

# **ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO)  
Y POSIBLES APLICACIONES EN COMUNICACIONES  
INALÁMBRICAS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CHRISTIAN FABRICIO ALDAZ CORRALES**

christianaldaz79@yahoo.com

**DIRECTOR: DR. LUIS CORRALES**

luisco5049@yahoo.com

**Quito, Febrero del 2009**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Christian Fabricio Aldaz Corrales, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y normatividad vigente.

---

Christian Fabricio Aldaz Corrales

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Fabricio Aldaz Corrales, bajo mi supervisión.

---

DR. Luis Anibal Corrales

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme sabiduría y fuerza cada día para seguir adelante en la vida.

Agradezco a mi familia por el apoyo que me ha brindado durante todo este tiempo, en especial a mi madre.

Agradezco a los profesores de la Escuela Politécnica Nacional por darme sus conocimientos para lograr mi meta.

Mil agradecimientos al Dr. Luis Corrales por ser una guía fundamental en mi proyecto.

## **DEDICATORIA**

A mi familia que estuvo siempre junto a mí para darme apoyo, a mis hermanos que me aconsejaron en este camino, a mi esposa por estar siempre conmigo en las buenas y malas, a mis hijos Samuel y Nicolas que con su sonrisa son el motor de mi vida.

A mi madre Mercedes que es lo más grande que Dios me ha dado, porque ella siempre confió en mí y estuvo apoyándome a la distancia.

Gracias mami

## Lista de Tablas

1.1 Banda de frecuencias UIT.....	2
1.2 Señales de transmisión y datos.....	28
2.1 Evolución de los radios militares.....	71
4.1 Ventajas y desventajas de SDR.....	95
4.2 Limitaciones de la difusión de SDR.....	96

## Lista de Figuras

1.1 Esquema de bloques típico de un transceptor.....	3
1.2 Oscilación.....	6
1.3 Sistema con realimentación positivas.....	7
1.4 Circuito oscilante LC.....	7
1.5 (a)Circuito equivalente del oscilador de Cristal (b)Símbolo.....	8
1.6 Proceso de la conversión A/D.....	9
1.7 Muestreo.....	10
1.8 Teorema de muestreo.....	11
1.9 Cuantización.....	13
1.10 Convertidor A/D.....	13
1.11 Codificación.....	16
1.12 Codificación NRZ.....	16
1.13 Codificación NRZ-L.....	17
1.14 Codificación NRZI.....	17
1.15 Codificación AMI y Pseudoternario.....	18
1.16 Codificación manchester.....	19
1.17 Codificación manchester diferencial.....	19
1.18 Codificación B8ZS y HDB3.....	20
1.19 Circuito sumador con resistencias ponderadas.....	21
1.20 Circuito sumador con conmutación.....	22
1.21 Red divisora de tensión.....	22
1.22 Conversor D/A con dos valores de resistencia.....	23
1.23 Conversor utilizando multiplexor.....	25

1.24	Convertor D/A.....	26
1.25	Modulador.....	27
1.26	Demodulador.....	28
1.27	Señal modulada por codificación de pulsos (PCM).....	32
1.28	Modulación de amplitud (AM).....	34
1.29	Modulación de frecuencia (FM).....	35
1.30	Modulación de fase (PM).....	35
1.31	Modulador de dos niveles de fase.....	36
1.32	Moduladores 4PSK.....	38
1.33	Modulador y Demodulador QAM.....	40
1.34	Modelo general de un sistema de comunicación digital de espectro expandido....	41
1.35	Generación de Señal DSSS.....	42
1.36	Ejemplo de DSSS.....	43
1.37	Ejemplo de salto de frecuencia.....	44
1.38	Transmisor y receptor de un sistema FHSS.....	45
1.39	Comparación del ancho de banda utilizando FDM y OFDM.....	46
1.40	Ejemplo del espectro de OFDM.....	47
1.41	Demodulación Homodina y Demodulación Síncrodina.....	50
1.42	Método de Hartley.....	51
1.43	Demodulador diferencial bidimensional convencional.....	52
1.44	Demodulador QAM genérico con dos fuentes de recuperación de portadora.....	54
1.45	Demodulación Muestreada.....	54
2.1	Evolución de SCA.....	60
2.2	Capas en un sistema SCA.....	64
2.3	Relación entre los componentes de SCA.....	65
2.4	Relación entre SCA y Middleware.....	66
2.5	Arquitectura CORBA ORB.....	68
2.6	Fases de Software Radio.....	72
2.7	Aspectos de SDR.....	74
2.8	Arquitectura ideal de SDR.....	76
3.1	Extensión y herencia de una interfaz.....	79
3.2	Protocolo “Compuesto” DaCaPo.....	83

3.3 Enfoque Adaptable.....	84
3.4 Pasos para descarga o actualización de software.....	85
3.5 Ejemplo de interfaces como objetos de un protocolo Activo.....	87
3.6 Ejemplo de un mensaje procesado por OPtIMA.....	88
3.7 Comunicación de capas sujetas a la reconfiguración en el terminal.....	89
4.1 Compartiendo infraestructura reconfigurable.....	93
4.2 Radioscape RS500.....	97
4.3 Radio Morphy Richards 27024.....	98
4.4 Transceptor SDR – 1000.....	99
4.5 Arquitectura de referencia.....	105
4.6 Esquema de aplicación de P-HAL.....	107
4.7 Gestión de recursos.....	109
4.8 Arquitectura testbed.....	110
4.9 Ejemplo de un teléfono modo dual.....	112
4.10 Ejemplo de un SDR.....	112
4.11 Ejemplo de modulación adaptiva.....	114



## INDICE

RESUMEN .....	i
PRESENTACIÓN .....	ii

## CONTENIDO

CAPITULO 1 .....	1
CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN RADIO TRANSMISOR .....	1
1.1 Cabezal de RF .....	3
1.2 Bloque de Frecuencia Intermedia.....	4
1.3 Oscilador Local .....	5
1.3.1 Osciladores LC .....	7
1.3.2 Osciladores de Cristal.....	8
1.4 Conversión Analógico-Digital y Digital-Analógico .....	8
1.4.1 Conversión Analógico-Digital .....	8
1.4.1.1 Muestreo .....	9
1.4.1.2 Cuantización .....	12
1.4.1.3 Codificación.....	15
1.4.2 Conversión Digital-Analógico .....	20
1.5 Modulador/Demodulador .....	26
1.5.1 Modulación con Portadora Digital .....	29
1.5.1.1 Tipos de Modulación de Pulsos .....	30
1.5.1.2 Modulación por Codificación de Pulsos (PCM).....	31
1.5.2 Modulación con Portadora Analógica.....	33
1.5.2.1 Modulación de Amplitud .....	34
1.5.2.2 Modulación de Frecuencia.....	34
1.5.2.3 Modulación de Fase .....	35
1.5.2.4 Modulación Phase Shift Keyed (PSK).....	36
1.5.2.5 Modulación de Amplitud en Cuadratura QAM .....	38
1.5.3 Espectro Expandido (SS) .....	40
1.5.3.1 DSSS (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa).....	41
1.5.3.2 FHSS (Espectro Expandido por Salto de Frecuencia) .....	44
1.5.4 OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal).....	45

1.5.5	Demodulación .....	49
1.5.5.1	Demodulación coherente o demodulación sincrónica .....	49
1.5.5.2	Demodulación no coherente o demodulación libre .....	51
1.5.5.3	Demodulación diferencial .....	51
1.5.5.4	Demodulación Muestreada .....	54
CAPITULO 2 .....		56
CARACTERÍSTICAS DEL RADIO CONFIGURADO POR SOFTWARE.....		56
2.1	Estudio de la Arquitectura SCA .....	57
2.1.1	Evolución de SCA .....	58
2.1.2	Que es el SCA .....	62
2.2	Descripción del Middleware .....	65
2.2.1	CORBA .....	67
2.3	Descripción del SDR.....	70
2.3.1	Componentes del Software Radio .....	73
2.3.2	Arquitectura ideal de un SDR .....	75
CAPITULO 3 .....		77
INTEGRACIÓN DE REDES Y LOS PROTOCOLOS SDR .....		77
3.1	Aspecto de Protocolos en el Ambiente SDR.....	77
3.1.1	Interfaz vs Punto de Acceso al Servicio.....	78
3.2	Re-configuración y Configuración de Protocolos.....	80
3.2.1	Protocolos “Compuestos”. .....	81
3.2.2	Protocolos Adaptables.....	83
3.2.3	Pila Reconfigurable.....	85
3.2.4	Sistemas reconfigurables en redes futuras .....	88
CAPITULO 4 .....		92
SOLUCIONES Y APLICACIONES EN TECNOLOGÍAS DIGITALES		
INALÁMBRICAS .....		92
4.1	El RadioScape RS500 .....	96
4.2	Transceptor SDR - 1000.....	98
4.3	Software Radio en Entornos de Redes Móviles Heterogéneas .....	103
4.3.1	Metodología de Desarrollo del Software Radio: P-HAL .....	106
4.3.2	Gestión de Recursos .....	108

4.3.3 Arquitectura Testbed .....	109
4.4 Estación Base GSM/CDMA Utilizando SDR.....	110
4.5 Terminal reconfigurable .....	111
CAPITULO 5 .....	115
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	115
5.1 Conclusiones .....	115
5.2 Recomendaciones.....	116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

## **RESUMEN**

En este trabajo se plantea el estudio de la tecnología SDR y posibles aplicaciones en comunicaciones inalámbricas, para entender de mejor manera el funcionamiento de SDR se realizó una comparación con los radios convencionales y así visualizar que parte del hardware puede ser reconfigurado por software.

Se realiza una descripción de la plataforma que utiliza SDR, su middleware, arquitectura, protocolos e integración con otras redes, basada en documentos relacionados con sistemas reconfigurables y foros realizados sobre la tecnología SDR.

SDR tiene una amplia acogida en diversos escenarios; radioaficionados, redes inalámbricas y presenta soluciones eficaces para las plataformas celulares dando un gran beneficio al usuario.

## PRESENTACIÓN

El término “Software Radio” fue acuñado por Joe Mitola en 1991 para referirse a una clase de “radios” re-programables o re-configurables. En otras palabras, un mismo hardware puede realizar diferentes funciones en diferente tiempo. Con lo anterior podemos especular el hecho de tener un dispositivo de hardware de “propósito general” en un ámbito de comunicaciones.

El SDR es una tecnología emergente particularmente dentro de la industria inalámbrica que tiene gran potencial para ser utilizado entre una amplia gama de usos. En términos de requisitos de comunicación presenta soluciones baratas para los diversos sectores como militar, civil y comercial.

Los dispositivos de equipo y de red del SDR pueden ser controlada usando la programación dinámica de su software, y puede ser configurado de nuevo y actualizado para mejorar sus características, protocolos, seguridad, funcionamiento y servicios. Los SDR presentan ventaja al hardware de sistema de radio normal, puesto que los sistemas de radio normales pueden proporcionar solamente parámetros fijos.

El trabajo está dividido de la siguiente manera:

- ✓ El capítulo 1 presenta una descripción de un radio transceptor; RF, frecuencia intermedia, oscilador local, converso analógico-digital/digital-analógico y modulación/demodulación.
- ✓ En el capítulo 2 se describe las características de un radio configurado por software; se presenta una visión general de la Arquitectura de Software de Comunicaciones (SCA), evolución, el middleware que utiliza y una descripción del SDR; componentes y arquitectura.
- ✓ El capítulo 3 explica la integración de redes por medio de sistemas reconfigurables y el rol de la pila de protocolos para estos sistemas.

- ✓ El capítulo 4 presenta algunas soluciones y aplicaciones de SDR; una estación base multiestándar, equipos que están en el comercio y terminales reconfigurables.
- ✓ El capítulo 5 presenta algunas conclusiones y recomendaciones del estudio de la tecnología SDR.

## CAPITULO 1

### CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN RADIO TRANSMISOR

En este trabajo se realizará un estudio de la tecnología SDR (Software Defined Radio) y de las posibles aplicaciones que ésta brindaría a las tecnologías digitales inalámbricas, así como sus ventajas. Primero se revisará lo que es un radio transmisor convencional.

Un radiotransmisor es un dispositivo electrónico que, con la ayuda de una antena irradia ondas electromagnéticas que contienen, o son susceptibles de contener, información, tal como las señales de radiodifusión, televisión, telefonía móvil o cualquier otro tipo de información.

Se utilizan ondas radioeléctricas de diferente longitud para distintos fines; por lo general se identifican mediante su frecuencia. El espectro electromagnético está dividido en bandas tal como se indica en la Tabla 1.1.

El nombre del pionero alemán de la radio Heinrich Hertz ha servido para bautizar la unidad de medida de la frecuencia, el ciclo por segundo (hercio, Hz).

Las ondas de radio van desde algunos kilohercios a varios gigahercios. Las ondas de luz visible son mucho más cortas. En el vacío, toda radiación electromagnética se desplaza en forma de ondas a una velocidad uniforme de casi 300.000 kilómetros por segundo.

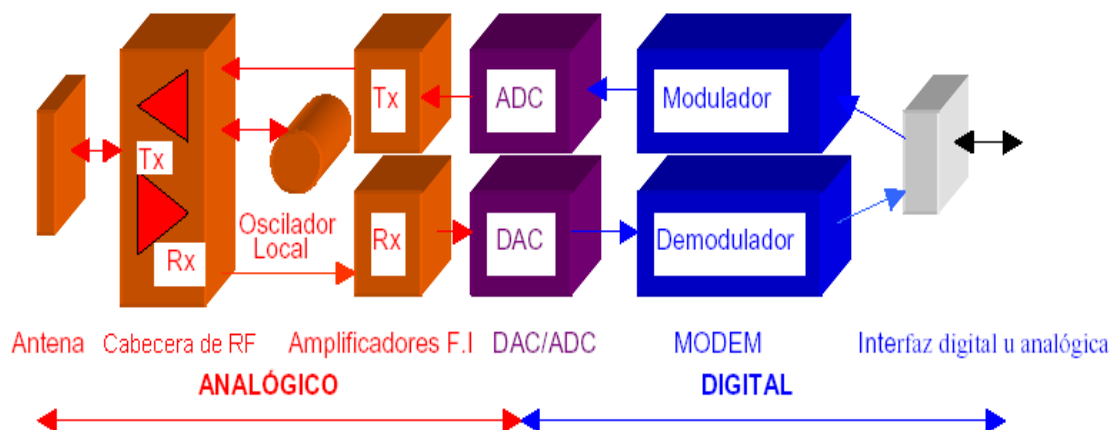
Por encima de 300 Ghz la absorción de la radiación electromagnética por la atmósfera terrestre es tan alta que la atmósfera se vuelve opaca a ella, hasta que, en los denominados rangos de frecuencia infrarrojos y ópticos, vuelve de nuevo a ser transparente.

<b>Nombre</b>	<b>Abreviatura inglesa</b>	<b>Banda ITU</b>	<b>Frecuencias</b>	<b>Longitud de onda</b>
Frecuencias extra bajas	ELF	1	3-30 Hz	100.000 km – 10.000 km
Frecuencias súper bajas	SLF	2	30-300 Hz	10.000 km – 1.000 km
Frecuencias ultra bajas	ULF	3	300–3000 Hz	1.000 km – 100 km
Frecuencias muy bajas	VLF	4	3–30 kHz	100 km – 10 km
Frecuencias bajas	LF	5	30–300 kHz	10 km – 1km
Frecuencias medias	MF	6	300–3000 kHz	1km – 100 m
Frecuencias altas	HF	7	3–30 MHz	100 m – 10 m
Frecuencias muy altas	VHF	8	30–300 MHz	10 m – 1m
Frecuencias ultra altas	UHF	9	300–3000 MHz	1m – 100 mm
Frecuencias súper altas	SHF	10	3-30 GHz	100 mm – 10 mm
Frecuencias extremadamente altas	EHF	11	30-300 GHz	10 mm – 1 mm
Microondas			Por encima de los 300 GHz	< 1 mm

**Tabla 1.1** Banda de frecuencia UIT



Para comprender el funcionamiento de un radio transmisor y de un radio receptor, se puede recurrir al diagrama de bloques de un transceptor de radio, como el que se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1** Esquema de bloques típico de un transceptor

La transmisión de la información se realiza mediante ondas electromagnéticas. El elemento que realiza la adaptación desde el medio electrónico en el que se generan estas ondas al medio en el que se propagan (y viceversa en el punto de recepción) se denomina Antena. Puede considerarse como un adaptador de impedancia al medio de transmisión.

### 1.1 Cabezal de RF

El Transceptor cuenta con dispositivos electrónicos de estado sólido que procesan el nivel de las señales para que sea adecuado a la función que les precede o les sigue.

Esta función de adaptación de nivel se realiza en el bloque “ Front End de RF” (Cabezal de Radiofrecuencia).

En este módulo las señales se procesan a la frecuencia de transmisión/ recepción, del orden de 1.000 MHz el caso de Telefonía GSM. En el lado transmisión, se produce una amplificación de la señal entregada por las etapas anteriores hasta el nivel de tener potencia suficiente para su transmisión por el medio de propagación.

El nivel de potencia de transmisión depende de la distancia a la que se quiere llegar. En telefonía GSM es del orden de 2W como máximo (+ 33dBm).

Conviene recordar que el dBm es una unidad logarítmica de potencia definida por  $Pot(dBm) = 10 \log(mW)/1 \text{ mW}$ , por lo que  $0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$ ;  $30 \text{ dBm} = 1000 \text{ mW} = 1W$ ;  $-30 \text{ dBm} = 0,001 \text{ mW}$ , etc.

En recepción, la señal se recibe con una gran atenuación (por ejemplo  $-60 \text{ dBm}$ ) y su nivel debe incrementarse miles de veces sin agregar demasiado ruido, antes de poder procesarla en los circuitos siguientes del receptor.

## **1.2 Bloque de Frecuencia Intermedia**

Se denomina Frecuencia intermedia (FI) a la Frecuencia que en los aparatos de radio emplean el principio superheterodino. Se obtiene de la mezcla de la señal sintonizada en antena con una frecuencia variable generada localmente en el propio aparato mediante un oscilador local (OL) y que guarda con ella una diferencia constante. Esta diferencia entre las dos frecuencias es precisamente la frecuencia intermedia.

En los receptores de radio convencionales el valor de la frecuencia intermedia es normalmente 455 ó 470 kHz, en los receptores de modulación de amplitud (AM) y de 10,7 MHz en los de modulación de frecuencia (FM), aunque en aparatos más sofisticados, los denominados de doble conversión, se utiliza un segundo valor de FI más pequeño. En los receptores de televisión del sistema PAL empleado en Alemania, España y otros países, la FI se selecciona a 38,9 MHz.

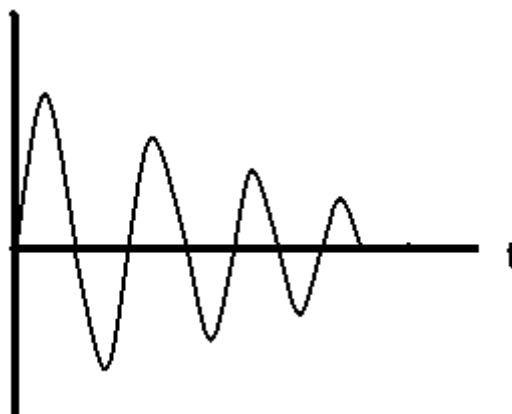
La utilidad del empleo de una frecuencia intermedia radica en el hecho de que todos los circuitos sintonizados existentes a partir de la etapa en que se efectúa la mezcla, trabajan a una frecuencia fija (la de la FI) y por tanto son más fáciles de ajustar. De este modo se mejora la selectividad y se facilita el diseño de las etapas amplificadoras. Si no se empleara la frecuencia intermedia, sería preciso diseñar circuitos sintonizadores que tuvieran al mismo tiempo una gran selectividad y un gran rango de selección de frecuencias de actuación, algo difícil y caro de conseguir.

La mayor parte de la amplificación en recepción se produce a la frecuencia intermedia. En este caso el Front End RF realiza una conversión o adaptación de frecuencias (de hecho una reducción de la frecuencia recibida a un valor más manejable). Por razones similares, también se procesa la señal del lado de transmisión a una frecuencia inferior para luego convertirla al valor final y amplificarla hasta el nivel de aplicación requerida en la antena. El bloque de Frecuencia Intermedia cumple estas funciones.

### **1.3 Oscilador Local**

La oscilación es un fenómeno producido en un circuito eléctrico que consiste en una fluctuación de la carga circulante de tal manera que la energía total asociada permanece constante.

Todo sistema oscilante posee una frecuencia propia de oscilación que no depende de la energía suministrada sino más bien de la estructura del sistema; esto es, siempre oscilará a la misma frecuencia.



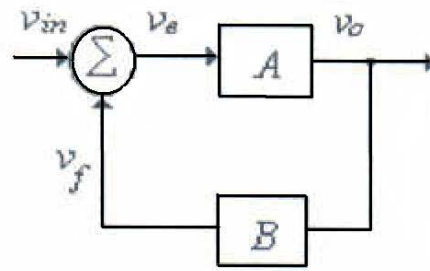
**Figura 1.2** Oscilación

El oscilador local genera las frecuencias apropiadas para convertir la Frecuencia Intermedia en la frecuencia de trabajo, mediante una mezcla alineal que produce frecuencias suma y diferencia. La frecuencia es una de las características más importantes de la señal generada por el oscilador, debiendo ser esta frecuencia fija y sin variación. Se selecciona la frecuencia deseada mediante filtros analógicos para su amplificación en los amplificadores de Frecuencia Intermedia correspondientes.

Desde el punto de vista práctico siempre existe un corrimiento o una variación en la frecuencia. Si el corrimiento es mínimo se dice que el oscilador es estable; pero si el corrimiento es importante se dice que el oscilador es inestable.

Las condiciones que debe cumplir un circuito para que oscile son:

1. El circuito básicamente sea un amplificador.
2. Que tenga realimentación positiva.
3. La cantidad de realimentación debe ser suficiente para vencer las pérdidas del circuito de entrada.

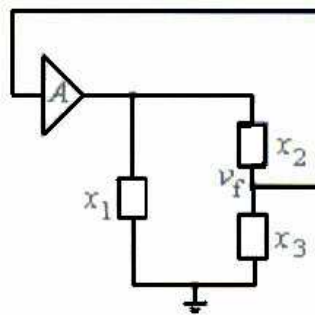


**Figura 1.3** Sistema con realimentación positivas

### 1.3.1 Osciladores LC

Los osciladores LC son circuitos osciladores que utilizan un circuito tanque LC para los componentes que determinan la frecuencia. La operación del circuito tanque involucra un intercambio de energía entre cinética y potencial. La característica principal de estos osciladores es que el bloque de realimentación está constituido por elementos reactivos.

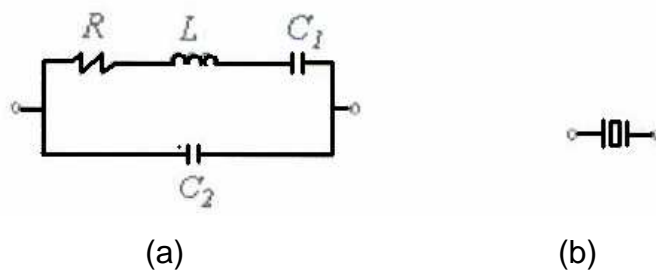
El oscilador LC es un circuito que se puede usar para alta frecuencia.



**Figura 1.4** Circuito oscilante LC

### 1.3.2 Osciladores de Cristal

Los osciladores de cristal son circuitos osciladores de retroalimentación, en donde el circuito tanque LC se reemplaza con un cristal para el componente que determina la frecuencia. El cristal actúa de manera similar al tanque, excepto que tiene varias ventajas inherentes. A los cristales se los llama a veces resonadores de cristal y son capaces de producir frecuencias precisas y estables para contadores de frecuencias, sistemas electrónicos de navegación, transmisores y receptores de radio, televisores, etc.



**Figura 1.5** (a)Circuito equivalente del oscilador de Cristal  
(b)Símbolo

## 1.4 Conversión Analógico-Digital y Digital-Analógico

Puesto que la transmisión por el medio físico se realiza mediante señales analógicas pero el procesamiento en el Transceptor es de índole digital, se requiere una conversión analógica-digital en el receptor y digital-analógica en el transmisor.

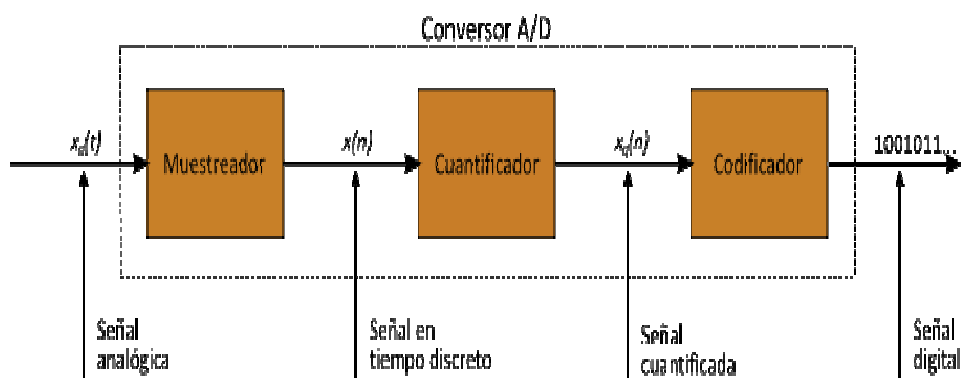
### 1.4.1 Conversión Analógico-Digital

La digitalización o conversión analógica-digital (conversión A/D) consiste básicamente en realizar de forma periódica medidas de la amplitud de la señal y traducirlas a un lenguaje numérico. La conversión A/D también es conocida por el acrónimo ADC (Analogic to Digital Conversion).

Los conversores A/D requieren que la tensión analógica a convertir permanezca constante durante el tiempo de conversión; para ello, se utilizan circuitos específicos de muestreo y mantenimiento (sample and hold) que toman un valor puntual de la señal presente en su entrada (muestreo) y lo mantienen en su salida (por efecto capacitivo) durante un cierto intervalo de tiempo.

La conversión analógica-digital consta de algunos procesos que son:

- Muestreo
- Cuantización
- Codificación



**Figura 1.6** Proceso de la conversión A/D

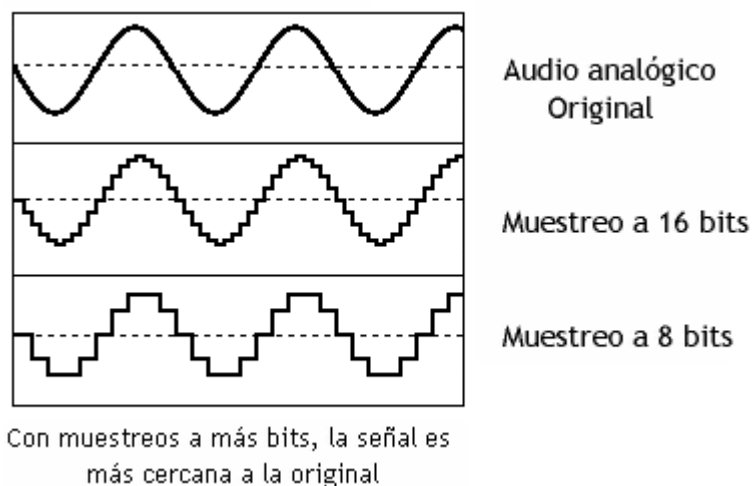
#### 1.4.1.1 Muestreo

El muestreo digital de una señal analógica trae consigo una discretización tanto en el dominio temporal como en el de la amplitud. Hay varias formas de describir matemáticamente el proceso de discretización temporal de una señal continua en el tiempo.

El muestreador ideal consiste en una función que toma los valores de la señal  $x_c(t)$  en los instantes de muestreo y el valor cero para el resto de puntos.

$$X_s(t) = X_c(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nt_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_c(nt_s) \delta(t - nt_s) = X_c(t) X_I(t)$$

Donde  $t_s$  es el periodo de muestreo y  $x_I(t)$  es la función de interpolación.



**Figura 1.7** Muestreo

El muestreo trae consigo una aparente pérdida de información en la señal  $x_c(t)$  es por eso que el Teorema del Muestreo establece en qué condiciones se puede muestrear sin pérdida de información.

*Una señal  $x_c(t)$  con un espectro limitado a la frecuencia  $f_B$  ( $|f| \leq f_B$ ) puede ser muestreada sin pérdida de información si la frecuencia de muestreo  $f_S$  supera la cantidad  $2f_B$ , es decir  $f_S \geq 2f_B$ .*



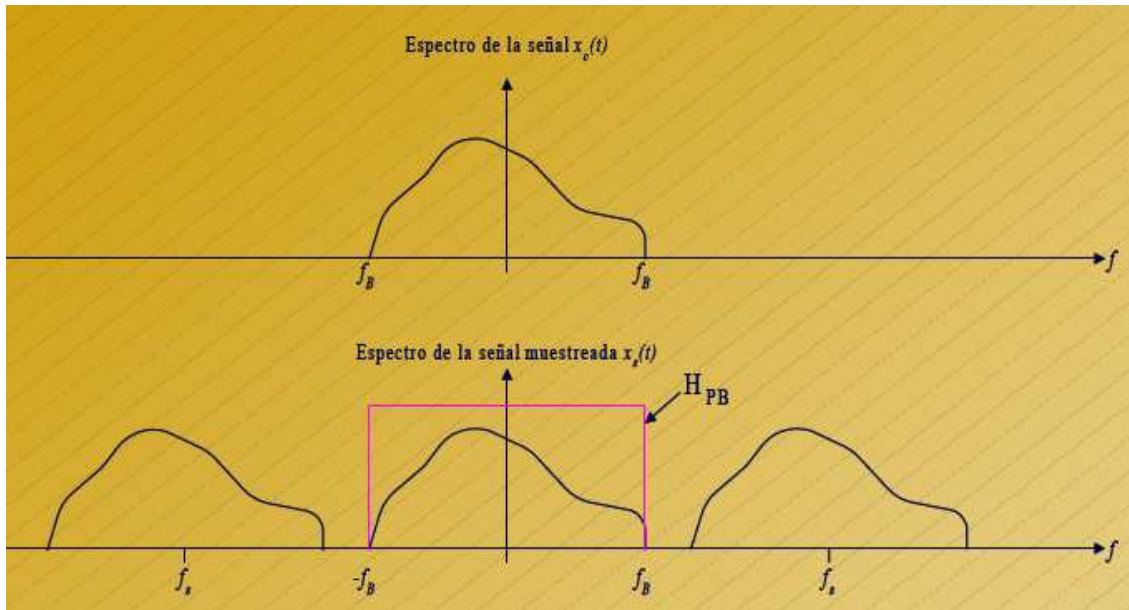


Figura 1.8 Teorema de muestreo

Si no se muestrea como mínimo a esa frecuencia tiene lugar el fenómeno denominado "aliasing".

$$X_S(t) = X_C(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nt_s) = X_C(t) \cdot X_I(t)$$

$$X_S(f) = X_C(f) * X_I(f)$$

$$X_I(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} \delta(t - K \cdot t_s) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} C_K \cdot e^{j2\pi Kt/t_s}$$

$$C_K = \frac{1}{t_s} \int_{-\frac{t_s}{2}}^{\frac{t_s}{2}} \delta(t) e^{-j2\pi Kt/t_s} dt = \frac{1}{t_s} \rightarrow X_I(f) = \frac{1}{t_s} \sum_{K=-\infty}^{\infty} \delta(f - K/t_s)$$

$$X_S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X_I(f) \cdot X_C(f - \xi) \cdot d\xi = \frac{1}{t_s} \sum_{K=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(f - k/t_s) \cdot X_C(f - \xi) \cdot d\xi$$

$$X_S(f) = \frac{1}{t_s} \sum_{K=-\infty}^{\infty} X_C(f - K/t_s)$$

Es decir, el espectro de la señal muestreada se compone de una función periódica de periodo  $1/t_s$ , replicándose en cada periodo el espectro de la señal original.

Para recuperar la señal original a partir de la muestreada se tiene que aplicar un filtro pasa-bajo con una frecuencia de corte en  $f=f_B$  y una amplificación  $t_s$ ; es decir:

$$X_C(f) = X_S(f)H_{PB}(f) \rightarrow X_C(t) = X_S(t) * h_{PB}(t)$$

$$H_{PB}(f) = t_s \text{rect}\left(\frac{f}{2f_B}\right) \rightarrow h_{PB}(t) = t_s \cdot 2 \cdot f_B \cdot \text{sinc}(t \cdot 2 \cdot f_B)$$

$$X_S(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} X_C(Kt_s) \delta(t - Kt_s) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} X_C[K] \delta(t - Kt_s)$$

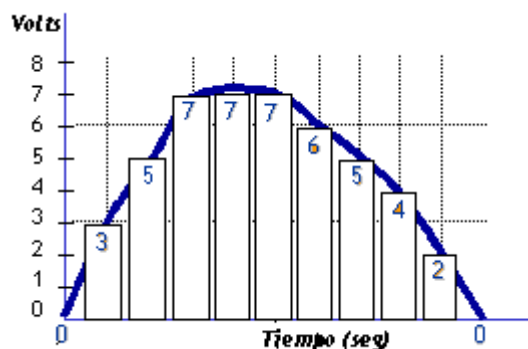
$$X_C(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} X_C[K] h_{PB}(t - Kt_s) = 2 \cdot t_s \cdot f_B \cdot \sum_{K=-\infty}^{\infty} X_C[K] \cdot \text{sinc}[2f_B(t - Kt_s)]$$

Este tipo de reconstrucción de la señal original presenta varios problemas:

- El dominio de la función  $\text{sinc}(t)$  es infinito.
- Requiere muestreos pasados y futuros.
- Existe la posibilidad de truncar la función  $\text{sinc}(t)$ , pero da lugar al efecto Gibbs y además requeriría muchos puntos.
- No pueden reconstruir funciones con discontinuidades

#### 1.4.1.2 Cuantización

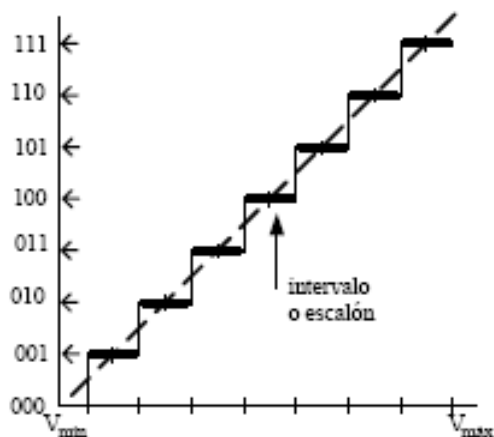
Para procesar señales digitalmente no sólo es necesario muestrear la señal analógica sino también cuantizar la amplitud de esas señales a un número finito de niveles.



**Figura 1.9** Cuantización

El tipo más usual de cuantización es la cuantización uniforme, en el que los niveles son todos iguales. La mayoría usan un número de niveles que es una potencia de 2. Si  $L=2^B$ , cada uno de los niveles es codificado a un número binario de B bits.

En la conversión A/D, a cada número binario de salida le corresponde todo un «intervalo» o «escalón» horizontal de tensiones análogas; las tensiones situadas dentro de un mismo «escalón» son indistinguibles por cuanto proporcionan la misma salida digital.



**Figura 1.10** Convertidor A/D

Se produce, de por sí, un error de cuantificación o discriminación, pues valores de tensión próximos pero diferentes corresponden al mismo valor digital, no pueden ser

diferenciados por el conversor si éste es analógico/digital no distingue entre ellos y si es digital/analógico no los genera como tensiones de salida.

La función de transferencia de los conversores lineales viene caracterizada por una línea recta (recta de conversión), que pasa por el origen (0,  $V_{\min}$ ), en el caso A/D la recta de conversión pasa por los puntos medios de los «escalones», o sea, de los intervalos de correspondencia entre las tensiones analógicas de entrada eje X y los números binarios de salida eje Y.

El ruido de cuantización es un aspecto que se debe tomar en cuenta: si  $x_s[n]$  es la señal discreta y  $x_Q[n]$  es la señal discreta cuantizada. El error es:

$$\epsilon[n] = X_s[n] - X_Q[n]$$

Se define la relación señal a ruido de cuantización ( $SNR_Q$ ) como la relación entre la potencia  $P_S$  de la señal y la potencia  $P_N$  del error  $\epsilon[n]$ , medido en decibelios.

$$P_S = \frac{1}{N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_s^2[n] \quad P_N = \frac{1}{N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \epsilon^2[n]$$

$$SNR_Q(dB) = 10 \cdot \log \frac{P_S}{P_N}$$

Si se tiene una señal  $x(t)$  cuyo fondo de escala  $D$  está dado por  $x_{\max} - x_{\min}$ . Si se cuantiza  $x(t)$  con  $L$  niveles, la distancia entre dos niveles consecutivos o resolución  $\Delta$  se define como  $\Delta = D/L$ .

Se denomina rango dinámico  $DR$ , a la relación entre el fondo de escala  $D$  y la resolución, de forma que  $DR = 2^B$ . En decibelios,

$$DR(dB) = 20 \log_{10}(2^B) = 6.02B$$

Para una señal  $x_s[n]$  cuantizada a  $x_Q[n]$ , el error estará entre  $-\Delta/2$  y  $\Delta/2$ . Si  $L$  es grande la distribución de errores será uniforme en ese intervalo. Para este caso  $\Sigma \varepsilon^2[n] = \sigma^2 = \Delta^2/12$ . Sustituyendo

$$SRN_Q(dB) = 10 \log P_s - 10 \log \Delta^2 + 10 \log 12$$

$$SRN_Q(dB) = 10 \log P_s + 10.8 - 20 \log D + 20 \log L$$

$$SRN_Q(dB) = 10 \log P_s + 10.8 - 20 \log D + 6B$$

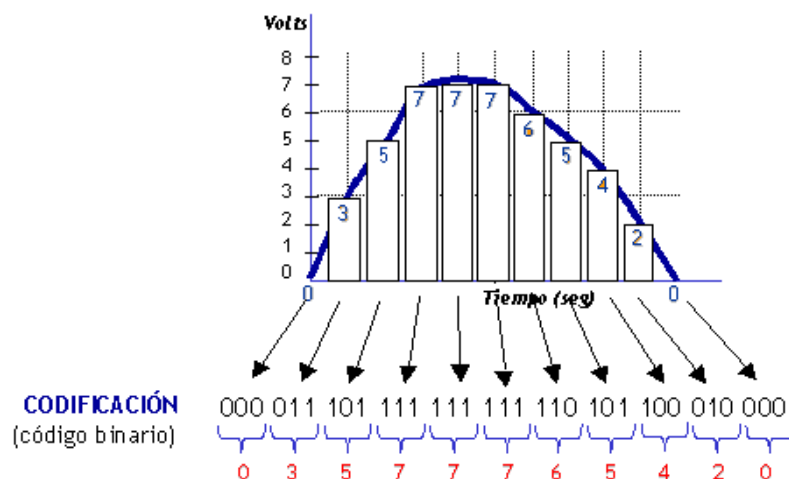
Donde se ha utilizado el hecho que  $L=2^B$ .

La ecuación sugiere que por cada bit que se añade al cuantizador, la relación señal a ruido de cuantización mejora en 6 dB.

### 1.4.1.3 Codificación

Como un radio definido por software cambia su funcionalidad de acuerdo a la necesidad del usuario, se hará una descripción rápida de los tipos de codificación, que no necesariamente el radio definido por software podría utilizar a todos los tipos de codificación.

La codificación es la representación numérica de la cuantización utilizando códigos ya establecidos y estándares. El código más utilizado es el código binario, pero también existen otros tipos de códigos que son empleados.



**Figura 1.11** Codificación

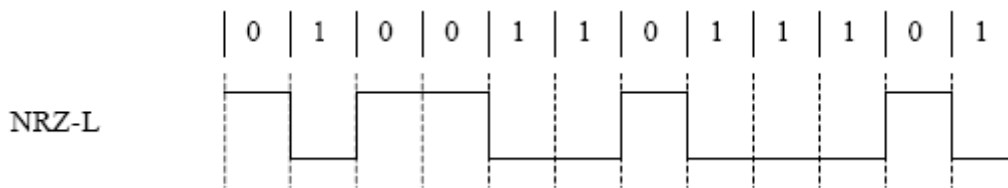
De entre los distintos tipos de codificación posibles, el más sencillo es la codificación **de no retorno a cero (NRZ)**. En este caso, a cada nivel lógico se le asigna un nivel de tensión diferente. El nivel de tensión se mantiene constante durante la duración de un bit.

La forma más inmediata de hacer esta codificación consiste en asignar una tensión positiva, por ejemplo 5 voltios, al nivel lógico 1 y una tensión nula para el 0.



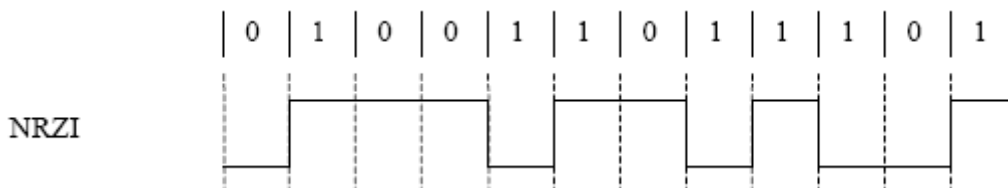
**Figura 1.12** Codificación NRZ

El código **NRZ-L**, que es más usada en la práctica, asigna un nivel negativo al 1 lógico, y un nivel positivo al 0 lógico, tal y como sucede por ejemplo en una comunicación serie RS-232.



**Figura 1.13** Codificación NRZ-L

Otra variante del NRZ es el **NRZI** (No retorno a cero, invertir en unos). En este esquema también se mantiene constante la tensión durante la duración de un bit, sin embargo, la codificación de los datos dependen de si existe o no una transición de la señal al comienzo de cada bit. Un 1 se codificará mediante un cambio de nivel de la señal al comienzo del bit, mientras que la ausencia de cambio significará un cero lógico.



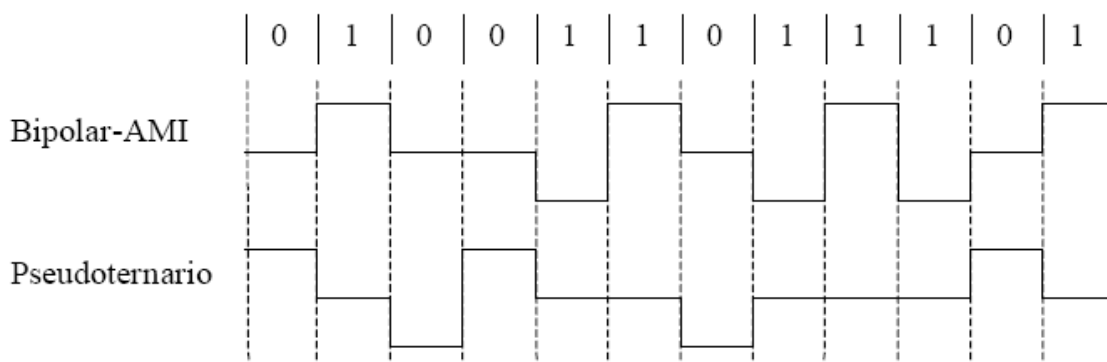
**Figura 1.14** Codificación NRZI

Este tipo de código es un ejemplo de *codificación diferencial*. En este tipo de codificación, en lugar de determinar el valor absoluto, la señal se decodifica comparando la polaridad de los elementos de señal adyacentes. Esto presenta la ventaja de que en presencia de ruido puede ser más seguro detectar una transición en lugar de comparar un valor con un umbral. Otra ventaja es que no importa la polaridad de los cables, o sea, si se cruzan o no al instalarlos.

Los códigos NRZ son los más fáciles de implementar, y además hacen un uso eficaz del ancho de banda. Su principal limitante es la existencia de un nivel de continua en la señal y la ausencia de capacidad de sincronización. Existen codificaciones alternativas a las NRZ denominadas binario multinivel. En este caso se usan más de

dos niveles distintos de señal para codificar más de un bit en cada elemento de señal.

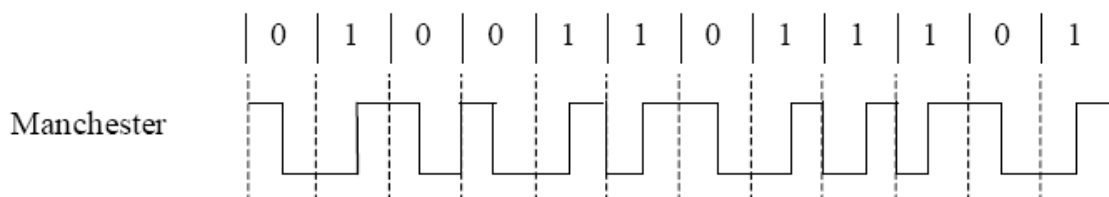
Dos ejemplos de señales bipolares son el bipolar-AMI y el pseudoternario. En el primer caso, un 0 binario se representa por ausencia de señal y el 1 binario por pulso de polaridad alternante. En este tipo de esquema, sólo la aparición de largas cadenas de ceros dificulta la sincronización. Además, no hay componente de continua en la señal debido a la alternancia de los pulsos. Por último, la alternancia de los unos facilita la detección de errores. El código pseudoternario es similar, salvo que el 0 binario es el que se representa por pulsos de polaridad alternante.



**Figura 1.15** Codificación AMI y Pseudoternario

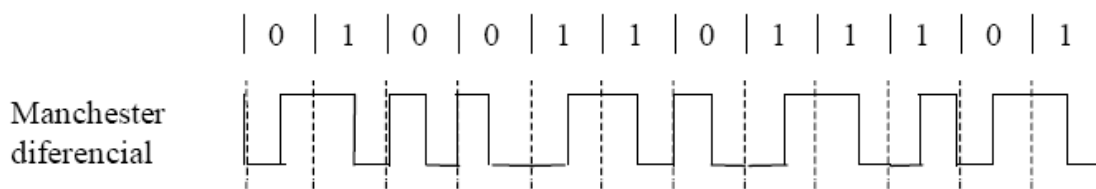
Los códigos bifase representan una alternativa muy extendida en redes locales. En particular la codificación **Manchester** y **Manchester Diferencial** pertenecen a este grupo. El código Manchester se caracteriza por poseer siempre una transición en el medio del intervalo de un bit. Esta transición sirve como un procedimiento de sincronización a la vez que permite la transmisión de los datos. Así, una transición de bajo a alto representa un 1 binario, mientras que una transición de bajo a alto indica un 0.





**Figura 1.16** Codificación manchester

En Manchester diferencial, la transición a mitad del intervalo se usa sólo para sincronización, mientras que la información se codifica en función de la existencia o no de una transición al comienzo del intervalo, de modo que una transición al comienzo de un bit indicará un 0 binario y su ausencia un 1.



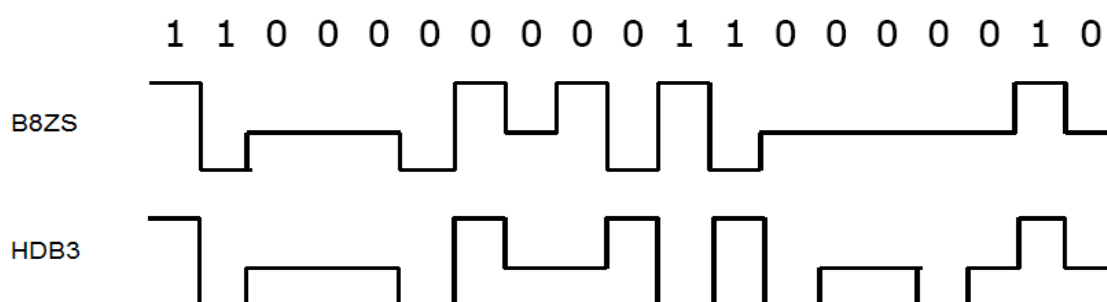
**Figura 1.17** Codificación manchester diferencial

El ancho de banda requerido por los esquemas bifase es doble del necesario que NRZ debido a la existencia de la transición en mitad de un bit. Sin embargo, tienen la ventaja de su fácil sincronización, no tiene componente de continua por lo que es posible el aislamiento galvánico de la interfaz (aislamiento eléctrico para evitar averías por sobretensiones o fenómenos similares en la línea de transmisión). También es posible la detección de errores, mediante la detección de ausencia de transición.

Un último grupo de técnicas de codificación a considerar son las técnicas de altibajos, como por ejemplo la codificación B8ZS (Bipolar con sustitución de 8 ceros) o la HDB3 (High Density Bipolar-3 Zeros). Este tipo de técnicas utiliza la codificación bipolar AMI y lo que incorporan es un mecanismo para la sustitución de cadenas largas de ceros por determinadas secuencias que suponen una violación de código. Por ejemplo, en el caso más sencillo, el B8ZS, una cadena de ceros se sustituye por

una secuencia 000VB0VB, donde V significa violación de código. La violación de código consiste en un pulso que repite la polaridad del último pulso enviado (lo que va en contra de la codificación AMI).

El siguiente pulso, B, compensa la componente continua de la señal al ser de signo contrario al anterior. La principal ventaja que se obtiene es mejorar la sincronización al evitar cadenas de ceros largos. Este tipo de códigos se aplica en la transmisión de datos en líneas de larga distancia.



**Figura 1.18** Codificación B8ZS y HDB3

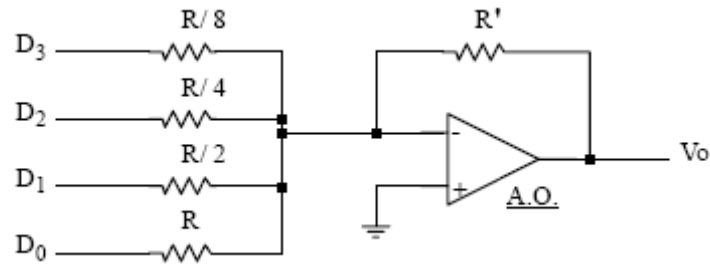
### 1.4.2 Conversión Digital-Analógico

Conceptualmente la conversión analógica-digital consiste en realizar la suma ponderada de los diversos dígitos que configuran el número binario; el valor relativo de cada uno de ellos viene dado por la correspondiente potencia de 2:

$$N = a_0 + 2 \cdot a_1 + 4 \cdot a_2 + 8 \cdot a_3 + 16 \cdot a_4 + \dots$$

$$N = 2^0 \cdot a_0 + 2^1 \cdot a_1 + 2^2 \cdot a_2 + 2^3 \cdot a_3 + \dots = \sum 2^i \cdot a_j$$

Esta suma puede realizarse mediante un sencillo circuito sumador con resistencias ponderadas (según la relación  $R, R/2, R/4, R/8, \dots$ ) como el de la Figura 1.19:



**Figura 1.19** Circuito sumador con resistencias ponderadas

Supuesto que las tensiones que corresponden a los valores booleanos sean 0 y +V:

$$V_o = - (R' / R) \cdot (+V) \cdot (D_0 + 2.D_1 + 4.D_2 + 8.D_3 + \dots)$$

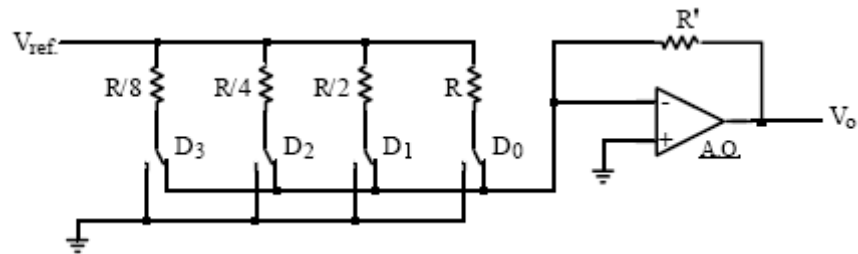
El último paréntesis de la expresión anterior expresa el valor del número binario ...  $D_3 D_2 D_1 D_0$  y el factor inicial  $V.R'/R$  determina el valor de tensión asignado a cada unidad; las resistencias  $R'$  y  $R$  permiten ajustar dicho valor a la tensión unitaria que se desee.

Resulta un circuito sumamente sencillo para obtener una tensión analógica a partir de las tensiones de los dígitos binarios del número que se desea convertir. Habida cuenta de que la etapa sumadora es inversora, se obtendrá una tensión negativa, que puede transformarse fácilmente en positiva mediante una segunda etapa amplificadora inversora de ganancia unitaria.

Las tensiones booleanas que presentan los diversos dígitos de un número binario (salidas de los correspondientes terminales del circuito digital, generalmente salidas de circuitos integrados) no ofrecen adecuada precisión: ambas tensiones,  $V_{oL} \approx 0 V$  y  $V_{oH} \approx +V$ , no son valores muy precisos.

Por ello, para aumentar la precisión del convertidor, no se utilizan directamente las tensiones de los dígitos a convertir sino una tensión única de referencia de alta precisión, la cual se conecta (caso de dígito de valor 1) o no (valor 0) a las correspondientes resistencias sumadoras mediante interruptores; además, para

disminuir los efectos capacitivos propios de los conmutadores y aumentar la velocidad de conmutación, ésta se efectúa entre dos posiciones de igual tensión.



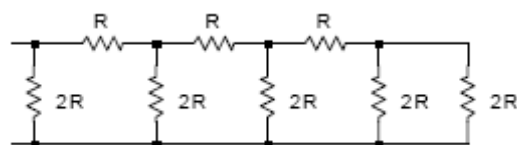
**Figura 1.20** Circuito sumador con conmutación

Cada conmutador se conecta hacia la entrada del amplificador cuando el valor del correspondiente dígito es 1; en otro caso, se conecta directamente hacia la línea de 0 V.

$$V_o = - (R' / R) \cdot V_{ref} \cdot (D_0 + 2 \cdot D_1 + 4 \cdot D_2 + 8 \cdot D_3 + \dots)$$

La precisión de este conversor depende de la precisión de las resistencias y de la tensión de referencia así como de las características del amplificador operacional, especialmente en lo relativo a tensión y corrientes de offset.

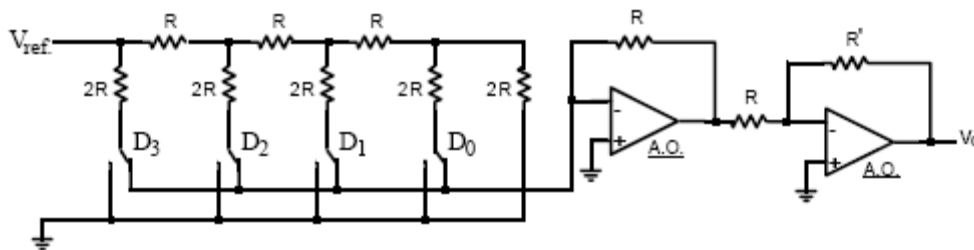
Ahora bien, esta red sumadora requiere resistencias de valores muy diferentes (por ejemplo para 12 bits ha de llegarse desde  $R$  hasta  $R/4096$ ), siendo extremadamente difícil integrar tal diversidad de resistencias con la precisión necesaria. Por ello, resulta preferible utilizar una red de resistencias  $R$ - $2R$  en escalera o red divisora de tensión, que posee la propiedad de que la resistencia de carga vista desde cualquier nudo de la red hacia adelante es de idéntico valor:  $2R$ .



**Figura 1.21** Red divisora de tensión

Esta red de resistencias tiene la propiedad de que en cada nudo se encuentran en paralelo sendas resistencias de igual valor  $2R$ , una de las cuales es la equivalente del resto del circuito; de forma que en cada nudo la intensidad se divide en dos partes iguales y, de esta forma, cada nudo realiza una división de la tensión del nudo anterior por 2.

Utilizando este tipo de red como sumadora, mediante conmutadores entre dos posiciones (ambas con tensión de referencia  $0\text{ V}$ ) según el esquema siguiente, puede obtenerse un convertor D/A que solamente utiliza dos valores de resistencias  $R$  y  $2R$ .



**Figura 1.22** Convertor D/A con dos valores de resistencia

La segunda etapa amplificadora sirve para que la tensión de salida sea positiva e introduce la amplificación con el factor  $R'/R$ , considerando que la sucesiva división de tensiones e intensidades que se produce en cada nudo:

$$V_o = - (R' / R) \cdot V_{ref} \cdot (D_3 + D_2 / 2 + D_1 / 4 + D_0 / 8)$$

$$V_o = - (R' / 16R) \cdot V_{ref} \cdot (16 \cdot D_3 + 8 \cdot D_2 + 4 \cdot D_1 + D_0)$$

Con este tipo de red sumadora se configura una amplia gama de convertidores D/A integrados, de alta precisión, ya que es posible conseguir gran precisión en la red de resistencias y en la tensión de referencia (utilizando un zener de alta precisión bien estabilizado). Ello permite asegurar una fuerte linealidad en la conversión, con errores inferiores a la mitad del paso en tensión correspondiente a una unidad.

Los convertidores D/A más comunes de este tipo son de 8 y de 12 bits; un convertidor de 8 bits permite una resolución de 256; es decir, para un intervalo de conversión 0-10 V a cada unidad le corresponden aproximadamente 40 mV; la resolución de un convertidor de 12 bits es de 4096 pasos, 2.5 mV.

En tecnología MOS los conmutadores se realizan mediante transistores NMOS alternativos, entre cuyos terminales de puerta se conecta un inversor; se consiguen tiempos de respuesta globales (desde que se presenta el valor digital, hasta que aparece el correspondiente valor analógico) inferiores al microsegundo. Además, en aplicaciones relativas a la generación de ondas, en las cuales la salida va siguiendo sucesivamente valores próximos de la onda a generar, el tiempo de transición entre un valor y otro resulta mucho menor, pudiéndose alcanzar frecuencias superiores a 10 MHz.

En el caso bipolar se configuran generadores de intensidad ponderados, mediante redes R-2R incluyendo transistores en las mismas; la configuración en amplificador diferencial permite conmutar tales intensidades entre las dos posiciones con altas velocidades de respuesta, consiguiéndose tiempos de conmutación del orden de 10 ns.

La utilización de una referencia de tensión negativa evita la necesidad de utilizar el segundo amplificador inversor.

En todos los convertidores D/A anteriormente considerados la tensión de salida es proporcional al número binario aplicado a sus entradas:  $V_o = V_u \cdot N$ , siendo  $V_u$  el paso en tensión correspondiente a una unidad; a veces (por ejemplo en la generación digital de ondas senoidales o de otras formas de onda) interesa otro tipo de funciones  $V_o = f(N)$  distintas de la simple proporcionalidad.

Para ello puede efectuarse una transformación digital previa del número  $N$  a un número  $N'$  tal que  $f(N) = V_u \cdot N'$ , de manera que un convertidor D/A proporcional aplicado sobre  $N'$  servirá para generar la tensión analógica deseada; la conversión

intermedia (de  $N$  a  $N'$ ) puede ser realizada por un conversor de código o codificador ROM.

Cuando no se requiere gran precisión en la tensión de salida, puede obtenerse directamente la función  $V_o = f(N)$  mediante un multiplexor analógico (formado por puertas de transmisión) controlado por el número  $N$ , según el esquema siguiente.

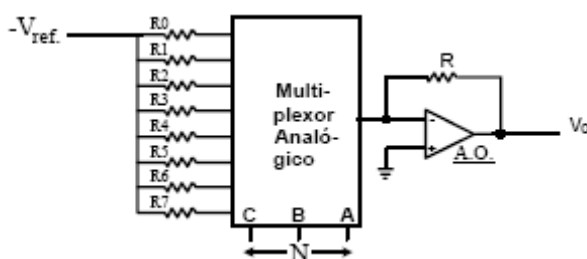
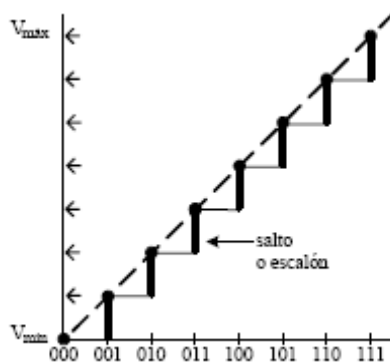


Figura 1.23 Conversor utilizando multiplexor

A un valor concreto  $N$  le corresponderá una tensión  $V_o = R' \cdot V_{ref} / R_N$ , que puede ser ajustada al valor deseado mediante la resistencia  $R_N$ . En el caso de que la función  $f(N)$  adopte también valores negativos, bastará conectar las resistencias correspondientes a una tensión de referencia positiva  $+V_{ref}$ .

La conversión D/A presenta un «paso» o «escalón» vertical, dado por la diferencia entre las dos tensiones que corresponden a dos números binarios sucesivos; los valores de tensión situados «dentro» de dicho «escalón» (entre las dos tensiones citadas) nunca se producirán como tensiones de salida.



**Figura 1.24** Conversor D/A

La función de transferencia de los convertidores lineales viene caracterizada por una línea recta (denominada «recta de conversión»), que pasa por el origen ( $0, V_{\min}$ ). En el caso D/A esta recta contiene los «puntos de conversión», es decir, de correspondencia entre los números binarios de entrada, eje X, y los valores de tensión analógica de salida, eje Y.

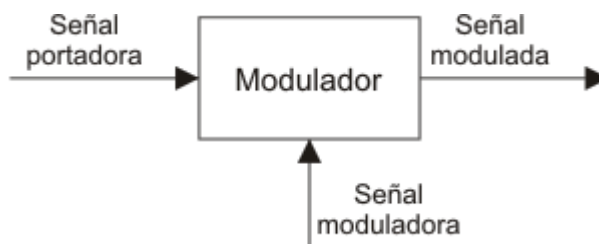
## 1.5 Modulador/Demodulador

Se denomina modulación al proceso de colocar la información contenida en una señal, generalmente de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia.

Debido a este proceso la señal de alta frecuencia, denominada portadora, sufrirá la modificación de alguno de sus parámetros, siendo dicha modificación proporcional a la amplitud de la señal de baja frecuencia, denominada moduladora.

A la señal resultante de este proceso se la denomina señal modulada y la misma es la señal que se transmite.





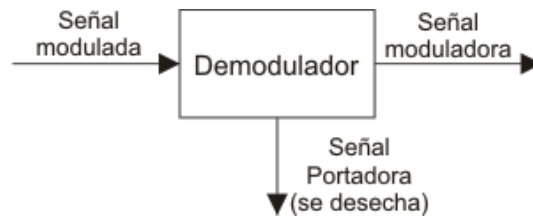
**Figura 1.25** Modulador

Es necesario modular las señales por diferentes razones:

- a) Si todos los usuarios transmiten a la frecuencia de la señal original o moduladora, no será posible reconocer la información inteligente contenida en dicha señal, debido a la interferencia entre las señales transmitidas por diferentes usuarios.
- b) A altas frecuencias se tiene mayor eficiencia en la transmisión, de acuerdo al medio que se emplee.
- c) Se aprovecha mejor el espectro electromagnético, ya que permite la multiplexación por frecuencias.
- d) En caso de transmisión inalámbrica, las antenas tienen medidas más razonables.

En resumen, la modulación permite aprovechar mejor el canal de comunicación ya que posibilita transmitir más información en forma simultánea por un mismo canal y/o proteger la información de posibles interferencias y ruidos.

La demodulación es el proceso mediante el cual es posible recuperar la señal de datos de una señal modulada.



**Figura 1.26** Demodulador

Las señales de transmisión corresponden a la portadora, mientras que las señales de datos corresponden a la moduladora.

De acuerdo al sistema de transmisión, se pueden tener los siguientes casos.

<b>Señal de transmisión</b>	<b>Señal de Datos</b>
Analógica	Analógica
Analógica	Digital
Digital	Analógica
Digital	Digital

**Tabla 1.2** Señales de transmisión y datos

Estas funciones son actualmente muy complejas y totalmente digitales.

Se puede afirmar que la gran evolución de los sistemas de Radio (y también de otras áreas de Telecomunicaciones), se ha producido por el gran avance que sobre los procesos de modulación/demodulación ha permitido la creciente capacidad de proceso digital de las señales.

En los sistemas modernos, la capacidad de separar las diferentes señales recibidas, de modo de procesar solo la que se desea está también incluida en el MODEM, mediante funciones de filtrado digital muy eficientes y complejas.

Los parámetros que se modifican para que la onda transmita información útil son típicamente la frecuencia o la fase/amplitud de la señal, utilizando modulaciones de múltiples niveles denominadas “en cuadratura”: mQAM, mPSK, etc.

### **1.5.1 Modulación con Portadora Digital**

En las transmisiones en banda base los datos se codifican en una señal digital, cuya forma de onda dependerá del esquema de codificación adoptado. Dicho esquema de codificación deberá optimizar el uso del medio de transmisión: minimizar ancho de banda, número de errores, etc. Su elección también influirá directamente en la complejidad de la electrónica necesaria para enviar o recibir la señal.

Dentro de las señales empleadas para la transmisión en banda base se pueden distinguir dos tipos:

- a) Señales unipolares: que son aquellas en las que todos los elementos de señal tienen la misma polaridad.
- b) Señales bipolares: que son aquellas en las que existen elementos de señal con polaridades diferentes.

El esquema de codificación empleado determinará:

- a) Características espectrales de la señal resultante: ancho de banda, existencia de una componente continua.
- b) Facilidad para sincronización: determinada por la facilidad para identificar el comienzo y el final de un bit.
- c) Capacidad para la detección de errores.
- d) Inmunidad al ruido e interferencias.

e) Costo y complejidad del sistema.

#### **1.5.1.1 Tipos de Modulación de Pulsos**

En la modulación de pulsos se necesita también una portadora que será un tren de pulsos y será la información que hay que enviar la que module o cambie el tren de pulsos.

Las diferentes técnicas de modulación de pulsos pueden dividirse en dos grupos:

a) En función de la información a enviar (señales de entrada), se puede cambiar alguna característica física del pulso, como puede ser la amplitud, la anchura y la posición. Esto da lugar a los siguientes modos:

PWM o modulación por ancho de pulso. El ancho de cada pulso varía conforme, varía la amplitud de la señal analógica.

PPM o modulación por posición de pulso. Dentro de un slot de tiempo determinado, se varía la posición de un pulso de ancho constante, conforme varía la amplitud de la señal analógica muestreada.

PAM o modulación por amplitud de pulso. Consiste en una secuencia de pulsos de ancho constante y amplitud variable, esta última de acuerdo a la variación de amplitud de la señal analógica.

b) También se puede modular la señal a enviar en PAM, y convertir a continuación el valor de amplitud de cada pulso en dígitos para transmitirlos en banda base. Este método se conoce como modulación por codificación de pulsos (PCM).

### 1.5.1.2 Modulación por Codificación de Pulsos (PCM)

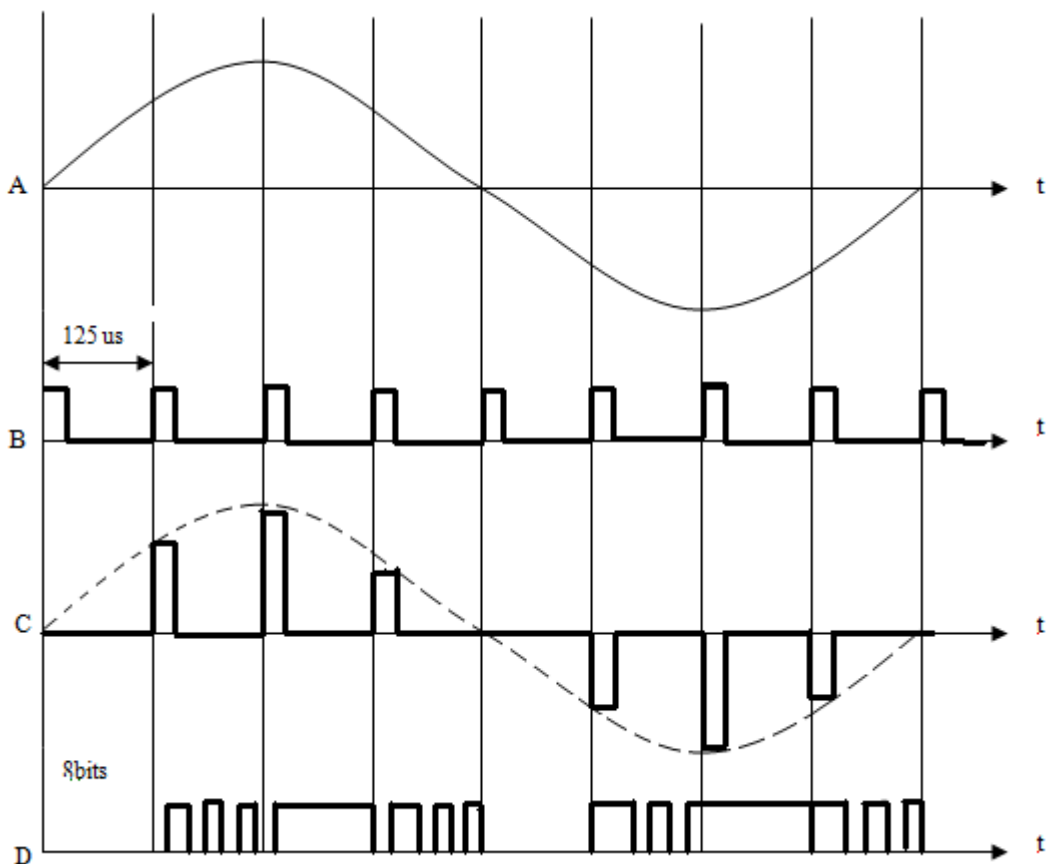
Cuando se quiere enviar una señal analógica en forma digital, lo primero es hacer una conversión A/D, mediante la técnica del muestreo, y después una cuantificación. Una vez en el receptor, se sigue el proceso inverso para poder reconstruir la señal original.

La señal analógica de entrada se observa a intervalos regulares (muestreo) y se toman muestras de la misma en puntos específicos, obteniendo una señal PAM. La señal PAM obtenida tras el muestreo sigue siendo una señal analógica, pues la amplitud del pulso puede tener distintos valores.

A continuación el valor de cada pulso PAM se cuantifica en distintos niveles codificados en valores binarios de  $n$  bits. Si se dispone de  $N$  niveles de cuantificación, se necesitan  $n = \log_2(N)$  bits para representar cada nivel. Al proceso final de muestrear y codificar en binario la señal se le denomina modulación por codificación de pulsos (PCM).

Lo más habitual es emplear 256 niveles que se codifican en 7 bits (128 niveles) más un bit de signo. Estos valores pueden transmitirse en forma binaria como un tren de pulsos.

Para obtener una comunicación eficiente, se necesita tomar un mínimo de  $2H$  muestras por segundo, siendo  $H$  la frecuencia de la señal analógica a transmitir, si se quiere que el receptor sea capaz de reconstruirla. Por ejemplo, para transmitir una señal de audio de un canal telefónico típico donde la frecuencia máxima es de 3.400 Hz, se necesitaría enviar al menos 6.800 muestras/s en PCM. Lo habitual es enviar 8.000 muestras por segundo codificadas cada una con 8 bits, lo que hacen 64Kbps.



**Figura 1.27** Señal modulada por codificación de pulsos (PCM)

Se obtiene así una transmisión de pulsos, con las ventajas que esto conlleva:

- Facilidad para la recomposición de pulsos en estaciones repetidoras
- Mayor inmunidad al ruido y las distorsiones que puede añadir la línea.
- Mayor facilidad para la detección de los pulsos, pues sólo existen dos niveles que representan los valores 0 y 1.

### 1.5.2 Modulación con Portadora Analógica

Ya se mencionó que para transmitir información se usan en general señales de alta frecuencia. La razón principal es que, aunque la atenuación sufrida es mayor, la sensibilidad al ruido es mucho menor que en el caso de las bajas frecuencias.

Si se quieren evitar señales por determinados canales de transmisión, es necesario usar una frecuencia portadora modulada por la señal que se envía, propagándose por el medio hasta el receptor, donde se demodula para así obtener la señal original.

Este método se usó en principio para la transmisión por radio y luego para la transmisión por líneas. Como el canal de transmisión tiene generalmente un ancho de banda mayor que el que necesita la información, se podrá transmitir simultáneamente varias señales por la misma línea usando portadoras de diferente frecuencia (multiplexación por división de frecuencias, FDM).

Si se usa como portadora para enviar datos una onda senoidal, se puede caracterizarla por tres parámetros: amplitud, frecuencia y fase. La modulación de fase no se usa normalmente para transmitir información analógica, sin embargo es la más adecuada para las señales de datos. La portadora será de la forma:

$$a_c = A_c \text{sen}(2\pi f_c t + \alpha_c)$$

Donde  $A_c$  es la amplitud máxima de la señal,  $f_c$  es su frecuencia y  $\alpha_c$  es el ángulo de fase. Variando estos tres parámetros en función de la información a transmitir, se tiene los tres tipos de modulación básicos:

- a) Modulación de amplitud (AM)
- b) Modulación de Frecuencia (FM)
- c) Modulación de fase (PM)

### 1.5.2.1 Modulación de Amplitud

En esta modulación se varía la amplitud de la onda transportadora de acuerdo con la señal que se envíe. En su forma más sencilla, la transportadora simplemente se conecta y desconecta para simular el envío de los bits 1 y 0.

La señal que se propaga por la línea es el resultado de componer la onda original con la portadora. Pueden usarse cuatro niveles diferentes para transmitir 2 bits por nivel, lo que da un margen de error más bajo, sin embargo, la susceptibilidad al ruido aumenta.

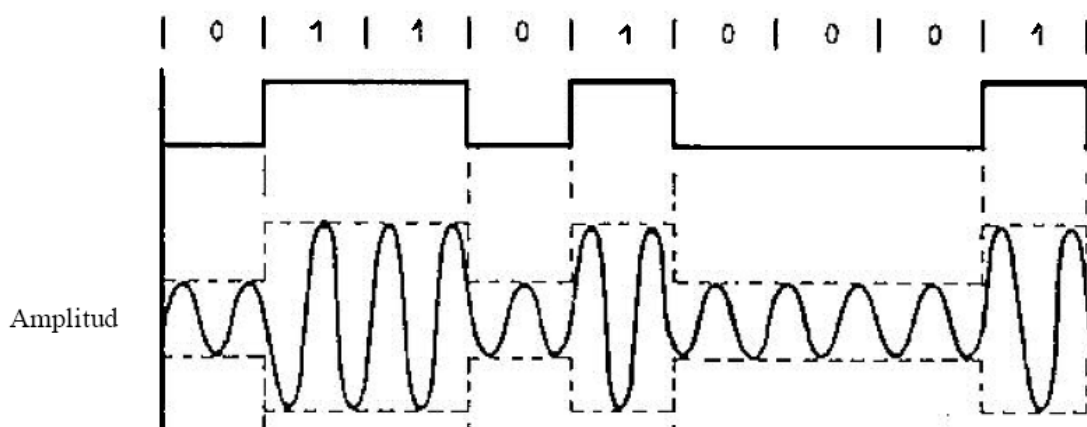
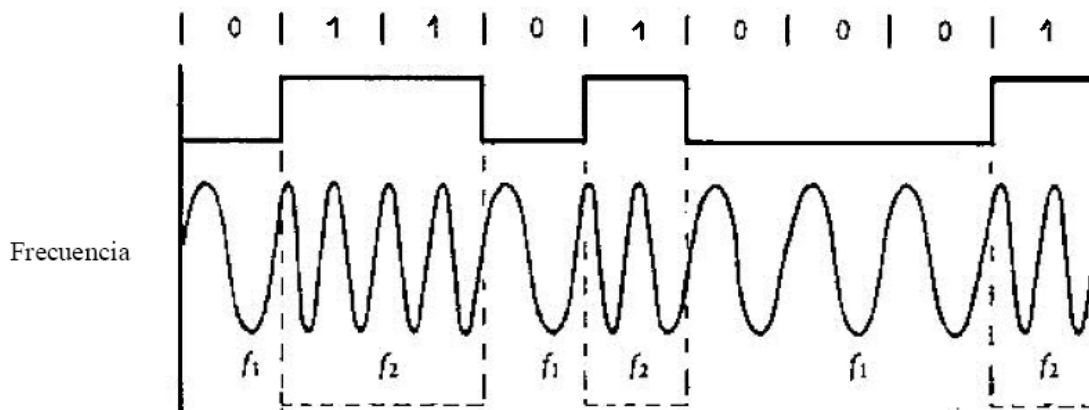


Figura 1.28 Modulación de amplitud (AM)

### 1.5.2.2 Modulación de Frecuencia

En la modulación de frecuencia, al ser la amplitud constante, es inmune a todos los ruidos que varían la amplitud, pero necesita más ancho de banda. Una forma intuitiva y sencilla de modular en FM sería emplear un valor de frecuencia para indicar el valor 1 y otro para indicar el valor 0. A este tipo de modulación de conexión y desconexión se le llama conmutación de variación de frecuencia o conmutación de variación de portadora. La forma práctica de modular en FM es un proceso analógico continuo, en donde la frecuencia varía de acuerdo con la señal que hay que enviar.

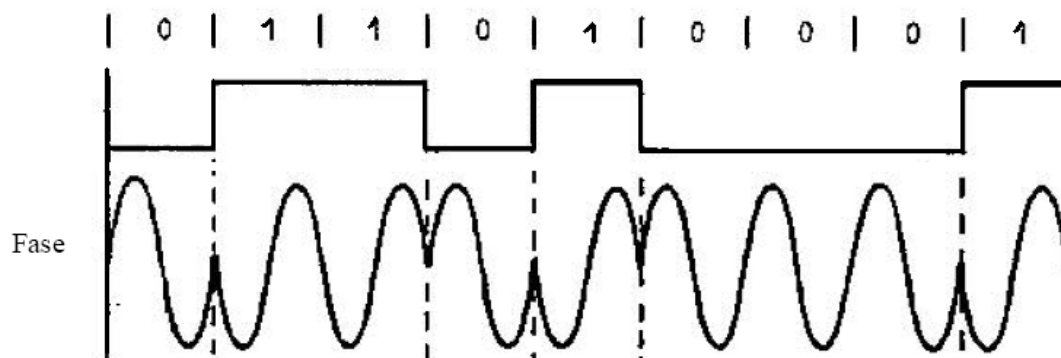




**Figura 1.29** Modulación de frecuencia (FM)

### 1.5.2.3 Modulación de Fase

En la modulación de fase, la fase de la portadora se hace variar en función de los datos a transmitir, siendo la gama máxima de variación de  $\pm 180^\circ$ . Las pequeñas variaciones de fase son difíciles de transmitir y de detectar. Por ello, este tipo de modulación no suele usarse para el envío de información analógica (voz, música,...): no obstante, pueden usarse para poner en clave los bits de datos.

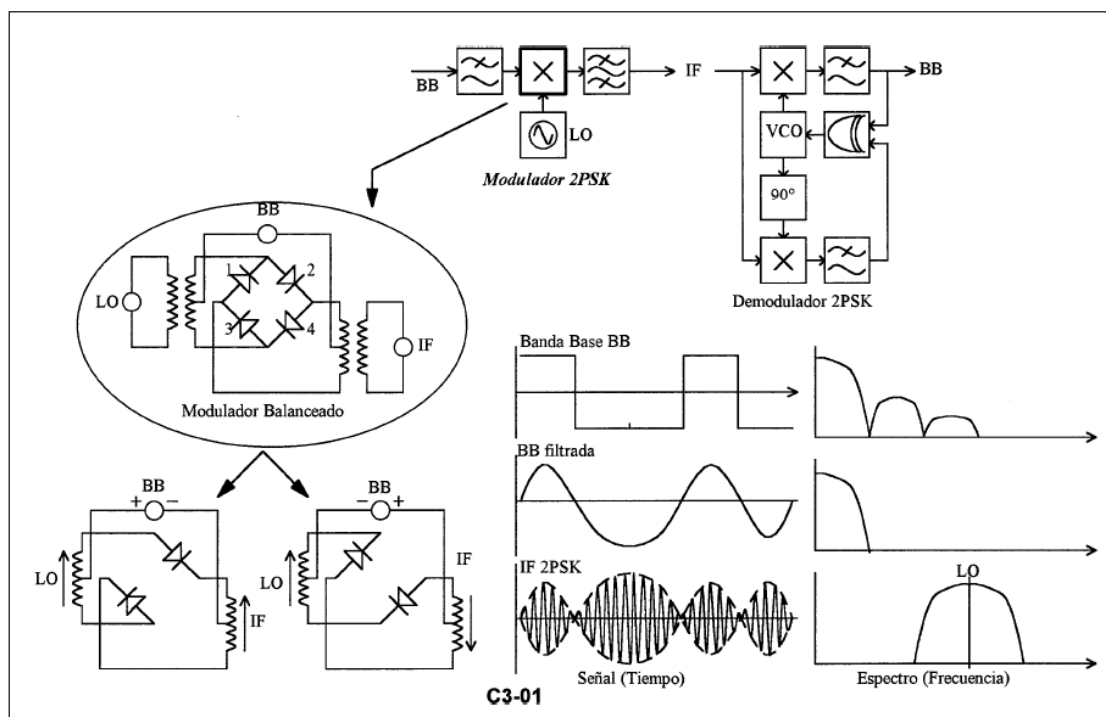


**Figura 1.30** Modulación de fase (PM)

### 1.5.2.4 Modulación Phase Shift Keyed (PSK)

La modulación 2PSK que consiste en dos estados de fase de salida asociados a los dos estados de banda base. Los datos de entrada al circuito que realiza el producto deben ser del tipo bipolar (+1,-1) para polarizar en forma alternada los diodos.

El demodulador se fundamenta en el mismo esquema de funcionamiento pero la complejidad es superior debido a que se requiere una referencia de fase para poder reconocer la modulación de  $0^\circ$  y  $180^\circ$  de fase. En la Figura 1.31 se esquematiza el modulador y demodulador del tipo 2PSK.



**Figura 1.31** Modulador de dos niveles de fase

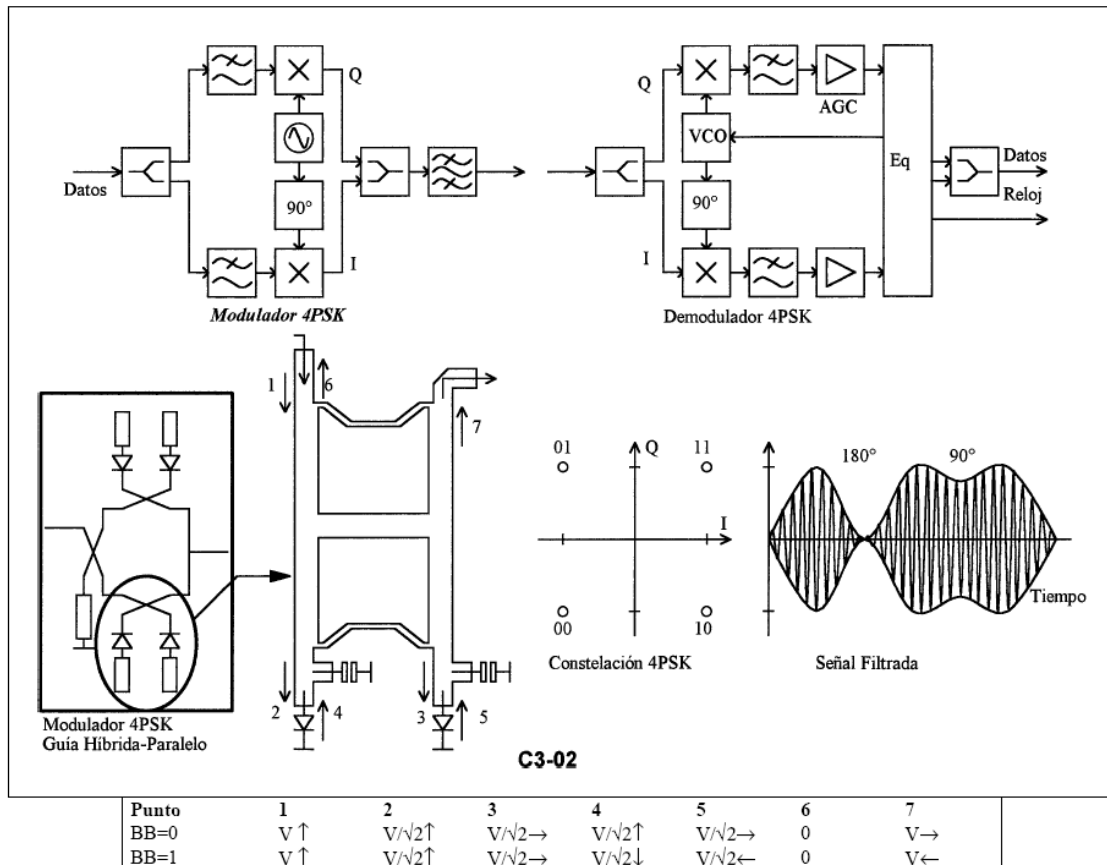
La modulación de 4 estados de fase 4PSK resulta tener una mejor eficiencia espectral (relación entre la velocidad de información en b/s y el ancho de banda necesario en Hz). En otras palabras, requiere menor ancho de banda para transmitir la misma información debido a que cada nivel de fase lleva 2 bits de información.

El modulador y demodulador del 4PSK está constituido por dos moduladores balanceados funcionando en cuadratura (el oscilador local que alimenta a cada modulador se encuentra con una diferencia de fase de  $90^\circ$ ). Cada modulador entrega las fases  $0-180^\circ$  y  $90-270^\circ$  lo cual permite obtener las 4 fases resultantes por suma vectorial. Los ejes en cuadratura (ortogonales) se denominan **I** (In phase) y **Q** (Quadrature). La distribución de bits para cada fase se realiza mediante la codificación cíclica (Gray) de tal forma que entre una fase y las adyacentes a  $90^\circ$  solo se tiene el cambio de un bit. Entre fases a  $180^\circ$  se tiene el cambio de dos bits. Un error de fase entre estados adyacentes solo introduce un error de bit. Antes y después del modulador se coloca un filtro que limita la banda ocupada por la señal digital y por el espectro de frecuencia intermedia. El filtrado de la banda del canal modulado permite reducir el espectro aumentando la eficiencia espectral. Sin embargo, dicha operación elimina armónicas lo que produce una distorsión de amplitud y de fase de la señal resultante respecto de la señal de entrada.

La distorsión de amplitud se observa como una atenuación teórica de 3 dB para saltos de  $90^\circ$  y una anulación de la portadora para saltos de  $180^\circ$ . Esta modulación de amplitud superpuesta a la de fase obliga a trabajar a los amplificadores de radiofrecuencia en una zona lineal de transferencia. Si se satura el amplificador se destruye la modulación de amplitud y se expande el espectro. Esto obliga a mantener a los amplificadores con un nivel de potencia inferior al de saturación en algunos dB<sub>s</sub> (Back off).

Un resultado auxiliar se obtiene demodulando en el receptor la componente de amplitud lo cual permite obtener una armónica de temporización que se traduce en la recuperación del reloj asociado a los datos. En la Figura 1.32 se incluye en el diagrama de bloques del demodulador el circuito de extracción de reloj.

Consiste en un detector de amplitud y un filtro sintonizado a la frecuencia de reloj. Con esta señal se gobierna a un Oscilador Controlado por Tensión VCXO en bucle (PLL) de Control de Fase APC.



**Figura 1.32** Moduladores 4PSK

### 1.5.2.5 Modulación de Amplitud en Cuadratura QAM

Con el propósito de obtener una eficiencia espectral mayor se recurre a métodos de modulación de mayor número de fases. Debido a las prestaciones de tasa de error BER, en función de la relación portadora a ruido C/N, no es conveniente continuar incrementando el número de fases PSK. La modulación de 16 fases PSK consiste en 16 estados de fase distribuidos en una circunferencia con igual amplitud. Una distribución más acertada es 16QAM donde las fases se distribuyen en un reticulado de acuerdo con la Figura 1.33.

La virtud de 16QAM frente a 16PSK es que las fases se encuentran más separadas una de otra con lo cual admiten una amplitud de ruido mayor. El modulador 16QAM se puede efectuar de 2 formas:

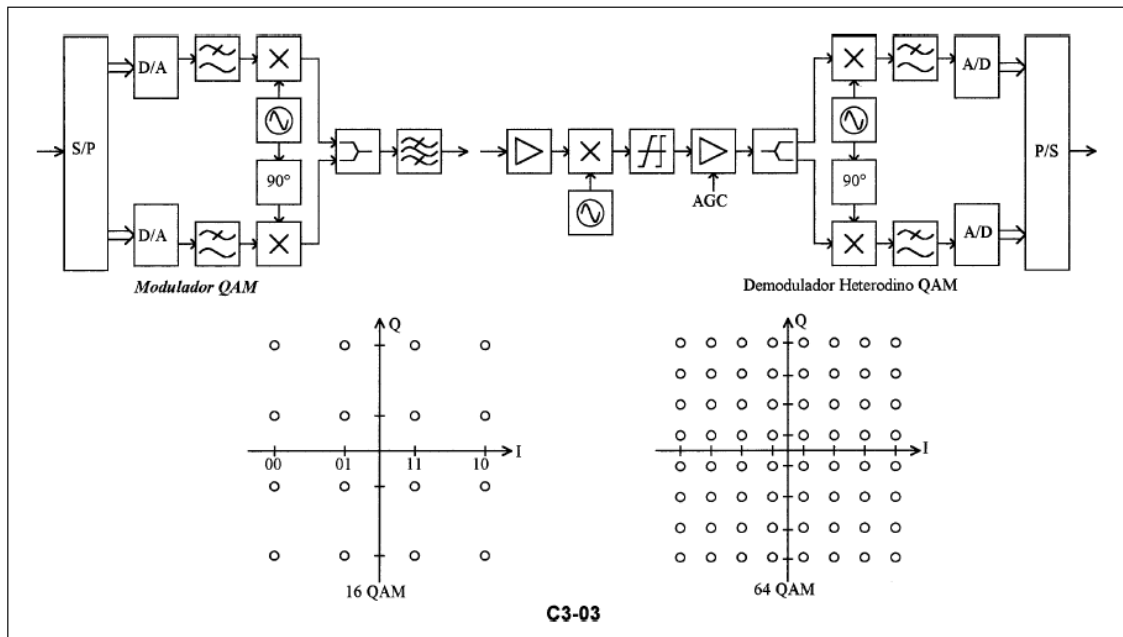
- Mediante un codificador apropiado se disponen de 4 trenes de datos en paralelo y se agrupan de a dos para obtener dos señales analógicas con 4 estados de amplitud cada una (-3,-1,+3,+1). A continuación se efectúa la modulación en cuadratura convencional del tipo 4PSK.
- Mediante 2 moduladores del tipo 4PSK se generan 4 estados de fase en cada uno. Uno de ellos se lo afecta con una atenuación de 6 dB antes de la suma. La modulación 16 QAM resulta ser una modulación 4PSK por cuadrante, donde los cuadrantes se obtienen mediante la otra modulación 4PSK.

La modulación 16QAM permite transmitir una velocidad de 140 Mb/s (4x34 Mb/s) en un ancho de banda de 80 MHz, que es como el ITU-R tiene definidas.

También en bandas con ancho de 60 MHz se ha introducido la modulación 64QAM. La modulación 4PSK solo se usa en sistemas de baja y media capacidad (hasta 34 Mb/s).

La modulación 64QAM se muestra en la Figura 1.33. El modulador es una extensión del concepto anterior con 6 trenes de datos en paralelo en lugar de 4.

Se administran 2 señales analógicas de 8 niveles de amplitud moduladas en cuadratura o se utilizan 3 moduladores 4PSK con relación de atenuación de 6 y 12 dB. La distribución de códigos a cada fase se realiza siguiendo una codificación cíclica; de tal forma que un error de fase introduce en las fases más cercanas solo un error de bit.

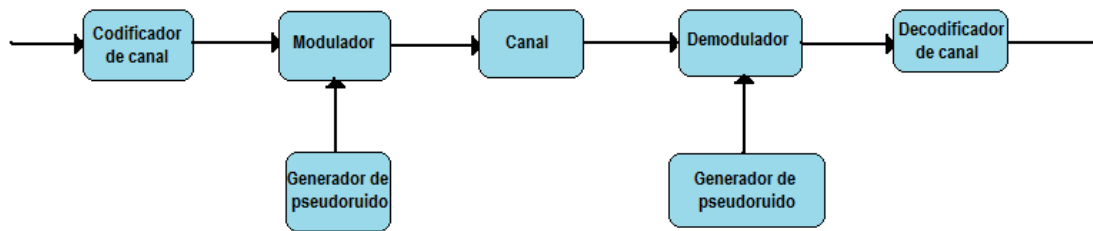


**Figura 1.33** Modulador y Demodulador QAM

### 1.5.3 Espectro Expandido (SS)

La Figura 1.34 destaca las características principales de un sistema de espectro expandido. La entrada va a un codificador de canal que produce una señal analógica con un ancho de banda relativamente estrecho centrado en una frecuencia dada. Esta señal se modula posteriormente haciendo uso de una secuencia de dígitos conocida como código o secuencia de expansión.

Generalmente, aunque no siempre, el código expansor se genera mediante un generador de pseudoruido o números pseudoaleatorios. El efecto de esta modulación es un incremento significativo en el ancho de banda (expansión del espectro) de la señal a transmitir. El extremo receptor usa la misma secuencia pseudoaleatoria para demodular la señal de espectro expandido. Finalmente, la señal pasa a un decodificador de señal a fin de recuperar los datos.



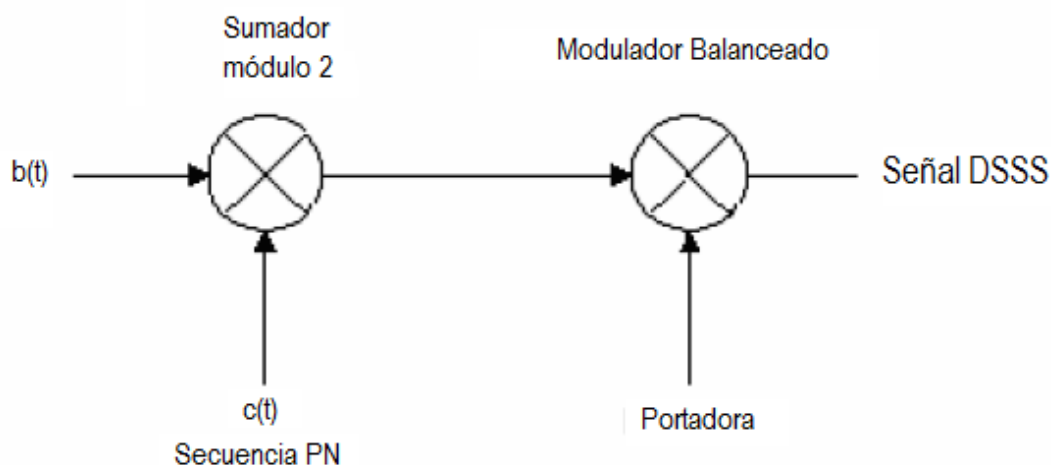
**Figura 1.34** Modelo general de un sistema de comunicación digital de espectro expandido

A través de este aparente desaprovechamiento de espectro se consigue:

- Más inmunidad ante diversos tipos de ruido y distorsión multitrayectoria.
- Inmunidad a interferencias.
- También puede utilizarse para ocultar y cifrar señales. Solo un usuario que conozca el código expansor podrá recuperar la información codificada.
- Varios usuarios independientes pueden utilizar el mismo ancho de banda con muy pocas interferencias entre sí.

### 1.5.3.1 DSSS (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa)

En este tipo de modulación la señal digital de información es modulada mediante una secuencia pseudo aleatoria o pseudo ruido (PN), con una velocidad mucho mayor que la de la señal de información y luego transmitida utilizando algún tipo de modulación digital como se observa en la Figura 1.35:



**Figura 1.35** Generación de Señal DSSS

Multiplicar dos señales en tiempo implica hacer una convolución en frecuencia lo cual esparce o dispersa el espectro. Al dispersar el espectro, la Densidad Espectral de Potencia disminuye, disminuyendo así la interferencia entre sistemas; además, se puede multiplexar casi indefinidamente un canal, asignando códigos diferentes a cada usuario. Esta personalización de los códigos hace también más difícil la intervención indebida de las comunicaciones.

Una secuencia pseudo aleatoria o de ruido (*Pseudo Noise-PN*) se define como un conjunto de señales binarias, periódicas y de cierta longitud de tal forma que, dentro de cada período, la señal puede aproximarse a una señal aleatoria.

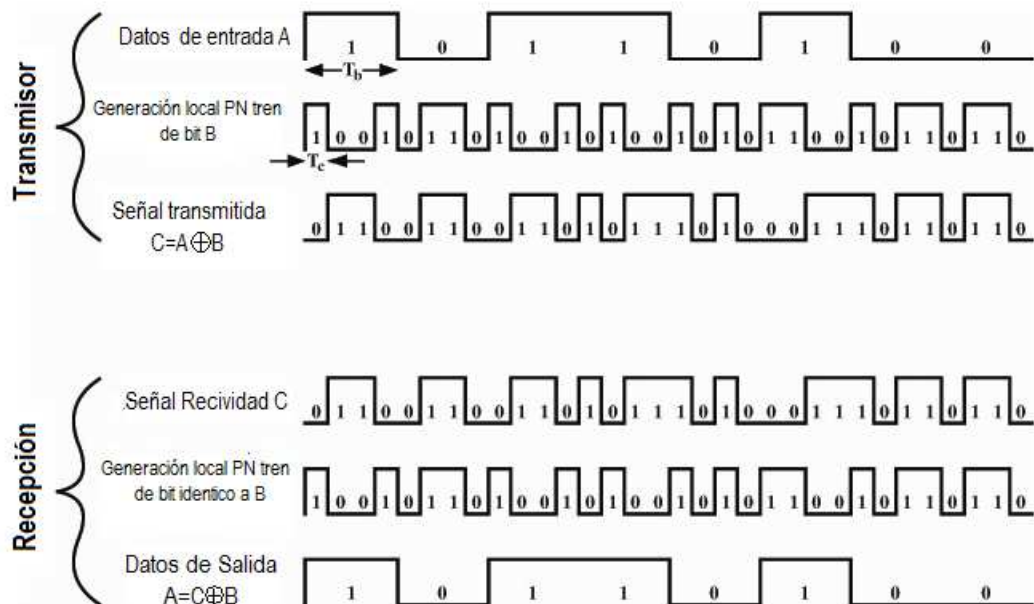
Se hace esto para tener la certeza de que la misma secuencia puede generarse tanto en el transmisor como en el receptor. Si fuese totalmente aleatoria esto no sería posible.

Dentro de estas secuencias PN se define un chip como la duración de cada elemento dentro de la misma. Se le llamará  $T_c$ . Este tiempo será mucho menor que la duración de 1 bit en la secuencia que se quiere codificar. Las secuencias periódicas pseudos aleatorias deben satisfacer las siguientes propiedades:



1. **Balance:** El número de 1<sub>s</sub>, en un período de la secuencia, difiere en uno del número de 0<sub>s</sub>.
2. **Balance en Cadenas:** Dentro de un período de la secuencia se definen cadenas de 1<sub>s</sub> y cadenas de 0<sub>s</sub>. El número de cadenas de cada uno deben ser iguales. En cada periodo la mitad de las cadenas del mismo signo tiene longitud 1, un cuarto tienen longitud 2, un octavo tiene longitud 3 y así sucesivamente.
3. **Auto correlación:** La función de auto correlación de estas secuencias es periódica y con dos valores. Para una secuencia {a<sub>k</sub>} de 1<sub>s</sub> y -1<sub>s</sub> la auto correlación C(k) se calcula como:

$$C(K) = \sum_{n=1}^N a_n a_{n+K} = \begin{cases} N & K = 0, N, 2N \\ -1 & \text{el resto} \end{cases}$$

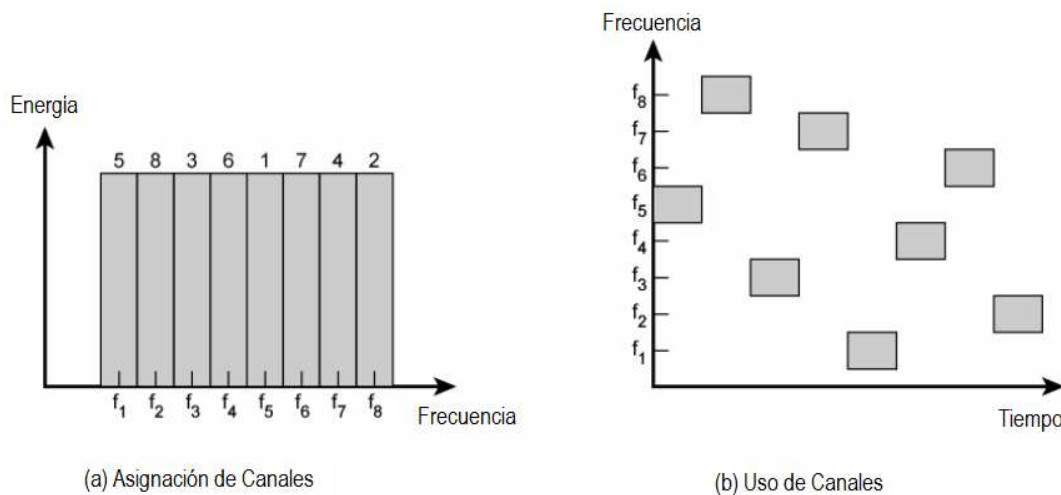


**Figura 1.36** Ejemplo de DSSS

### 1.5.3.2 FHSS (Espectro Expandido por Salto de Frecuencia)

En los sistemas DSSS a mayor dispersión del ancho de banda se tiene más fortaleza frente a las interferencias. Sin embargo, esto también aumenta la complejidad del hardware. Eso da pie a otro tipo de sistemas conocidos como de multiplicidad de frecuencias que van cambiando en el tiempo o Frequency Hopping (FHSS). En este caso la señal o mensaje es modulada, con algún tipo de modulación, por señales de portadoras que cambian abruptamente su frecuencia a intervalos regulares, cíclica o aleatoriamente.

Estos saltos de frecuencia se hacen con dos objetivos fundamentales: incrementar la capacidad del sistema y mejorar su calidad (disminuyendo la tasa de bits errados). La variación en frecuencia podría lucir como sigue:

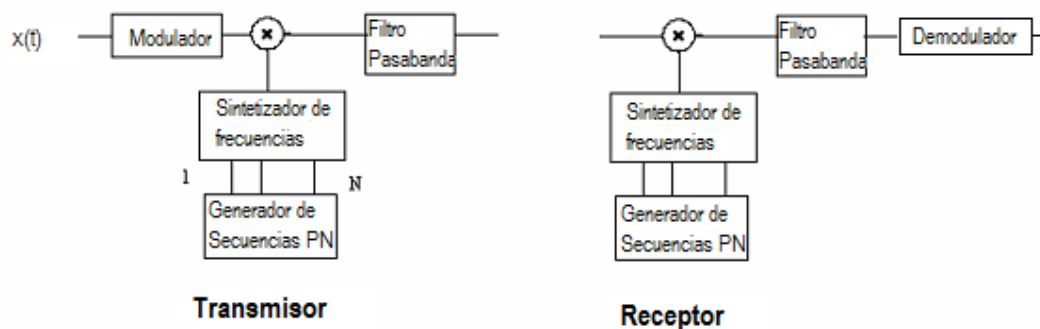


**Figura 1.37** Ejemplo de salto de frecuencia

En el esquema de espectro expandido por salto de frecuencia (FHSS), la señal se emite sobre una serie de radiofrecuencias aparentemente aleatoria, saltando de frecuencia en frecuencia sincronamente con el transmisor. Por su parte, los receptores no autorizados escucharán una señal ininteligible. Si se intenta interceptar la señal, solo se conseguirá hacerlo para unos pocos bits.

El diagrama típico de un sistema en salto de frecuencia se muestra en la Figura 1.38. Se reserva varios canales para la señal FH, existiendo por lo general  $2^k$  frecuencias portadoras que dan lugar a  $2^k$  canales. El espacio entre frecuencias portadoras y, por lo tanto, el ancho de banda de cada canal, se corresponden generalmente con el de la señal de entrada. El emisor opera en un canal durante un intervalo fijo (por ejemplo, el estándar IEEE 802.11 considera un intervalo de 300 ms).

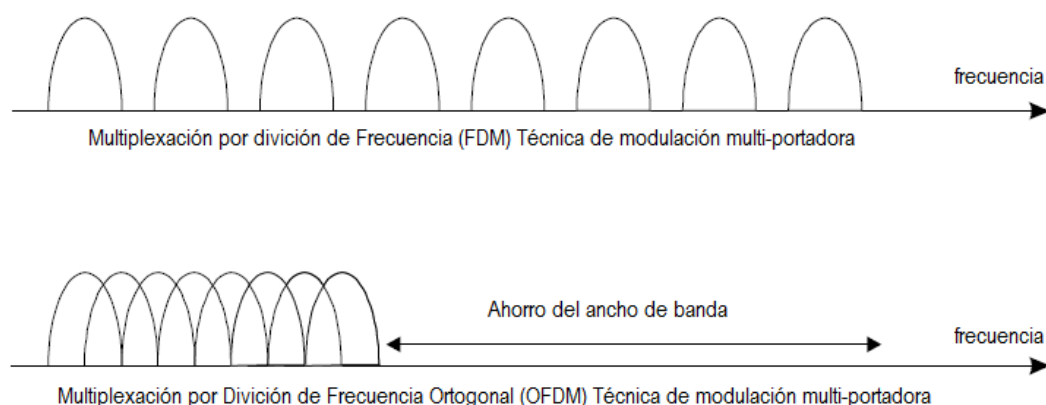
Durante este intervalo se transmiten varios bits haciendo uso de algún esquema de codificación. La secuencia de canales queda especificada por un código expansor, utilizando el emisor y el receptor el mismo código a fin de sincronizar la secuencia de canales seguida.



**Figura 1.38** Transmisor y receptor de un sistema FHSS

#### 1.5.4 OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal)

El concepto de usar la transmisión paralela de los datos por medio de multiplexación de división de frecuencia (FDM) fue publicado por los años sesenta. La idea era usar el tren de datos paralelos y FDM con solapamiento de sub-canales para evitar el uso de ecualizadores de alta velocidad y combatir el ruido y la distorsión por multi-trayectorias, así como para usar el ancho de banda total disponible.



**Figura 1.39** Comparación del ancho de banda utilizando FDM y OFDM

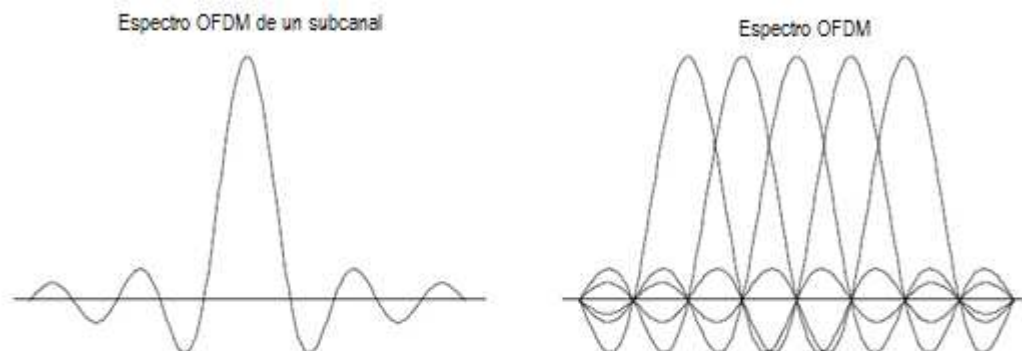
En OFDM los datos son divididos entre el número de portadoras estrechamente espaciadas. El ancho de banda entero está lleno de una sola fuente de datos y la influencia de la interferencia intersimbolo (ISI) es significativamente reducida.

La ortogonalidad en OFDM es importante, indica que hay una relación matemática precisa entre las frecuencias de las portadoras en el sistema, así las portadoras son linealmente independientes, si la portadora es un múltiplo de  $1/t$ . Matemáticamente se tiene un conjunto de signos  $\psi$  dónde  $\psi_p$  es el elemento  $p$ -th del conjunto. Los signos son ortogonales si:

$$\int_a^b \Psi_p(t) \Psi_q^*(t) dt = \begin{cases} K & \text{para } p = q \\ 0 & \text{para } p \neq q \end{cases}$$

Donde el \* indica el complejo conjugado en el intervalo  $[a,b]$  que es el periodo del símbolo. Es una prueba que las series  $\sin(mx)$  para  $m = 1,2,\dots$  es ortogonal encima del intervalo  $-\pi$  a  $\pi$ .

La descripción matemática de OFDM permite ver cómo el signo se genera y cómo el receptor debe operar, dando una herramienta para entender los efectos de imperfecciones en el canal de transmisión.



**Figura 1.40** Ejemplo del espectro de OFDM

Matemáticamente, cada portadora puede describirse como una onda compleja:

$$S_c(t) = A_c(t) e^{j[\omega_c t + \phi_c(t)]} \quad (1)$$

Los valores de los parámetros son constantes sobre la duración del símbolo en el periodo  $t$ .

La ecuación que describe a la Figura 1.40 viene dada por:

$$S_s(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n(t) e^{j[\omega_n t + \phi_n(t)]} \quad (2)$$

Donde:  $\omega_n = \omega_0 + n\Delta\omega$ . Si se considera las formas de onda de cada componente de la señal por encima del periodo del símbolo, entonces las variables  $A_c(t)$  y  $\phi_c(t)$  asumen valores fijos que dependen de la frecuencia de esa portadora en particular y puede volverse a escribir:

$$\varphi_n(t) \rightarrow \varphi_n$$

$$A_n(t) \rightarrow A_n$$

Si se prueba usando una frecuencia de  $1/T$ , el resultado se representaría:

$$S_s(KT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j[(\omega_0 + n\Delta\omega)KT + \varphi_n]} \quad (3)$$

En este punto se ha restringido el tiempo para analizar a las N muestras, así se tendrá una relación:

$$t=NT$$

Si se simplifica la ecuación (3), si una pérdida de generativa, permitiendo  $\omega_0 = 0$ , entonces la señal se vuelve:

$$S_s(KT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j\varphi_n} e^{j(n\Delta\omega)KT} \quad (4)$$

Ahora la ecuación 4 puede ser comparada con la forma general de la transformada inversa de Fourier:

$$g(KT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} G\left(\frac{n}{NT}\right) e^{j2\pi nk/N} \quad (5)$$

En la ecuación 4 la función  $A_n e^{j\varphi_n}$  no es más que una definición de la señal en una muestra del dominio de la frecuencia, y  $s(kT)$  es la representación en el dominio del tiempo. Las ecuaciones 4 y 5 son equivalentes si:

$$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{1}{NT} = \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

Esta es la misma condición que se requirió para la ortogonalidad. Así, una consecuencia de mantener la ortogonalidad en OFDM puede definirse usando procedimientos de las transformadas de Fourier.

### **1.5.5 Demodulación**

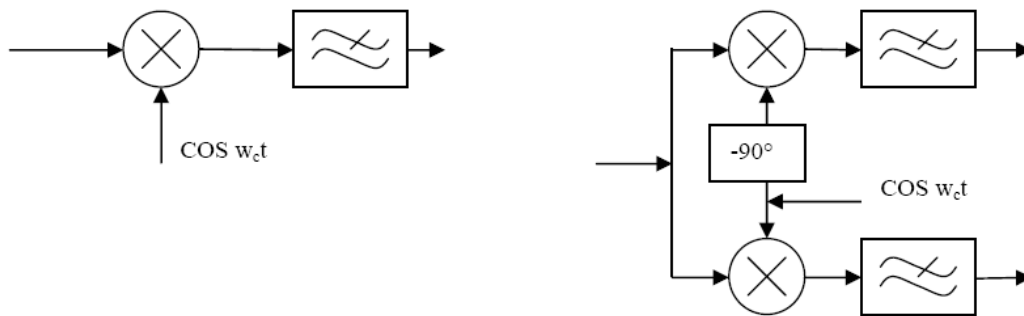
Demodulación es el proceso de traslación en frecuencia de la señal recibida pasabanda a bandabase. Hay algunos tipos de demodulación:

- Demodulación coherente o demodulación sincrónica.
- Demodulación no coherente o demodulación libre.
- Demodulación diferencial.
- Demodulación muestreada.

#### **1.5.5.1 Demodulación coherente o demodulación sincrónica**

La fase de la señal es deducida de su relación con una portadora generada localmente, puede usar demodulación homodina o sincrodina. La demodulación homodina significa el uso de la misma portadora transmitida como un piloto junto con la misma señal. En cambio sincrodina implica el uso de una portadora generada localmente que está de alguna manera sincronizada con la portadora implícita en la señal.

Un ejemplo de homodina es la demodulación SSB (BLU) y de sincrodina es QAM. Las siguientes figuras muestran dos demoduladores coherentes, uno unidimensional y el otro bidimensional (QM: modulación en cuadratura).



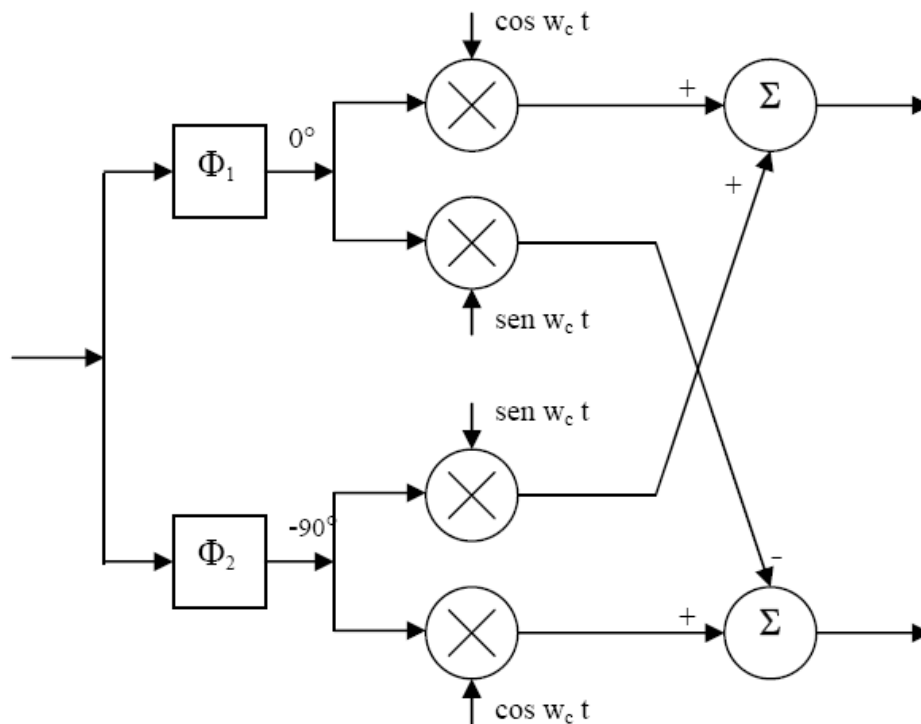
**Figura 1.41** Demodulación Homodina y Demodulación Sincrodina

El filtro pasabajo debe rechazar la banda lateral superior generada en el proceso de demodulación que comienza en  $f_c - (1+\alpha)f_s/2$ , aún para sistemas de banda ancha ( $f_s/f_c > 1/2$ ) como en V.33, la atenuación de 46dB necesaria para prevenir que la S/N a la entrada de 30dB sea reducida por el “ruido” de la banda lateral superior por más de 0.1dB es fácil de conseguir.

Los multiplicadores son más fáciles de implementar si la portadora es una onda cuadrada. Esto no impone una exigencia mayor sobre los filtros pasabajos debido a que los productos de intermodulación indeseados que se agregan, la banda lateral inferior de la tercera armónica de la portadora, se superpone (9.5dB más abajo) con la banda lateral superior de la fundamental.

La banda lateral superior puede ser eliminada también por el método de Hartley mostrado en la Figura 1.42.





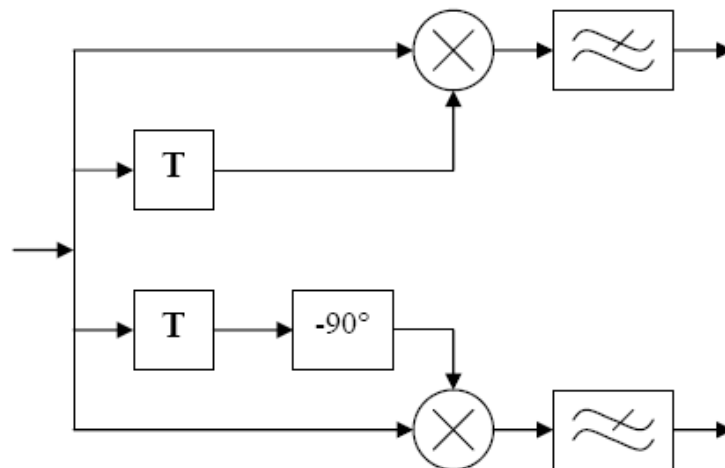
**Figura 1.42** Método de Hartley

### 1.5.5.2 Demodulación no coherente o demodulación libre

Este demodulador puede implementarse con cualquiera de los dos esquemas anteriores, excepto que en este caso el oscilador es libre a la frecuencia de la portadora, por lo tanto es un caso particular de demodulación heterodina. Este proceso normalmente es seguido de un ecualizador adaptativo y rotación como describí más adelante.

### 1.5.5.3 Demodulación diferencial

Ya sea con demodulación coherente o no coherente es necesaria una etapa previa de detección coherente. La Figura 1.43 muestra un demodulador diferencial bidimensional convencional.



**Figura 1.43** Demodulador diferencial bidimensional convencional

Una condición importante en el demodulador diferencia es que la frecuencia de la portadora  $f_c$  debe ser un múltiplo entero de la tasa de símbolo  $f_s$ . El desplazamiento de fase provocado por la red de retardo de la parte superior del diagrama es:

$$\Phi_p(\omega) = (\omega_c - \omega) T + \Phi_c$$

Entonces: puede parecer que solo es necesario un retardo  $T$  pero, solo se ha dibujado de esa forma para enfatizar las dos operaciones separadas. Si el defasador a  $-90^\circ$  es combinado con el retardo, el circuito puede expresarse como:

$$\Phi_q(\omega) = (\omega_c - \omega) T + \Phi_c - \pi/2$$

Para entender el funcionamiento del circuito, hay que suponer que la señal recibida se deriva de uno de los cuatro patrones posibles:  $\Delta\Phi = 0, 90^\circ, 180^\circ$ , o  $270^\circ$ .

La señal recibida será:

$$s(t) = A_m \cos 2\pi \left( \frac{f_c + m f_s}{4} \right) t + (1 - A_m) \cos 2\pi \left( \frac{f_c - f_s + m f_s}{4} \right) t$$

Donde  $m = 0, 1, 2, \text{ o } 3$

Las salidas de los dos filtros pasa bajos para  $t = kT$  son:

$$X_p(kT) = \cos\left(\Phi_c - \frac{K\pi}{2}\right)$$

$$X_q(kT) = \cos\left(\Phi_c + \frac{(1-K)\pi}{2}\right)$$

Si las redes de retardo se diseñan de forma tal que  $\Phi_c = 0$ , entonces:

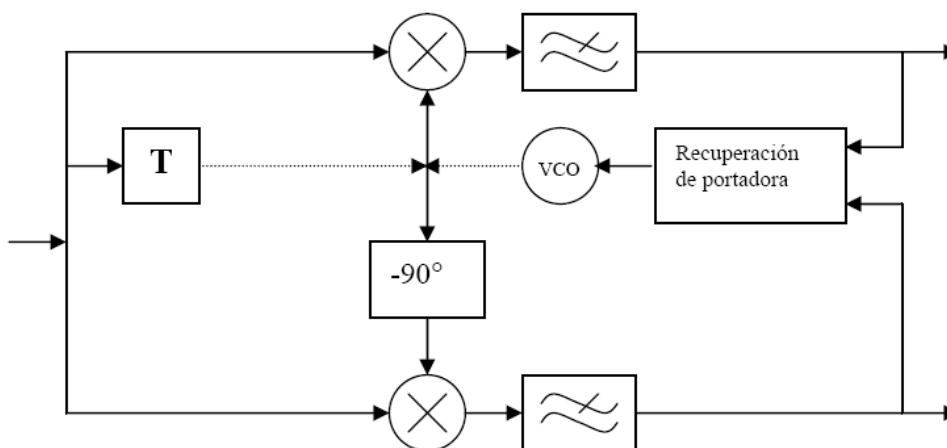
$$X_p(kT) = \cos\left(\frac{K\pi}{2}\right)$$

$$X_q(kT) = \sin\left(\frac{K\pi}{2}\right)$$

Sin embargo los valores muestreados de  $x_p$  y  $x_q$  solo pueden valer  $+1, -1, \text{ o } 0$ .

En la práctica, es más conveniente utilizar valores de  $\Phi_c$  igual a cualquier múltiplo impar de  $\pi/4$ . Entonces en los instantes de muestreo  $x_p$  y  $x_q$  solo puede adoptar los valores  $+1/\sqrt{2}$  y  $-1/\sqrt{2}$ , y puede utilizarse un detector de cruce por cero para el detector.

La Figura 1.44 muestra un demodulador diferencial genérico con dos alternativas para generar los multiplicandos en fase y cuadratura. Puede verse que la única diferencia con respecto a un demodulador sincrónico es la fuente de la que se extrae la portadora.



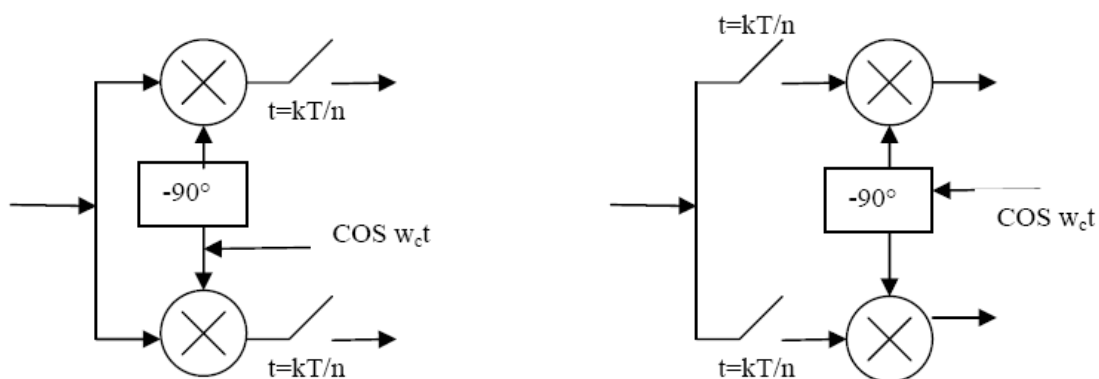
**Figura 1.44** Demodulador QAM genérico con dos fuentes de recuperación de portadora

#### 1.5.5.4 Demodulación Muestreada

Si se utilizan portadoras senoidales, no es necesario emplear filtros pasabajos.

Se puede usar un demodulador de Hartley seguido por un muestreador.

Los muestreadores se colocan a la salida de los dos multiplicadores, aunque como los multiplicadores son dispositivos sin memoria, también pueden moverse a la entrada de los multiplicadores como muestra la Figura 1.45:



**Figura 1.45** Demodulación Muestreada

La frecuencia de muestreo puede ser igual a la tasa símbolo o algún múltiplo entero pequeño de esa tasa. En la mayoría de los modems para línea telefónica, la frecuencia de la portadora del transmisor es un múltiplo racional de tasa de símbolos:

$$f_c = M f_s / N$$

donde M y N son enteros pequeños.

En un receptor elemental la señal analógica es procesada (filtrada, etc), demodulada a banda base y luego ingresa a un detector de umbral. La salida continua del detector es muestreada digitalmente, y el resultado es pasado al decodificador.

Como se pudo apreciar en este capítulo se realizó una descripción de un radio transceptor convencional, amplificación de señales, conversión A/D y D/A, tipos de modulación/demodulación, para tener presente todo lo que realiza el radio en una transferencia de información, dando una idea para comprender de mejor manera los capítulos siguientes que comprenden el estudio del radio definido por software (SDR).

## **CAPITULO 2**

# **CARACTERÍSTICAS DEL RADIO CONFIGURADO POR SOFTWARE**

En este capítulo se describirá las funcionalidades de un radio que puede configurarse mediante la tecnología SDR. Se revisarán los componentes que den a un radio la característica de poder ser definido por software.

El radio definido por software (SDR) necesita una infraestructura donde opere el software; es así, que se revisará la Arquitectura de Software de Comunicaciones (Software Communications Architecture, SCA).

El objetivo fundamental de la SCA es proporcionar una infraestructura de software común para gestionar los sistemas de radio. A pesar de que el software comprende parte significativa de los radios más recientes, posibilitando así que nuevas capacidades y funciones puedan ser agregadas al radio en un futuro, el software es cargado y controlado típicamente a través de mecanismos propietarios y cada fabricante de radio emplea una infraestructura o arquitectura única. Conviene ampliar que un SDR se refiere a una clase de radio cuyas capacidades no son simplemente proporcionadas por el software, sino que utiliza una infraestructura que provee soporte a componentes intercambiables y de allí a su funcionalidad.

La especificación de un SCA describe una colección de componentes, la configuración de los componentes y la unión de los componentes en una aplicación de forma de onda<sup>1</sup> funcional en un sistema de radio. Tomados juntos, éstos forman una infraestructura para definir y construir un sistema de radio definido por software (SDR).

---

<sup>1</sup> Una forma de onda se utiliza a veces como sinónimo de un estándar de interfaz de aire o de la capa física.

## 2.1 Estudio de la Arquitectura SCA

La SCA es una arquitectura abierta definida por el Conjunto Táctico para Sistemas de Radio (Joint Tactical Radio System, JTRS) y la Oficina del Programa Conjunto (Joint Program Office, JPO). El SCA se ha publicado para proporcionar una arquitectura abierta que puede ser utilizada para construir una familia nueva de radios reconfigurables, basados en software. Los radios construidos con SCA deben ser interoperables, deben permitir utilizar una amplia gama de frecuencias, y permitir la inserción de nuevas tecnologías. El SCA también apoya la reutilización del software.

El propósito principal de la especificación del SCA es definir el ambiente en el que opera el software, llamado también el Core Framework (CF) que lleva a cabo el direccionamiento, despliegue, configuración, y mando del sistema de radio y las aplicaciones que corren en la plataforma de ese radio.

La JPO fue establecida para seguir el desarrollo de los sistemas de comunicación futuros, mientras captan los beneficios de los adelantos de las tecnologías de años recientes, que se espera refuercen la interoperabilidad de los sistemas de comunicación. Las metas puestas para el programa de JTRS son:

1. **Arquitectura común abierta:** El uso de una arquitectura abierta, estandarizada tiene la ventaja de promover la competencia, interoperabilidad, inserción de tecnología, actualizaciones, uso repetido de software, y escalabilidad.
2. **Campos múltiples:** La familia de los radios JTRS debe ser capaz de soportar operaciones en una variedad de campos, incluyendo el aerotransportado, fijo, marítimo, vehicular y portátil.
3. **Bandas múltiples:** Un radio JTRS debe poder reemplazar varios radios que usen un rango amplio de frecuencias, y pueda operar con ellos.

4. **Compatibilidad:** Los radios JTRS deben ser capaces de comunicarse con los sistemas más representativos para minimizar el impacto de la integración de la plataforma.
5. **Actualizaciones:** La arquitectura JTRS debe permitir la inserción de nuevas tecnologías para mejorar el rendimiento, y para construir radios que no tengan problemas en el futuro.
6. **Seguridad:** La seguridad es un aspecto muy importante en los radios militares. De allí que la arquitectura debe proporcionar las bases necesarias para cubrir aspectos como: capacidad de encriptación, manejo de certificados, identificación y autenticación de usuarios, manejo de claves, y múltiples niveles independientes de clasificación.
7. **Red:** Los radios JTRS deben soportar protocolos existentes de red, con el propósito de dar transparencia en la integración. La arquitectura debe también apoyar las capacidades de una red de banda ancha para voz, datos y video.
8. **Reutilización de software:** Como con cualquiera otra arquitectura de software, la arquitectura JTRS debe permitir la máxima reutilización de los componentes de software.

### 2.1.1 Evolución de SCA

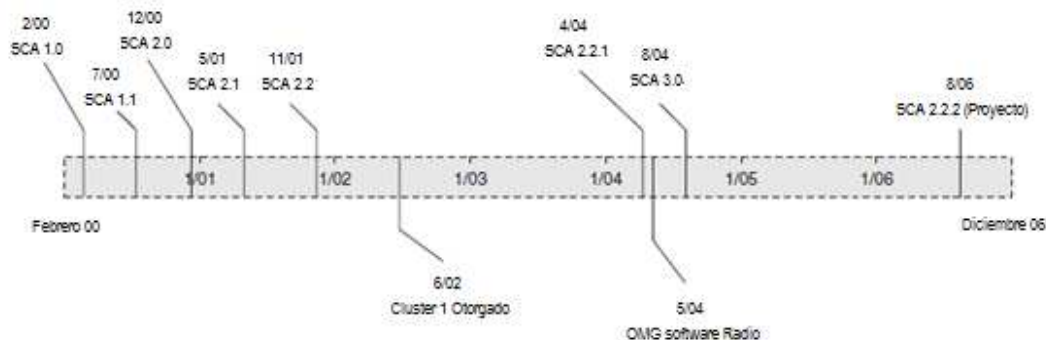
El ejército de Estados Unidos estuvo (y está) enfrentando una necesidad crítica creciente de apoyar comunicaciones para tareas múltiples, de despliegue rápido, con diversos escenarios y objetivos. Uno de los obstáculos primarios al enfrentar estos desafíos fue que los sistemas de radio eran predominantemente basados en hardware, limitadas a aquellas formas de onda que fueron diseñadas en el sistema, e incapaces de ser actualizados o de agregar nuevas formas de ondas sin un costo significativo debido a su dependencia del hardware del equipo.



Concurrentemente, durante las últimas dos décadas, las capacidades de los procesadores se han incrementado dramáticamente, procesadores de propósito especial como el Procesador Digital de Señales (Digital Signal Processor, DSP) y la Matriz de Compuertas Programables en el Campo (Field Programmable Gate Array, FPGA), están ahora más comúnmente disponibles, y la velocidad y la resolución de los circuitos análogo a digital y digital a análogo ha aumentado continuamente. El resultado es que el procesamiento de señales de formas de onda que una vez era exclusivamente de dominio analógico ha migrando al dominio digital implementando en software. Experimentos tempranos en radios basados en software como SpeakEasy mostraron que había beneficios importantes ganados si se movía hacia una arquitectura basada en software. Muchos fabricantes de radio ya han empezado el camino de implementar en software los componentes del procesamiento de señales. Los primeros sistemas de radio multi-canal desarrollados en los años noventa, como el Terminal de Información de Combate Conjunto (Joint Combat Information Terminal, JCIT) y la Radio Digital Modular (Digital Modular Radio, DMR) proveían una infraestructura de software para la gestión de los recursos del radio.

Con la necesidad de mejorar la reconfigurabilidad, dar soporte a misiones múltiples y reducir operaciones de larga duración y costos de mantenimiento, se formo el JTRS y la JPO para desarrollar una nueva familia de sistemas de radio reconfigurables basados en software. Una de sus primeras actividades fue definir una infraestructura de software común que se aplicaría a esta nueva familia de sistemas de la radio. Así, nació la SCA.

La Figura 2.1 muestra algunos pasos importantes en la evolución de las especificaciones de SCA. Hubo varias versiones preliminares pero la 1.0 fue la primera versión de la especificación desarrollada para una implementación inicial del SCA. Con ciertos adecuamientos se realiza la versión 1.1. Luego se rediseñaron partes significantes de la especificación resultando en la versión 2.0.



**Figura 2.1** Evolución de SCA

La versión 2.0 tuvo varios problemas y requirió un poco de detalles adicionales y ciertas especificaciones para resolver todos los aspectos que se requerían de una infraestructura de software. No obstante, hubo varias aplicaciones de la versión 2.0 que proporcionaron valiosas experiencias para la regeneración del proceso de desarrollo. De nuevo, una versión incremental se dio a mediados de 2001, la versión 2.1, seguida por la versión 2.2 en noviembre del mismo año. Se consideraba que la versión 2.2 era bastante completa para implementarla y aplicar en el campo en un sistema de software radio.

En junio del 2002, el primer programa para aplicar el SCA se otorgó a Boeing por el Comando de Comunicaciones y Electrónica (Communication and Electronics Command, CECOM). La Radio Móvil Terrestre (GMR) renombró al programa como Cluster 1, siendo el primer proyecto en utilizar la versión 2.2 del SCA. En Abril del 2004, casi tres años después, se lanzó la versión 2.2.1. Esta versión eliminó muchos de los errores en la versión 2.2 e incorporó varias mejoras. A mediados del 2004, el Grupo de Gestión de Objetos (OMG) lanzó su especificación de Software Radio. La especificación de OMG fue iniciada por varias de aquellas personas que habían contribuido al desarrollo de SCA. El objetivo original era hacer de SCA un estándar industrial en lugar de una especificación solo militar. Sin embargo, cuando la especificación evolucionó en el OMG, tomó una ruta que es significativamente diferente de la especificación de SCA.

Al mismo tiempo, problemas con la portabilidad de la forma de onda estaban siendo consideradas a través de los programas del Cluster JTRS. El problema básico era que el código desarrollado para un Procesador de Propósito General (GPP) era razonablemente portátil entre las plataformas. Sin embargo, el código desarrollado para un DSP y para el FPGA generalmente permanecía específico a un procesador en particular y a cierta arquitectura de radio.

Este problema de portabilidad se empezó a tratar a finales del 2004, generándose varios talleres especiales convocados por el JPO, para resolver el problema de portabilidad de DSP y FPGA. El resultado de estos talleres fue el SCA 3.0. Esta versión del SCA cambió poco los requisitos básicos que describen el SCA. Sin embargo, definió restricciones adicionales en el software del DSP relacionando con lo que el sistema podría invocar usando el código del DSP. Definió también una propuesta de un conjunto de componentes de forma de onda, propuso un diseño de transporte de datos de alto nivel (llamado HAL-C), y tenía una sección de Interfaz de Programas de Aplicación (Application Programming Interface, API) de antena.

La reacción general en la comunidad fue que la especificación requería trabajo adicional y, aunque los conceptos y acercamientos eran potencialmente útiles, que se requería más detalle y análisis para lograr un conjunto de descripciones que podrían ser implementados eficazmente.

A finales del 2005 y comienzos del 2006, el JPO fue re-organizado para resolver los problemas con los programas del Cluster en forma más eficaz y avanzada. La JPO se trasladó a San Diego, CA, de Washington, D.C. y se administra ahora por la oficina SPAWAR de la Armada. A mediados del 2006 se presentó la versión 2.2.2. Era una versión incremental de la versión 2.2.1 de SCA. Además, la versión 3.0 es mostrada en el website de JTRS como 'sin soporte.' Así, al momento de esta publicación, la versión 2.2.2 es la apoyada por la JPO.

### 2.1.2 Que es el SCA

El SCA define el entorno de funcionamiento a ser usado en radios JTRS. También especifica los servicios y enlaces de las aplicaciones usadas por el entorno. Los enlaces son definidos para el uso de CORBA IDL (Interface Definition Language), y las representaciones gráficas son hechas usando el Lenguaje de Modelación Unificada (Unified Modelling Language, UML).

El entorno de funcionamiento consiste de un Core Framework, un middleware de CORBA y un sistema operativo basado en POSIX (OS). El OS corriendo en SCA debe proporcionar servicios y enlaces que son definidos como obligatorios en el Perfil del Entorno de Aplicación (Application Environment Profile. AEP) del SCA. El Core Framework describe a interfaces, sus propósitos y sus operaciones. Proporciona una abstracción fundamental de las capas de software y hardware para los desarrolladores de aplicaciones de software. Un sistema compatible con SCA debe implementar estas interfaces. Las interfaces son agrupadas en la aplicación base, control de Framework e interfaces de servicios.

Las interfaces de aplicación base son utilizadas por la capa de aplicación. Ellas proporcionan los elementos básicos de una aplicación. Las interfaces en este grupo son: *Port*, *LifeCycle*, *TestableObject*, *PropertySet*, *PortSupplier*, *ResourceFactory* y *Resource*.

Las interfaces de control de Framework proporcionan el control del sistema. La capa de aplicación puede alcanzar al OS a través de estos interfaces de control. Las interfaces en el grupo son: *Application*, *ApplicationFactory*, *Domain Manager*, *Device*, *LoadableDevice*, *ExecutableDevice*, *AggregateDevice* y *DeviceManager*.

Las interfaces de servicio del Framework proporcionan los servicios del sistema. Estas interfaces soportan las aplicaciones básicas y no básicas. Incluyen: *File*, *FileSystem*, *FileManager* y *Timer*.

El Core Framework utiliza un perfil de campo para describir los componentes en el sistema. El perfil de campo es un conjunto de archivo XML que describe la identidad, capacidades, propiedades, inter-dependencias, y la ubicación de los dispositivos de hardware y los componentes de software que componen el sistema. Las características de los componentes de software son contenidas en el Descriptor del Paquete de Software (Software Package Descriptor, SPD), el Descriptor del Componente de Software (Software Component Descriptor, SCD) y el Descriptor del Conjunto de Software (Software Assembly Descriptor, SAD).

Las características del dispositivo de hardware son almacenadas en el Descriptor de Paquete del Dispositivo (Device Package Descriptor, DPD) y en el Descriptor de Configuración del Dispositivo (Device Configuration Descriptor, DCD). Las propiedades del descriptor contienen información acerca de las propiedades de un dispositivo de hardware o componente de software. El descriptor de perfil contiene un nombre de archivo absoluto para un DCD, un SPD o un SAD. Finalmente, el Descriptor de Configuración del administrador del Dominio (Domain Manager Configuration Descriptor, DMD), contiene la información de configuración para el campo de administrador.

Conceptualmente, un radio de SCA tiene tres segmentos:

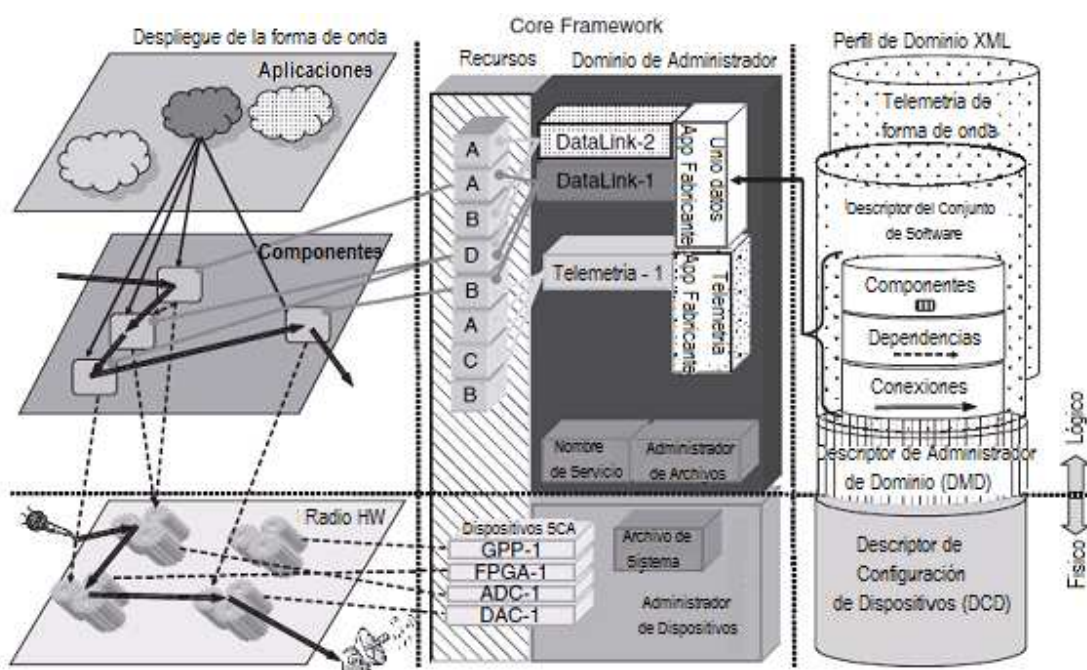
- La implementación de formas de onda
- El Core Framework, y
- El perfil de dominio

Cada de estos tres segmentos se dividen desde un punto de vista físico y lógico. En el segmento denominado “implementación de formas de onda”, el radio es el equipo físico del sistema de radio. Sin embargo, las formas de onda se realizan a través de software que se cargan en los elementos físicos del radio. Hay dos capas en la vista lógica del sistema de radio. La primera consiste en el conjunto de componentes que forman una aplicación de forma de onda u otro servicio en el sistema. La segunda es

la aplicación que proporciona la interfaz de alto nivel y de control para el conjunto de componentes.

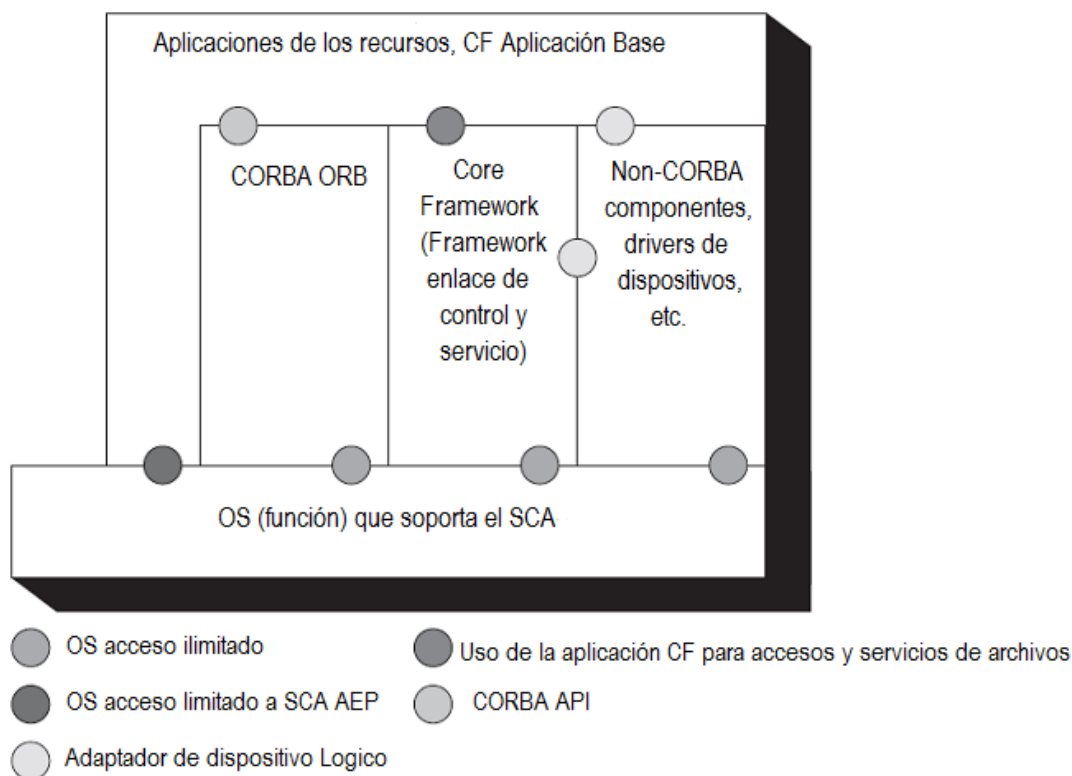
El segmento “Core Framework”, incluye el software necesario para gestionar el sistema de radio y la implementación de las aplicaciones. Tiene un componente físico y lógico también. Desde el punto de vista físico el Core Framework proporciona una gestión de alto nivel de los dispositivos físicos en el sistema de radio. Desde el punto de vista lógico proporciona así mismo gestión para las aplicaciones de forma de onda y otros servicios.

El segmento del “perfil de dominio” consiste en un conjunto de archivos XML que describen los recursos de hardware dentro del sistema de radio, la estructura de la aplicación de forma de onda, la dependencia entre los componentes de la forma de onda, las conexiones entre los componentes y en las dependencias de los recursos de hardware. Esto se muestra en la Figura 2.2.



**Figura 2.2** Capas en un sistema SCA

Aunque el SCA utiliza el middleware de CORBA para su software, la capa aplicación puede alcanzar el OS por otros medios. Los adaptadores de CORBA pueden ser utilizados para aceptar componentes de software heredados. La Figura 2.3 muestra el parentesco entre AEP, la aplicación y el entorno de funcionamiento.



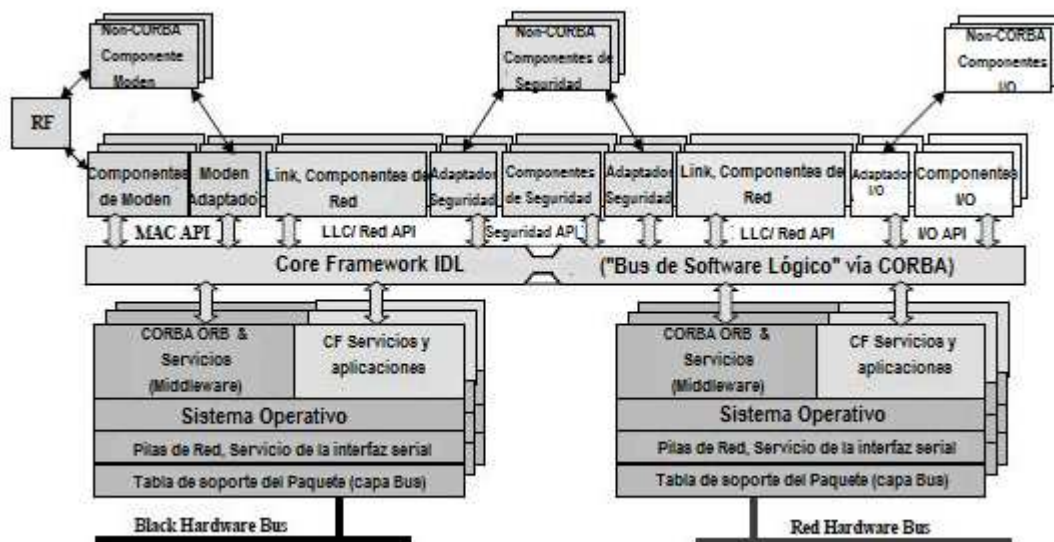
**Figura 2.3** Relación entre los componentes de SCA

## 2.2 Descripción del Middleware

El middleware es una capa de software entre las aplicaciones y la red fundamental. Esta capa proporciona servicios como identificación, autenticación, nombramiento, comercio, seguridad y directorios.

El middleware también tiene por objeto proporcionar ubicación transparente a las entidades de software y hardware. Funciona como una entidad de conversión o capa de traducción. Es un consolidador y aparato integrador. Con la ayuda del middleware, las aplicaciones de software que corren en las diferentes plataformas

pueden comunicarse de modo transparente. La Figura 2.4 muestra la relación entre la arquitectura del software y el middleware.



**Figura 2.4** Relación entre SCA y Middleware

El middleware toma a su cargo la interoperabilidad del desarrollador de aplicaciones. Hoy es posible encontrar un grupo diverso de productos de middleware que ofrece estas soluciones. Algunos ejemplos son:

- Monitor TP
- Mensajería Middleware
- Proceso Distribuido
- Base de Datos Middleware
- Servidor de Aplicación Middleware

De estos ejemplos el que interesa es el proceso distribuido. Vale indicar que el proceso distribuido es la Arquitectura de Intermediarios Solicitante de Objetos Comunes (Common Object Request Broker Architecture, CORBA) de OMG que fue elegida como la capa Middleware de SCA.



### 2.2.1 CORBA

CORBA es una arquitectura e infraestructura de aplicaciones de computadora que se usa para trabajar en conjunto sobre redes. Un programa basado en CORBA de cualquier vendedor, en casi cualquier computador, sistema operativo, lenguaje de programación, o red, puede interoperar con otro programa basado en CORBA del mismo u otro vendedor en casi cualquier otra computadora sistema operativo, lenguaje de programación o red.

CORBA se eligió como la capa middleware del software SCA, debido a la amplia disponibilidad comercial de productos CORBA y su aceptación en la industria. El procesamiento distribuido es un aspecto fundamental de la arquitectura del sistema JTRS. CORBA se utiliza para proporcionar una plataforma-cruzada de servicio middleware que simplifica la estandarización cliente/servidor en operaciones que están distribuidas en un ambiente para ocultar el mecanismo real de comunicación detrás de un bus de software Intermediario de Solicitud de Objeto (Object Request Broker, ORB).

CORBA se utiliza sobre todo en los sistemas de grandes empresas, debido a su capacidad de integrar máquinas de diferentes fabricantes con facilidad. También se utiliza con frecuencia en servidores con la necesidad de manejar gran número de clientes con altas tasas de éxito, segura, y confiable.

Las aplicaciones CORBA se componen de objetos que encapsulan datos y funcionalidad. Estos objetos son pequeñas unidades individuales de software que ejecutadas generalmente representan algo en la vida real. Los objetos son casos de un tipo, y una aplicación típica tendrá muchos casos de un tipo. Todos estos casos tienen la misma funcionalidad, pero los datos que contienen difieren. Un buen ejemplo es un sitio de comercio electrónico que asigna un carrito de la compra de objetos a cada cliente. Todos los carros tienen la funcionalidad de añadir y eliminar elementos, pero el carro es diferente para cada cliente. Cada objeto en una aplicación CORBA se define como una interfaz, utilizando el OMG IDL.

La Figura 2.5 muestra los principales componentes de la arquitectura CORBA ORB.

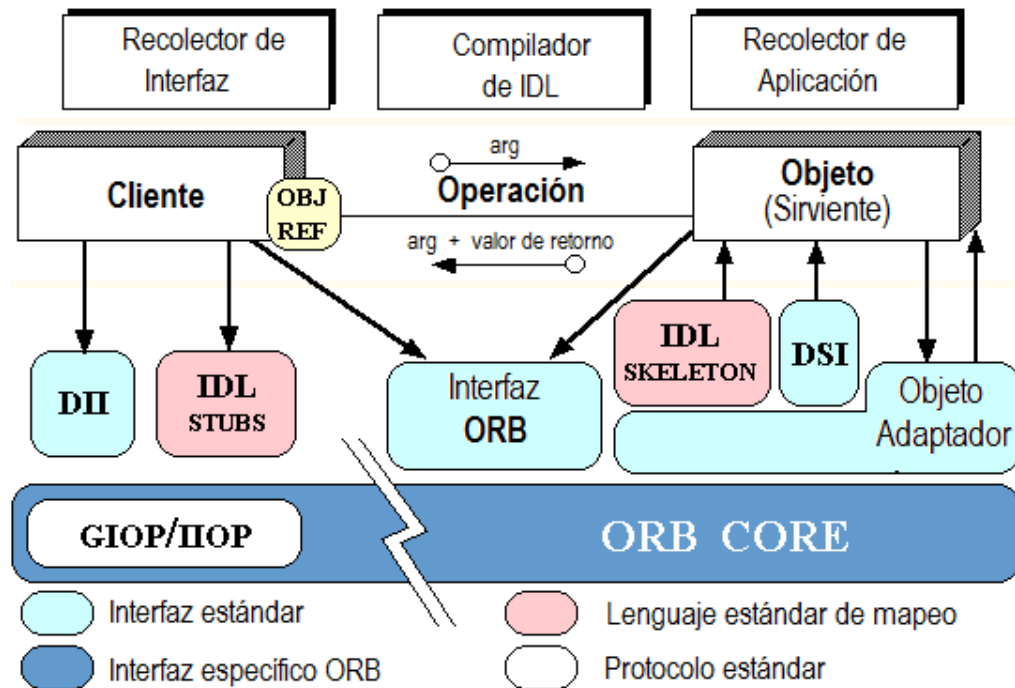


Figura 2.5 Arquitectura CORBA ORB

**Objeto:** Esta es una entidad de programación CORBA, que consiste en una identidad, una interfaz, y una aplicación, que se conoce como Siervo.

**Sirviente (Servant):** Este es un programa que se aplica a la entidad que define las operaciones que apoyan una interfaz CORBA IDL. Estos pueden ser escritos en una variedad de lenguajes, incluyendo C, C ++, Java, Smalltalk, y Ada.

**Cliente:** Este programa es la entidad que invoca una operación sobre un objeto aplicación. El acceso a los servicios de un objeto remoto debe ser transparente para la persona que llama. Idealmente, debería ser tan simple como llamar a un método en un objeto. El resto de componentes en la Figura 2.5 apoyan a este nivel de transparencia.

**Intermediario de Solicitud:** El ORB proporciona al objeto cliente un mecanismo

transparente para la comunicación de solicitudes de implementación del objetivo. El ORB simplifica la programación distribuida por la disociación de los detalles de las peticiones del método del cliente. Esto hace que las solicitudes de los clientes parezcan ser las llamadas a procedimientos locales. Cuando un cliente invoca una operación, el ORB es el responsable de encontrar el objeto “aplicación”, entregar la solicitud con el objeto, y retornar cualquier respuesta a la persona que llama.

**Interfaz ORB:** Un ORB es una entidad lógica que puede aplicarse de diversas maneras (por ejemplo, uno o más procesos o un conjunto de bibliotecas). Para desvincular las solicitudes de los detalles de la aplicación, CORBA define una interfaz abstracta en un ORB. Esta interfaz proporciona diversas funciones de ayuda, tales como la conversión de referencias a cadenas de objetos y viceversa, y el argumento de la creación de listas de las solicitudes realizadas a través de la interfaz de invocación dinámica que se describe a continuación.

**CORBA IDL partes (Stubs) y esqueletos (skeletons):** CORBA IDL partes y esqueletos sirven como “la cola” entre el cliente, el servidor de aplicaciones y el ORB respectivamente. La transformación de las definiciones entre CORBA IDL y el objetivo es el lenguaje de programación automatizada por un compilador CORBA IDL. El uso de un compilador reduce las incoherencias potenciales entre las partes de cliente y el servidor de esqueletos aumentando las oportunidades para la automatización de las optimizaciones del compilador.

**Interfaz de Invocación Dinámica (Dynamic Invocation Interface, DII):** Esta interfaz permite a un cliente acceder directamente a los mecanismos previstos por la solicitud de un ORB. Las aplicaciones usan el DII para emitir las demandas dinámicamente a los objetos sin necesidad de una interfaz específica IDL.

**Interfaz de Esqueleto Dinámico (Dynamic Skeleton Interface, DSI):** La DSI permite a un ORB entregar solicitudes a una aplicación del objeto que no tiene conocimiento del tiempo de compilación. El cliente que hace la solicitud no tiene idea

de si la aplicación está utilizando algún tipo específico de esqueleto IDL o está utilizando esqueletos dinámicos.

**Objeto Adaptador:** Este ayuda a ORB con la entrega de solicitudes a un objeto y con la activación del objeto. Lo más importante de un adaptador de objetos es asociar las aplicaciones del objeto con el ORB. Los adaptadores proporcionan apoyo especializado para determinados estilos del objeto aplicación (tales como adaptadores OODB de persistencia y la biblioteca de objetos adaptadores para objetos no remotos).

### 2.3 Descripción del SDR

Ya se mencionó que un SDR es un radio reconfigurable, en el que la funcionalidad se define en el software. En un SDR, el mismo hardware puede ser utilizado para realizar diferentes funciones en diferentes momentos. El SDR ofrece al radio una arquitectura flexible que permite cambiar la personalidad del radio en tiempo real.

En un radio convencional, todas las funciones de procesamiento de señales, tales como transposición de frecuencia, filtrado, demodulación, etc., se realiza en hardware y por lo tanto no se pueda cambiar sin alterar el diseño de hardware. Mientras que este método ha resultado ser práctico para un rango muy grande de aplicaciones, existen casos en que la habilidad para alterar la funcionalidad del radio en tiempo real es altamente deseable. Interoperabilidad con sistemas existentes heredados, habilidad para operar con los diferentes estándares de las regiones son algunos ejemplos de cuando se desea un sistema reconfigurable.

Tal como se indicó, la tecnología de Software Radio fue iniciada por las fuerzas armadas de EE.UU. para conseguir comunicaciones permanentes en distintas bandas con un solo equipo, asegurar compatibilidad entre sistemas de comunicación de las diversas ramas (ejército, armada, fuerza aérea), lograr adaptabilidad frente a nuevas innovaciones de componentes y equipos, y para otros objetivos.

Características	1980s	1990s	2000s
<b>Arquitectura del Radio</b>	Principalmente Hardware	Principalmente Software (no portátil)	Software basado en arquitectura común
<b>Banda de Frecuencias</b>	Simple	Múltiple	Múltiple
<b>Canales</b>	Simple	Simple	Múltiple
<b>Servicios</b>	Voz/Datos	Voz/Datos	Voz/Datos/Videos
<b>Hardware Interno</b>	ASICs, DSPs	ASICs, FPGAs, DSPs	GPPs, DSPs, FPGAs
<b>Actualizaciones</b>	Hardware	Principalmente Software	Software
<b>Crypto</b>	Exterior/Basado en Hardware	Basado en Hardware	Programable

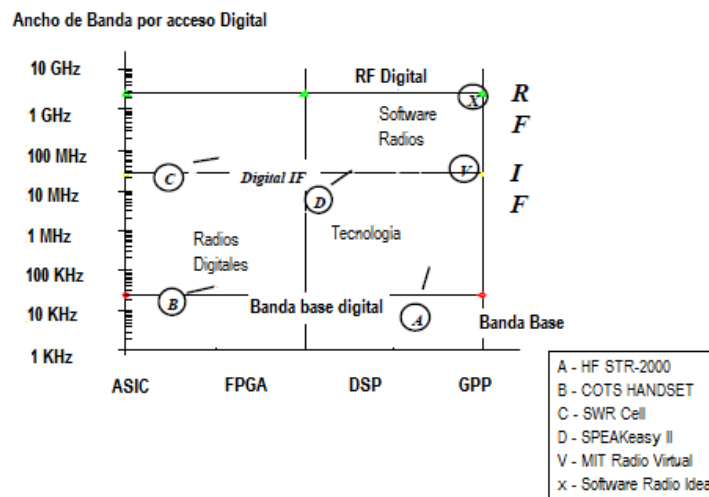
**Tabla 2.1.** Evolución de los radios militares

Básicamente se trata de trasladar a software muchas de las funciones que se efectúan hasta ahora en hardware. En el ámbito civil se denomina Radio definido por Software.

Cada día se hace más complejo conjugar distintos tipos de sistemas de comunicación. La aparición, casi en forma continua, de nuevos avances y mejoras en los sistemas ya existentes hace imperiosa la necesidad de disminuir costos en la adaptación e instalación de nuevos métodos de transmisión/recepción.

Dado que la mayor parte de los costos se encuentran en el hardware de las máquinas, que es de baja adaptación, se ha visto la importancia de reemplazar estos elementos de hardware por unidades de software que permitan reducir los costos y también permitir la incorporación de nuevos avances, u operadores de sistemas, agregando un mínimo de hardware y reemplazando este último por software que solucione el problema.

Las fases del software radio, que se muestra en Figura 2.6, representa una aplicación de radio dada por el, así referido, punto de acceso digital y el grado para ser programable.



**Figura 2.6** Fases de Software Radio

El proceso es provisto por una de cuatro opciones: Procesador de Propósito General (GPP), Procesador Digital de Señales (DSP), Matriz de Compuertas Programable en el Campo (FPGA), y Circuito Integrado para Aplicación Específica (ASIC). El ASIC no es considerado una parte de la solución dentro de un software radio típico porque, una vez programado, no puede modificarse y la modificación es uno de los principios fundamentales de un software radio.

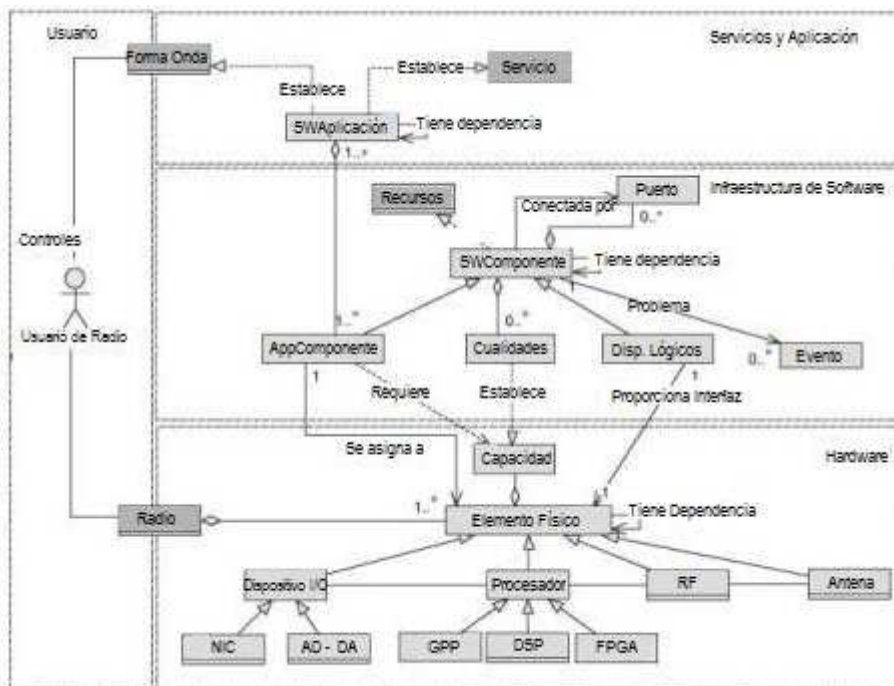
Las formas de onda diseñan la salida como un conjunto de requisitos, simulación, modelo matemático, o alguna otra representación conceptual.

Desde el punto de vista de rendimiento y capacidad, el diseño de la forma de onda se maneja en un lenguaje de alto nivel para su posterior despliegue en GPP o DSP para aplicaciones que demandan alto rendimiento. Para un rendimiento más alto se puede optar por FPGA.

Un procesador GPP normalmente proporciona gestión y control de servicios para el sistema. Superpuesto en la parte superior del procesador es un sistema operativo o integrado con el sistema operativo. Es una colección de software que proporciona ejecución en tiempo real para la infraestructura del radio. La infraestructura, en las condiciones de SCA, se llama el Core Framework. Sobre el Core Framework se tienen las formas de ondas y otras aplicaciones.

### **2.3.1 Componentes del Software Radio**

Un sistema de software radio puede verse a través de uno de cuatro perspectivas o componentes. Cada componente constituye una agrupación funcional de objetos y servicios prestados por el sistema de radio. Ilustrados en la Figura 2.7 estos componentes son:



**Figura 2.7** Aspectos de SDR

- **El hardware:** Este componente describe el conjunto físico de dispositivos y componentes que comprenden el aparato de radio
- **El software:** Este componente define el conjunto de servicios e interfaces a través de la cual todas las aplicaciones de forma de onda deben interactuar con el hardware.
- **La aplicación:** Este componente define la aplicación y capa de servicio. Todas las formas de onda y los servicios comunes se ejecutan en este componente.
- **El usuario:** Este componente da la opción de que el usuario interactúe con el radio. Hay dos modos básicos de interacción. El usuario realizando operaciones de control, por ejemplo, fijando parámetros, o realizando el control, o ejecutando la aplicación de transferencia de datos, por ejemplo, establecer un parámetro para obtener un tipo de forma de onda específico.



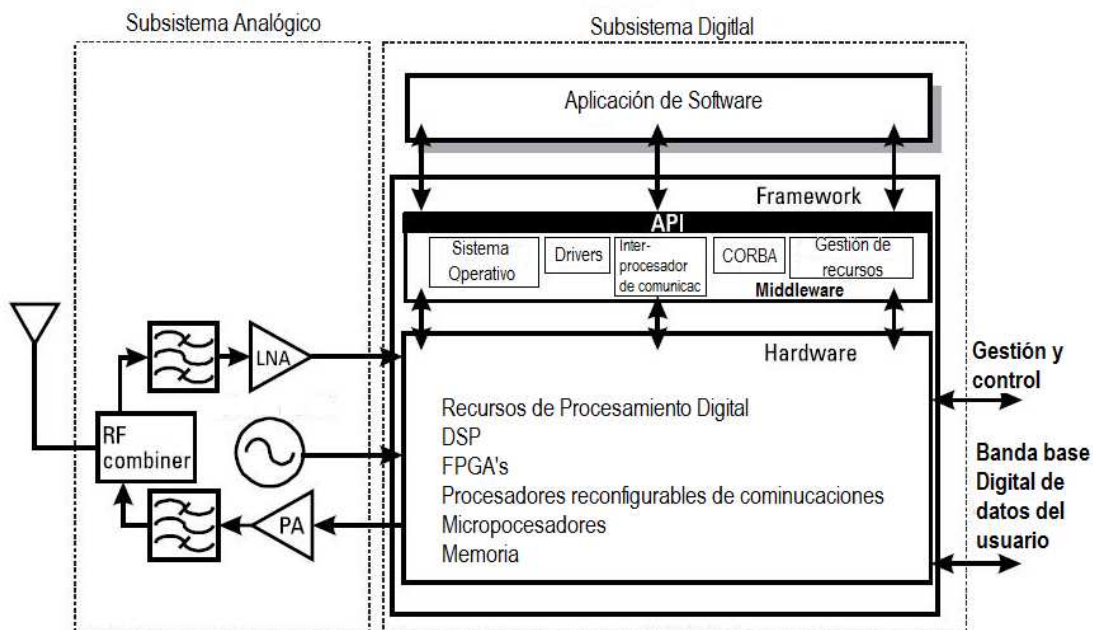
### 2.3.2 Arquitectura ideal de un SDR

Una arquitectura SDR consiste en un subsistema digital y un simple subsistema analógico. Las funciones analógicas son restringidas a aquellas que no pueden ser mejoradas digitalmente, que son: antena, filtrado RF, Combinación RF, pre amplificación en recepción, transmisión de potencia de amplificación y generación de frecuencia de referencia.

La separación de portadoras y la conversión de frecuencias altas y bajas a banda base es mejorada por los medios de procesamiento digital. De igual manera, la codificación del canal y las funciones de modulación son mejoradas digitalmente en banda base por los mismos medios de procesamiento.

El software en una arquitectura ideal tiene una estructura de capas, de esta manera el hardware es completamente abstracto de la aplicación de software. Una capa intermedia logra esta funcionalidad tratando los elementos del hardware como objetos y proveyendo servicios que permiten a los objetos comunicarse unos con otros mediante interfaces estándar, por ejemplo CORBA. La capa intermedia incluye: sistema operativo, controladores del hardware, recursos de administración y otras aplicaciones no específicas de software. La combinación del hardware y la capa intermedia frecuentemente se llama Framework.

Diseños de SDR y Frameworks que usan una API abierta como capa intermedia hace el desarrollo de aplicaciones mas portables, rápidas y más baratas. Los desarrolladores de aplicaciones tienen la libertad de diseñar la programación del hardware permitiendo concentrarse en bloques más complicadas y mejores aplicaciones.



**Figura 2.8** Arquitectura ideal de SDR

Como se describió, el SDR es una tecnología que revolucionará las comunicaciones porque tiene una gran flexibilidad para el trabajo de los diseñadores de software al utilizar una infraestructura abierta como es SCA. Esto proporciona una variedad de opciones en el momento de diseño, y gracias a los avances de los procesos digitales el SDR tiene una parte del hardware que se puede reconfigurar, con lo que se obtiene una gran ventaja con respecto a los radios convencionales, proveyendo múltiples beneficios al usuario.

## **CAPITULO 3**

### **INTEGRACIÓN DE REDES Y LOS PROTOCOLOS SDR**

En este capítulo se explica el rol del protocolo o pila de protocolos requeridos para complementar un proceso completo de comunicación entre aplicaciones, en un ambiente en donde el hardware puede adoptar cambios temporales de manera dinámica.

La reconfiguración del hardware por medio del software exige también un comportamiento similar del software destinado a regular el intercambio de información sobre diferentes tipos de redes. Es importante contar con esquemas que permitan la reconfigurabilidad del software de los protocolos empleados en las comunicaciones actuales y futuras para la intercomunicación.

#### **3.1 Aspecto de Protocolos en el Ambiente SDR.**

Se debe empezar por considerar que toda tecnología tiene una pila de protocolos muy específica y que una capa se comunica con la siguiente a través de los SAPs para alcanzar un servicio. Sin embargo, una de las mayores desventajas de los SAPs es su carencia de flexibilidad. Cualquier cambio, alteración o mejora en la pila de protocolos, requiere que los SAPs y protocolos deban ser re-estandarizados. Un ejemplo de re-estandarización es la evolución gradual del estándar GSM hacia el Servicio Generalizado de Paquetes por Radio (GPRS), el cual requirió un nuevo diseño de la pila de protocolos.

Con la tecnología SDR no se necesita tener esta preocupación, porque se utilizaría sistemas reconfigurables tanto en el terminal del usuario como en la red. Por ejemplo, si un usuario tiene un dispositivo UMTS y en el área de cobertura se tiene una WLAN, el usuario podrá utilizar la infraestructura WLAN para alcanzar su aplicación.

En los sistemas reconfigurables se utilizan protocolos adaptables, por su gran capacidad de reconfiguración que ayudan a que el terminal o red pueda adaptarse al estándar que se utilizará en un momento dado. La reconfiguración abarca a todas las capas de comunicación. Esto se logra con la utilización de las APIs<sup>2</sup> en las diferentes capas. La comunicación con APIs no necesariamente es con la capa vecina. Lo que se propone es identificar los aspectos comunes de señalización, transferencia de datos de usuario y la gestión de protocolos de: ISDN BRI, GSM, DECT, 3G, Bluetooth y HIPERLAN / 2, con el fin de desarrollar una pila de protocolos genéricos.

### **3.1.1 Interfaz vs Punto de Acceso al Servicio**

Una API es un conjunto de funciones que facilitan el intercambio de mensajes o datos entre dos aplicaciones. Define como dos aplicaciones que trabajan al mismo tiempo, por ejemplo un procesador de texto y una hoja de cálculo, se comuniquen e intercambien datos.

A simple vista se podría concluir que los servicios proporcionados vía SAPs y vía APIs son iguales. Sin embargo, existen un número de diferencias entre las dos técnicas que deben ser comprendidas. Se muestra primeramente los puntos importantes que consideran cada uno de éstas:

#### **Punto de Acceso al Servicio (SAP)**

- Número de puertos.
- Ocultamiento de complejidad.
- Un paso hacia plataformas abiertas.
- Poca flexibilidad.
- Un cambio menor provoca una re-estandarización.

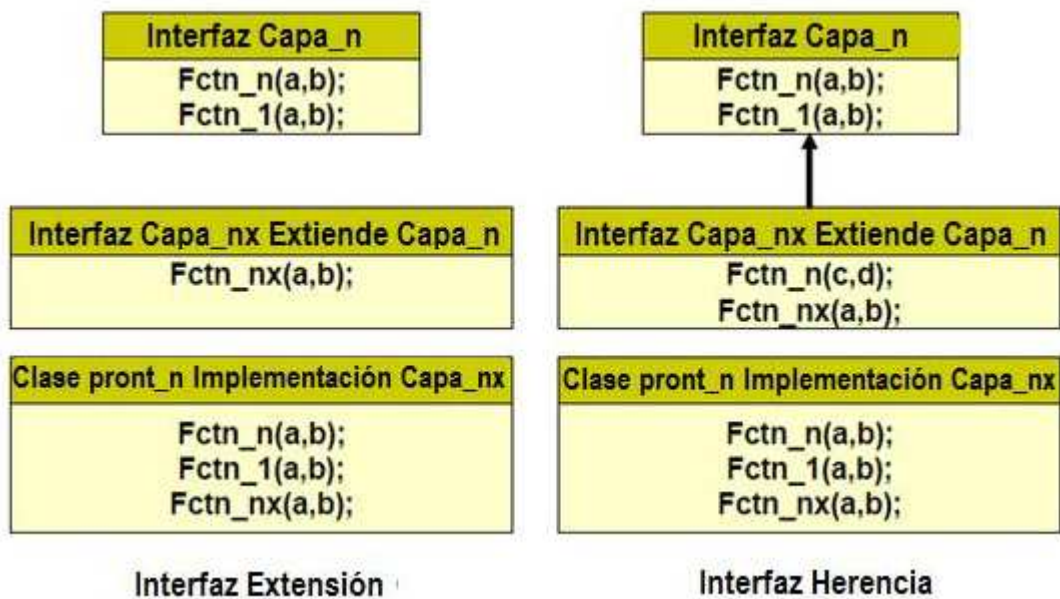
---

<sup>2</sup> Interfaz de Programas de Aplicación (Application Programming Interface, API), es un conjunto de funciones y procedimientos (o métodos si se refiere a programación orientada a objetos) que ofrece cierta biblioteca para ser utilizada por otro software como una capa de abstracción.

## Interfaz de Programas de Aplicación (API)

- Clases (definición e implementación).
- Organización jerárquica.
- Permite la aplicación de métodos y técnicas orientadas a objetos.
- Extensión y herencia.
- Permite la compatibilidad entre versiones diferentes de la misma interfaz.

Las APIs son definidas en interfaces de clases relacionados a una implementación actual de la capa. El punto importante de las APIs es su capacidad de extensión y herencia que permite partir de interfaces genéricas hacia una implementación más específica.



**Figura 3.1** Extensión y herencia de una interfaz

En la Figura 3.1, la columna izquierda muestra la definición de una interfaz genérica (llamada `capa_n`), su extensión en “`capa_nx`” y finalmente su implementación en “`prot_n`”. La columna derecha muestra la misma interfaz genérica; sin embargo, esta vez la “`capa_nx`” hereda la funcionalidad de “`capa_n`”, sustituyendo algunas

definiciones por las de la interfaz original. Finalmente, la interfaz es implementada en “prot\_n”.

Lo anterior hace a la interfaz extensible en varios sentidos permitiendo, sobre todo, la compatibilidad entre versiones diferentes de la misma interfaz. Lo anterior significa que un protocolo mejorado en alguna capa de una pila de protocolo, puede ser compatible con una versión anterior del mismo protocolo en otra pila de protocolo. Esta característica no se mantiene con las SAPs debido a su carencia de flexibilidad.

### **3.2 Re-configuración y Configuración de Protocolos.**

Una visión futura de la integración de diferentes sistemas de comunicación considerando como base a SDR es la re-configurabilidad del software de red.

Un proyecto real donde se implementó esta idea fue el llamado End to End Reconfigurability (E2R). El proyecto E2R apunto hacia un total beneficio de la valiosa diversidad de los sistemas de radio, formado de un amplio rango de alternativas tales como celular, redes locales inalámbricas y broadcast. El objetivo de E2R es crear, desarrollar y probar diseños arquitecturales de funciones y dispositivos reconfigurables para dar soporte a los sistemas y ofrecer un conjunto extendido de opciones a los usuarios, proveedores de servicios y aplicaciones, operadores y reguladores en el contexto de sistemas heterogéneos de radio móviles.

Los protocolos de los sistemas abiertos son definidos y estandarizados de una forma muy rígida resultando en poca reconfigurabilidad o capacidad para adaptarse a cambios de requerimientos en la comunicación. La construcción de pilas de protocolos más versátiles es necesaria para permitir y simplificar la reconfigurabilidad de los terminales, así como reconocer ambientes de comunicación integrados. De esta forma se destacan tres enfoques orientados hacia el concepto de reconfigurabilidad del software.

Los enfoques que abordan la reconfigurabilidad del software para la integración de múltiples sistemas de comunicación basados en radio son: Adaptable, “Compuestos” y Protocolo reconfigurable. En otras palabras son enfoques que abordan la problemática de no permitir la configuración de muchos protocolos, sino permitir la configuración de cualquiera.

Los enfoques de los protocolos adaptable y “compuestos” son técnicas que proporcionan versatilidad. La base de estas dos tecnologías está en el hecho de que los protocolos o capas en las pilas de protocolos, son una mera aglomeración de numerosas funciones de protocolos simples, los cuales pueden ser implementados independientemente de sus capas asignadas. Estos dos enfoques retoman el principio de funciones de protocolos básicas combinados en una pila de protocolos genérica o ensamblándolas durante el periodo de “arranque”, respectivamente.

Considerando el modelo OSI como guía, los enfoques adaptables y “compuestos” para la clasificación de funcionalidades en un grupo de funciones de protocolos, las funcionalidades de la capa física y las capas de aplicación y presentación no deben ser consideradas como parte del grupo de funciones genéricas, debido a sus alta dependencia a la plataforma de hardware y sistema operativo, respectivamente. Las funciones de las otras capas de protocolos son distribuidas de acuerdo a la tarea particular de cada capa.

### **3.2.1 Protocolos “Compuestos”.**

Los protocolos compuestos representan un enfoque alternativo. La funcionalidad de los protocolos y pilas de protocolos completas puede ser dividida en funciones de protocolos simples y un grupo de estas funciones puede utilizarse para construir las pilas de protocolos personalizadas durante el periodo de “arranque”. Uno de los proyectos que han sido iniciados para explorar e implementar este principio es “DaCaPo”.

DaCaPo es un trabajo de dominio público que implementa la configuración del protocolo durante el tiempo de ejecución, en vez del tiempo de compilación. La intención de este trabajo es crear protocolos estandarizados que provean de parámetros de QoS para la conexión actual/proyectada. La base de la arquitectura es una estructura de pila con un reducido número de capas: solo tres capas son definidas en DaCaPo.

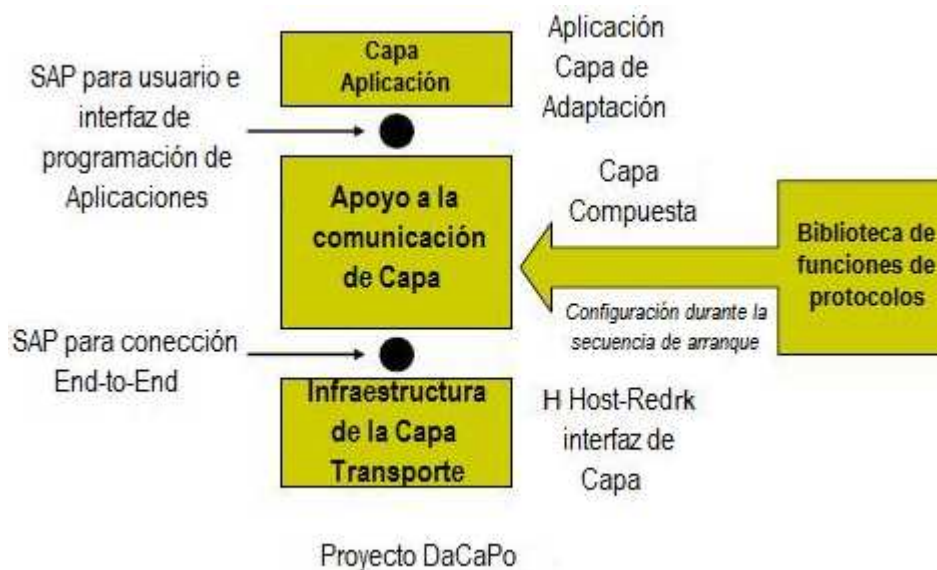
- Capa A. Capa de aplicación.
- Capa C. Capa de apoyo a la comunicación.
- Capa T. Capa de infraestructura de transporte.

Mientras que las capas A y T, las capas de adaptación, son dependientes de la aplicación y de los principales mecanismos de transporte (ATM, LAN, MAC, etc.), respectivamente, la capa C es la capa configurable (Figura 3.2). Esta capa está formada de bloques de construcción de protocolos granular aglomerados, cada uno definiendo una tarea de protocolo simple.

DaCaPo emplea cuatro entidades co-operacionales para controlar los mensajes entre los bloques de construcción y la unión de éstos con la capa C. Estas cuatro entidades son:

- CORA (Método para configuración y distribución de recursos). Determinación de configuración de protocolos adecuados en tiempo de ejecución.
- Administrador de conexión. Establecimiento de control, administración de error y liberación de conexión.
- Ambiente de coordinación de ejecución en tiempo de corrida (runtime) del procesamiento con la capa.
- Entidad para monitorear otros componentes y control de la disponibilidad de recursos en la comunicación y sistemas.

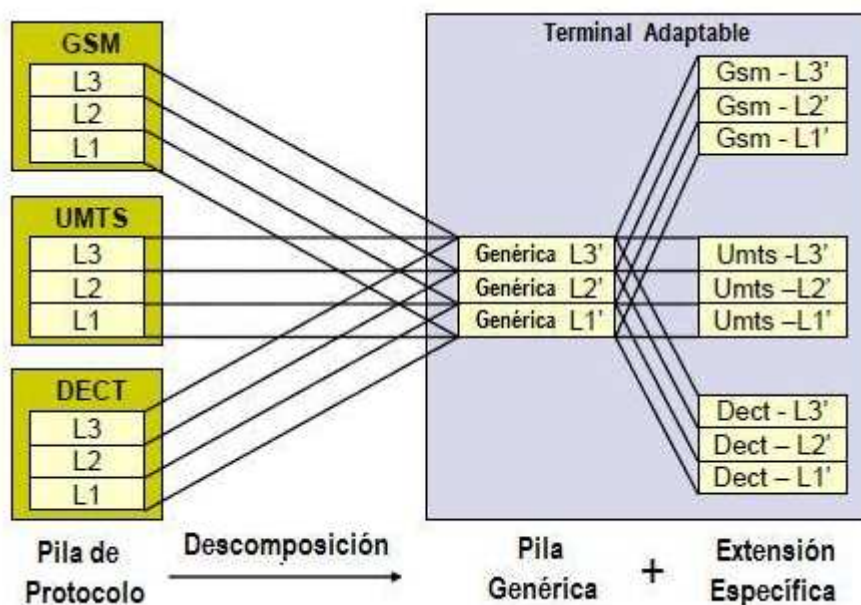




**Figura 3.2** Protocolo "Compuesto" DaCaPo

### 3.2.2 Protocolos Adaptables.

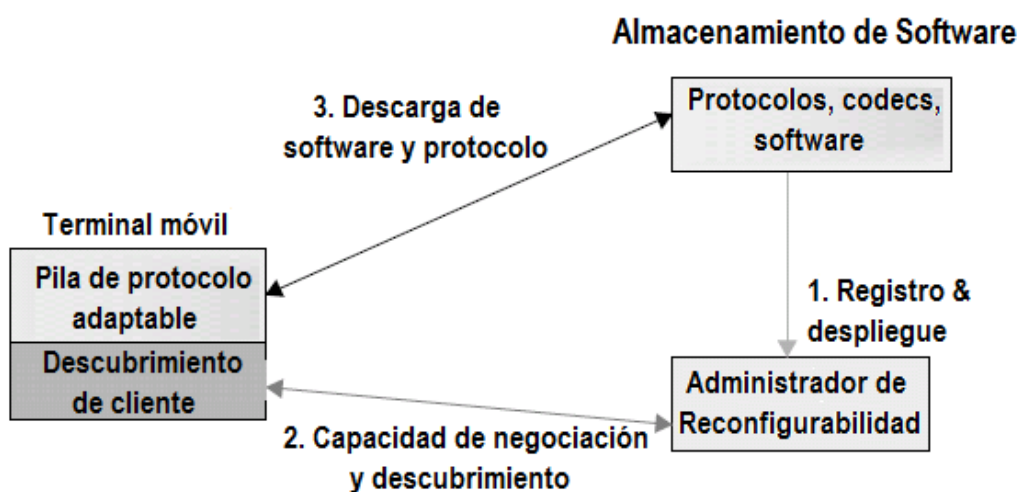
Este enfoque consiste, en principio, de capas de protocolo genérico que implementa un conjunto de funciones de protocolos comunes; y de una segunda parte que implementa extensiones estandarizadas a dicho protocolo genérico o común, generando de esta forma un protocolo específico. La Figura 3.3 muestra el principio de este protocolo adaptable, utilizando GSM, DECT y UMTS como ejemplos. La implementación práctica de este esquema resulta en una pila de protocolos que contiene todos los elementos comunes de esos protocolos. Mediante extensiones de funciones específicas de algún protocolo (GSM, DECT, UMTS) a la pila de protocolos común, se tienen uno de los tres protocolos específicos mencionados en este ejemplo.



**Figura 3.3** Enfoque Adaptable

En la Figura 3.3 se puede observar que de las tres capas de cada protocolo (L1, L2, L3) se tiene una pila genérica (L1', L2', L3'). En cada capa de esta pila genérica se agrupan funciones de protocolos simples que son similares en la misma capa de cada pila del protocolo original correspondiente (GSM, UMTS, DECT). Por otro lado, aquellas características que son diferentes de cada capa es decir, que no son similares en el mismo nivel, se conservan en pilas más pequeñas, denominadas extensiones específicas. De este modo, al tener una pila genérica y ligarla a una de las extensiones específicas se tiene como resultado una pila de protocolos única de propósito específico. Así, se tiene un esquema de reconfiguración de pila de protocolos en el que únicamente basta agregar extensiones mínimas para tener un esquema completo de comunicación. La desventaja de este esquema es el hecho de tener pocas funciones comunes entre las diferentes pilas de protocolos a integrar. Poca similitud trae consigo una pila genérica muy pobre y en cambio pilas de extensiones específicas de alto volumen. Mayor volumen para actualizar un protocolo hace de este esquema bastante ineficiente, ya que el tiempo de transmisión se hace mucho mayor como consecuencia del mayor tiempo de reconfiguración.

Dado que existen muchas versiones diferentes de software, antes de descargar e instalar el software de un protocolo en un dispositivo, debe hacerse pruebas que garanticen su interoperabilidad en el entorno de ejecución. El paso final incluye una configuración inicial, parametrización y la activación del software de protocolo descargado. La Figura 3.4 muestra los pasos necesarios para lograr la descarga de software y / o actualización.



**Figura 3.4** Pasos para descarga o actualización de software

### 3.2.3 Pila Reconfigurable.

El enfoque de pila de protocolo reconfigurable está basado en la re-definición de las interfaces entre las capas de los protocolos, clasificación de la interacción entre las diferentes capas en la pila del protocolo y provisión de una arquitectura para dar soporte a la pila y configuración del protocolo. Este enfoque introduce el concepto de interfaces re-configurables en forma activa, en la forma de objetos que son parte de la pila de un protocolo, utilizando métodos de diseño orientado a objetos, para definir esta arquitectura de pila de protocolos y sustituir implementaciones de protocolos durante el tiempo de ejecución.

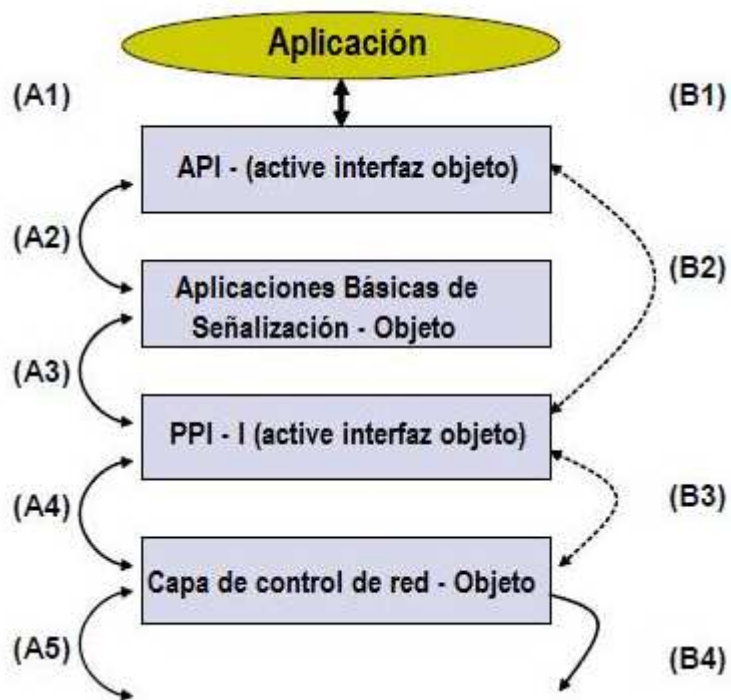
Las APIs han sido utilizadas por décadas en el campo de la computación para simplificar el desarrollo de aplicaciones a alto nivel. Mientras tanto, en el campo de “networking” y las telecomunicaciones la necesidad del beneficio potencial de tener interfaces abiertas comunes en la capa de aplicación ha sido ampliamente reconocida. Muchos proyectos de investigación han surgido para explorar la implementación y aplicación de interfaces y plataformas de programación abierta y su uso en terminales móviles y nodos de red.

Utilizando interfaces con reprogramación activa estandarizada en todas las capas, se introduce un grado adicional de libertad para reconfigurar las pilas de protocolos en terminales y redes. Una función mayor que se requiere para terminales SDR es la habilidad de intercambiar software de protocolo al paso (on the flight), implicando la re-configuración dinámica de la pila de protocolos. OPTIMA es un proyecto desarrollado en esta dirección.

OPTIMA está basado en la separación (descomposición) de las pilas de protocolos en un número de entidades funcionales. Estas entidades incluyen capas de protocolo (pro-capas), interfaces y threads descritas en clases genéricas organizadas en librerías de clases, las cuales les permiten ligarse dinámicamente durante el tiempo de ejecución.

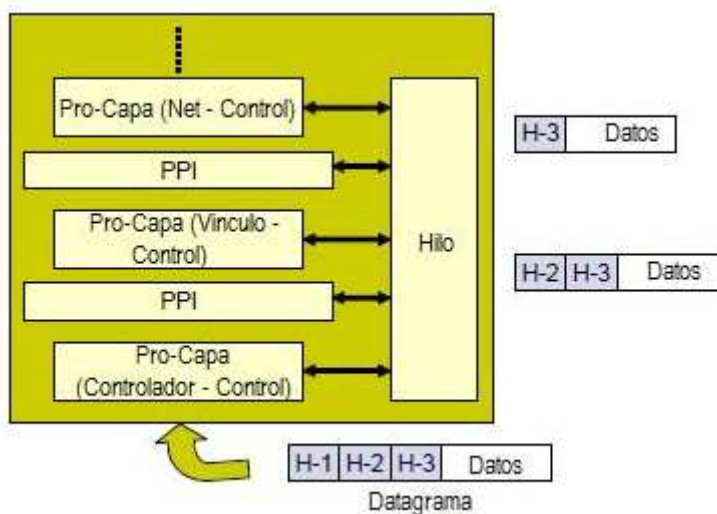
El uso de interfaces de protocolo activos agrega más complejidad al sistema, pero también proporciona la ventaja de intercambiar el protocolo durante el tiempo de ejecución más que durante el tiempo de compilación o “tiempo de arranque”.

Las interfaces de protocolos activas se las puede también ver como objetos que encapsulan un conjunto de intérpretes de mensajes y métodos de distribución de mensajes. La estructura se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5** Ejemplo de interfaces como objetos de un protocolo Activo

Las interfaces-objeto recuperan información, requerida para el procesamiento de los mensajes, desde la cabecera de los mensajes entrantes. La interfaz-objeto luego procesa o interpreta el mensaje y lo pasa a la “pro-capa” destino. La Figura 3.6 muestra este principio.



**Figura 3.6** Ejemplo de un mensaje procesado por OPTIMA

Compañías como Motorola, Panasonic, Siemens, y otras están desarrollando un proyecto para la integración de equipos SDR en redes móviles futuras. Esto refuerza lo expuesto en este capítulo respecto a la tendencia en la integración de SDR en los protocolos de las capas superiores de las pilas de protocolos. Específicamente se tiene la implementación de APIs para la comunicación entre capas, en donde no necesariamente debe ser con respecto a capas vecinas inmediatas.

### 3.2.4 Sistemas reconfigurables en redes futuras

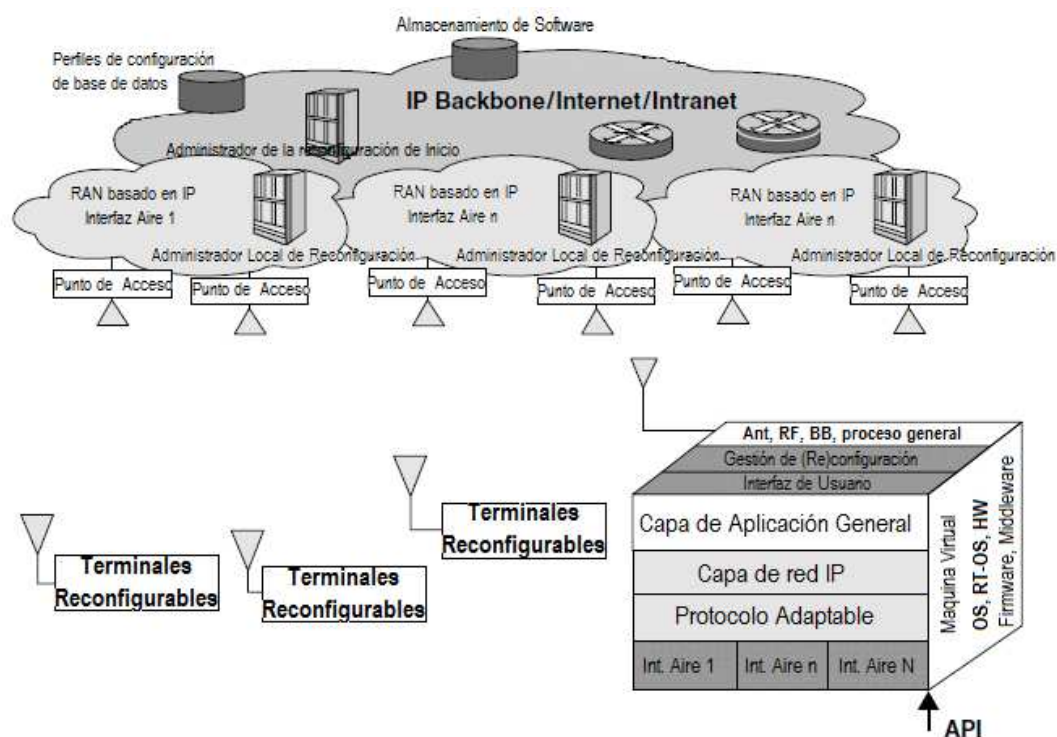
Al mirar más allá de la tercera generación de comunicaciones móviles, se experimentará la integración y la intercomunicación de las redes existentes y futuras. El objetivo es desarrollar redes y terminales reconfigurables que permitan el interfuncionamiento utilizando el sistema más adecuado de “acceso de radio”, donde el término “acceso de radio” significa la elección dinámica adecuada de acceso para alcanzar sin problemas, sin interrupciones la entrega al cliente. Esto se puede realizar con la ayuda del SDR con terminales y pilas de protocolos reconfigurables y su equivalente en la parte de red.

La arquitectura tiene que ser abierta y flexible, que permita el intercambio de las funcionalidades existentes, así como la integración de nuevas funcionalidades, con

el fin de seguir el ritmo de desarrollo de terminales y tecnologías de radio. Por lo tanto, los sistemas reconfigurables al proporcionar una plataforma común para múltiples interfaces, múltiples protocolos y múltiples aplicaciones en una red aumentan así en capacidad y demandan una mayor versatilidad de modificación del software.

Como ya se dijo, la reconfigurabilidad afecta prácticamente a todas las capas de comunicaciones (a partir de la capa física, a la capa aplicación) de la interfaz radioeléctrica e impacta tanto al terminal móvil como a la red de acceso por radio (Radio Access Network, RAN).

La Figura 3.7 muestra una arquitectura de red heterogénea de comunicaciones de acceso móvil apoyada por terminales reconfigurables. La reconfiguración de las capas de la pila de protocolos es apoyada por un administrador local.



**Figura 3.7** Comunicación de capas sujetas a la reconfiguración en el terminal

Tomando en cuenta la reconfigurabilidad, se presenta niveles o escenarios, que pueden ser diferentes según el momento y el uso.

**Reconfiguración parcial.-** Se refiere a la situación donde uno o más módulos son reconfigurados sin cambiar el funcionamiento estándar; es decir, reconfiguración intra-estándar. Por ejemplo, ciertos módulos pueden ser reconfigurados, a fin de mejorar la QoS, pero permaneciendo en el actual nivel de funcionamiento. Esto es aplicable sólo cuando partes del terminal se han reconfigurado (por ejemplo, la banda base digital), mientras que las solicitudes o interfaces de usuario están todavía activas.

**Reconfiguración total.-** Hace referencia a la situación donde se reconfigura y se pasa de un estándar a otro; es decir, reconfiguración entre estándares. Por ejemplo, de GSM a UMTS. Esta reconfiguración implica cambios exhaustivos en la funcionalidad, el comportamiento y las interfaces de los componentes de los módulos.

**Reconfiguración estática.-** Se refiere que en el momento de la fabricación, se programan nuevas capacidades, por ejemplo, una tarjeta inteligente u otros medios.

**Reconfiguración de Background.-** Se refiere a la situación donde el software se descarga, se instala y se inicializa en un determinado evento. Por lo general, esto es realizado por proporcionar sombra y activa los módulos, o incluso una cadena completa de módulos, que luego son cambiados cuando se terminan los servicios al usuario.

**Reconfiguración Transparente.-** Se refiere a la situación donde el software se descarga, se instala y se inicializa en un determinado evento sin afectar las actividades actuales de los usuarios y servicios.



Como el usuario necesita descargar un nuevo interfaz de aire con el fin que pueda el dispositivo funcionar en un nuevo tipo de red, se debe dar una información al usuario como:

- Cual otra red está disponible
- La compatibilidad entre el terminal y la red
- La velocidad de transmisión, etc.

Con todo lo expuesto en este capítulo se tiene una visión general de lo que sucede en un sistema reconfigurable utilizando los SDR, dando grandes facilidades al usuario en el momento de integrarse a otra red, es así, que si una persona tiene un terminal reconfigurable y está cerca de una estación GSM, la estación le mire al terminal como GSM y si está cerca de una estación UMTS, vea el terminal como UMTS, esto gracias a la pila reconfigurable y la reconfigurabilidad tanto en terminales como en la red.

## **CAPITULO 4**

### **SOLUCIONES Y APLICACIONES EN TECNOLOGÍAS DIGITALES INALÁMBRICAS**

Es este capítulo se indica algunas posibles soluciones y aplicaciones del SDR para poder apreciar de mejor manera su impacto en las telecomunicaciones.

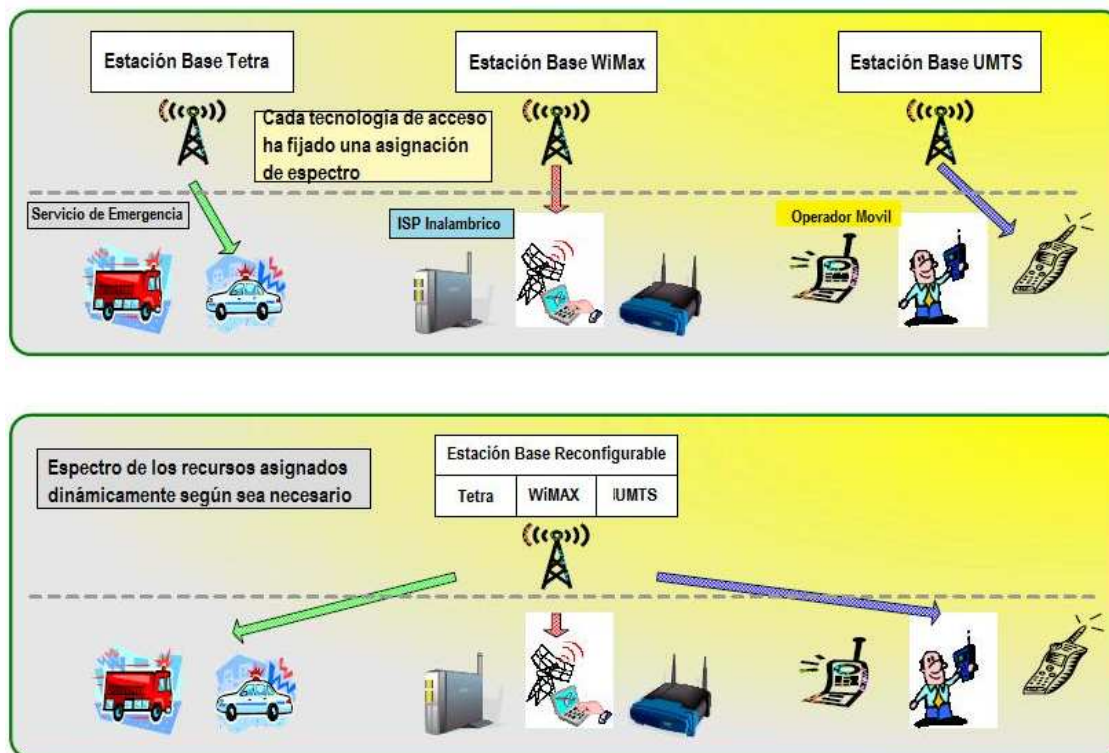
Si bien la tecnología SDR sigue evolucionando y los primeros productos comerciales se han comenzado a comercializar (por ejemplo, MidTex telecomunicaciones provee una estación base SDR), la difusión total del concepto SDR aún está por llegar. Todavía hay muchos obstáculos técnicos que superar, entre ellos: la terminación de una base reconfigurable, modularización de todos los bloques de hardware, el aumento de la eficiencia energética, la aplicación de un sistema digital front-end.

Se está trabajando para resolver la mayoría de estos problemas técnicos, pero también hay dificultades con la difusión efectiva de la tecnología.

Tomando el ejemplo de un pequeño operador celular local usando una estación base SDR, tendrá como principal ganancia el desarrollo de una red de acceso reconfigurable. Esto les permitirá alterar la dinámica de la configuración de la red en función de la situación real de la carga (por ejemplo, cambiar el número de portadoras, tamaño de la celda, la transmisión de potencia, etc y, finalmente, permitir el intercambio de la interfaz de aire sin necesidad de cambiar el hardware de la estación base. (Esto se ilustra en la Figura 4.1).

El ejemplo de MidTex demuestra que este tipo de uso compartido de una infraestructura no solo puede reducir los costos de expansión, sino que también reduciría los riesgos durante una etapa de expansión para los operadores. Por otro lado, también serviría de base para futuros escenarios de uso del espectro, tales

como espectro virtual y una asignación común de recursos dinámicos entre los operadores (por ejemplo, DVB / UMTS).



**Figura 4.1** Compartiendo infraestructura reconfigurable

Sin embargo, hay algunos elementos esenciales, la mayoría de reglamentación aunque también comerciales, que impiden la aplicación generalizada de los equipos SDR. En el primer caso, la mayoría de restricciones (de reglamentación) se relacionan con el hecho de que las ondas de radio que emiten los equipos (incluidas las estaciones base así como terminales) exige la certificación / pruebas de conformidad y, por lo general, algún tipo de aprobación antes de que pueda ser utilizado (o incluso distribuido a los usuarios). Si bien una solución global en la forma de regulación sería deseable, la historia ha demostrado que esto es casi imposible de realizar. Un camino a seguir sería la definición de una solución regional (dentro de una región de radio) para certificación de equipos SDR.

La tecnología SDR tiene una gama amplia de posibles áreas de difusión en el mercado, la más evidente y activa incluye el uso de esta tecnología en estaciones base, y en terminales definidos por software. La tecnología SDR puede ser vista también como una alternativa a las costosas soluciones de hoy. Al inicio se tendrá más gastos en la implementación de la plataforma y aumentará aún más la complejidad de los sistemas correspondientes. Sin embargo, hay indicios de que las posibles ventajas superen a los costos adicionales. Estas ventajas se pueden agrupar en dos categorías principales: por un lado, la seguridad (es decir, los gastos de capital de seguridad) y, por otra parte están las ventajas operativas (como flexibilidad, extensibilidad y el rendimiento).

Como la tecnología SDR parte de un sistema reconfigurable de comunicación afectará a todas las partes de la red. En la Tabla 4.1 se describen las ventajas y desventajas del SDR.

<b>Tecnología SDR</b>	
Ventajas	Desventajas
<b>Usuario</b>	
Portabilidad	Aumento de la complejidad
Flexibilidad	Restricción a la base de control
Compatibilidad	Vulnerabilidad de la seguridad
Servicio "AAA" (cualquier cosa, cualquier lugar, en cualquier momento)	Facturación compleja
Interoperabilidad	Problemas en la prestación de servicios
Apertura a configuración como quería	
Aumento de la disponibilidad del servicio	
<b>Operador (Red y Proveedor de servicio)</b>	
Mejor control del sistema	Complejidad en la prestación de servicios
Problemas fáciles	

Actualizaciones en masa	Posible diversificación de los clientes funcionales
Utilización de la red de manera eficiente	
Fabricante (Red y proveedor de equipos terminales)	
Fácil de mantener el equipo	Más competencia de proveedores de software cuando se utilizan arquitecturas abiertas
Fácil de desarrollar y apoyar los sistemas	
Concentración en la parte de software	
Plataforma única	

**Tabla 4.1** Ventajas y desventajas de SDR

Hay una dependencia entre el desarrollo de la tecnología y algunas áreas donde los cambios regulatorios pueden ser necesarios con el fin de acelerar el proceso de desarrollo. La Tabla 4.2 describe estas áreas.

Definición de terminal	Los terminales SDR son flexibles, su definición puede y va a cambiar muchas veces durante su vida. Por lo tanto, la definición común de "un terminal SDR es una emisora de radio cuyos patrones pueden ser alterados por medio de software" tiene que ser considerado en el Reglamento.
Circulación de Equipo	Los cambios mundiales de los regímenes nacionales de reglamentación tendrán más tiempo que el desarrollo tecnológico. Incluso si muchas administraciones permitieran el uso de equipo SDR, otros no. Los mecanismos para garantizar la reglamentación de los equipos SDR deben ser desarrollados.
Descargas de	La descarga e instalación del software de configuración tiene que estar dotado de una serie de seguridades. Si bien todo el software se puede descargar (es decir, la

software y la instalación	prevención de la descarga sería bastante difícil), sólo código válido debe ser instalable. Deben ponerse en su lugar las garantías como la seguridad en un artefacto que permite sólo marcar el código a ser ejecutado sobre la plataforma de radio.
Control de Equipo	Con el fin de garantizar un mercado abierto para el suministro de software y, al mismo tiempo proteger los intereses de otros usuarios (prevención de las interferencias perjudiciales), hay que definir mecanismos para eliminar los terminales de la operación de forma remota.

**Tabla 4.2** Limitaciones de la difusión de SDR

A pesar de que existen muchas aplicaciones militares; sin embargo, sólo unas pocas están disponibles en el mercado. La verdadera tecnología con amplia difusión de uso aún no se ha producido. Al respecto, la opinión general en Europa es que la tecnología SDR hará posible un costo eficiente en la integración de las redes de radio antiguas y futuras, y se espera que vaya a facilitar la aplicación de un sistema más flexible en el proceso de asignación del espectro.

#### **4.1 El RadioScape RS500**

El RadioScape RS500 (Figura 4.2) es el primer ejemplo de un módulo de varias bandas y multi-estándar. En este caso el RTOS (Sistema Operativo en Tiempo Real) usado es radiOS, el cuál es el framework de RadioScape, que trabaja sobre un núcleo proporcionado por un DSP.



**Figura 4.2** Radioscape RS500

Este módulo premiado proporciona recepción para DAB (banda III & Banda L), DRM (LW, MW & SW), FM-RDS (Banda II) y AM (LW, MW & SW) incluyendo AMSS, así como un número de características, incluyendo una alternativa automática de conmutación de frecuencia (AFS), EPG (DAB), tarjeta de Grabación MMC/SD (DAB/DRM) y dispositivo de lectura de archivos MP3/WMA.

Al inicio de este nuevo desarrollo de productos, RadioScape se ha asegurado la integración de DRM sin problemas con DAB. Los usuarios no tendrán que saber cuál tecnología o frecuencia sintonizan, y seleccionarán simplemente el nombre de la estación igual como se hace hoy para DAB. La radio con RS500 exhibe una lista de todas las estaciones disponibles en el DAB, DRM, FM y AM.

Hay dos aspectos principales proporcionadas por el RS500:

- En primer lugar, los consumidores no se deberán preocupar sobre la tecnología usada, simplemente podrán tener acceso a los servicios que prefieran, cuando quieran, de una manera fácil y constante.

- En segundo lugar, el uso de SDR permite la integración de cuatro estándares (DAB, DRM, FM, AM) con la funcionalidad de multimedia, siendo de menor importancia los cambios de software para el cliente.

La primera radio multi-estándar, basada en RS500, está disponible para los clientes en Francia, Portugal, España, Holanda, Alemania, Bélgica y el Reino Unido. Es el **Morphy Richards 27024**, con un costo aproximado de 199 euros. Muchas otras radios multi-estándar de diferentes fabricantes, también basados en el módulo RS500, vendrán pronto a otros países.



**Figura 4.3** Radio Morphy Richards 27024

## 4.2 Transceptor SDR - 1000

El equipo desarrollado por Gerald, AC5OG, es un transceptor denominado SDR-1000, obviamente con arquitectura SDR. Fue desarrollado en los primeros años de la década de los 2000. Físicamente este equipo consta de tres partes:





**Figura 4.4** Transceptor SDR - 1000

- La primera incorpora un generador de frecuencias basado en un sintetizador digital directa (DDS), un oscilador maestro a cristal de alta calidad, un mezclador bidireccional I & Q, un detector de muestreo por cuadratura QSD, un control automático de ganancia (AGC), y jacks de audio para conexión a una tarjeta de sonido. El módulo sintetizador usa una frecuencia de reloj de 200 MHz, tiene una resolución de 1 uHz, y un ruido de fase (jitter) de 1 pseg rms máximo.
- La segunda parte incorpora la alimentación (genera  $\pm 15$  V y +5 V, a partir de +12 V de alimentación general), interfaces de conexión al computador (interfaz de puerto paralelo con un conector DB 25), memorias de registro (latches) para las señales de entrada y salida (I/O) a través de las cuales el computador controla el generador de frecuencias DDS, y los relés de conmutación TX/RX.
- La tercera parte posee filtros pasa banda (filtros LC convencionales, conmutados mediante relés), un amplificador de potencia de 1 W en transmisión, y un conector BNC para la conexión de la antena o de un amplificador de potencia exterior.

Este equipo es capaz de cubrir en recepción desde 12 KHz a 65 MHz, en cobertura

continua, y en transmisión dentro de todas las bandas de radioaficionados de 160 a 6 metros.

Su oscilador de síntesis digital directa DDS es capaz de cubrir ese margen de frecuencias en pasos de 1 Hz. Está basado en el chip AD9854, controlado a través de un microcontrolador PIC desde el software SRD que corre en un computador. Genera una frecuencia 4 veces mayor a la requerida por el mezclador QSD o Tayloe, y es dividida por 4 por un contador Johnson para generar las dos frecuencias de mezcla para el detector, desfasadas 90 grados.

Un mezclador bidireccional maneja las señales I y Q tanto para la recepción como para la transmisión. Y en el caso de la recepción, las señales I y Q pasan por un circuito de control automático de ganancia (AGC) cuya función es prevenir que la recepción de una señal fuerte pueda sobrecargar la entrada del conversor A/D de la tarjeta de sonido.

Las funciones de modulación y demodulación en AM, FM, SSB, RTTY, PSK (y otros modos que se deseen implementar), filtrado DSP y supresión de ruidos, AGC, control de frecuencia (control del DSS), etc..., están implementadas en el software SRD cargado en el ordenador.

Para evitar los inconvenientes de la conversión de las señales de entrada de antena directamente a banda base de BF (por el nivel de ruido que es mayor en frecuencias próximas a 0 Hz, típico de las conversiones directas), el receptor SDR no hace una conversión de frecuencia directa a banda base de 0 Hz, sino que hace una conversión a banda base de 11,025 KHz. Es decir, la frecuencia del oscilador local controlado por el DDS, aplicada al detector Tayloe, está desplazada en 11025 Hz respecto a la señal sintonizada. Ello ayuda a reducir el efecto de los ruidos de fase de la señal generada por el oscilador-generador de frecuencias, y los ruidos próximos a 0 Hz. Una vez que la señal en banda base de 11025 Hz es digitalizada, es fácil, usando el software adecuado, pasarla a banda base de 0 Hz, antes de

continuar con el resto de procesos de tratamiento digital de la señal (filtrado de ruidos, demodulación, etc...).

Para resaltar el rol del concepto SDR, es interesante analizar la arquitectura básica del software del receptor: Las señales I y Q presentes en la entrada de la tarjeta de sonido son muestreadas, digitalizadas y sometidas a un procesamiento complejo mediante la Transformada Rápida de Fourier FFT, y así convertirlas al dominio de frecuencias. Un generador calcula los coeficientes del filtro pasa banda (BPS) y mediante otro proceso FFT se convierten al dominio de frecuencia. Ambas señales, en el dominio de frecuencias (señal útil y señal de filtrado) son multiplicadas digitalmente (mediante una función de mezcla digital) para proporcionar el ancho de banda para el máximo filtrado de la señal útil y procesarla adecuadamente, por ejemplo para demodularla. La señal filtrada es procesada a continuación por la transformada rápida inversa de Fourier IFFT para convertirla de nuevo al dominio del tiempo. Ya en este dominio, la señal es sometida a procesos de filtrado adaptativo de ruido (LMS noise), filtro de muesca (Notch filter), y control automático de ganancia (AGC) basado en la detección de los valores pico de la señal. La señal resultante de todos estos procesos es la señal ya demodulada y filtrada, que llevada al conversor D/A de la tarjeta de sonido, es convertida a señal analógica para su amplificación y salida a altavoz.

El software SDR original desarrollado por Gerald incluye muchas otras prestaciones adicionales. Es un software de "código abierto" (está publicado todo su código de programa, escrito en Visual Basic), por lo que está abierto a que cualquier usuario con conocimientos de programación pueda modificarlo para mejorar aspectos de éste o introducir nuevos modos y nuevas prestaciones.

Como ejemplos de características adicionales del software SDR original están las siguientes:

1. Inclusión de un conjunto de filtros DSP de distintas características para supresión de ruidos (distintos anchos de banda), y seleccionables, que dan

varios valores de selectividad al receptor: 50, 100, 250 y 500 Hz, 1.0, 2.1, 2.6, 4, 6 KHz.

2. Un analizador de espectros de la señal recibida por la tarjeta de sonido,
3. Tres sistemas de sintonía distintos (mediante teclado del valor numérico de la frecuencia, mediante un control de sintonía, o a través del analizador de espectros seleccionando con el ratón la señal deseada)
4. Control de ganancia de audio,
5. Selección del tipo de control automático de ganancia, ajustando su constante de tiempo entre cuatro valores (CAG largo, rápido, medio o lento). El CAG también es manejado de forma totalmente digital (hay un CAG externo implementado en el hardware del receptor, pero su función es proteger la entrada del convertor A/D de la tarjeta de sonido frente a señales fuertes).
6. Memorias para almacenar diversas condiciones de operación en las distintas bandas (anchos de banda de los filtros, tipo de CAG, etc...). Permite almacenar hasta cuatro configuraciones por cada banda de trabajo, seleccionables mediante clics del ratón.
7. Un reloj en tiempo real (en hora local y hora UTC) que toma la hora del reloj del computador. Si está bien sincronizado con alguna referencia horaria exacta externa (a través de Internet, o mediante alguna emisora patrón de frecuencia y horaria como la DCF77 en VLF) se hace especialmente útil para el uso de modos digitales que requieren sincronizaciones de tiempo para establecer los turnos de emisión y de recepción.
8. Control de la memoria reservada para el uso de telegrafía, que permite enviar de forma automática un texto como baliza telegráfica,

9. Posibilidad de controlar dos transverters, y de operación en modo "split". Ello está pensado a nivel del hardware mediante el uso de dos VCO, y de las funciones adecuadas en el hardware de control.

El desarrollo del software para el DSP, que constituye el software de los equipos de radio SDR, es relativamente sencillo para cualquier programador, ya que Intel tiene publicado y disponible un conjunto de librerías de software para las funciones DSP, lo que facilita el desarrollo de programas para computador destinados a dispositivos DSP, como son las tarjetas de sonido.

Este equipo goza de muy buena selectividad y sensibilidad de recepción buena, aunque no equiparable a la de un receptor de alta gama (puede ser necesario añadir un preamplificador de antena para mejorar este aspecto).

### **4.3 Software Radio en Entornos de Redes Móviles Heterogéneas**

Se espera que para las redes inalámbricas de área local (Wireless Local Area Networks, WLAN) IEEE 802.11 y las denominadas redes inalámbricas personales (Wireless Personal Area Networks, WPAN) se desarrollen terminales móviles con mayores niveles de flexibilidad que incorporen múltiples interfaces físicas o definidas por software, que permita a los usuarios la conmutación entre diferentes tecnologías de acceso, a menudo con áreas de cobertura superpuestas y diferencias importantes en el tamaño de las células.

Es a raíz de esta integración de diferentes tecnologías, 4G, con características y segmentos de aplicación claramente diferenciadas que se van a plantear las más interesantes oportunidades de negocio y al mismo tiempo el cambio de la perspectiva y el rol de los agentes implicados. Las características más relevantes que definirán los sistemas 4G son la movilidad global, portabilidad del servicio y redes móviles heterogéneas y escalables, y las mejoras en la gestión de los recursos de forma integrada para asegurar la QoS demandada por el usuario. Dentro de este entorno, basado en la convergencia de las redes de comunicaciones

móviles, entre ellas y con la tecnología Internet, ALL-IP, el concepto Software Radio en sentido amplio se distingue como uno de los más relevantes.

El objetivo de las redes celulares de cuarta generación, 4G, es el desarrollo del marco de trabajo para permitir un verdadero y omnipresente acceso, basado en IP, con especial énfasis en la posibilidad de usar una amplia variedad de acceso a tecnologías.

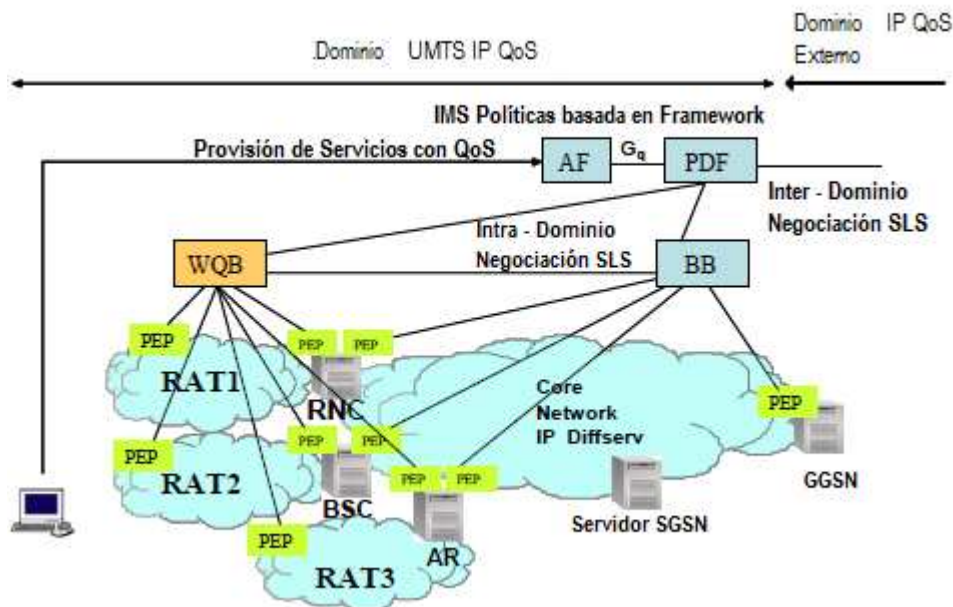
Desde un punto de vista más genérico la arquitectura de los sistema 4G prevé incluir tres niveles básicos de conectividad: las redes de área personal, que proporcionan una interconectividad de corto alcance entre diferentes equipos, WLAN y la conectividad celular (GSM-UMTS), utilizados para cobertura global y velocidades de tráfico de rango medio, aunque suficientes para aplicaciones multimedia.

Actualmente el rol que pretenden jugar los terminales 3G o UMTS es el de proveer un terminal móvil fácil de gestionar y que sea capaz de ofrecer flujos de datos de diferentes niveles de calidad o QoS para soportar adecuadamente diferentes tipos de aplicaciones. La utilización de reconfiguración de todo el stack de protocolos debería permitir incrementar la habilidad del terminal para alcanzar la calidad de servicio requerida. Por tanto, el uso de tecnologías reconfigurables y procesos de descarga de software, permite replantear el desarrollo de las terminales 4G, los cuales ofrecerán configuraciones optimizadas para una aplicación concreta y según sea la interfaz aire que se esté utilizando. Además, una completa reconfiguración precisará del desarrollo de nuevas arquitecturas Hardware/Software para las estaciones base y la red de comunicaciones de soporte.

La arquitectura de referencia considerada es una red de acceso heterogénea soportada por una CN (Core Network) común. Tomando como referencia la arquitectura de gestión de QoS end-to-end de la Figura. 4.5, ésta se extiende para incluir los aspectos relacionados con el concepto Software Radio. Las ideas básicas de dicha arquitectura se basan en mantener el elemento PDF (Policy Decisión Function) introducida en 3GPP R4/R6 e incorporar dos nuevas entidades gestoras

basadas en políticas (policy-based management) denominadas Bandwidth Broker (BB) y Wíreless QoS Broker (WQB). El BB es el encargado de gestionar los recursos del dominio Diffserv en que está basada la CN mientras que el WQB es el elemento similar de la parte de acceso. Ambos actúan como gestores basados en políticas y estas son ejecutadas en los routers de las CN así como en el equipamiento del radio, respectivamente.

Las estrategias de gestión común de los recursos de radio de la red de acceso heterogénea se denomina Gestión Conjunta de los Recursos de Radio (Joint Radio Resource Management, JRRM) que se ubica en el elemento WQB. Así mismo, se considera otro elemento, encargado de la gestión de la infraestructura Hardware/Software, que da soporte al sistema y que en su caso gestiona la reconfiguración. Es el denominado Gestor de la Reconfiguración (GRC) cuya funcionalidad se considera también dentro del WQB.



**Figura 4.5** Arquitectura de referencia

Se observa pues la necesidad de analizar la forma en que las diferentes tecnologías de acceso gestionan la QoS, de forma que pueda plantearse su integración y mediante los procesos de reconfiguración atender a las necesidades de QoS

teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos. Los elementos básicos en que se sustenta son:

- Plataforma Software Radio que dé soporte a la reconfiguración.
- Red WLAN y Bluetooth que permita explorar los mecanismos de QoS que puedan aplicarse sobre este tipo de redes.
- Gestión de los recursos: GRC y JRRM.

Los altos requerimientos de computación que demandan los diferentes estándares (GSM, 10 MIPS; WLAN, unos 6000MIPS o UMTS, alrededor de 10000MIPS) no son fácilmente obtenibles mediante un solo procesador reconfigurable con niveles de eficiencia energética aceptables, lo que abunda en la necesidad de plantear el uso de matrices de procesadores diferentes (computación heterogénea y distribuida).

#### **4.3.1 Metodología de Desarrollo del Software Radio: P-HAL**

En estas estructuras definidas por capas, cada capa de nivel inferior proporciona servicios a la capa de nivel superior. Por tanto la capa Hardware (red heterogénea de procesadores más RF) proporciona los recursos a la capa aplicación del Radio a través de la definición de una capa intermedia o “Middleware” que gestiona propiamente al Hardware de la Aplicación.

Siguiendo la idea introducida en los párrafos anteriores, se ha definido un entorno genérico para el desarrollo y la ejecución de aplicaciones de radio que permita independizar la programación de dichas aplicaciones de las plataformas (Hardware y Software de soporte). El entorno se ha bautizado con el nombre de P-HAL (Platform and Hardware Abstraction Layer), y define tanto reglas en la programación de las aplicaciones como otras para la gestión del equipo sobre el que se aplican. La premisa de partida es la de programar la aplicación sin saber cuál será el hardware que la ejecutará. Desde el punto de vista de la aplicación de radio, P-HAL se muestra como una capa de software que se extiende a lo largo de múltiples plataformas (una o más) que componen el hardware. Cada pieza de dicha aplicación



(objeto), que ha podido ser desarrollada independientemente del resto, interactúa con su entorno mediante los servicios proporcionados por P-HAL.

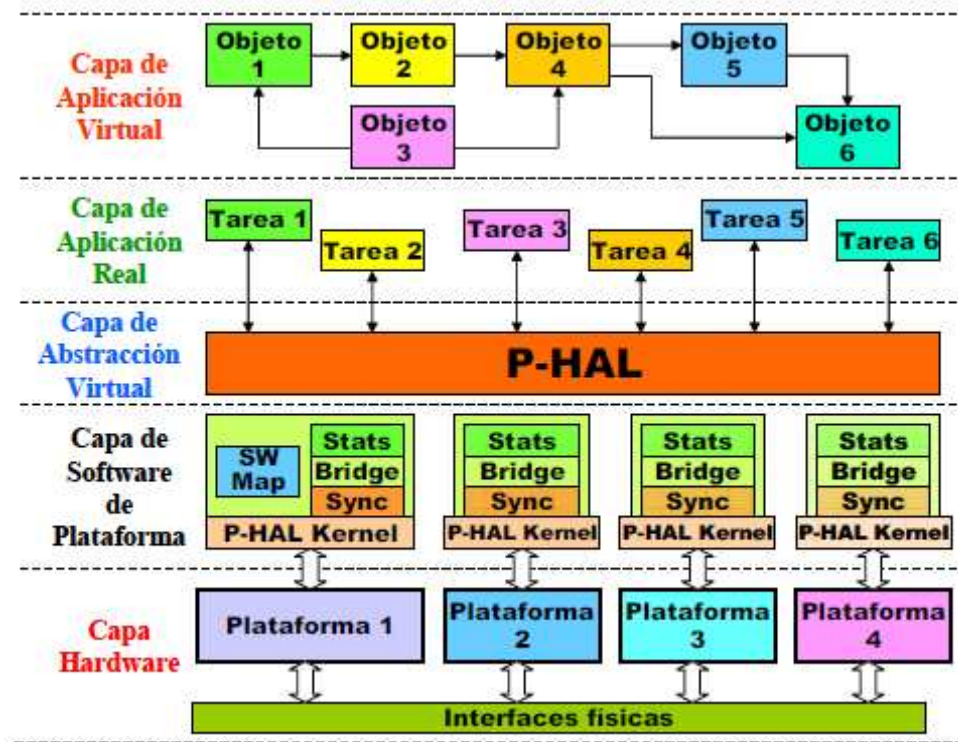


Figura 4.6 Esquema de aplicación de P-HAL

Estos se resumen en la siguiente lista:

1. Intercambio transparente de datos entre objetos, en tiempo real y sin rupturas.
2. Isocronismo tanto de datos como de procesos ejecutándose en diferentes plataformas.
3. Ejecución coordinada de objetos
4. Monitorización en tiempo real de los objetos de la aplicación y adaptación de su comportamiento.

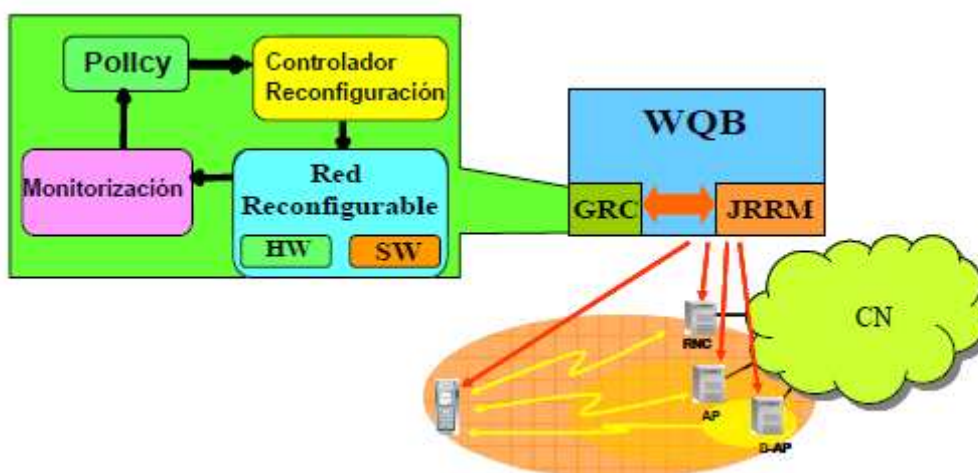
## 5. Gestión de eventos y errores.

Desde el punto de vista de la aplicación, los tres primeros servicios producen el efecto de disponer de una única plataforma, aunque físicamente sean más de una. Dentro de la estructura de P-HAL se realizan las conexiones necesarias para que la aplicación realice la función debida. La implementación de la capa virtual de P-HAL que aparece en la Figura 4.6 consume recursos de entre el 1% y el 10% de los disponibles. Por tanto, dadas las facilidades que introduce un mecanismo de abstracción del hardware como P-HAL para la portabilidad y la flexibilidad de aplicaciones de radio en un contexto Software Radio, un consumo de recursos tan reducido hace factible su uso en aplicaciones comerciales. En estos momentos se está desarrollando bajo esta metodología una versión simplificada de un canal DCH de UTRA aunque versiones preliminares de un sistema QPSKCDMA y un GMSK ya han sido probados utilizando PHAL.

### 4.3.2 Gestión de Recursos

Los elementos esenciales de una red reconfigurable y sus relaciones se indican en la Figura 4.7 donde se observa la necesidad de incorporar cierta inteligencia y capacidad de control de la reconfiguración. Dado que se pretende evaluar las necesidades que implican el concepto Software Radio aplicado a las redes heterogéneas, la propuesta que se expone plantea la necesidad de incorporar dentro de la red un Gestor de Reconfiguración Global con las siguientes funcionalidades:

1. Mecanismos de Monitorización y Análisis
2. Gestión de Recursos de Computación e Infraestructura.
3. Gestión de la Reconfigurabilidad.



**Figura 4.7** Gestión de recursos

La coordinación de ambas entidades, el JRRM y el Gestor de la Reconfiguración, resulta de especial relevancia ya que el traspaso de una tecnología de acceso a otra, tanto del terminal como de partes de una estación base, requiere una adecuada gestión de los recursos de hardware disponibles que claramente repercuten en la QoS proporcionada al usuario.

### 4.3.3 Arquitectura Testbed

El propósito de la arquitectura planteada en este demostrador es el de disponer de una plataforma Hardware/Software flexible y heterogénea, mezclando diferentes elementos de procesamiento como son las DSPs y las FPGAs, que pueda ser desarrollada, gestionada y reconfigurada siguiendo el concepto de Software Radio. Dicha plataforma deberá permitir evaluar y analizar el comportamiento de una red de acceso heterogénea ante situaciones diversas, especialmente aquellas generadas por la movilidad, verificar los algoritmos diseñados de optimización de la gestión del conjunto del sistema, teniendo en cuenta criterios de QoS, así como las problemáticas derivadas de la gestión de la reconfigurabilidad del terminal.

Toda la plataforma deberá desarrollarse utilizando un lenguaje orientado a objetos de manera que permita una fácil sustitución de unos módulos de software por otros,

facilitando el proceso de reconfiguración y optimización. La visión de la arquitectura de dicha plataforma se observa en la Figura 4.8

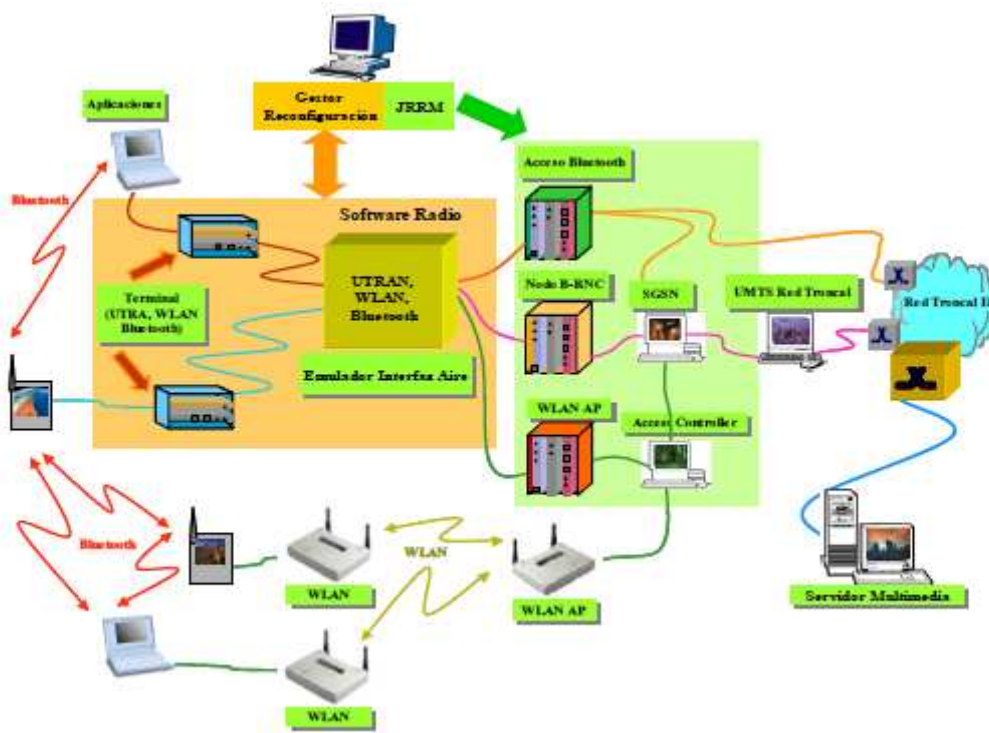


Figura 4.8 Arquitectura testbed

#### 4.4 Estación Base GSM/CDMA Utilizando SDR

En cada país las empresas celulares instalan sus propias estaciones base, de acuerdo a la tecnología utilizada y al espectro de frecuencias que usa, lo que lleva a una proliferación de antenas y a una serie de problemas urbano-ambientales.

Esto se puede evitar con una estación base que utilice dos o más tecnologías pero que trabajen en el mismo espectro de frecuencias.

Al recibir la estación base la señal, se la pasaría por filtros para saber el tipo de la señal para que el sistema sea configurado correctamente de acuerdo a la tecnología recibida. Se procedería a cargar el firmware en los FPGA para el funcionamiento del

sistema; así el subsistema sabría qué forma de onda crear ya que es su memoria se encontrarían tablas con código/frecuencia que el receptor reconocería. La implementación de las formas de ondas se las realizaría por software para resolver futuros cambios en las mismas.

Como el oscilador local (O.L.) tendría que funcionar para diferentes formas de onda, este sistema constaría de parámetros modificables que serían proporcionados por un DSP y utilizando herramientas de desarrollo y análisis de datos se determinaría los valores y rangos a los que debe oscilar el O.L. Esto serviría para la etapa de RF.

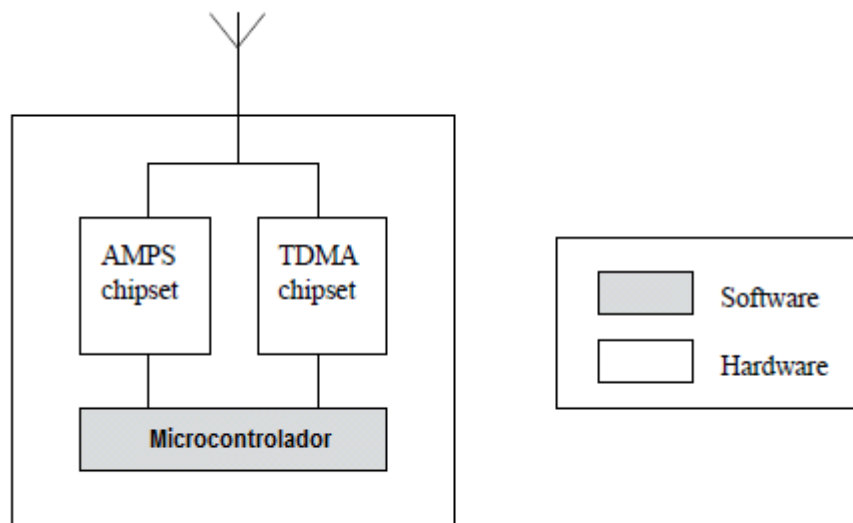
El DSP generaría diferentes funciones dependiendo del tipo de señal que esté recibiendo la estación base; detección de errores, código de convolución, modulación, demodulación, seguridad, privacidad, etc.

En resumen la estación base recibiría la señal, se la filtraría y se procedería a reconfigurar el sistema. Esto se realizaría cuando el DSP envía el informe de la señal recibida al Centro de Conmutación Móvil (Mobile Switching Center, MSC). Con esta información el MSC enviaría los datos al DSP para que este se configure de acuerdo a la forma de onda recibida.

Como se indicó, el DSP se reconfigura y realiza todo lo indicado anteriormente; así, la estación base puede funcionar correctamente con la forma de onda que reciba.

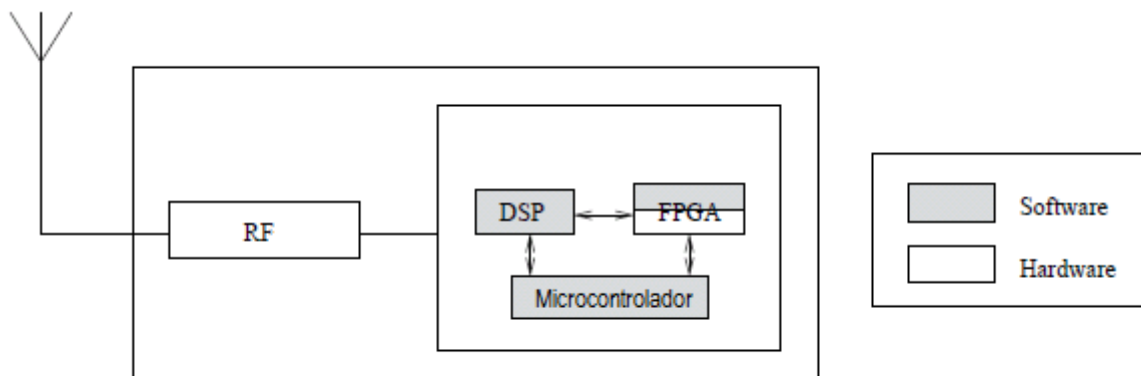
#### **4.5 Terminal reconfigurable**

Una solución para que un terminal funcione con otros estándares se lo puede realizar colocando chips, que generalmente son diseñados con ASIC, específicamente para cada estándar, pero esta solución no es nada flexible (Ver Figura 4.9).



**Figura 4.9** Ejemplo de un teléfono con modo dual

La solución multiestándar que da SDR es mucho más flexible, utilizando los GPP con un micro controlador (Ver Figura 4.10).



**Figura 4.10** Ejemplo de un SDR

En el país existen operadoras que utilizan la misma tecnología y si el usuario quiere tener el servicio de una operadora debe insertar la tarjeta SIM, en el caso de GSM. Por ejemplo, si un usuario está en una operadora GSM y su cobertura no es muy buena, el usuario debe comprar un chip y abrir la banda para la otra operadora y así poder comunicarse.

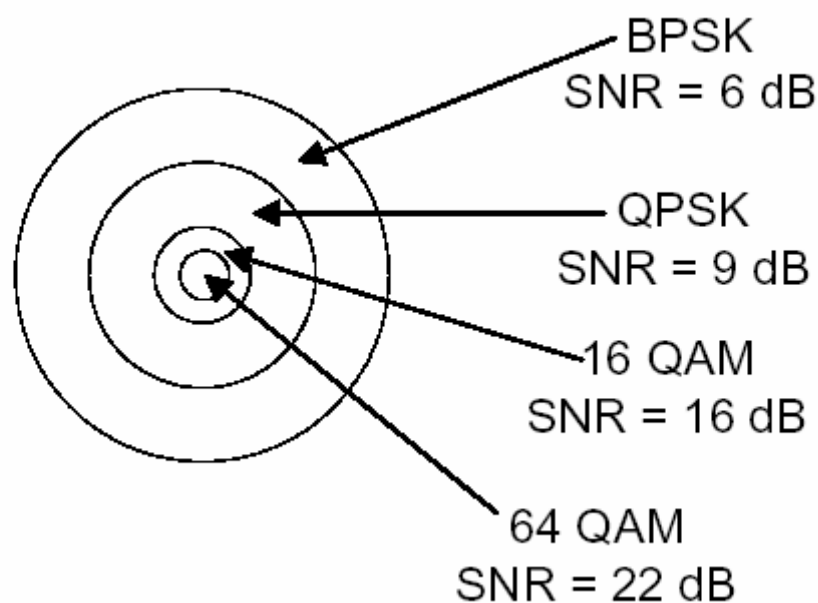
El terminal reconfigurable en estos casos es muy útil porque puede configurarse para que el terminal pueda funcionar con la otra operadora. Esta acción se puede realizar modificando solo una parte del software, ya que se utilizara el mismo estándar.

La reconfiguración del terminal se daría siguiente manera:

- El terminal esta en algún sitio donde no tiene cobertura de la operadora A a la cual pertenece, como el terminal envía siempre su número serial esta información llega a la operadora B.
- Al recibir la operadora B esta información del terminal verifica en el Registro de Ubicación Base (Home Location Register, HLR) si el terminal pertenece o no pertenece a la operadora B.
- El HLR envía un mensaje a la MSC indicando que este usuario no pertenece a la operadora B, el MSC pide información del usuario al HLR de la operadora A, especialmente si el usuario tiene saldo disponible.
- El MSC recibe la información de la operadora A. Si todo está correcto procede a enviar el software necesario al terminal para que pueda ocupar la infraestructura de la operadora B.
- El terminal no cambia su estándar y la reconfiguración básicamente es el cambio de banda puesto que la operadora A y B trabajan en diferentes bandas de frecuencia.

Una reconfiguración parcial del terminal se podría dar cuando se utilice una modulación adaptiva.

Una técnica de modulación adaptativa permite a un sistema inalámbrico escoger el mayor orden de modulación dependiendo de las condiciones de interferencia en el canal. De esta forma cuando el usuario se encuentra lejos de la estación base y con mayores fuentes de interferencia sólo es posible utilizar una modulación de bajo orden, en este caso QPSK. Cuando el usuario se encuentra más cerca de la estación base es posible utilizar técnicas de modulación de mayor orden como es el caso de 16-QAM o inclusive 64-QAM mejorándose así la velocidad de transmisión.



**Figura 4.11** Ejemplo de modulación adaptiva

En este capítulo se han explicado algunas aplicaciones y soluciones con SDR. Todavía no hay una difusión amplia del SDR porque se tiene que reglamentar muchos aspectos. Como se indicó, los militares tienen muchas aplicaciones con SDR y para los radioaficionados FlexRadios System y Microtelecom son los que tienen varios productos con SDR.



## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio realizado de esta nueva tecnología y conceptos es posible extraer las siguientes conclusiones y recomendaciones.

#### 5.1 Conclusiones

- Un radio software (SDR) tiene casi todos sus “componentes” definidos y funcionando en forma de programas, con un mínimo de componentes físicos, por lo que se puede concluir que es una tecnología muy flexible, ya que modificando, remplazando o aumentando programas de software se consigue modificar sus funcionalidades.
- Los radios definidos por software permiten construir radios reconfigurables que pueden ser acondicionadas para futuras tecnologías. Permitiendo la transferencia directa de diversos estándares y actualizaciones, creando la flexibilidad requerida y exigida con nuevas y emergentes tecnologías de comunicación inalámbrica. De esto se puede concluir que es posible ajustar el SDR a las necesidades que tenga el usuario, para que tenga acceso a la red actual y redes futuras sin ninguna interrupción.
- El software radio traería una tecnología de gran flexibilidad a la infraestructura celular, mediante la implementación de funciones de la capa física en software. Esto permitiría nuevos servicios y estándares que se desplegarían como actualizaciones de software. Haciendo efectiva esta posibilidad se puede concluir que un operador celular reduciría significativamente el costo y el riesgo asociado con el mejoramiento de su infraestructura.

- La idea de contar con protocolos que se configuren rápidamente es muy atractiva y más aún la idea de que las funcionalidades entre capas estén perfectamente definidas y se considere el establecer comunicación entre cualquier par de capas. Este concepto permite concluir que la utilización de APIs daría una gran flexibilidad de implementación a los protocolos reconfigurables.

## **5.2 Recomendaciones**

Después de haber concluido este trabajo, de la experiencia ganada se puede extraer las recomendaciones siguientes:

- Se recomienda seguir muy de cerca el avance del régimen regulatorio que permita el uso de la tecnología SDR, puesto que este es un aspecto muy importante que ayudará con la homologación de equipos. Al ser SDR un equipo que se adapta o actualiza de acuerdo a las necesidades del usuario se podría reconfigurar para una función para la cual no esté homologado.
- Se recomienda que la E.P.N. incluya al SDR en la parte académica para que los estudiantes tengan conocimiento de esta nueva tecnología, puesto que la tecnología SDR está tomando mucha importancia en las comunicaciones inalámbricas y esta vista como la tecnología que predominará en el futuro.
- Se recomienda que la E.P.N. a través de la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), obtenga información de la tecnología SDR y sería muy beneficioso para los estudiantes que se organice conferencias con personas que están trabajando con SDR para saber de los avances de SDR y tener la orientación del alcance de esta tecnología

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WILLIAM STALLINGS, “Comunicación y Redes de Computadores“, 7<sup>ma</sup> Edición, Editorial Prentice Hall, Madrid, 2004, Capitulo 9, pp. 286-296.
- [2] DONALD L. SCHILLING – CHARLES BELOVE, “Circuitos Electrónicos: Discretos e Integrados“, 3<sup>ra</sup> Edición, Editorial McGraw-Hill, Madrid, 1993, Capitulo 10 y 15, pp. 550-558, 755-779.
- [3] DANIEL M. SHEINGOLD, “Analog-Digital Conversion Notes“, The Engineering Staff of Analog Devices, Massachusetts, 1977, pp. 1-22.
- [4] TEPPER MARVIN, “Curso Básico de Radio“, Volumen 6, Editorial Glem S.A., Buenos Aires, 1967, pp.64-76.
- [5] “Modems”,<http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Tecnologias%20de%20banda%200angosta/Apunte%20Modems%202004.pdf>, pp. 7-11.
- [6] PAPER, “Métodos de Modulación Digital“, <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Radioenlaces/1502.pdf>
- [7] SRIKATHYAYANI SRIKANTESWARA, JEFFREY H. REED, PETER ATHANAS, ROBERT BOYLE, “A Soft Radio Architecture for Reconfigurable Platforms“, IEEE Communications Magazine, 2000, <http://portal.gunet.gr/index.pl?iid=3766>
- [8] JOHN BERTRAND, JOHN W. CRUZ, BRYAN MAJKRZAK, THOMAS ROSSANO, “Corba Delays in a Software Defined Radio“, IEEE Communications Magazine, <http://portal.gunet.gr/index.pl?iid=3766>

- [9] MASSIMILIANO LADDOMADA, "Reconfiguration issues of Future Mobile Software Radio Platforms", Wireless Communications and Mobile Computing, Italia, 2002, <http://portal.gunet.gr/index.pl?iid=3766>
- [10] GNU RADIO, "SDR Forum", <http://www.sdrforum.org/>
- [11] FERNANDO FERNÁNDEZ, "El Transceptor SDR-1000", <http://www.ea1uro.com/sdr.html>
- [12] "Software Radio", [http://www.maderkraft.com/software\\_radio.pdf](http://www.maderkraft.com/software_radio.pdf)
- [13] O. SALLENT, J. PÉREZ ROMERO, X. GELABERT, J. NASREDDINE, R. AGUSTÍN, F. CASADEVALL, A. UMBERT, J. OLMOS, "Gestión Integrada de Redes de Acceso Radio Celulares 2G, 2.5G y 3G", Universidad Politécnica de Catalunya, 2007, [http://users.ece.gatech.edu/~xgelabert3/papers/URSI\\_2007.pdf](http://users.ece.gatech.edu/~xgelabert3/papers/URSI_2007.pdf)
- [14] "Software Radio Resource Page", <http://www-sop.inria.fr/rodeo/personnel/Thierry.Turletti/SoftwareRadio.html>
- [15] GERALD YOUNGBLOOD, "A Software Defined Radio for the Masses", Parte 2, 2002, <http://www.arrl.org/tis/info/pdf/020910qex010.pdf>
- [16] CRISTO RODRIGUEZ, IVÁN F. CUÉLLAR, "Corba", <http://agamenon.uniandes.edu.co/~revista/articulos/corba/corba.htm>
- [17] SHREEKANT JOSHI, "Software Defined Radio" Tcom 551, [http://mason.gmu.edu/~sjoshi7/FINAL\\_PROJECT.pdf](http://mason.gmu.edu/~sjoshi7/FINAL_PROJECT.pdf)
- [18] FLEXRADIO SYSTEM, "Online store SDR", <http://www.flex-radio.com/>

- [19] MEI YEN CHEONG, "Software Reconfigurable Radio", [http://www.comlab.hut.fi/opetus/4210/presentations/32\\_scr\\_text.pdf](http://www.comlab.hut.fi/opetus/4210/presentations/32_scr_text.pdf)
- [20] ALOK SHAH, "An Introduction to Software Radio", Vanu Inc., 2002, <http://www.vanu.com/wp-content/resources/intro/SWRprimer.pdf>
- [21] LES SABEL, "The solution for Multi-Standard Multimedia in the Mobile Environment", RadioScape Ltd., 2007, [http://www.uer.biz/en/technical/trev/trev\\_309-radioscape.pdf](http://www.uer.biz/en/technical/trev/trev_309-radioscape.pdf)
- [22] TONY J. ROUPHAEL, "RF and Digital Signal Processing for Software Defined Radio" Editorial Elsevier, U.S.A., 2008, pp. 1-6, 8-43.
- [23] JOHN BARD, VICENT J. KOVARIK, "Software Defined Radio: The Software Communications Architecture", Editorial John Wiley & Sons Ltd., 2007, Capítulo 1, pp. 1-19.
- [24] MARKUS DILLINGER, KAMBIZ MADANI, NANCY ALONISTIOTI, "Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions", Editorial John Wiley & Sons Ltd., 2003, Capítulo 1 y 4, pp. 3-23, 73-91.

## GLOSARIO

<b>3GPP</b>	Grupo de Comunicaciones Móviles de 3ra Generación
<b>ADC</b>	Conversion Analógico-Digital
<b>AEP</b>	Perfil del Entorno de Aplicación
<b>AGC</b>	Control Automático de Ganancia
<b>AM</b>	Modulación en Amplitud
<b>AMI</b>	Inversión Alternativa de Marcas
<b>API</b>	Interfaz de Programas de Aplicación
<b>ASIC</b>	Circuito Integrado para Aplicación Específica
<b>ATM</b>	Modo de transferencia Asíncrona
<b>B8ZS</b>	Bipolar con sustitución de 8 ceros
<b>BLU</b>	Demodulación SSB
<b>BPS</b>	Filtro Pasa Banda
<b>CDMA</b>	Acceso Múltiple por División de Código
<b>CECOM</b>	Comando de Comunicaciones y Electrónica
<b>CF</b>	Core Framework
<b>CORBA</b>	Arquitectura de Intermediarios Solicitante de Objetos Comunes
<b>DAB</b>	Difusión de Audio Digital
<b>DAC</b>	Conversion Digital-Analógico
<b>DCD</b>	Descriptor de Configuración del Dispositivo
<b>DCH</b>	Canal Digital
<b>DDS</b>	Síntetizador Digital Directa
<b>DECT</b>	Telecomunicaciones Inalámbricas Mejoradas Digitalmente
<b>DII</b>	Interfaz de Invocación Dinámica
<b>DMD</b>	Descriptor de Configuración del administrador del Dominio
<b>DMR</b>	Radio Digital Modular
<b>DPD</b>	Descriptor de Paquete del Dispositivo
<b>DRM</b>	Radiodifusión Digital Sonora
<b>DSI</b>	Interfaz de Esqueleto Dinámico
<b>DSP</b>	Procesador Digital de Señales
<b>DSSS</b>	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa

<b>DVB</b>	Difusión de Video Digital
<b>E2R</b>	Reconfiguración Fin a Fin
<b>EHF</b>	Frecuencias extremadamente altas
<b>ELF</b>	Frecuencias extra bajas
<b>FDM</b>	Multiplexación por División de Frecuencia
<b>FFT</b>	Transformada Rápida de Fourier
<b>FHSS</b>	Espectro Expandido por Salto de Frecuencia
<b>FI</b>	Frecuencia Intermedia
<b>FM</b>	Modulación en Frecuencia
<b>FPGA</b>	Matriz de Compuertas Programables en el Campo
<b>GMR</b>	Radio Móvil Terrestre
<b>GPP</b>	Procesador de Propósito General
<b>GPRS</b>	Servicio Generalizado de Paquetes por Radio
<b>GRC</b>	Gestor de la Reconfiguración
<b>GSM</b>	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles
<b>HAL</b>	Capa Abstracta de Hardware
<b>HDB3</b>	Bipolar de Densidad Alta de 3 ceros
<b>HF</b>	Frecuencias altas
<b>HLR</b>	Registro de Ubicación Base
<b>IDL</b>	Lenguaje de Definición de Interface
<b>IFFT</b>	Transformada Rápida Inversa de Fourier
<b>ISDN</b>	Red Digital de Servicios Integrados
<b>ITU</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
<b>ITU-R</b>	Unión Internacional de telecomunicaciones de sector de Radiocomunicación
<b>JCIT</b>	Terminal de Información de Combate Conjunto
<b>JPO</b>	Oficina del Programa Conjunto
<b>JRRM</b>	Gestión Conjunta de los Recursos de Radio
<b>JTRS</b>	Conjunto Táctico para Sistemas de Radio
<b>LAN</b>	Red de Área Local
<b>LF</b>	Frecuencias bajas
<b>MF</b>	Frecuencias media

<b>MIPS</b>	Mil-procesos por Segundos
<b>MOS</b>	Semiconductores de Metal Oxido
<b>MSC</b>	Centro de Conmutación Móvil
<b>NMOS</b>	Semiconductores de Metal Oxido de Canal Negativo
<b>NRZ</b>	No Retorno a Cero
<b>NRZI</b>	No Retorno a Cero Inverso
<b>OFDM</b>	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal
<b>OL</b>	Oscilador Local
<b>OMG</b>	Grupo de Gestión de Objetos
<b>ORB</b>	Intermediario de Solicitud de Objeto
<b>OS</b>	Sistema Operativo
<b>PAL</b>	Línea alternada en fase
<b>PAM</b>	modulación por amplitud de pulso
<b>PCM</b>	Modulación por Codificación de Pulsos
<b>P-HAL</b>	Plataforma de la Capa Abstracta de Hardware
<b>PLL</b>	Lazo de Seguimiento de Fase
<b>PM</b>	Modulación de Fase
<b>PN</b>	Ruido Seudoaleatorio
<b>PPM</b>	modulación por posición de pulso
<b>PSK</b>	Modulación de Cambio de Fase
<b>PWM</b>	Modulación por Ancho de pulso
<b>QAM</b>	Modulación de Amplitud en Cuadratura
<b>QM</b>	Modulación en Cuadratura
<b>QoS</b>	Calidad de Servicio
<b>QSD</b>	Muestreo por Cuadratura
<b>RAN</b>	Red de Acceso por Radio
<b>RF</b>	Radio Frecuencia
<b>RTOS</b>	Sistema Operativo en Tiempo Real
<b>SAD</b>	Descriptor del Conjunto de Software
<b>SAP</b>	Punto de Acceso al Servicio
<b>SCA</b>	Arquitectura de Software de Comunicaciones
<b>SCD</b>	Descriptor del Componente de Software



<b>SDR</b>	Radio Definido por Software
<b>SHF</b>	Frecuencias súper altas
<b>SLF</b>	Frecuencias súper bajas
<b>SPD</b>	Descriptor del Paquete de Software
<b>SS</b>	Espectro Ensanchado
<b>SSB</b>	Modulación de Banda Lateral Única
<b>UHF</b>	Frecuencias ultra altas
<b>ULF</b>	Frecuencias ultra bajas
<b>UML</b>	Lenguaje de Modelación Unificada
<b>UMTS</b>	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles
<b>VCXO</b>	Oscilador Controlado por Voltaje
<b>VHF</b>	Frecuencias muy altas
<b>VLf</b>	Frecuencias muy bajas
<b>WLAN</b>	Red Inalambrica de AreaLocal
<b>WPAN</b>	redes inalámbricas personales
<b>XML</b>	Leguaje Ampleable de Marcas