

# **Radio definida por Software**

**Autor:** Gerez Jiménez, Juan José Armando

## **Resumen**

La radio definida por software (SDR, por sus siglas en inglés) representa una revolución en el diseño y la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica. Esta monografía explora el concepto de banda base analítica y las diferentes topologías que permiten la conversión entre señales analógicas de banda pasante y señales digitales de banda base. Se analizan topologías como la conversión directa con muestreo en banda base, superheterodino con muestreo en banda base, superheterodino con muestreo en frecuencia intermedia y muestreo en radiofrecuencia. Además, se examinan las plataformas de desarrollo GNURadio y diversos periféricos como RTL-SDR, HackRF One, USRP y ADALM-PLUTO. Se detallan sus arquitecturas, capacidades y aplicaciones prácticas, proporcionando una visión integral de las herramientas disponibles para el desarrollo en SDR.

## **Introducción**

La evolución de las tecnologías de comunicación ha llevado a la necesidad de sistemas más flexibles y adaptables. La radio definida por software (SDR) surge como una solución que permite implementar funciones tradicionalmente realizadas en hardware mediante software, facilitando la actualización y personalización de los sistemas de radiofrecuencia (Pu & Wyglinski, 2013). Este trabajo se centra en dos aspectos fundamentales: la banda base analítica y las plataformas y periféricos utilizados en SDR. El objetivo es proporcionar una comprensión profunda de cómo se realiza la conversión de señales y qué herramientas están disponibles para investigadores y desarrolladores en este campo.

## **Desarrollo**

### **Banda Base Analítica**

#### **Concepto de Banda Base Analítica**

La banda base analítica es una representación compleja de una señal real que facilita el procesamiento y análisis de señales moduladas en sistemas de comunicación digitales. Esta representación se obtiene al eliminar las componentes negativas del espectro de la señal, resultando en una señal compleja cuyo espectro está centrado en cero y contiene solo frecuencias positivas (Grayver, 2013).

Matemáticamente, dada una señal real  $x(t)$ , su señal analítica  $x_a(t)$  se define como:

$$x_a(t) = x(t) + j \cdot \hat{x}(t)$$

donde  $\hat{x}(t)$  es la transformada de Hilbert de  $x(t)$ , y  $j$  es la unidad imaginaria.

La transformada de Hilbert de una señal  $x(t)$  se define como:

$$\hat{x}(t) = \mathcal{H}\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

donde P.V. denota el valor principal de Cauchy. La transformada de Hilbert introduce un desfase de  $-90^\circ$  a todas las componentes de frecuencia de  $x(t)$ , lo que permite construir la parte imaginaria de la señal analítica.

La señal analítica  $x_a(t)$  tiene un espectro que es cero para frecuencias negativas:

$$X_a(f) = 2X(f), \quad \text{para } f \geq 0; \quad X_a(f) = 0, \quad \text{para } f < 0$$

donde  $X(f)$  es la transformada de Fourier de  $x(t)$ . Esto significa que toda la información espectral se concentra en frecuencias positivas, lo cual es útil para representar señales moduladas y simplificar el procesamiento digital (Collins et al., 2018).

### **Representación en Fasores y Centrando el Espectro en Cero**

Las señales moduladas pueden representarse utilizando fasores, que son números complejos que describen la amplitud y fase de componentes sinusoidales. En comunicaciones, una señal de banda pasante puede expresarse como:

$$x(t) = \text{Re}\{s(t)e^{j2\pi f_c t}\}$$

donde:

- $s(t)$  es la señal de banda base compleja (envolvente compleja).
- $f_c$  es la frecuencia de la portadora.
- $\text{Re}\{\cdot\}$  denota la parte real.

Al multiplicar  $x(t)$  por  $e^{-j2\pi f_c t}$ , se traslada el espectro de la señal al centro de frecuencias (cero), obteniendo la señal de banda base analítica:

$$s(t) = x(t)e^{-j2\pi f_c t}$$

Este proceso es conocido como demodulación o conversión a banda base y permite que  $s(t)$  sea procesada en el dominio complejo, facilitando operaciones como filtrado y demodulación (Pu & Wyglinski, 2013).

### **Uso de la Transformada de Hilbert en la Conversión a Banda Base Analítica**

La transformada de Hilbert es esencial para obtener la representación analítica de una señal real. Al generar la parte imaginaria de la señal analítica, permite

construir una señal compleja que contiene toda la información de la señal original pero centrada en frecuencias positivas.

En sistemas de procesamiento digital de señales (DSP), la implementación práctica de la transformada de Hilbert se realiza mediante filtros Hilbert discretos. Estos filtros tienen una respuesta en frecuencia que introduce un desfase de  $-90^\circ$  a las componentes positivas y  $+90^\circ$  a las negativas, anulando efectivamente las componentes de frecuencia negativa en la señal analítica (Grayver, 2013).

La señal analítica discreta  $x_a[n]$  se obtiene como:

$$x_a[n] = x[n] + j \cdot \hat{x}[n]$$

donde  $\hat{x}[n]$  es la transformada de Hilbert discreta de  $x[n]$ .

### **Beneficios y Aplicaciones de la Banda Base Analítica**

- **Simplificación del Procesamiento:** Al trabajar con señales complejas de banda base, muchas operaciones como la modulación, demodulación y filtrado se simplifican considerablemente.
- **Eficiencia Espectral:** Al centrar el espectro en cero y eliminar las frecuencias negativas redundantes, se optimiza el uso del ancho de banda disponible.
- **Implementación de Modulaciones Digitales:** Modos de modulación como PSK, QAM y OFDM se implementan de manera más directa en banda base compleja, facilitando el diseño de transmisores y receptores (Collins et al., 2018).

**Facilidad en la Corrección de Errores y Ecualización:** El procesamiento en banda base analítica permite aplicar técnicas avanzadas de corrección de errores y ecualización en el dominio complejo.

### **Conversión entre Señales de Banda Pasante y Banda Base**

En sistemas de comunicación, es esencial convertir señales de banda pasante (radiofrecuencia) a banda base para su procesamiento digital. Este proceso implica mezclar la señal entrante con una señal de oscilador local para trasladar el espectro de frecuencia a una frecuencia más baja, donde los convertidores analógico-digitales (ADC) pueden muestrear la señal de manera eficiente (Collins et al., 2018).

### **Topologías de Conversión**

#### **Conversión Directa con Muestreo en Banda Base**

En la conversión directa, también conocida como arquitectura homodina, la señal de radiofrecuencia se convierte directamente a banda base sin etapas intermedias de frecuencia (Pu & Wyglinski, 2013).

- **Etapas Analógicas y Digitales (fig. 1):**

- Amplificador de bajo ruido
- Mezcladores en cuadratura para obtener componentes I y Q
- Filtros de paso bajo para eliminar componentes no deseadas
- ADC para digitalizar las señales I y Q

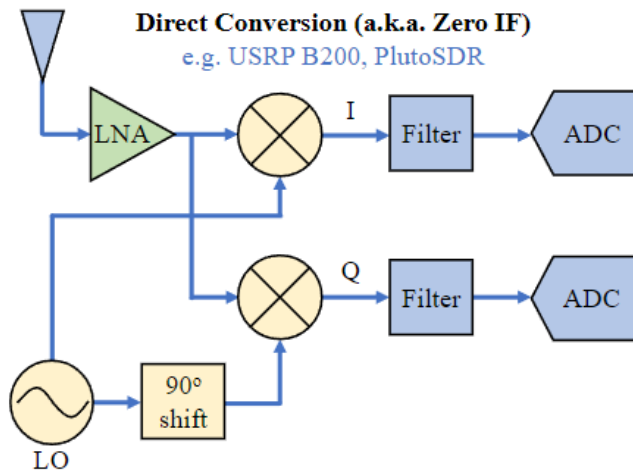


Fig. 1: Conversión directa, PySDR.

- **Ventajas:**

- Arquitectura simple y compacta
- Menor costo y complejidad de hardware

- **Desventajas:**

- Sensibilidad a desequilibrios entre las ramas I y Q
- Problemas de desplazamiento de continua (DC offset) que pueden degradar el rendimiento

## Superheterodino con Muestreo en Banda Base

La arquitectura superheterodina tradicional utiliza una frecuencia intermedia (FI) para mejorar la selectividad y sensibilidad del receptor (Grayver, 2013). Al combinar esto con muestreo en banda base, se obtiene una señal más fácil de procesar digitalmente.

- **Etapas Analógicas y Digitales (fig. 2):**

- Oscilador local para mezclar la señal de entrada a FI
- Filtro FI para seleccionar la banda deseada
- Conversión a banda base mediante un segundo mezclador
- ADC para digitalizar las señales I y Q

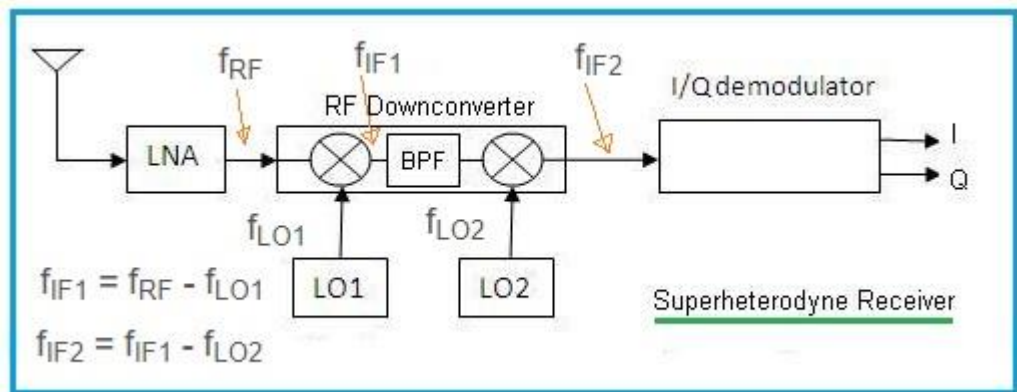


Fig. 2: Conversión con superheterodino para banda base, Fmuser.

- **Ventajas:**
  - Mejor selectividad y rechazo de señales no deseadas
  - Menor sensibilidad a problemas de DC offset
- **Desventajas:**
  - Mayor complejidad y costo de hardware
  - Requiere ajustes precisos de los filtros FI

### Superheterodino con Muestreo en Frecuencia Intermedia

En esta topología, la señal se digitaliza directamente en la frecuencia intermedia, eliminando la necesidad de una segunda conversión a banda base (Collins et al., 2018).

- **Etapas Analógicas y Digitales (fig.3):**
  - Oscilador de bajo ruido con filtro
  - Oscilador local y mezclador para convertir a FI
  - Filtro FI
  - ADC de alta velocidad para muestrear la señal en FI

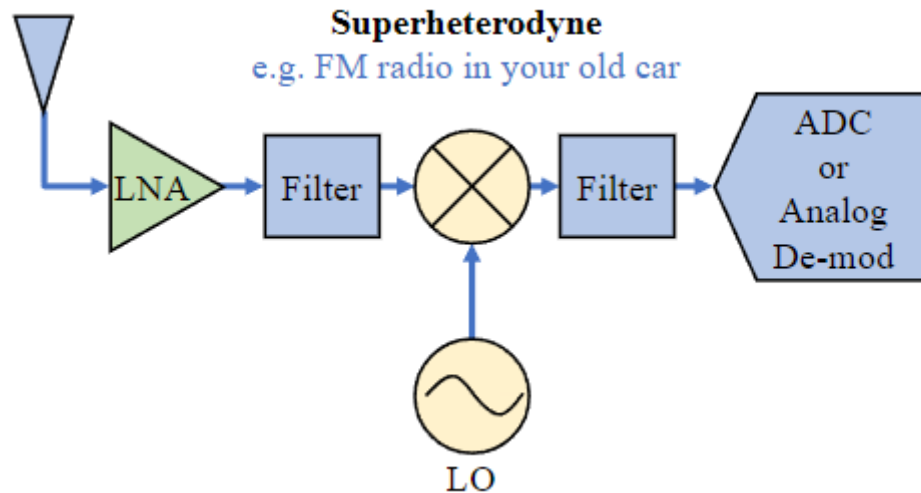


Fig. 3: Conversión con superheterodino para FI, PySDR

- **Ventajas:**
  - Compromiso entre complejidad y rendimiento
  - Menor requerimiento de linealidad en comparación con la conversión directa
- **Desventajas:**
  - ADC de alta velocidad y resolución requerida
  - Mayor consumo de energía

### Muestreo en Radiofrecuencia

El muestreo directo en radiofrecuencia implica digitalizar la señal de RF sin etapas de conversión intermedia (Pu & Wyglinski, 2013).

- **Etapas Analógicas y Digitales (fig. 4):**
  - Amplificador de bajo ruido
  - ADC de muy alta velocidad capaz de manejar frecuencias de RF

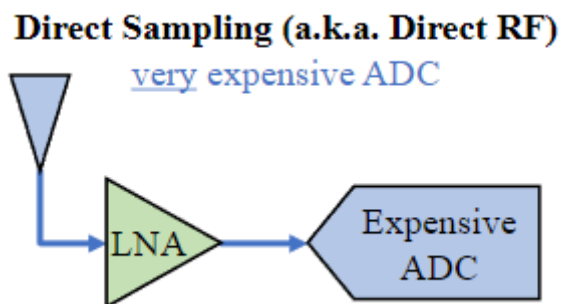


Fig. 4: Conversión para radiofrecuencia, PySDR

- **Ventajas:**
  - Arquitectura simplificada al eliminar etapas analógicas
  - Máxima flexibilidad en procesamiento digital
- **Desventajas:**
  - ADC extremadamente costosos y con alto consumo de energía
  - Limitaciones tecnológicas en la velocidad de muestreo y resolución

## **Plataforma GNURadio y Periféricos SDR**

### **GNURadio**

GNURadio es una plataforma de software libre que permite el desarrollo de aplicaciones SDR mediante bloques de procesamiento de señales reutilizables (Collins et al., 2018). Proporciona una interfaz gráfica que facilita el diseño y la implementación de sistemas de radio sin requerir hardware especializado.

- **Características:**
  - Extensible y modular con amplia biblioteca de bloques
  - Soporte para múltiples periféricos SDR
  - Gran comunidad de usuarios y desarrolladores contribuyendo al ecosistema

### **Periféricos SDR**

#### **RTL-SDR**

Los dispositivos RTL-SDR son receptores de TV digital terrestre adaptados para funcionar como receptores SDR económicos (Pu & Wyglinski, 2013).

- **Diagrama de Bloques:**
  - Sintonizador RF → Demodulador → ADC → Interfaz USB
- **Topología Implementada:**
  - Superheterodino con muestreo en frecuencia intermedia
- **Capacidades:**
  - Solo recepción
  - Ancho de banda limitado (~2.4 MHz)
  - Banda de trabajo: 24 MHz a 1.766 GHz
- **Ventajas y Desventajas:**
  - **Ventajas:** Costo muy bajo, amplia disponibilidad

- **Desventajas:** Limitado en ancho de banda y prestaciones

## **HackRF One**

HackRF One es un dispositivo SDR de bajo costo que permite tanto transmisión como recepción en un amplio rango de frecuencias (Great Scott Gadgets, 2014).

- **Diagrama de Bloques:**
  - Amplificador RF ↔ Mezclador ↔ Filtro ↔ ADC/DAC ↔ Interfaz USB
- **Topología Implementada:**
  - Conversión directa con muestreo en banda base
- **Capacidades:**
  - Transmisión y recepción
  - Ancho de banda de hasta 20 MHz
  - Banda de trabajo: 1 MHz a 6 GHz
- **Ventajas y Desventajas:**
  - **Ventajas:** Amplio rango de frecuencias, soporte para transmisión y recepción
  - **Desventajas:** Limitaciones en potencia de transmisión, menor sensibilidad que dispositivos profesionales

## **USRP (Ettus Research y National Instruments)**

Los dispositivos USRP son plataformas SDR profesionales que ofrecen altas prestaciones y flexibilidad (Ettus Research, 2020).

- **Diagrama de Bloques:**
  - Modular; típicamente incluye etapas de RF intercambiables (daughterboards), FPGA y procesadores integrados
- **Topología Implementada:**
  - Varias, incluyendo superheterodino y conversión directa dependiendo del modelo
- **Capacidades:**
  - Transmisión y recepción
  - Ancho de banda y rango de frecuencias variable según el modelo (desde DC hasta 6 GHz y anchos de banda de más de 160 MHz)
- **Ventajas y Desventajas:**



- **Ventajas:** Alta flexibilidad, rendimiento profesional, escalabilidad
- **Desventajas:** Costo elevado, mayor complejidad en configuración

### **ADALM-PLUTO (Analog Devices)**

El ADALM-PLUTO es una plataforma SDR compacta y asequible, orientada a la educación e investigación (Analog Devices, 2017).

- **Diagrama de Bloques:**
  - Transceptor RF integrado (AD9363) ↔ FPGA ↔ Interfaz USB
- **Topología Implementada:**
  - Conversión directa con muestreo en banda base
- **Capacidades:**
  - Transmisión y recepción
  - Ancho de banda de hasta 20 MHz
  - Banda de trabajo: 325 MHz a 3.8 GHz (expandible a 70 MHz - 6 GHz mediante modificaciones de firmware)
- **Ventajas y Desventajas:**
  - **Ventajas:** Costo accesible, portabilidad, adecuado para educación
  - **Desventajas:** Limitaciones en potencia de transmisión y rango de frecuencias sin modificaciones

### **Conclusiones**

La radio definida por software ha democratizado el acceso al diseño y experimentación en comunicaciones inalámbricas, permitiendo a estudiantes, investigadores y profesionales explorar y desarrollar sistemas de comunicación de manera flexible y económica. La comprensión detallada de la banda base analítica, incluyendo su fundamento matemático a través de la transformada de Hilbert, el uso de fasores y el centrado del espectro en cero, es esencial para aprovechar al máximo las capacidades de SDR (Grayver, 2013).

Herramientas como GNURadio, junto con periféricos como RTL-SDR, HackRF One, USRP y ADALM-PLUTO, ofrecen un amplio espectro de opciones para diferentes necesidades y presupuestos (Collins et al., 2018). Cada dispositivo presenta ventajas y limitaciones que deben ser consideradas según la aplicación específica. El avance continuo en tecnología SDR promete aún más oportunidades para innovación en el campo de las comunicaciones, fomentando la investigación y el desarrollo de nuevas técnicas y protocolos.

## Referencias

- Analog Devices. (2017). *ADALM-PLUTO Active Learning* <https://www.analog.com>
- Collins, D., Getz, G., Pu, T., & Wyglinski, A. (2018). *Software-Defined Radio for Engineers*. Artech House.
- Ettus Research. (2020). *USRP Product Line Overview* <https://www.ettus.com>
- Grayver, E. (2013). *Implementing Software Defined Radio*. Springer.
- Great Scott Gadgets. (2014). *HackRF One*. <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>
- Pu, T., & Wyglinski, A. (2013). *Digital Communication Systems Engineering with Software-Defined Radio*. Artech House.
- RTL-SDR.com. (n.d.). *RTL-SDR Blog*. <https://www.rtl-sdr.com>
- PySDR: Guia de uso SDR/DSP con Python. <https://pysdr.org/es/content-es/sampling.html>
- Fmuser. <https://es.fmuser.net/content/?7518.html>