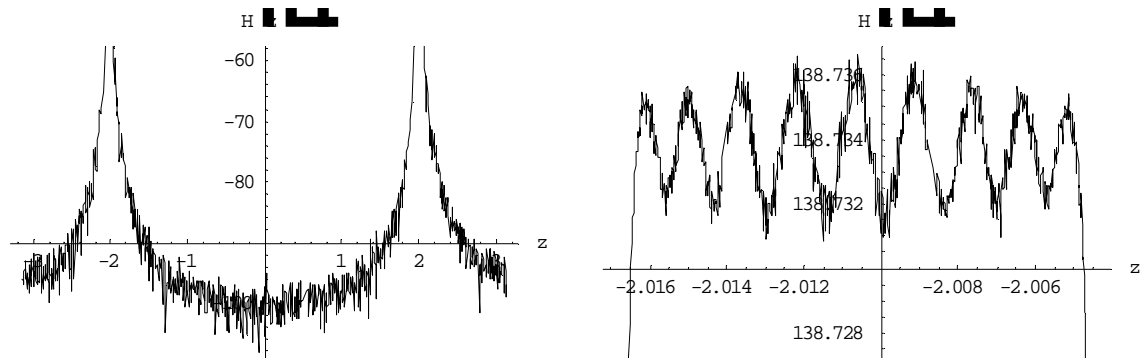
Podemos observar que la función de transferencia en tiempo continuo es muy buena, tiene una caída de 2000 dB. En tiempo discreto la caída es únicamente de 170 dB pero observando la Figura 13 podemos ver que tiene una buena respuesta en la banda de paso.

Figura 13 Vista de la función de transferencia del filtro de respuesta infinita en la banda de paso



Posteriormente, fue necesario desplazar la función de transferencia a la frecuencia que nos interesaba. Podemos observar en la Figura 14.a la gráfica obtenida al desplazar a 800 MHz, la banda de paso no está ubicada en 0 dB, pero la caída total es de 240 dB aproximadamente. Y en la Figura 14.b la banda de paso posee el rizado característico de los filtros *Butterworth*.

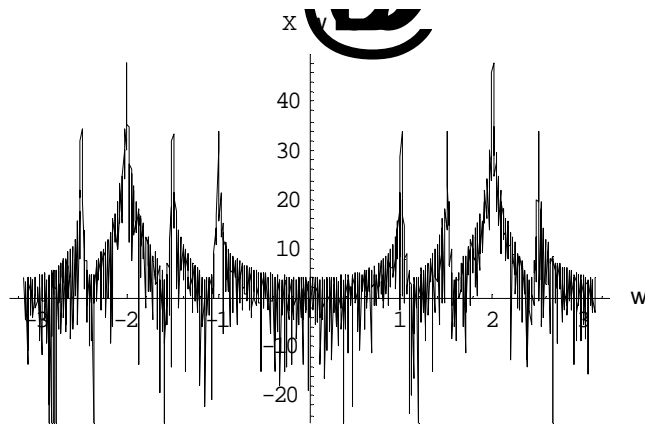
Figura 14 Filtro de respuesta infinita a) Función de transferencia desplazada b) Vista de la banda de paso



La función que se obtuvo para el filtro *Butterworth* es bastante sencilla, la simetría de la ubicación de los polos permite que la función que describe el comportamiento discreto sea aún más simple. Sin embargo, es importante indicar que el desplazamiento en frecuencia y la simetría que debe tener el filtro pasa bandas, aumenta considerablemente el número de operaciones para obtener la función de respuesta al impulso, aunque son bastante sencillas.

Para observar la respuesta de los filtros, utilizamos una señal de prueba con componentes atenuadas en 200, 400, 600 y 1000 MHz, y la señal que nos interesa en 800 MHz.

Figura 15 Señal de prueba



Los filtros se diseñan para ser utilizados en distintos servicios en tiempo real, por lo que se varió el número de muestras para poder comparar los resultados. En las siguientes figuras se puede observar la respuesta obtenida:

Figura 16 Espectro de la señal de salida utilizando 250 muestras para el filtro de respuesta infinita

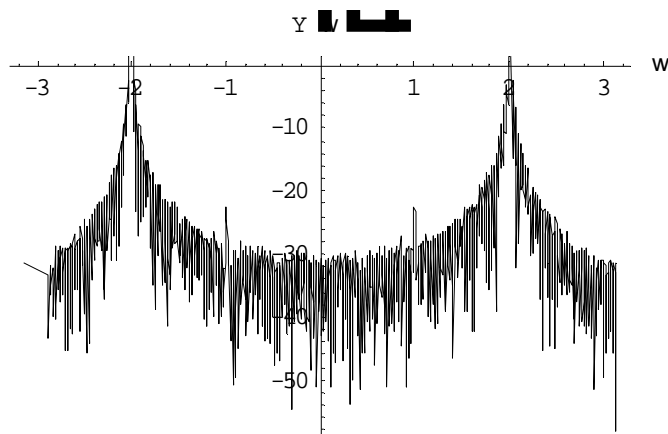


Figura 17 Espectro de la señal de salida utilizando 500 muestras para el filtro de respuesta infinita

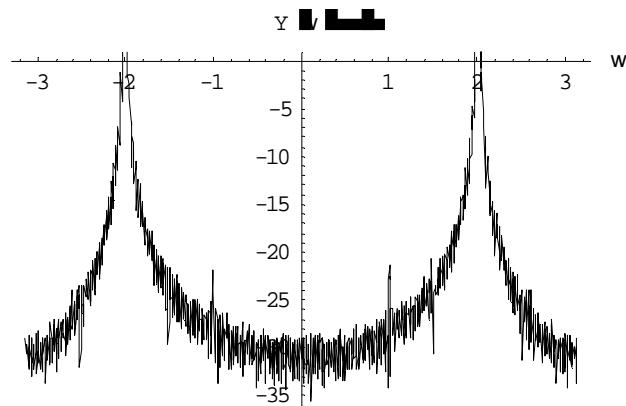
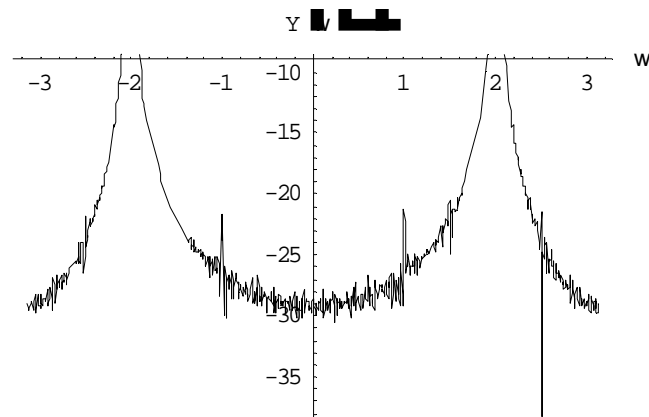


Figura 18 Espectro de la señal de salida utilizando 1000 muestras para el filtro de respuesta infinita



6.3.2 Aspectos generales de filtros de respuesta finita al impulso (FIR)

Las estructuras en forma directa simple teóricamente equivalentes a los sistemas en tiempo continuo se pueden comportar en forma distinta cuando se realizan empleando aritmética de precisión finita. Por el contrario, los filtros de respuesta finita están restringidos casi totalmente a realizaciones en tiempo discreto, y la mayoría de las técnicas de aproximación de la respuesta en amplitud de un sistema FIR asumen una restricción de fase lineal, evitando el problema de la factorización del espectro que complica el diseño directo de los filtros IIR.

Muchos sistemas se definen en forma idealizada, como resultado la respuesta al impulso de estos sistemas es no causal e infinita.. La forma directa de obtener una aproximación FIR causal a estos sistemas es truncar la respuesta ideal, y el método más simple se denomina método de ventanas; la función de respuesta al impulso del sistema tendrá la forma:

$$h[n] = h_{ideal}[n] * w[n]$$

Utilizaremos dos filtros pasa bajos ideales con fase lineal generalizada en paralelo y la ventana de *Blackman*. La ventana de *Blackman* tiene una respuesta bastante buena y la función que la define es simple.

Para variar la frecuencia en la que opera el filtro, únicamente debemos variar un parámetro de la función de respuesta al impulso de los filtros ideales, pues la ventana que estamos utilizando no depende de la frecuencia en la que se opere.

Las especificaciones de los filtros pasa bajos ideales son:

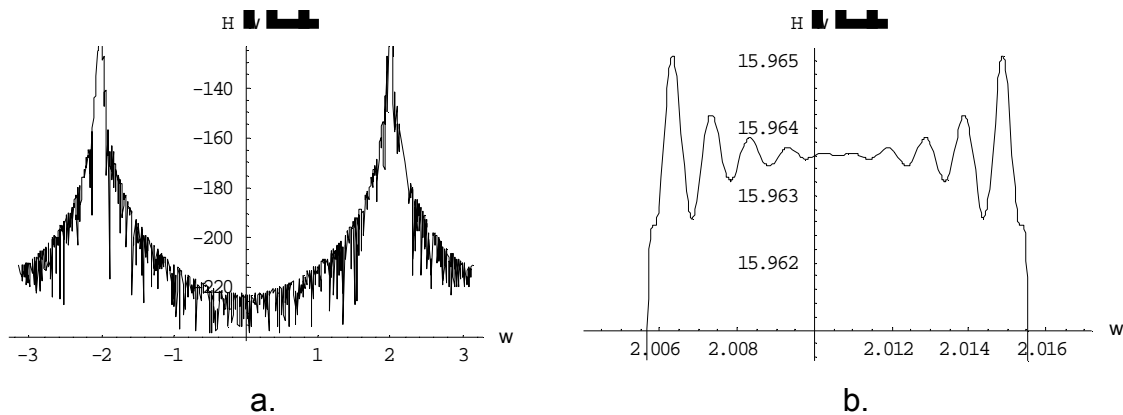
$$H_{LP1}(\omega) = \begin{cases} e^{-j\omega \frac{H}{2}} & 0 \leq \omega \leq Fc1 \\ 0 & Fc1 \leq \omega \leq \pi \end{cases} \quad H_{LP2}(\omega) = \begin{cases} e^{-j\omega \frac{H}{2}} & 0 \leq \omega \leq Fc2 \\ 0 & Fc1 \leq \omega \leq \pi \end{cases}$$

Al igual que el filtro IIR diseñado, el filtro pasa banda FIR operará en 800 MHz. La forma general de la ventana de *Blackman* es:

$$wB[n_] = 0.42 - 0.5 * \text{Cos}\left[\frac{2\pi * n}{Mw}\right] + 0.08 * \text{Cos}\left[\frac{4\pi * n}{Mw}\right];$$

Luego de definir las especificaciones del filtro, la respuesta al impulso tiene 12552 elementos y su respuesta en frecuencia es:

Figura 19 Función de transferencia del filtro de respuesta finita a) en todo el espectro b) banda de paso



Para observar la respuesta de los filtros, utilizamos una señal de prueba con componentes atenuadas en 200, 400, 600 y 1000 MHz, y la señal que nos interesa en 800 MHz. Su respuesta en frecuencia se puede observar en la Figura 15.

Los filtros se diseñan para ser utilizados en distintos servicios en tiempo real, por lo que se varió el número de muestras para poder comparar los resultados. En las siguientes figuras se puede observar la respuesta obtenida:

Figura 20 Espectro de la señal de salida utilizando 250 muestras para el filtro de respuesta finita

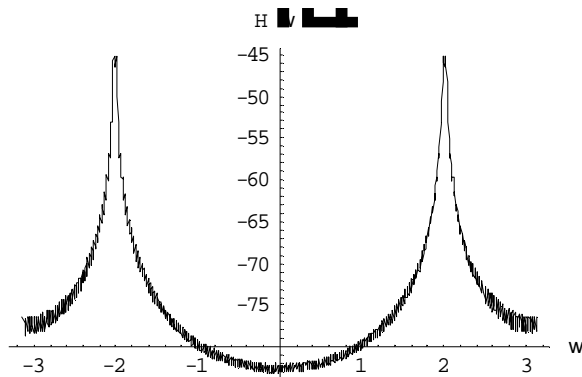


Figura 21 Espectro de la señal de salida utilizando 500 muestras para el filtro de respuesta finita

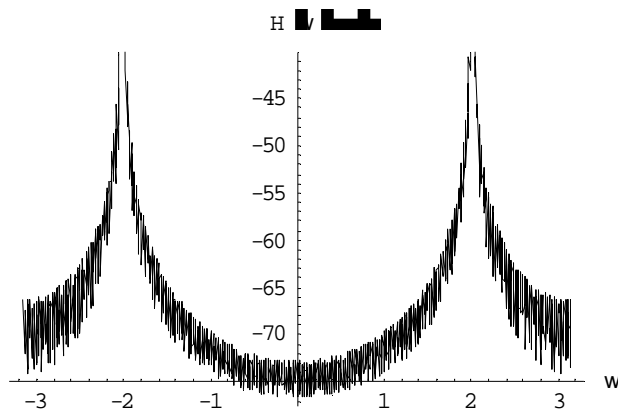


Figura 22 Espectro de la señal de salida utilizando 100 muestras para el filtro de respuesta finita

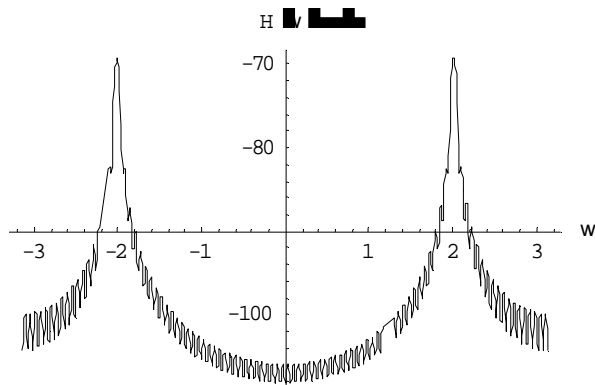
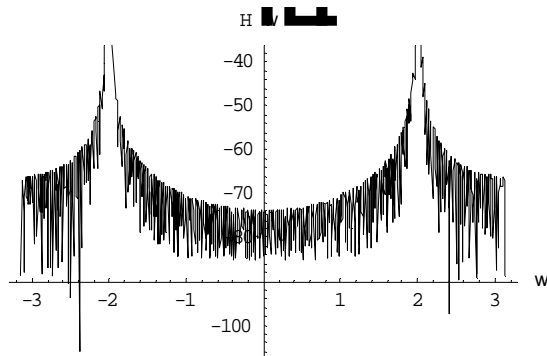


Figura 23 Espectro de la señal de salida utilizando 1000 muestras para el filtro de respuesta finita



6.3.3 Implementación de los filtros

Básicamente, los filtros son la implementación de las funciones matemáticas obtenidas en *Mathematica* a C++ , para obtener los retardos en cada caso. El código está incluido en el Apendice 2.

Para aproximar el comportamiento de los filtros que realizamos a filtros reales, se realizaron las siguientes simplificaciones:

1. El espacio de memoria de los vectores de la señal de entrada, la respuesta al impulso y la señal de salida está determinada por el número de muestras que se emplea.

2. El vector de la respuesta al impulso se calculará cada vez que se varíe la frecuencia de la portadora.

3. Todo el control del sistema lo realizará una etapa posterior.

El programa fue ejecutado en DOS, en un procesador con un reloj de 333 MHz. La tabla I muestra los resultados obtenidos.

Tabla I Resultados obtenidos

| | No. Muestras | Respuesta al Impulso | Señal de salida |
|------------|---------------------|-----------------------------|------------------------|
| IIR | 250 | ≈ 360 s | ≈ 660.3 ms |
| | 500 | ≈ 720 s | ≈ 2.5274 s |
| | 1000 | ≈ 1408 s | ≈ 10.1648 s |
| FIR | 250 | < 0 μ s | < 0 μ s |
| | 500 | < 0 μ s | < 0 μ s |
| | 1000 | < 0 μ s | 54.9450 ms |

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La saturación de la red que afrontarán los operadores por la masificación de los servicios de banda ancha es eminente, y aunque el planteamiento teórico de la asignación dinámica de espectro es una buena alternativa, su implementación en un futuro próximo es poco probable. Aún más importante que el desarrollo de tecnología que mantenga una buena respuesta en todo el espectro, los principales problemas que tiene la implementación del espectro como un recurso colectivo es la regulación y seguridad.

Sin embargo, la implementación de ADE en los rangos espectrales asignados a cada operador presenta una muy buena alternativa. De esta forma se pueden brindar anchos de banda que permitan acceder a algunos servicios que se disponen en las redes alambradas y no será necesario compartir los esquemas de seguridad y control de cada red.

Independientemente del rango espectral que se utilice para implementar ADE o cualquier otra solución para la evitar la saturación de las redes de RF, el uso de procesamiento digital en los dispositivos de radio es evidente. Además de darle mucha flexibilidad a los sistemas, al mejorar los procesos de digitalización de señales la calidad de la respuesta aumentará considerablemente hasta que los procesos análogos solamente complementen los procesos digitales. Sin embargo, aún se deben analizar muchos aspectos de los dispositivos digitales de *hardware* y *software*.

Aunque el análisis de las probables tendencias de la tecnología está fuera del alcance de este trabajo, se planteó un bosquejo general de algunos aspectos importantes.

7.1 Análisis de *hardware* de radio

Muchas características de los dispositivos SDR ya están siendo implementadas en muchos dispositivos, aunque no con tanta flexibilidad para operar en todo el espectro. El principal desafío que afrontan los diseñadores de *hardware* es desarrollar dispositivos rentables con alta velocidad de operación. Los dispositivos SDR representan la transición entre sistemas análogos a sistemas digitales.

7.2 Análisis de *software* de radio

En el capítulo 6 se plantearon en forma general dos filtros digitales, uno de respuesta infinita al impulso y otro de respuesta finita al impulso. No fue necesario un diseño más específico, pues no se dispone de recursos para implementarlo y con los planteamientos realizados podemos obtener una buena idea de hacia donde se dirige la tecnología.

Al observar los resultados, es bastante claro que el filtro de respuesta finita presenta mejores características, que básicamente se deben a:

- La operatoria es mucho más sencilla, las funciones matemáticas que se utilizan son menos y más simples.
- Son implementaciones de sistemas discretos, por lo que se suman menos errores por truncamiento de la respuesta al impulso.
- En este caso en particular, la ventana que utilizamos está definida únicamente para números reales, por lo que se evita mucho procesamiento al no realizar operaciones con números complejos.

El principal problema de los filtros IIR es la complejidad de su función de respuesta al impulso. Si una vez definido el número de muestras que se deben procesar solamente se actualiza el vector de respuesta al impulso, en vez de calcularlo para cada cambio de la frecuencia de la portadora, la respuesta de estos mejoraría considerablemente. Es importante notar que las aproximaciones obtenidas para definir filtros IIR son secuencias infinitas, y aún si el número de muestras no fuera una limitación, no es práctico realizar tantas operaciones.

CONCLUSIONES

1. La implementación de las redes móviles expone importantes dificultades y alta complejidad.
2. Aunque la asignación dinámica de espectro flexibiliza el uso del espectro, aún es necesario analizar los patrones de variación de tráfico para obtener un desempeño óptimo.
3. Los dispositivos SDR son probablemente la mejor alternativa como dispositivos de redes móviles por la alta reconfiguración que ofrecen.
4. El diseño del hardware y software de radio enfrenta grandes desafíos para soportar la flexibilidad que necesitan las redes futuras.

RECOMENDACIONES

1. Considerar todos los posibles escenarios y limitaciones para lograr una eventual integración de todas las redes.
2. Priorizar los aspectos relacionados con seguridad, pues es una característica fundamental de las redes públicas asumiendo el espectro como recurso colectivo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Sedra, Adel y Smith, Kenneth. **Circuitos Microelectrónicos**. 4ª. Edición. México. Oxford University Press. 2000. 1237 pp.
2. Stalling, William. **Comunicaciones y Redes de Computadoras**. 6ª. Edición. Madrid. Pearson Educación. 2000. 776 pp.
3. Vizmuller, Peter. **RF Design guide, system, circuit and equation**. Estados Unidos: Artech House, 1995, 245 pp.

Páginas web

1. Aurél Rónai M, Barz C, Frank M, Maihöfer C, Petrescu A, Pilz M, Pop O, Szabó A, Tölle J, Tönjes R, Wolf M, “**Concept of Mobile Router and Dynamic IVAN Management**” OverDRiVE deliverable D07, IST-2001-35125/OverDRiVE/WP3/D07, Marzo 2003.
www.overdriveproject.org 29 de junio de 2,004
2. Grandblaise D, Moessner Klaus “**Spectrum Efficiente Uni- and Multicast Services over Dynamic Multi-Radio Networks in Vehicular Enviroments**”, OverDRiVE deliverable D11, IST-2001-35125 OverDRiVE\WP1\D11, Diciembre 2003.
www.overdriveproject.org 29 de junio de 2,004
3. Janneteau, Christophe, “**OverDRiVE Scenarios, Services, and Requirements**”, OverDRiVE deliverable D03, IST-2001-35125/OverDRiVE/WP1-2-3/D03, Septiembre 2002.
www.overdriveproject.org 29 de junio de 2,004

-
4. Leaves P, Breveglieri M, Grandblaise D, Hamacher C, Migneret F,
**“Specification and Performance of Dynamic Spectrum
Allocation including Evaluation of Spectrum Coexistence”**,
OverDRiVE deliverable D13, IST-2001-35125
OverDRiVEWP1\D13, Febrero 2004. www.overdriveproject.org
29 de junio de 2,004

Desplazamiento de Filtro Butterworth pasa bajos

Para canal de 5 MHz, que varíe de 200 a 1200 MHz después de la primera etapa de mezclado.

Frecuencia de muestreo FN

$$FN = 2500;$$

La frecuencia de corte sería :

$$F1 = \frac{2.5}{FN} 2 p;$$

Si dejamos una banda de guarda de 10% tendríamos :

$$F2 = \frac{2.75}{FN} 2 p;$$

$$Fv = \frac{f}{FN} 2 p;$$

$$|H_c(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}} \quad \text{Y} \quad |H(j\omega)|^2 = \frac{0.5}{0.05} \frac{0.5}{F2} \quad \text{E}$$

$$Np = \text{Ceiling} \left[\frac{2 \cdot \log \left(\frac{F1}{F2} \right)}{2 \cdot \log \left(\frac{1}{0.95} \right)} \right]$$

44

$$\omega_c = \frac{F1}{\sqrt[2N]{\frac{1}{0.95^2} - 1}}$$

$$F1 = 0.975029$$

0.975029

Y observamos que la frecuencia de corte es el 97.5% de la frecuencia deseada, y N = 44. Ahora definimos la función de los polos,

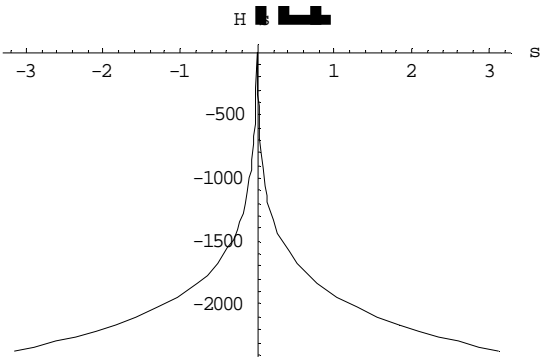
Inicialmente, calcularemos las características del filtro en tiempo continuo y la respuesta del filtro pasa bajos para señal discreta :

$$s = \frac{1}{\Delta} \left[\frac{1 - \alpha^{Np+1}}{1 - \alpha \cdot z^{-1}} \right];$$

$$B = \sum_{l=0}^{Np} b_l z^{-l}$$

$$H = \frac{B}{1 - \alpha \cdot z^{-1}}$$

Plot [redacted] p, p, AxesLabel["H"]

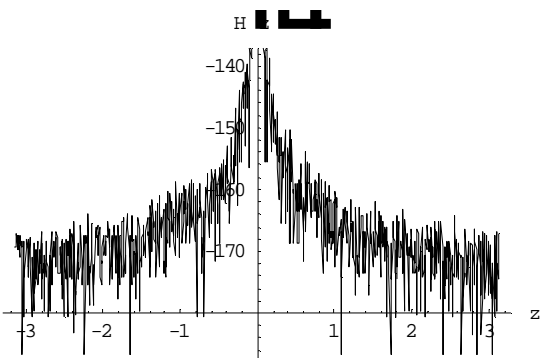


..Graphics ...

A [redacted]

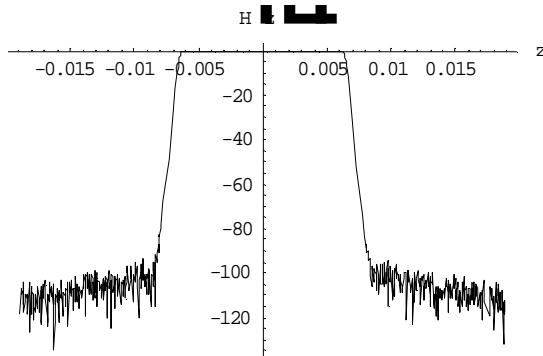
HZ [redacted]

Plot [redacted] p, p, AxesLabel["H"]



..Graphics ...

Plot 20 * mag(0, As #Z^v, 3 F1, 3 F1, AxesLabel @ "H", "H"



..Graphics ...

Ahora calcularemos la salida del filtro desplazado a 800 MHz.

$$sa[k] = \sum_{n=0}^{Np-1-k} a^{k-n} \frac{p}{z^{Np}} \cdot \sum_{m=0}^{k+n} b^{k+m} Fv[30, m]$$

$$sb[k] = \sum_{n=0}^{Np-1-k} a^{k-n} \frac{p}{z^{Np}} \cdot \sum_{m=0}^{k+n} b^{k+m} Fv[30, m]$$

$$Ba = \sum_{h=0}^{Np-1} a^{h} \frac{p}{z^{Np}}$$

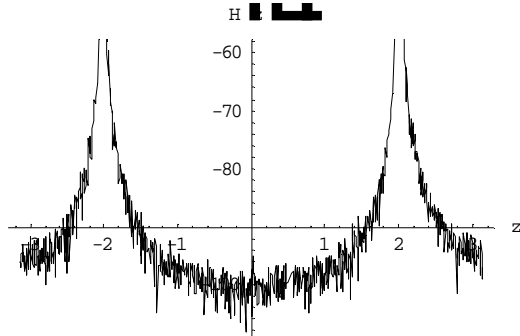
$$Bb = \sum_{h=0}^{Np-1} b^{h} \frac{p}{z^{Np}}$$

$$Aa = \sum_{h=0}^{Np-1} a^{h} \frac{p}{z^{Np}}$$

$$Ab = \sum_{h=0}^{Np-1} b^{h} \frac{p}{z^{Np}}$$

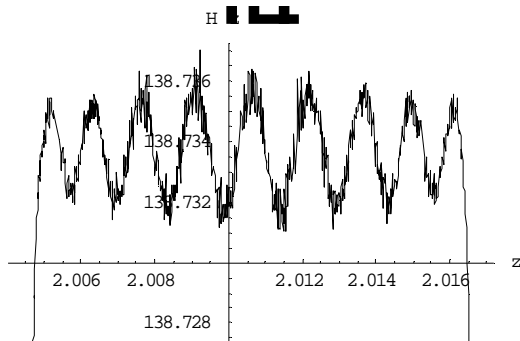
$$HZd[k] = \sum_{n=0}^{Np-1-k} \frac{Aa}{Aa} \frac{p}{z^{Np}} + \sum_{n=0}^{Np-1-k} \frac{Ab}{Ab} \frac{p}{z^{Np}} - \sum_{n=0}^{Np-1-k} a^{n} \frac{p}{z^{Np}} - \sum_{n=0}^{Np-1-k} b^{n} \frac{p}{z^{Np}}$$

Plot 20* 1/g 10, Axes Hz, w, p, p, AxesLabel @ "H



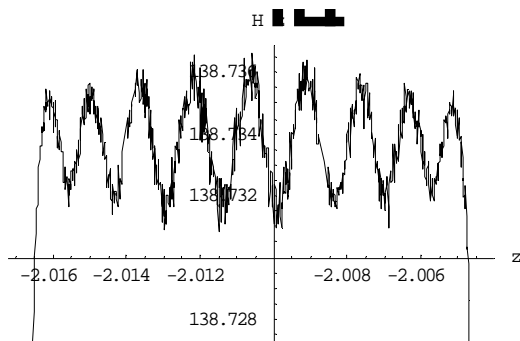
..Graphics ...

Plot 20* 1/g 10, Fv 80, Fv 80, AxesLabel @ "H



..Graphics ...

Plot 20* 1/g 10, Fv 80, - Fv 80, AxesLabel @ "H

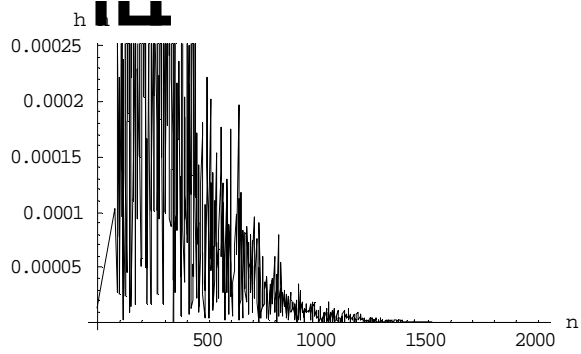


..Graphics ...

Podemos observar que posee el ondulado característico de los filtros Butterworth



Plot h , 2000, AxesLabel $\{h, n\}$



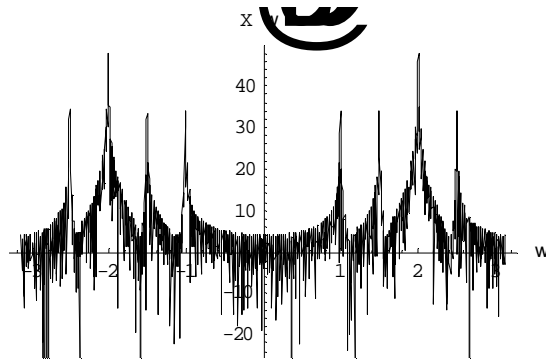
..Graphics ...

Definimos una señal de prueba :

$x[n] = 0.2 \cos\left(\frac{2\pi}{1000} n\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{500} n\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{800} n\right)$

$x[n] = 0.2 \cos\left(\frac{2\pi}{1000} n\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{500} n\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{800} n\right);$

Plot x , 0, 20, AxesLabel $\{x, w\}$



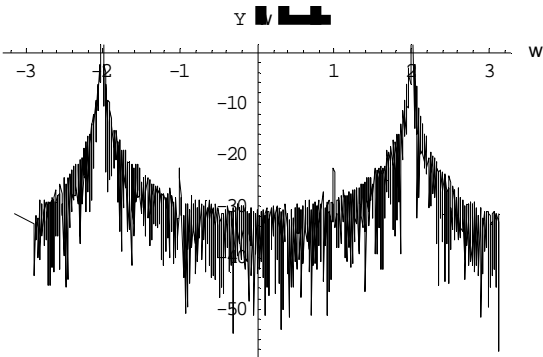
..Graphics ...

Para 250 muestras

$y1[n] = x[n] * h[n]$

$y1[n] = x[n] * h[n];$

```
Plot [p, {w, -3, 3}, AxesLabel -> {"Y", "w"}]
```



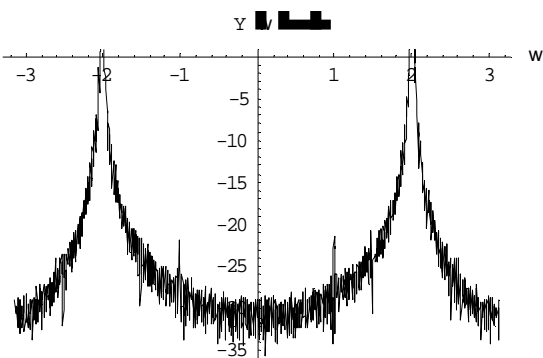
..Graphics ...

Para 500 muestras

```
y2 = Table[0.5 Cos[2 Pi w], {w, -3, 3, 1/500}];
```

```
Y2 = Fourier[y2, 500];
```

```
Plot [Abs[Y2], {w, -3, 3}, AxesLabel -> {"Y", "w"}]
```



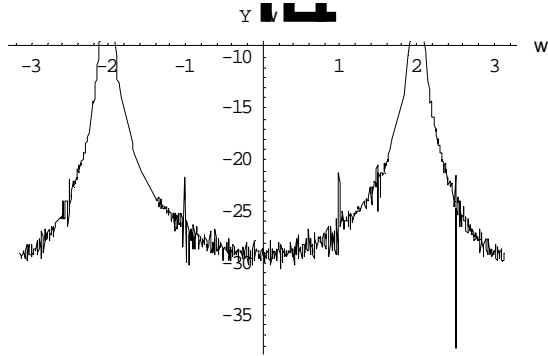
..Graphics ...

Para 1000 muestras

```
y3 = Table[0.5 Cos[2 Pi w], {w, -3, 3, 1/1000}];
```

```
Y3 = Fourier[y3, 1000];
```

Plot p, p , AxesLabel $\{w, Y\}$



..Graphics ...

Filtro pasa banda ideal con ventana de Blackman

Para canal de 5 MHz, que varíe de 200 a 1200 MHz después de la primera etapa de mezclado.

Frecuencia de muestreo FN

$$FN = 2500;$$

La frecuencia de corte sería :

$$Fc1 = \frac{f_c}{FN} * 2\pi;$$

$$Fc2 = \frac{f_c}{FN} * 2\pi;$$

La función de transferencia del filtro pasa banda ideal se puede escribir como la resta de dos filtros pasa bajos :

$$H_{LP1} = \frac{M}{2} \text{sinc} \left(\frac{M}{2} (\omega - \omega_c) \right)$$

$$H_{LP2} = \frac{M}{2} \text{sinc} \left(\frac{M}{2} (\omega - \omega_c) \right)$$

$$hlp1[n] = \frac{M}{2} \text{sinc} \left(\frac{M}{2} (n - n_c) \right) \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{M} (n - n_c) \omega_c \right)$$

$$hlp2[n] = \frac{M}{2} \text{sinc} \left(\frac{M}{2} (n - n_c) \right) \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{M} (n - n_c) \omega_c \right)$$

Ahora, se calculan los parámetros de la ventana de Blackman.

Asumiendo un margen de frecuencia del 5%

$$DW = \frac{.25}{FN} * 2\pi;$$

$$A = -20 * \log_{10} \left(\frac{0.001}{0.003} \right)$$

$$26.0206$$

$$Mw = \frac{A - 8}{2.285 * Dw}$$

12551.7

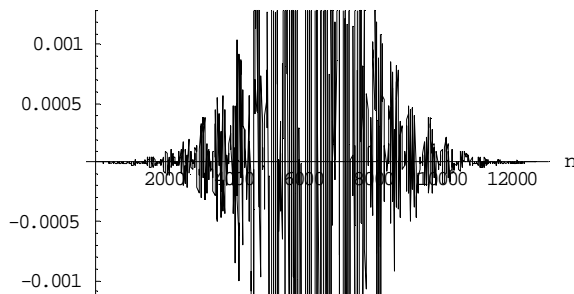
$$wB = 2 - 0.5 * \cos\left(\frac{P}{Mw}\right) + 3 * \cos\left(\frac{P}{Mw}\right)$$

Para observar el funcionamiento del filtro,
 asumimos que la frecuencia a utilizar será de 800 MHz.

f = 800;

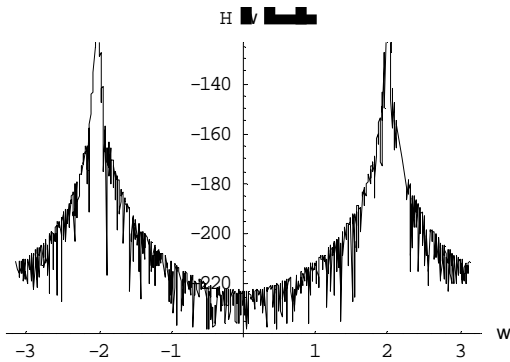
Finalmente, la respuesta al impulso del filtro sería :

```
hbp = ...
Plot ... Ceiling ... "h
```



..Graphics ...

```
Hw ...
Plot ... p, p, AxesLabel @ ... "H
```



..Graphics ...

```

#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<complex.h>
#include<time.h>

const pi = 3.141592654;
const fc = 0.0064441;
const fN = 2500;
const Np = 44;
const Lv = 1000;
float freq;

complex sk(int n, int sg){
    return
    fc*exp(complex(0,(pi*2*n*(Np+1))/(2*Np)))+sg*complex(0,freq*2*pi/fN);
}

complex Nm(int sg){
    complex AuxNm = complex(1,0);
    int cnt;

    for (cnt=0; cnt<Np; cnt++)
        AuxNm=AuxNm*sk(cnt,sg);

    return AuxNm;
}

complex Ak(int n, int sg, complex B){
    complex Dn=complex(1,0),skaux = sk(n,sg);
    int cnt;

    for (cnt=0; cnt<n; cnt++)
        Dn=Dn*(skaux-sk(cnt,sg));

    for (cnt=n+1; cnt<Np; cnt++)
        Dn=Dn*(skaux-sk(cnt,sg));

    return (B/Dn);
}

complex fhN(int n){
    complex fhNAux = complex(0,0), B1, B2;
    int cnt;

    B1 = Nm(1);
    B2 = Nm(-1);

    for (cnt=1; cnt<=Np; cnt++)
        fhNAux = (Ak(cnt,1,B1)/Ak(0,1,B1))*exp(n*sk(cnt,1)) + (Ak(cnt,-
1,B2)/Ak(0,-1,B2))*exp(n*sk(cnt,-1));
}

```

```

    return fhnAux;
}

void main(void){
    int k=0,m=0,q=0,Lx=125;
    float xn[Lv];
    complex yn[Lv],hn[2*Lv + 1];
    clock_t start, end;

    clrscr();
    freq = 0;
    printf("Ingrese la frecuencia central en MHz: ");
    scanf("%f",&freq);
    printf("La frecuencia central es %f \n",freq);

    for (q=1;q<=3; q++){
        Lx=Lx*2;
        printf("Para %d muestras.\n", Lx);
        for (k=1; k<=Lx; k++)
            xn[k]=0.2*cos(2*pi*400*k/fN)+0.2*cos(2*pi*600*k/fN)+cos(2*pi*800*
k/fN)+0.2*cos(2*pi*1000*k/fN);

        start = clock();
        for (k=1; k<=(2*Lx+1); k++)
            hn[k]= fhn(k);

        end = clock();
        printf("Calculo de funci3n de transferencia: %f\n %f\n %f\n", end,
start,(end-start)/CLK_TCK);

        start = clock();
        for (k=1; k<=Lx; k++){
            yn[k]=complex(0,0);
            for (m=0; m<Lx; m++)
                yn[k]=xn[Lx-m]*hn[k+m];
        }

        end = clock();
        printf("Calculo de se3al de salida: %f\n", (end - start)/CLK_TCK);
    }
    printf("Ticks: %f\n", CLK_TCK);
    getch();
}

```

```

#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<time.h>

const pi = 3.141592654;
const fN = 2500;
const Mw = 12551.7;
const Lx = 500;
float freq;

void main(void){
    int k=0,m=0;
    float xn[Lx],yn[Lx],hn[2*Lx + 1];
    clock_t start, end;

    clrscr();
    freq = 0;
    printf("Ingrese la frecuencia central en MHz: ");
    scanf("%f",&freq);

    for (k=1; k<=Lx; k++)
        xn[k]=0.2*cos(2*pi*400*k/fN)+0.2*cos(2*pi*600*k/fN)+cos(2*pi*800*
k/fN)+0.2*cos(2*pi*1000*k/fN);

    start = clock();
    for (k=1; k<=(2*Lx+1); k++)
        hn[k]= (4*(sin((freq+2.5)*(Mw-2*k)*pi/fN) - sin((freq-2.5)*(Mw-
2*k)*pi/fN))/(Mw-2*k))*(0.42-0.5*cos(2*pi*k/Mw)+0.08*cos(4*pi*k*Mw));

    end = clock();
    printf("Calculo de función de transferencia: %f\n", 1000000*(end -
start) / CLK_TCK);

    start = clock();
    for (k=1; k<=Lx; k++){
        yn[k]=0;
        for (m=0; m<Lx; m++)
            yn[k]=xn[Lx-m]*hn[k+m];
        }
    end = clock();
    printf("Calculo de señal de salida: %f\n", 1000000*(end - start) /
CLK_TCK);
    getch();
}

```
