

# **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

En comunicaciones digitales, una señal de banda pasante puede representarse mediante su equivalente en banda base. Según Proakis y Salehi (2008), la señal analítica se define como una señal compleja que contiene solo componentes de frecuencia positiva. Esto simplifica las operaciones de modulación y demodulación, permitiendo trabajar en el dominio de las frecuencias positivas sin perder información.

Matemáticamente, si  $x(t)$  es una señal real, su equivalente de baja frecuencia o señal analítica  $x^+(t)$  se expresa como:

$$x^+(t) = \frac{1}{2}x(t) + j\frac{1}{2}\hat{x}(t)$$

donde  $\hat{x}(t)$  es la transformada de Hilbert de  $x(t)$ , que introduce un desfase de  $-90^\circ$  a las frecuencias positivas y  $+90^\circ$  a las frecuencias negativas de  $x(t)$ .

## Representación en Fasores y Centrando el Espectro en Cero

Una señal de banda pasante puede expresarse en términos de su envolvente compleja, que facilita la modulación y demodulación en sistemas de comunicación. Cualquier señal de banda pasante  $x(t)$  puede representarse como una combinación de componentes sinusoidales usando la expresión desarrollada por Proakis y Salehi (2008):

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

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.

Esta representación es útil para describir señales moduladas, donde  $s(t)$  contiene toda la información de la señal y  $f_c$  es la frecuencia sobre la cual se modula dicha información.

## Centrando el Espectro en Cero

Cuando multiplicamos una señal de banda pasante  $x(t)$  por  $e^{-j2\pi f_c t}$ , su espectro se traslada a frecuencias cercanas a cero, obteniendo así la señal de banda base analítica. Este proceso es conocido como conversión a banda base y es una operación esencial en, por ejemplo, los sistemas de radio definidos por software (SDR). La expresión resultante es:

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

Este proceso facilita la manipulación de la señal en el dominio complejo, lo que simplifica las operaciones como filtrado y demodulación

## Aplicaciones en la Comunicación Digital

La señal de banda base analítica permite que las operaciones de modulación y demodulación se realicen de manera más eficiente en el dominio de las frecuencias positivas. Esta técnica es ampliamente utilizada en modulaciones digitales como la modulación por amplitud en cuadratura (QAM) y la modulación por desplazamiento de fase (PSK), que son fundamentales en los sistemas de comunicaciones modernas.

## Topologías de Conversión

### Conversión Directa con Muestreo en Banda Base

Según vimos en el libro de Travis Collins (2018) y la guía de Marc Lichtman (PySDR), en la conversión directa, también conocida como arquitectura homodina, la señal de radiofrecuencia se convierte directamente a banda base sin etapas intermedias de frecuencia.

- **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

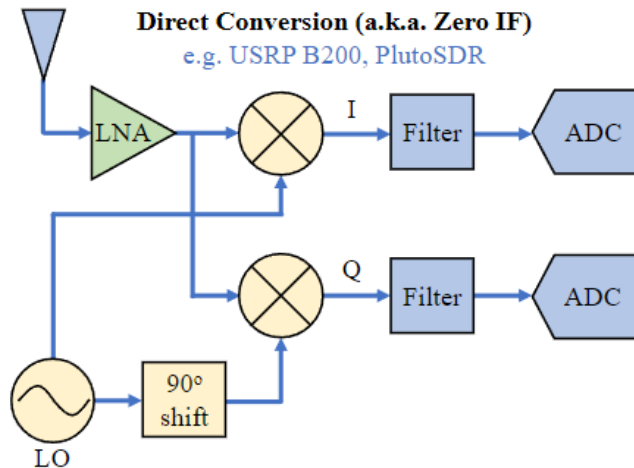


Fig. 1: Conversi3n directa, PySDR.

- **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. Al combinar esto con muestreo en banda base, se obtiene una se1al m1s f1cil de procesar digitalmente.

- **Etapas Anal3gicas y Digitales (fig. 2):**
  - Oscilador local para mezclar la se1al de entrada a FI
  - Filtro FI para seleccionar la banda deseada
  - Conversi3n a banda base mediante un segundo mezclador
  - ADC para digitalizar las se1ales I y Q

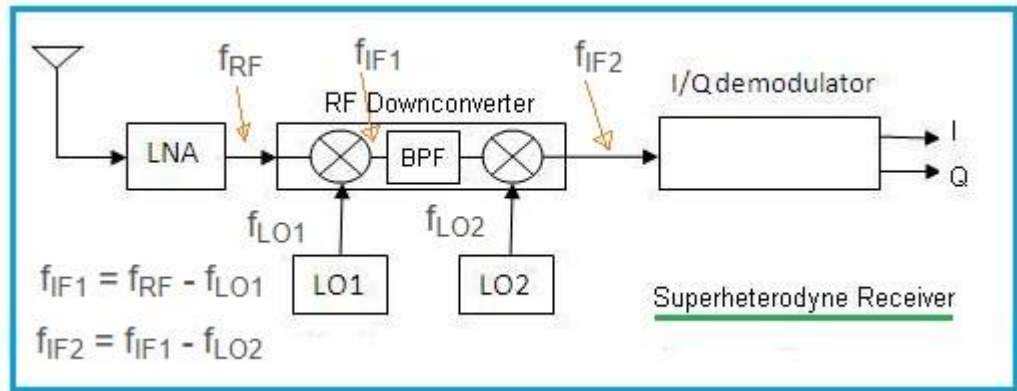


Fig. 2: Conversión con superheterodino para banda base, Fmuser.

- **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.

- **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

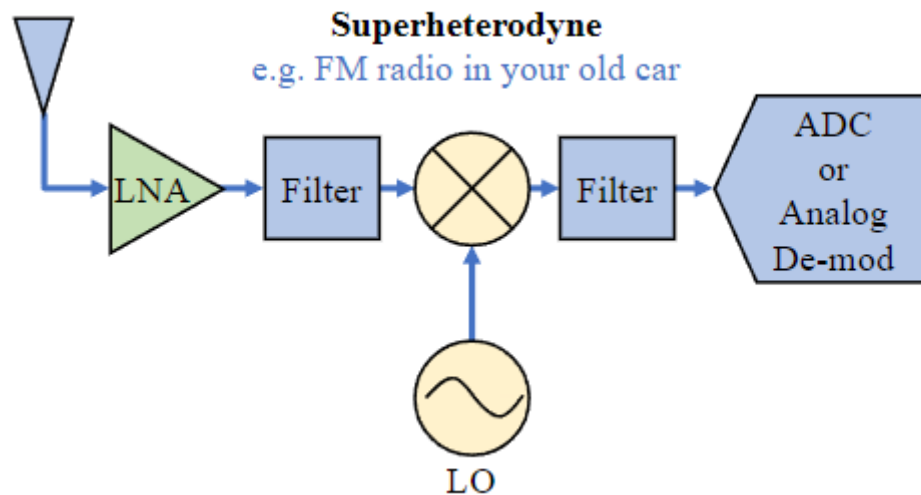


Fig. 3: Conversión con superheterodino para FI, PySDR

- **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.

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

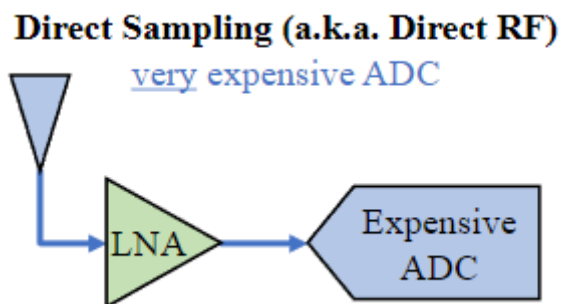


Fig. 4: Conversión para radiofrecuencia, PySDR

- **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, 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 (Onelectrontech, 2019).

- **Diagrama de Bloques (fig. 5):**

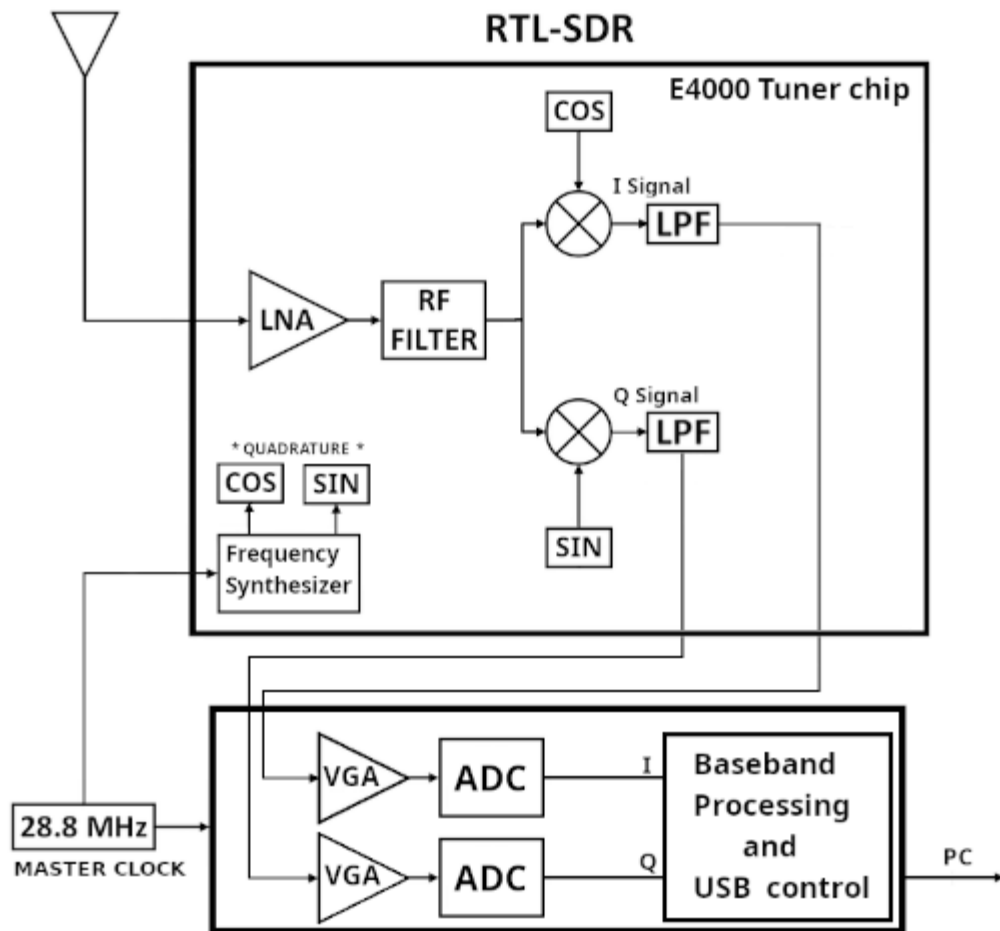


Fig. 5: Diagrama de bloques de RTL-SDR, Elonics E4000

*En Forma simplificada:*

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 (fig. 6):

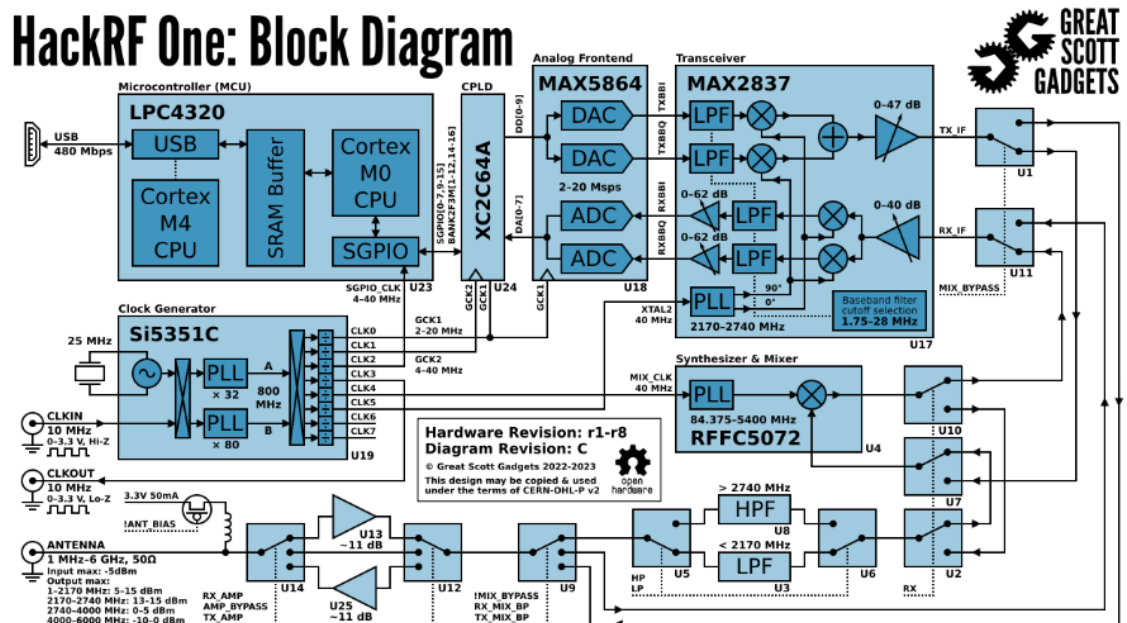


Fig. 6: Diagrama de bloques HackRF one, greatscottgadgets.

*Forma simplificada:*

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 (fig. 7):**

- Modular; típicamente incluye etapas de RF intercambiables (daughterboards), FPGA y procesadores integrados

◦

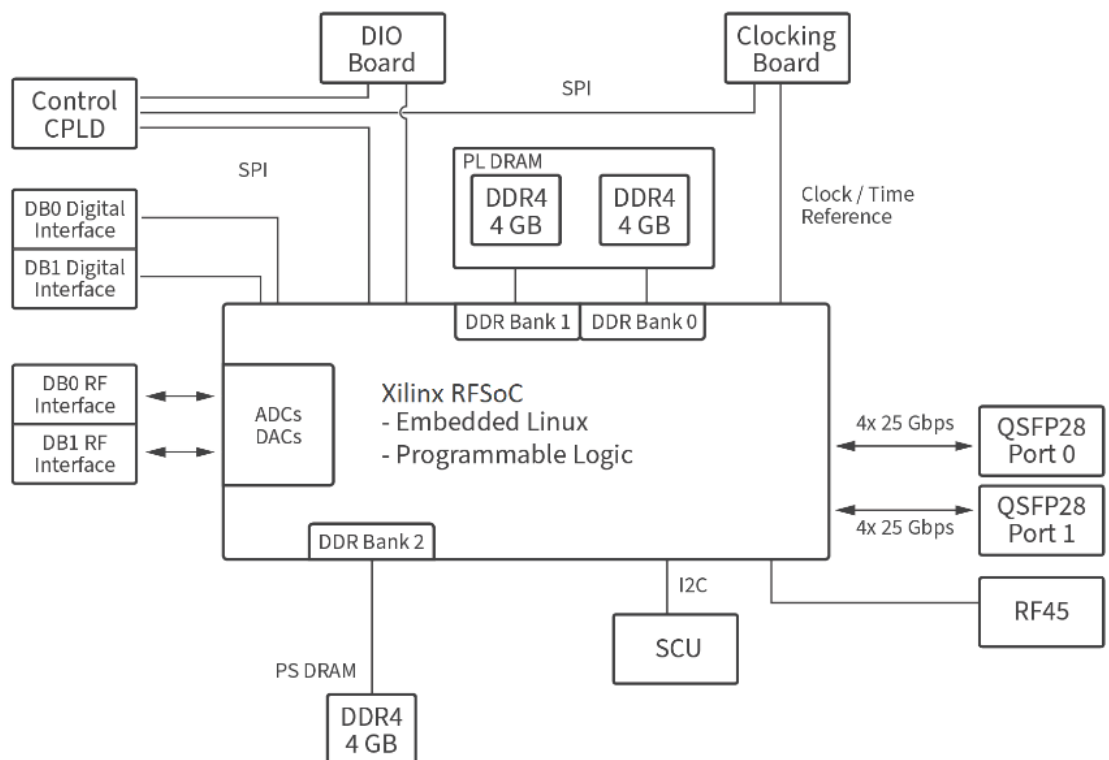


Fig. 7: Diagrama de bloques Ettus USRP X410 Motherboard, Emerson

- **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) (fig. 8):

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

- **Diagrama de Bloques:**

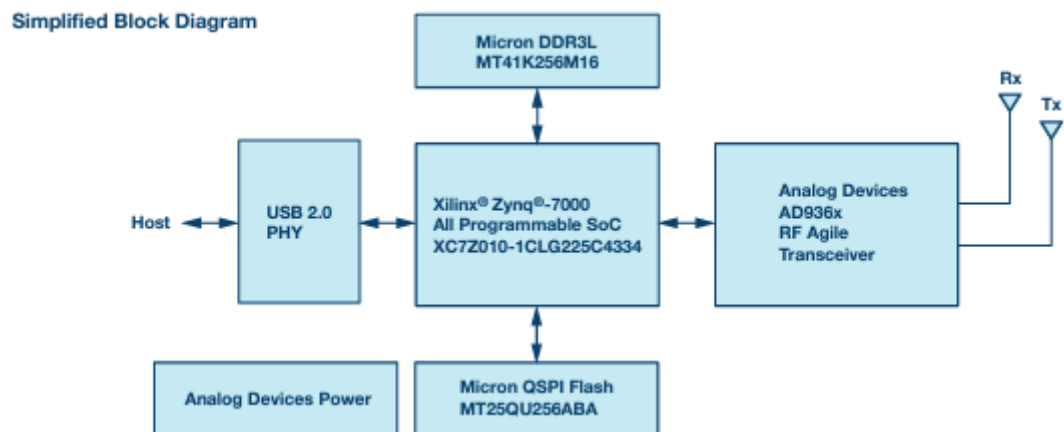


Fig. 8: Diagrama de bloques ADALM-PLUTO, Analog Devices.

- 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 facilitado 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.

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. 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.
- Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital Communications* (5th ed.). McGraw-Hill
- 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: Guía de uso SDR/DSP con Python. <https://pysdr.org/es/content-es/sampling.html>
- Fmuser. <https://es.fmuser.net/content/?7518.html>
- Onelectrontech. <https://www.onelectrontech.com/rtl-sdr-v3-teardown-and-analysis/>

- Emerson. [https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-x410/page/block-diagram.html?srsId=AfmBOopynhOxhQaAQtm-1\\_R05C9rCEdcF09\\_TqL43Ut2z0YY8oTwaAKA](https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-x410/page/block-diagram.html?srsId=AfmBOopynhOxhQaAQtm-1_R05C9rCEdcF09_TqL43Ut2z0YY8oTwaAKA)