

## **RDS (RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE). CONSIDERACIONES PARA SU IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE**

**José Ángel Amador Fundora 1, Néstor Alonso Torres<sup>2</sup>**  
1CUJAE, Calle 114 # 11901, Marianao, La Habana, Cuba,  
2 DPTH, Ulloa # 335, Nuevo Vedado, La Habana, Cuba  
e-mail: [amador@electrica.cujae.edu.cu](mailto:amador@electrica.cujae.edu.cu)

### **RESUMEN**

El presente trabajo estudia los elementos que componen las etapas de hardware necesario para implementar sistemas SDR. Los radios definidos por software (SDRs) están evolucionando los sistemas de comunicaciones inalámbricos. Las capacidades de cómputo cada vez mayores permiten el procesamiento digital de señales en los procesadores de propósito general. La clara línea que dividía el hardware y el software años atrás ha ido desapareciendo paulatinamente.

**PALABRAS CLAVES:** SDR, ADC, DAC, DSP, GPP

## **SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO). CONSIDERATIONS FOR ITS HARDWARE IMPLEMENTATION**

### **ABSTRACT**

The present article studies the elements composing the hardware stages required to implement SDR systems. The software defined radios (SDR's) are revolutioning the wireless communications systems. The increasing computing power allows the digital signal's processing in general purpose processors. The line dividing hardware and software years ago has progressively become more and more blurred, making it to almost vanish.

**KEY WORDS:** SDR, ADC, DAC, DSP, GPP

## INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas en el mundo actual avanzan a tal velocidad que los dispositivos de comunicaciones quedan prácticamente obsoletos poco después de su producción. Para superar este problema, los sistemas de comunicaciones deben ser diseñados para maximizar la inserción transparente de nuevas tecnologías en cualquier fase de su ciclo de vida, teniendo en cuenta que los dispositivos actualizados deben ser capaces de comunicarse entre ellos y con el resto de los dispositivos.

El término radio definido por software (Software Defined Radio, SDR) fue acuñado a principios de los años 1990. Un SDR es un dispositivo de comunicaciones cuya funcionalidad se encuentra definida en el software, lo cual minimiza la necesidad de realizar modificaciones de hardware durante actualizaciones tecnológicas. Para mantener criterios de interoperabilidad, el sistema de radio debe estar construido preferentemente sobre una arquitectura bien definida, estandarizada y abierta. Contar con estas bases garantiza la escalabilidad del proyecto, así como permite que los componentes de un sistema se desarrollen independientemente, a la vez que se garantiza la interconexión posterior de las partes.

Citando a Eric Blossom, fundador del proyecto GNU Radio, SDR puede definirse así: “Software Radio es la técnica de acercar el código a la antena tanto como sea posible. [SDR] convierte los problemas de hardware de radio en problemas de software” [1].

Uno de los primeros radios definidos por software fue el sistema Integrated Communications Navigation and Identification Avionics (ICNIA) de la fuerza aérea de los Estados Unidos, desarrollado a finales de la década de 1970. El sistema utilizaba un modem basado en un DSP, que era reprogramable para diferentes plataformas. Basado en esa tecnología se desarrollaron otros radios para uso militar. A finales de la

década de 1980, GEC desarrolló el primer Radio Programable Digital (PDR, por sus siglas en inglés) descrito en la literatura [2]. El radio estaba compuesto por dos extremos, uno “negro” (encriptado) y uno “rojo” que incluía una CPU, un procesador de entrada/salida y la fuente de energía. Poco después, ITT Corporation desarrolló un radio muy similar al PDR, con elementos de alto nivel, como procesadores Intel 486 y FPGAs.

Desde el punto de vista de arquitectura SDR, uno de los primeros ejemplos fue el sistema SPEAKeasy, concebido por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, y convertido eventualmente en un esfuerzo conjunto de varias ramas del ejército norteamericano. A principios de los años 1990, la Fase I de SPEAKeasy buscaba crear formas de onda de empleo militar como prueba de concepto, que incluían un sistema de alta velocidad y cuatro canales, con técnicas de espectro esparcido. El objetivo era crear un modem donde la mayoría del procesamiento de señales ocurriese en un DSP, el cual fue cumplido. La Fase II llevó a una arquitectura de sistema modular, abierta, reprogramable basada esta vez en componentes comerciales en la segunda mitad de los 1990. El sistema estaba limitado al intervalo de frecuencias de 4 a 400 MHz, aunque de acuerdo a los objetivos iniciales de diseño se pretendía que cubriera de 2 MHz a 2 GHz y no tenía soporte a formas de ondas de uso civil [3].

A finales de la década de los 1990 existían en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos más de 200 proyectos relacionados con tecnologías de radiocomunicaciones [3]. La SCA (Software Communications Architecture) surge como producto del esfuerzo de estandarización de varios actores

del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) responsabilizados con los proyectos de Joint Tactical Radio System (JTRS), encabezados por la Joint Program Executive Office (JPEO).

Es preciso agrupar las experiencias en el desarrollo de cada uno de los elementos que componen los SDR, para evitar la adopción de soluciones incompatibles con las que se desarrollan a nivel internacional.

El desarrollo de la tecnología Radio Definido por Software (SDR por sus siglas en inglés) ha generado un gran campo de trabajo y desarrollo en las telecomunicaciones en el ámbito mundial. La explotación de esta tecnología en las diferentes ramas de las telecomunicaciones ha devenido en un gran desafío para todas las ramas del saber implicadas en la implementación de sistemas de este tipo. Existen consideraciones de diseño que deben tomarse en cuenta en el desarrollo de cada una de las etapas que componen los SDR, motivado por las tecnologías empleadas en la implementación de cada una de ellas. En el caso particular del software para SDR, el desconocimiento y la complejidad de las soluciones más flexibles y genéricas hacen que se sigan produciendo sistemas rígidos e incompatibles.

## **RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE**

En su concepto más amplio, se conoce como software radio (SR) a aquellos radios multibanda capaces de soportar múltiples interfaces aire y protocolos a través del uso de antenas de banda ancha, conversiones de radiofrecuencia (RF), convertidores Analógico/Digital (ADCs, del inglés Analog/Digital Converters) y Digital/Analógico (DACs). En los “software radios” ideales, todos los aspectos del radio (incluyendo la interfaz aire física) se definen por software que corre sobre procesadores de propósito general. [4]

En muchos casos, esta implementación ideal no es realizable por razones que van desde el consumo energético hasta las estrictas y elevadas especificaciones del procesador, especialmente en altas frecuencias, de ahí que se siga el concepto de Radio Definido por Software (SDR, del inglés Software Defined Radio), más práctico, el cual caracteriza los radios reconfigurables o reprogramables cuya funcionalidad se encuentra definida por software, capaces de implementar en el mismo hardware diferentes funcionalidades, utilizando para este fin los componentes electrónicos disponibles en el mercado, combinados convenientemente para suplir las limitaciones de los procesadores actuales. [4] Como dichas funcionalidades se encuentran definidas en el software, resulta posible implementar nuevas tecnologías en un radio definido por software sencillamente realizando una actualización de software. [2]

La Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (FCC, Federal Communications Commission) como organismo regulador considera SDR “aquellos radios que incluyen un transmisor cuyos parámetros de operación como banda de frecuencias, tipo de modulación o potencia máxima de salida pueden ser alteradas mediante cambios en software sin realizar cambios a los componentes de hardware que se relacionan con la emisión de radiofrecuencias.” Los receptores no se incluyen en esta definición debido a su poco potencial como generadores de interferencias hacia otros servicios. [5]

En el presente trabajo no se utilizará la definición anterior, debido a que los equipos receptores también utilizan esta tecnología, al igual que equipos de medición, siendo objeto de interés en la presente investigación. Se prefiere en la presente investigación la definición dada por el SDR Forum:

“Un radio en el cual algunas o todas las funciones de la capa física son definidas por software” [6]

Los SDR brindan una arquitectura que permite cambiar las prestaciones del radio en tiempo real sin alterar el hardware del equipo, lo cual puede ser una funcionalidad importante en determinados escenarios, algunos de ellos bastante distantes entre sí. Considérese el caso de una empresa operadora de telefonía móvil que desea implementar una nueva funcionalidad que requiere cambios en la modulación de los teléfonos clientes, o brindar el servicio de actualizaciones a los terminales de los clientes con nuevas aplicaciones o servicios; o el caso de un despliegue en el campo de batalla donde las nuevas secuencias de saltos de frecuencia, modulación y encriptación se transmiten a los soldados vía aire, y se reconfiguran de manera automática e inmediata los transceptores, actuando selectivamente de acuerdo a la identidad y pertenencia a grupos de cada uno de los comunicadores que operan los equipos.

Entre las ventajas con que cuentan los equipos SDR se encuentra su adaptabilidad potencial al entorno que les rodea, siendo capaces de alternar entre disímiles esquemas de modulación con el objetivo de aprovechar al máximo el canal de radio, el espectro radioeléctrico o la energía disponible, su capacidad potencial de recibir actualizaciones en su funcionalidad, y el potencial de personalización por parte del usuario, que al obtener un terminal con hardware genérico, puede modificarlo de acuerdo a la actividad que realiza, escogiendo el software que más se ajuste a cada momento, permitiendo tener un terminal a la medida, que se comporte con igual facilidad como teléfono celular, walkie-talkie, receptor GPS, enrutador o asistente personal.

### **ARQUITECTURA**

Para comprender cabalmente las diferentes arquitecturas de los SDRs, es preciso explicar primero las diferencias entre los SDR ideales (SR) y los SDR prácticos.

Los SR definen por software, corriendo sobre procesadores de propósito general, todos los aspectos de la cadena de transmisión y recepción incluyendo modulación, demodulación, filtrado y selección de bandas de frecuencias. [7] Los requerimientos de hardware para esta plataforma generalmente exceden las especificaciones actuales de los procesadores de propósito general, en especial en aplicaciones de alta frecuencia y esquemas de modulación complejos.

Los SDR prácticos, basados en las limitaciones de los procesadores actuales, se definen como un radio multibanda capaz de soportar múltiples interfaces aire y protocolos, utilizando una mezcla apropiada de circuitos especializados (ASICs, siglas en inglés de Application Specific Integrated Circuit), arreglos de compuertas programadas en campo (FPGAs, del inglés Field Programmable Gate Arrays), Procesadores Digitales de Señales (DSPs, del inglés Digital Signal Processors) y microprocesadores de propósito general (GPPs, del inglés General Purpose Processors).[4]

Las diferencias entre ambas arquitecturas se muestran en la Figura 1. En múltiples implementaciones el procesamiento de señales analógico se realiza para convertir entre la banda baja en la cual se realiza el procesamiento y las altas frecuencias de transmisión. Los bloques de procesamiento especializado se utilizan por lo general para mejorar la eficiencia de procesamiento en capa física. [8]



Figura 1 – Diagrama de sistemas definidos por software ideal (a) y práctico (b)

## CONVERTIDORES ANALÓGICO/DIGITALES

Los avances en los circuitos procesadores (DSP, FPGA, GPP) han elevado considerablemente la capacidad de procesamiento de los SDRs, sin embargo las mayores dificultades se encuentran en lograr que las señales analógicas extremadamente sensibles sean convertidas al dominio digital. De hecho, la imposibilidad de construir SR para aplicaciones que funcionen en bandas altas está dada por los límites de realización de los ADC como se ha demostrado formalmente en [9].

Entre las especificaciones necesarias para diseñar las etapas receptoras de un radio están la sensibilidad y el ancho de banda útil. De manera simplificada se puede decir que la sensibilidad se refiere a la antena, y generalmente se expresa en dBm. A los efectos del ADC, este requerimiento se traduce como relación señal ruido en dBc o dBFS (donde dBc es la SNR referida a la portadora, y dBFS se refiere al nivel de la señal respecto a la escala completa del ADC). SNR para un determinado ADC puede calcularse mediante:

$$SNR_{A/D} = 1.76 + 6.02b + 10 \log (BW_{sig} / F_{sampling}) \quad (1)$$

Donde  $b$  es la resolución del ADC en bits,  $BW_{sig}$  es el ancho de banda de la señal que se desea muestrear y  $F_{sampling}$  es la frecuencia de muestreo, que de acuerdo al criterio de Nyquist, es al menos el doble de la frecuencia que se desea muestrear. [10]

Debe considerarse además la capacidad para recibir pequeñas señales y rechazar interferidores, caracterizada por el SFDR (margen dinámico libre de espurias, del inglés spurious-free dynamic range), el cual describe la relación entre la señal deseada y la mayor componente espuria más próxima en la salida del ADC, sea armónica o no, expresada en dBc. Finalmente, se debe considerar el ancho de banda del convertidor, un término que aunque no se especifica siempre con claridad, trata con el ancho de banda real del ADC en el cual es capaz de digitalizar con SNR y SFDR adecuado.

En la práctica, los ADC se especifican de acuerdo al punto de -3dB en su respuesta de frecuencia equivalente analógica, aunque en realidad muchos de ellos se degraden rápidamente al trabajar por encima de 200-300 MHz, incluso cuando su ancho de banda nominal sea de varios cientos de MHz [11]

Un parámetro crítico para la selección de un ADC es la tasa de muestreo (sample rate), pues es la cifra que decide el ancho de banda que es capaz de muestrear el dispositivo. El criterio de Nyquist limita el ancho de banda que un ADC puede digitalizar sin solapamiento (aliasing, el proceso mediante el cual el espectro de la señal deseada cae sobre sí mismo después de ser digitalizada esta, dando lugar a interferencias que a menudo se pueden manifestar como distorsión) en el entorno de la mitad de su frecuencia de muestreo ( $F_s/2$ ).

Por ende, para un ADC que muestree a 200 MSPS (megamuestras por segundo, del inglés MegaSamples Per Second) el ancho de banda máximo que puede ser digitalizado es de 100 MHz. En la práctica el filtro que se utiliza para limitar la entrada analógica a  $F_s/2$  tiene una pendiente finita en la banda de rechazo, la cual limita aún más el ancho de banda útil, en la práctica entre 80 y 90 MHz.

Debe tenerse en cuenta que en realizaciones de alta potencia donde la eficiencia es un parámetro importante, es posible implementar algoritmos de linealización mediante el empleo de pre-distorsión, debido a lo cual se requiere realimentar constantemente al procesador con una muestra digital de la señal de salida, lo cual requiere un ADC veloz para mantener la precisión del algoritmo corrector.

Para mantener la sensibilidad, es preciso que el diseño del SDR tenga una gran SNR para que las señales de baja potencia puedan ser diferenciadas y demoduladas. Este parámetro es especialmente importante cuando se trabaja con constelaciones complejas (como 64QAM, propuestas ya en algunas normas de TDT y radiodifusión digital). Con señales muy débiles, la SNR del ADC de conjunto con el ruido de fase del oscilador local constituyen factores limitantes y fijan la sensibilidad del receptor como un todo.

En muchos casos se hace necesario fijar una relación de compromiso entre la tasa de muestreo (ancho de banda) y el SNR, debido a los límites de resolución de los ADC (de 10 a 14 bits) a altas velocidades (MSPS).

Debe considerarse además la ganancia de procesamiento. Típicamente, se calcula SNR en un ADC como la relación entre la potencia del componente fundamental de un tono sinusoidal y la suma del ruido a todo lo ancho del ancho de banda de Nyquist del ADC (de 0 Hz a  $F_s/2$ , excluyendo la componente de directa CD), considerando el caso común en que el ruido se encuentra uniformemente distribuido en el ancho de banda que se analiza.

Si la señal de interés tiene un ancho de banda  $BW_{sig}$ , y el ADC una frecuencia de muestreo  $F_s$ , la ganancia de procesamiento efectiva (PG) se calcula como:

$$PG = -10 \log \left( \frac{BW_{sig}}{F_s/2} \right) \quad (2)$$

El jitter es otro parámetro que se debe tener en cuenta como limitador del SNR. La ecuación que relaciona SNR con jitter en un sistema discreto es:

$$SNR = -20 \log(2\pi f_{in} t_{jitter}) \quad (3)$$

Donde  $f_{in}$  representa la frecuencia de entrada analógica, y  $t_{jitter}$  el valor RMS del jitter del sistema. Se adiciona el jitter del circuito interno de muestreo del ADC (al estilo de raíz de suma de cuadrados) a la frecuencia externa de muestreo del ADC.

Nótese que la limitación de SNR es independiente de la frecuencia de muestreo, y está directamente relacionada con la frecuencia de entrada analógica. Esta limitación fundamental es una de las consideraciones de diseño a tener en cuenta para decidir la frecuencia intermedia (FI) en el diseño del receptor.

La linealidad del ADC, caracterizada por el parámetro SFDR, se hace crítica en situaciones donde la potencia incidente en la antena del receptor alcanza niveles considerables de potencia. Este fenómeno puede suceder cuando la señal deseada es fuerte –caso deseado-, o cuando un interferidor “en banda” es fuerte –caso no deseado-. En este último caso la linealidad del ADC define cuando la señal puede ser demodulada correctamente, en especial cuando la potencia de la señal deseada es baja. La presencia de un interferidor potente limita la posible aplicación de funciones AGC (Control automático de ganancia, del inglés Automatic Gain Control), ya que la amplitud de la señal total (la superposición de la deseada más la interferidora) puede alcanzar el límite de plena escala de la entrada analógica. Es en ese caso donde la linealidad del ADC se convierte en un cuello de botella, en particular en el caso de los convertidores de menor resolución.

De la misma forma que el jitter limita la FI (FI, frecuencia intermedia) máxima que puede seleccionar al diseñador, el SFDR es un criterio a tomar en cuenta en esa decisión. Muchos de los ADC disponibles en el mercado exhiben altos niveles de linealidad, pero limitados a frecuencias de entrada por debajo de los 200 MHz, lo cual limita seriamente los beneficios de contar con una FI alta, debido al efecto de la caída de amplitud en la respuesta de frecuencias en el rendimiento general de SFDR.

Si en los objetivos de diseño se selecciona como opción deseada la minimización racional de los costos, la principal limitante no va a coincidir con la que generalmente plantea la literatura, sino que va a radicar en las características de diseño del ADC, que resulta generalmente escogido por su amplia difusión y bajo costo.

## INTERFAZ RADIO

Como se explicó en el epígrafe anterior, es posible demostrar formalmente que los requerimientos de hardware del ADC necesarios para implementar un SR puro en bandas altas no son alcanzables con la tecnología disponible, al menos con la de menor costo. [9] Incluso en bandas bajas, los precios de los ADC que permiten muestrear las mismas directamente en RF son prohibitivos para aplicaciones de bajo costo. En muchos otros casos, es conveniente utilizar ADC disponibles popularmente, cuya frecuencia de muestreo rara vez supera los 192 kHz, como los disponibles en tarjetas de sonido de computadoras personales (PC, del inglés Personal Computer). En estos convertidores A/D más lentos se dispone de mayor resolución, los dispositivos comunes presentan una resolución entre 16 y 32 bits, lo que proporciona una mejora sustancial en el margen dinámico, aunque no siempre puede ser aprovechado plenamente debido al nivel de ruido presente a la entrada. Una opción muy popular y de costo

razonable en la actualidad resultan los A/D de audio de 24 bits, con frecuencias de muestreo hasta 192 kHz comunes

en las tarjetas de sonido de gama media para PC, disponibles tanto con bus PCI como con interfaz USB 2.0.

Por estos motivos se hace necesario introducir cambios en el diseño del hardware que permitan el desarrollo de soluciones con la tecnología disponible, sin comprometer más de lo necesario la flexibilidad y el protagonismo del software en la solución final.

Para implementar SDRs se ha experimentado con diversas interfaces radio, que comprometen en mayor o menor medida la flexibilidad y las prestaciones del radio, siempre con el objetivo de convertir la señal de radio en una señal en banda base, para su posterior procesamiento. Los métodos principales que se utilizan incluyen la arquitectura superheterodina clásica y las técnicas de conversión directa, conocidas también como FI-Cero (Zero-IF). En los sistemas superheterodinicos la señal es convertida a una FI, amplificada y filtrada, para luego ser convertida a banda base. Sobre esta arquitectura se implementan variaciones para mejorar diferentes aspectos de la recepción mediante cambios realizados en el diseño básico, como añadir o prescindir de filtros pasabanda a la entrada, incluir amplificadores de bajo ruido en la primera etapa del receptor, variar el número de conversiones sucesivas de frecuencias, y otras [9]. Se debe tener en cuenta que la ganancia de los preamplificadores de RF debe ser escogida cuidadosamente, para lograr una mejoría razonable de la relación señal-ruido sin comprometer excesivamente el margen dinámico, así como que cada oscilador heterodino en el sistema incrementa el aporte de ruido de fase a la señal demodulada.

En los sistemas de conversión directa, el ancho de banda de interés es convertido directamente a banda base, sin que medie otro proceso. [10] Este último método es preferido en los sistemas SDR de simple implementación, entre otras razones debido a la simplicidad de los circuitos que lo componen.

En el presente trabajo se profundizará solamente en los sistemas de conversión directa.

## **SISTEMAS DE CONVERSIÓN DIRECTA**

La recepción de conversión directa (RCD), también referida como homodina o de FI cero, es la solución más simple y natural para recibir la información transportada por una portadora, aunque cada vez se utiliza más para otros fines. La recepción de conversión directa presenta varias características que la hacen muy adecuada para la integración así como para la operación multibanda y multinorma, pero existen varios obstáculos inherentes que la han mantenido por mucho tiempo a la sombra de la técnica superheterodina. [12]

En primer lugar, el problema del rechazo al canal imagen ha sido eliminado desde que la FI es cero y la imagen del canal deseado es el mismo canal. Por tanto solo es necesario un oscilador local lo que implica que existe sólo una contribución de ruido de fase. En consecuencia la necesidad de utilizar filtros de alta Q para la eliminación del canal imagen - como sucede en los sistemas heterodinicos- desaparece. Ahora el filtrado se realiza a baja frecuencia (banda base) con amplificación, lo que implica un menor consumo de energía que cuando se realiza este trabajo en altas frecuencia, además de utilizar un menor número de componentes, de características técnicas más comunes y lógicamente de menor costo.

En la práctica, sin embargo hay que eliminar las interferencias fuera de banda que puedan bloquear el receptor antes de convertir la señal a banda base para evitar que se desestabilice el receptor si se saturan las secciones siguientes, así como que se produzcan armónicos e intermodulación que aparecerían en la banda base. Por tanto, es necesario utilizar un filtro pasa bajos, el que básicamente es un filtro de ancho banda similar al utilizado en la FI de un receptor heterodino, solo que centrado en frecuencia 0.

## **OFFSET DE CD**

En la conversión directa, como la señal de interés es convertida a banda base casi al inicio de la cadena de recepción, sin otro filtrado que la selección de banda de RF, ocurren varios fenómenos que contribuyen a la formación de componentes de CD (CD, corriente directa), que aparecen directamente como señales interferentes en la banda de interés.

La frecuencia del oscilador local puede ser conducida o radiada a través de un camino no deseado hacia el puerto de entrada del mezclador de RF, mezclándose así consigo misma, produciendo una componente de CD no deseada a la salida del mezclador. Peor aún, esta fuga de la señal del oscilador local puede alcanzar la entrada del amplificador de bajo ruido, produciendo un resultado aún más fuerte. Este efecto se presenta como una gran barrera para la integración de oscilador local, el mezclador y el amplificador de bajo ruido en un solo sustrato de silicio, ya que la proximidad entre ellos puede contribuir a un pobre aislamiento. [12]

Por el contrario, si ocurre una fuerte interferencia dentro de banda, una vez amplificada por el amplificador de bajo ruido, puede encontrar camino hacia la entrada del oscilador, lo que produciría que se mezclara consigo misma.

Alguna porción de potencia del oscilador puede conducirse a través del mezclador y del amplificador de bajo ruido (debido a un aislamiento inverso no ideal) hacia la antena. La potencia radiada aparece entonces como una señal interferente para otros receptores en la banda correspondiente, esto puede violar los estándares de emisión para el sistema dado. Es importante notar que desde que la frecuencia del oscilador local está dentro de la banda recibida, el filtro de entrada no hace nada para suprimir esta emisión. Además esta señal radiada puede ser reflejada por edificios u objetos en movimiento y recapturada por la antena. Este efecto es despreciable en comparación con los causados por los antes mencionados: mezcla del oscilador local consigo mismo y la mezcla consigo misma de la señal de bloqueo.

La fuga de la señal del oscilador local o de RF hacia el puerto del mezclador opuesto no es la única forma en la que pueden producirse componentes de CD. Cualquier sección que presente asimetrías o no linealidades generará un nivel de CD a la salida. Si la CD producida desensibiliza o no el receptor depende del diseño del resto del sistema. Obviamente es preferible tener un acoplamiento de CA (Corriente Alterna) a la salida del mezclador para eliminar la componente de CD. Algunos esquemas de modulación como FSK usada en el paging, muestra poca degradación si se filtran las componentes de baja frecuencia del espectro. Sin embargo, otros esquemas de modulación presentan un pico de CD y un acoplamiento capacitivo de CA significaría una pérdida importante de información, de aquí la considerable degradación del BER (Razón de Bits Erróneos, del inglés Bit Error Rate). En sistemas TDMA (Acceso múltiple por división de tiempo, del inglés Time Division Multiple Access) como GSM (Sistema global para comunicaciones móviles, del inglés Global System for Mobile Communications), no hay un

pico significativo en el espectro de baja frecuencias, pero aun así es imposible un acoplamiento capacitivo a la CA. Esto se debe a conflicto con los requisitos del capacitor de acoplamiento en TDMA – el capacitor debe ser lo suficientemente grande para evitar causar un rechazo a la CD, pero también debe ser lo suficientemente pequeño para que los transitorios que ocurren cuando la fuente del receptor se enciende no resulten molestos.

El procesamiento digital de señales (DSP) puede ser usado para eliminar la componente de CD de la señal de forma tal que no se duplique en el dominio analógico. Para ello la señal recibida se almacena en memoria, se determina la componente de CD y se elimina de cada muestra de datos de la señal. La señal resultante de este proceso tiene 0 V de componente de CD. Para sistemas como el GSM, ocurre un resultado indeseable debido a la pérdida de las componentes de CD que sean parte de la señal deseada, pero el efecto perceptible es mínimo. [12]

### **NO LINEALIDADES**

Otro de los problemas que presentan los RCD es la no linealidad. Al igual que los receptores superheterodinos, los RCD presentan respuestas espurias. En los heterodinos esto ocurre a las frecuencias de RF de entrada donde  $n(\text{RF}) \pm m(\text{LO}) = \text{FI}$ , mientras que para RCD esto ocurre donde  $n(\text{RF}) - m(\text{LO}) = 0$ .

Cuando una portadora de señal de bloqueo cae sobre una de estas frecuencias espurias, la señal se traslada a banda base con un cambio en su ancho de banda, en dependencia del orden del espurio.

Más importante, sin embargo, resulta que las señales de bloqueo de gran amplitud dan lugar a una componente de CD en los receptores de conversión directa, ya sea en una frecuencia espuria o no.

La componente de CD aparece a la salida del mezclador y se amplifica en las secciones posteriores.

Esto se debe a no linealidades de segundo orden en el mezclador, caracterizadas como punto de intercepción de segundo orden e intermodulación de segundo orden. Esto puede ser aliviado mediante un diseño cuidadoso, empleando un circuito bien balanceado. Sin embargo, el mezclador y el amplificador de bajo ruido deben estar diseñados con una sola terminación porque la antena y un hipotético filtro preselector tendrían una terminación única.

En la mayoría de los sistemas, la intermodulación de tercer orden es importante porque cae usualmente dentro de banda, en la vecindad de la señal de interés, y está caracterizada por un punto de intercepción de tercer orden. Además las no linealidades de segundo orden se convierten en críticas, pues producen señales en banda base que aparecen como señales interferentes a la señal útil.

### **RUIDO**

El ruido en baja frecuencias se convierte en una gran preocupación en los RCD, pues una parte significativa de la ganancia se logra en las secciones de banda base después del mezclador. Los niveles de señal débiles, de unos pocos milivolts en banda base son aún muy vulnerables al ruido. Esto requiere secciones de RF fuertes para mejorar la pobre cifra de ruido de los bloques de banda base, pero por supuesto esto debe estar regido por una relación de compromiso con el problema de la linealidad, mencionado anteriormente, que acompaña a la ganancia de RF.

El ruido parpadeo (flicker) es el mayor contribuyente del ruido en banda base. Asociado con el flujo de corriente directa, tiene una respuesta espectral proporcional a  $1/f$ . En los circuitos de RF, el ruido  $1/f$  tiende a ser modulado sobre la señal de RF, y en el caso de un mezclador con salida de banda base, el ruido  $1/f$  parece tener una alta ganancia de conversión.

En la práctica, el ruido de parpadeo es propio de los dispositivos MOS más que de los transistores bipolares, y se modela como una fuente de voltaje en serie con la compuerta.

El ruido  $1/f$  complica el uso de transistores MOS para circuitos de RF, puesto que el principal método para reducirlo en MOS es incrementar el tamaño del transistor, lo que implica un incremento de la capacidad del transistor que afecta la ganancia de RF. Por esta razón resulta a veces preferible el empleo de transistores bipolares para los diseños de mezcladores en RCD. En la primera sección de banda base después del mezclador, es posible emplear dispositivos MOS, mientras el tamaño del transistor sea factible para un resultado adecuado para la amplificación de baja frecuencia.

## **RADIO COGNITIVO**

Se conoce como radio cognitivo (CR, del inglés Cognitive Radio) a aquellos SDR que son capaces de monitorear su entorno, seguir sus cambios, y reaccionar consecuentemente. Un CR es una unidad autónoma en un escenario de comunicaciones que intercambia información con las redes a las que es capaz de acceder, así como con otros CRs. [13] De acuerdo a J. Mitola III quien acuñara el término, se entiende por radio cognitivo al radio que emplea un razonamiento basado en modelos para lograr un determinado nivel de competencia en el dominios relacionados con radio. [4]

Al consultar la literatura, es posible encontrar referencias al CR como asistente personal, capaz de brindar información de usuario, como direcciones, rutas, supervisión de citas, y otras aplicaciones típicas de un PDA (siglas en inglés de Personal Digital Assistant, Asistente Digital Personal). También es posible encontrar referencias relativas a la gestión inteligente y dinámica del espectro, seguimiento de ocupación del espectro, gestión de capacidades de procesamiento, así como recuperación y procesamiento de información de redes y sistemas. El concepto de CR considera tanto las propiedades centradas en el usuario como las centradas en la tecnología. [13] Por su complejidad, estas últimas son las que más atención reciben por parte de los especialistas en comunicaciones Aunque el concepto de CR asociado directamente a las comunicaciones móviles multimedia descarta el uso de frecuencias por debajo de 28 MHz y por encima de 6GHz [4], los autores del presente trabajo consideran que en entornos de comunicaciones de emergencia, donde más importante que la velocidad es la disponibilidad del servicio, los conceptos de monitoreo del espectro, seguimiento de los cambios del mismo y la gestión inteligente de la sintonía y protocolos para conseguir comunicaciones, los conceptos de CR son plenamente aplicables a los sistemas de radiocomunicaciones de onda corta.

## **CONCLUSIONES**

Los sistemas de Radio Definido por Software representan una nueva era tecnológica para las radiocomunicaciones. El hecho de estar constituidos en su mayor parte por software los dota de una flexibilidad sin precedentes en los sistemas de radiocomunicaciones.

En este trabajo se han analizado los diferentes bloques que conforman la interfaz radio. Se analizaron las tecnologías que permiten implementar cada uno de los elementos que componen los SDR, identificando sus potencialidades y desafíos.

En la actualidad, esta tecnología es parte integrante de numerosos dispositivos de amplio empleo y por sus potencialidades, ha permitido hacer realidad el acceso a numerosos servicios que ya son de empleo común, con dimensiones, peso y consumo cada vez menores.

## REFERENCIAS

1. Blossom, E. Exploring GNU Radio. 2004 [visitado Julio-2010]; disponible en:  
[Http://www.gnu.org/software/gnuradio/doc/exploring-gnuradio.html](http://www.gnu.org/software/gnuradio/doc/exploring-gnuradio.html).
2. Murat Biçer, S., A Software Communications Architecture Compliant Software Defined Radio Implementation, in Department of Electrical and Computer Engineering. 2002, Northeastern University. Boston, Massachusetts. p. 105.
3. Tuttlebee, D.W., Software Defined Radio. Origins, Drivers and International Perspectives. Wiley Series in Software Radio, ed. L. John Wiley and Sons. Vol. 1. 2002, Baffins Lane, Chichester, England. 369.
4. Mitola III, J., Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications. Mobile Networks and Applications 6, 2001: p. 435–441.
5. FCC, Authorization and Use of Software Defined Radios. 2001, Federal Communications Commission. p. 24.
6. Forum, S. What is Software Defined Radio. 2008 [visitado 7-Junio-2010]; disponible en:  
[http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1\\_0\\_0.pdf](http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1_0_0.pdf).
7. Mitola III, J., Software Radio Architecture: A Mathematical Perspective. IEEE Journal on selected areas in communications, 1999. 17(4): p. 25.
8. Weidling, F.J., A Design Workflow for Software Defined Radios, in Electrical Engineering and Computer Science. 2007, University of Kansas. p. 132.
9. Arkesteijn, V., Analog Front-Ends for Software-Defined Radio Receivers. 2007, Universiteit Twente.
10. Kumar Surineni, S., Software Defined Radio (SDR) based implementation of IEEE 802.11 WLAN Baseband protocols, in Electrical Engineering. 2004, University of New Hampshire. p. 87.
11. Papantonopoulos, Y.N. High-speed ADC technology paves the way for software defined radio. 2007 [visitado 4-Junio-2010]; disponible en:  
<http://www.planetanalog.com/features/showArticle.jhtml?articleID=201202849>.
12. Abidi, A.A., Direct-Conversion Radio Transceivers for Digital Communications. IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS,, 1995. 30(12): p. 12.
13. Jondral, F.K., Software-Defined Radio—Basics and Evolution to Cognitive Radio. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2005, 2005: p.275–283.