



**Implementación de una metodología para la adquisición de señales GNSS bajo condiciones ruidosas utilizando métodos de estimación espectral no convencionales  
bajo el paradigma de Radio Definida por Software**

**Jhon Alexander García Sierra**

*Ingeniería de sistemas y telecomunicaciones*

*Universidad Sergio Arboleda - Bogotá, Colombia*

**Juan Felipe Osorio Téllez**

*Ingeniería de sistemas y telecomunicaciones*

*Universidad Sergio Arboleda - Bogotá, Colombia*

**Proyecto Semillero de IoT opción de grado**

**Director:**

**Ing. Marco Tulio Teran de la Hoz, Ph.D (C).**

**Ing. Juan Manuel Aranda Lopez King, Ph.D**

Universidad Sergio Arboleda Escuela de Ciencias Exactas e Ingeniería (ECEI)  
Bogotá D.C. 2022

# Resumen

En este trabajo, se presenta una metodología que permite un estudio de evaluación del rendimiento de diferentes técnicas de estimación espectral para la detección del espectro con el fin de detectar señales GPS débiles transmitidas en condiciones de alto ruido. Tradicionalmente, se ha utilizado la Transformada Rápida de Fourier como mecanismo para realizar operaciones de correlación en el dominio de la frecuencia para la adquisición de señales GNSS. Sin embargo, la implementación de técnicas no convencionales aumenta la capacidad de detección en entornos de baja SNR (Relación señal-ruido). Se implementó un receptor de señales GPS en MATLAB para el estudio comparativo de técnicas de estimación espectral no convencionales, como Burg, Yule-Walker y Correlograma, con el fin de detectar señales GNSS reales en condiciones de mayor ruido. Mediante el uso del software receptor de señales GNSS de código abierto GNSS-SDR para grabar señales GPS, luego, el procesamiento de la señal GPS y las pruebas con los distintos métodos de estimación espectral se realizó con el programa SoftGNSS v3.0 codificado en MATLAB, así como plataformas de hardware de diferentes costos, con los cuales se lograron conseguir distintos tipos de resultados y desempeños con señales reales. Adicionalmente, también se implementó en GNU-Radio un barrido de frecuencia con el cual en un trabajo futuro se espera complementar mas a fondo la investigación de señales GNSS y su adquisición.

**Palabras Clave:** SDR, GNU Radio, GPS, GNSS-SDR, estimaciones espectrales, FFT, métodos paramétricos, métodos no paramétricos, Frequency sweeper.

# Abstract

In this paper, we present a methodology that allows a performance evaluation study of different spectral estimation techniques for spectrum sensing to detect weak GPS signals transmitted in high noise conditions. Traditionally, the Fast Fourier Transform has been used as a mechanism to perform correlation operations in the spectral domain for the acquisition of GNSS signals. However, the implementation of non-conventional techniques increases the detection capability in low SNR (Signal to Noise Ratio) environments. A GPS signal receiver was implemented in MATLAB for the comparative study of non-conventional spectral estimation techniques, such as Burg, Yule-Walker and Correlogram, in order to detect real GNSS signals in noisy conditions. By using the open source GNSS signal receiver software GNSS-SDR to record GPS signals, then, the GPS signal processing and testing with the different spectral estimation methods was performed with the SoftGNSS v3.0 program coded in MATLAB, as well as hardware platforms of different costs, with which different types of results and performances with real signals were achieved. Additionally, a frequency sweep was also implemented in GNU-Radio with which in a future work it is expected to further complement the investigation of GNSS signals and their acquisition.

**KeyWords:** GNSS, GPS, Signal acquisition, GNU Radio, MATLAB, GNSS-SDR, software-defined radio, spectral estimation, Frequency sweeper.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	6
1.1. Problemática . . . . .	7
1.2. Formulación del problema . . . . .	8
1.3. Objetivos . . . . .	9
1.3.1. Objetivo general: . . . . .	9
1.3.2. Objetivos específicos: . . . . .	9
<b>2. Referente Teórico</b>	11
2.1. Marco teórico . . . . .	11
2.1.1. Fundamentos del SDR . . . . .	12
2.1.2. Software para SDR . . . . .	12
2.1.3. Dispositivos para SDR: . . . . .	13
2.1.4. Hardware Adicional . . . . .	15
2.1.5. Señales GNSS . . . . .	16
2.1.6. Interferencias del GNSS . . . . .	20
2.1.7. Relación señal a ruido (SNR) . . . . .	21
2.1.8. Señal GPS . . . . .	21
2.1.9. Adquisición de señales GPS . . . . .	24
2.1.10. Método de estimación convencional . . . . .	25
2.1.11. Métodos de estimación no convencionales . . . . .	26
<b>3. Metodología</b>	30
<b>4. Diseño e implementación</b>	32
4.1. Diseño . . . . .	32
4.1.1. Metodología de trabajo . . . . .	32
4.1.2. Especificación de requerimientos . . . . .	33

4.1.3.	Composición de la solución propuesta . . . . .	34
4.2.	Implementación . . . . .	35
4.2.1.	Implementación y puesta a punto GNSS-SDR . . . . .	35
4.2.2.	Implementación del receptor GPS . . . . .	35
4.2.3.	Implementación barrido de frecuencia . . . . .	37
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	38
5.1.	Pruebas de adquisición . . . . .	38
5.2.	Coordenadas . . . . .	41
5.3.	Métodos de estimación . . . . .	42
5.4.	Barrido de frecuencia en banda FM . . . . .	45
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	47
<b>Referencias</b>		48
<b>7.</b>	<b>Anexos</b>	51

# 1. Introducción

Desde que el hombre moderno ha considerado nuevos tipos de tecnologías inalámbricas para establecer enlaces de comunicación y utilizar ellos mismos para el posicionamiento estas soluciones siempre han padecido de los efectos negativos asociados al ruido y las interferencias. Esto pondría al ruido como un elemento que cada vez más se debe tener en cuenta a la hora de desarrollar sistemas robustos de telecomunicaciones. Adicional al espectro electromagnético se ve cada día más congestionado a pesar de que su uso se encuentre reglamentado.

El sistema GNSS está definido como el conjunto de todos los sistemas de posicionamiento tales como, el europeo (GALILEO), el sistema de navegación por satélite Global de la Federación de Rusia (GLONASS), el sistema de posicionamiento global (GPS) de Estados Unidos, la navegación de India (NavIC) y el sistema de satélite Quasi-Zenith de Japón (QZSS). Los sistemas GNSS proporcionan una información precisa y continua en todo el mundo, determinando la velocidad y una posición tridimensional de los equipos receptores. Regulando al principal estándar de tiempo de todo el mundo UTC (Tiempo Universal Coordinado). Las constelaciones centrales (conocidas mayormente como constelaciones globales del GNSS), consisten en al menos 24 satélites ubicados en la órbita Terrestre Media (MEO) repartidos en 3 o 6 planos orbitales, teniendo como mínimo 4 satélites por plano. Dependiendo del sistema de posicionamiento la constelación de satélites esta generalmente ubicada a una altura de 20.000 Km, a su vez estas señales se reciben con un nivel de potencia de  $-130dBm$  [3].

Los sistemas GNSS transmiten en la banda L (1-2 GHz). La banda L ofrece ciertas ventajas respecto a otras bandas. A frecuencias bajas, la atmósfera de la tierra causaría retrasos e inhomogeneidades, resultando en un desvanecimiento de la potencia de la señal. Sin embargo, a frecuencias más altas es necesaria más energía en el satélite para transmitir y fenómenos atmosféricos como la lluvia podría atenuar significativamente la señal. Esta banda no está precisamente libre de inconvenientes, pero es la que mas ventajas otorga a la hora de transmitir de señales de baja potencia [3].

Se han establecido tres grandes fases para la utilización de señales GNSS: adquisición, seguimiento y decodificación. La primera fase de adquisición es vulnerable a afectaciones atmosféricas y ruido en

general, ya que son señales que se transmiten desde satélites que se encuentran en la órbita media, y llegan a la tierra con muy baja potencia [37]. Para la detección efectiva de una o varias señales GNSS en un punto geográfico determinado, generalmente es necesario realizar la estimación del espectro. El método de estimación espectral más implementado es la FFT (Fast Fourier Transform).

Últimamente se han venido investigando en la utilización de métodos no convencionales para la estimación del espectro, distintos a la FFT, con el objetivo de garantizar una mayor robustez al proceso de detección de señales en condiciones de alto ruido. Estos métodos de estimación espectral se pueden clasificar en, métodos paramétricos y no paramétricos Burg, Periodograma , Correlograma, entre otros [1]. Para este trabajo se pretende conocer el desempeño de los distintos métodos de estimación espectral aplicándolos a la primera fase de adquisición de las señales GNSS.

## 1.1. Problemática

Un sistema GNSS es una constelación de satélites que orbitan la tierra con el fin de permitir a un usuario obtener información de su latitud, longitud y elevación en tiempo real, a partir de las mediciones de rango y la calidad de la geometría de la constelación de satélites visibles. Sin embargo, el sistema puede verse afectado tanto por el medio de propagación, como la calidad del equipo de recepción GNSS que se esté utilizando [3]–[6].

Durante la recepción de señales GNSS, desde su origen en el satélite hasta su recepción por parte del dispositivo receptor, la señal GNSS se ve afectada por distintas fuentes de interferencia, ruido y atenuación, que afectan la calidad de la estimación de la posición. Entre las distintas fuentes de interferencias se encuentran, la sincronización de los satélites, que puede llegar a tener repercusiones negativas, alterando de forma indefinida la compensación del reloj de los satélites y/o del usuario receptor, ocasionando errores de fase y de pseudodistancia, puesto que el código de rango de la señal del satélite experimenta retrasos a medida que se propaga a través de la atmósfera provocando que el pseudorango sea aún mayor de lo que sería en el vacío [3]. Otra interferencia es el retraso de los parámetros de la señal portadora por la afectación troposférica. La troposfera es un medio no dispersivo (para frecuencias de hasta 15 GHz) que se encuentra ubicada en la parte inferior de la atmósfera. Dentro de la troposfera las velocidades de fase y otros elementos que se encuentran asociados con la

señal portadora y la información de la señal en las frecuencias de la banda L sufren un retraso con respecto a la propagación en el espacio libre, este retraso es debido al índice de refracción troposférico que depende de la temperatura, la presión y de la humedad relativa local. [3]–[6] Adicionalmente, el adelantado en fase causado por la ionosfera conocido como **divergencia ionosférica**, es un adelanto en fase se debe a que la ionosfera es un medio dispersivo que se encuentra ubicado en la superficie de la tierra, en su extensión los rayos ultravioletas del sol tienen una ionización por parte de las moléculas del gas generando y liberando electrones libres, estos electrones influyen en la propagación de ondas electromagnéticas.

El uso de los relojes atómicos como un estándar de frecuencia atómica (AFS) es una de las principales tecnologías con las que cuenta los satélites GNSS que son usados para mantener actualizada y controlada todas las operaciones de temporización. Los receptores tienen en su gran mayoría un defecto de sincronización con respecto al tiempo de los satélites GNSS. [3], [4]. Esto con el fin de mitigar otra de las interferencias que puede afectar una señal GNSS, la cual tiene que ver con las teorías de la relatividad especial y de la relatividad general propuestas por Einstein. Estos factores son tenidos en cuenta a pesar de que son notables luego de un año de funcionamiento. Los parámetros afectados por los efectos relativísticos son los procesos de medición para la pseudodistancia y la fase de la portadora. La necesidad de correcciones sobre efectos relativísticos nace del hecho de que un satélite se mueva a una velocidad cercana a la velocidad la luz [3].

Debido a que la mayoría de sistemas de posicionamiento global están basados en FFT como método único de estimación espectral y, han omitido otros métodos de estimación, es posible que estos sistemas se encuentren limitados a la afectación intrínseca del ruido, por lo tanto, son vulnerables a distintos tipos de interferencias externas, como las afectaciones causadas por el ruido e interferencias internas del sistema. [6]

## 1.2. Formulación del problema

¿Cuál sería la metodología adecuada para la adquisición de señales GNSS en entornos de baja relación señal ruido, que permita seleccionar un método de estimación espectral no convencional que

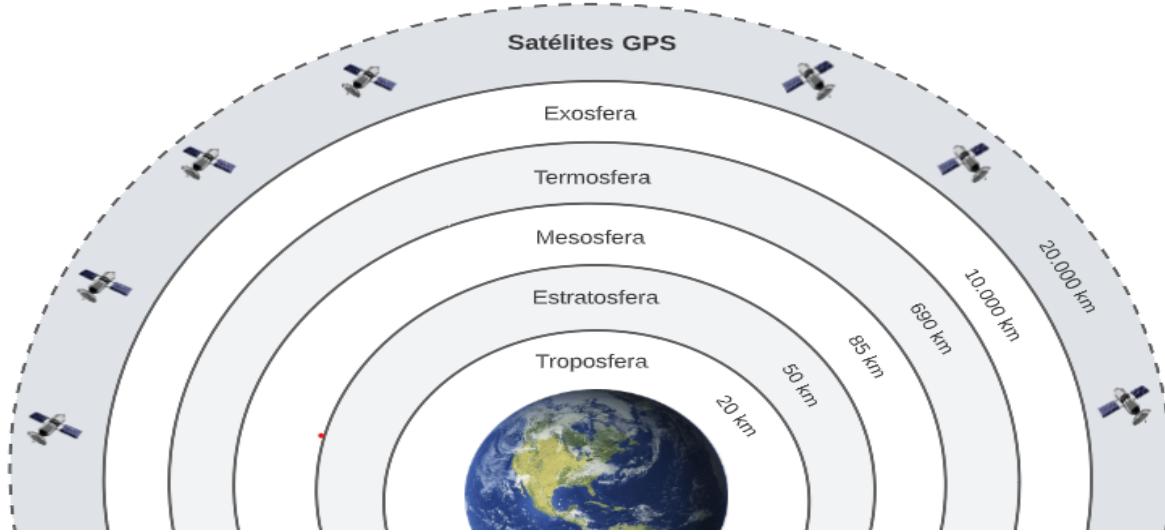


Figura 1: Diagrama de ubicación de los satélites GPS

garantice robustez a la sensibilidad, bajo el paradigma de la Radio Definida por Software?

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general:

Diseñar e implementar una metodología para la adquisición de señales GNSS en entornos de baja relación señal ruido, que permita seleccionar un método de estimación espectral no convencional que garantice robustez a la sensibilidad, bajo el paradigma de la Radio Definida por Software.

### 1.3.2. Objetivos específicos:

1. Realizar un estudio del estado del arte relacionado a la adquisición de señales GNSS utilizando métodos no convencionales de estimación espectral.
2. Realizar el cálculo de la estimación de la posición mediante el sistema GPS utilizando el paradigma de la Radio definida por software y el receptor para señales GNSS GNSS-SDR.
3. Realizar una metodología para la grabación de señales GPS utilizando SDR y GNU radio y el posterior tratamiento de estas señales en el software matemático de Matlab.
4. Implementar diferentes métodos de estimación espectral no convencionales utilizando grabaciones de señales reales para la posterior comparación de la calidad de la adquisición.

5. Realizar análisis de los resultados obtenidos mediante la documentación, generación de repositorio, un manual de utilización del software y la escritura de un artículo científico de conferencia.

## 2. Referente Teórico

En cuanto a las distintas fuentes consultadas como, libros, documentos en la web, repositorios, tesis, manuales y demás, fue posible evidenciar que muchas de las aplicaciones y sistemas para la detección se encuentran ya realizados junto a hardware diseñados para el uso limitado a un método de estimación espectral (FFT). Cabe mencionar que estas plataformas despliegan una baraja de precios en algunos casos costosos.

En el desarrollo de este proyecto se han realizado investigaciones en distintas fuentes, mencionadas anteriormente, que sirvan inicialmente para entender y ejecutar procesos de software sobre plataformas SDR, también características de hardware que distinguen a los distintos dispositivos SDR del mercado. Adicionalmente, fue necesaria toda la información relacionada a la recepción de señales GPS usando plataformas SDR, para después pasar a la siguiente fase de procesamiento donde se incluyen los distintos métodos de estimación espectral.

### 2.1. Marco teórico

Generalmente se conoce a los dispositivos de radiocomunicación como dispositivos para un solo uso, radio FM/AM, walkie-talkie, televisión digital, entre otros. Con la radio definida por software, mejor conocida como Software Defined Radio (SDR), se tiene en un solo dispositivo hardware de comunicaciones, donde las funciones de distintos componentes de la electrónica discreta son reemplazadas por funciones dentro de un software diseñado para controlar plataformas SDR. Esto permite una gran flexibilidad e interoperabilidad con un solo dispositivo SDR, convirtiendo procesos de hardware a software, modulación, demodulación, filtros, conversiones y demás son posibles aplicando la teoría en el software. Los beneficios en cuanto a costo, flexibilidad de uso e interoperabilidad con cualquier aplicación en el espectro son clave para el correcto desenvolvimiento del proyecto.

### 2.1.1. Fundamentos del SDR

El SDR está compuesto por un sistema de radiocomunicaciones (empleado para la recepción o transmisión de la señal) y un conjunto de programas informáticos que sustituyen gran parte de los componentes del hardware, para que se puedan conectar estos dos componentes con un ordenador es necesario de un dispositivo embebido que pueda procesar la información obtenida y remitirla al computador. Se debe destacar que el procesador que utiliza el SDR es de uso general para el procesamiento de las señales disminuyendo su complejidad al no necesitar la implementación de un hardware de bloque completo.

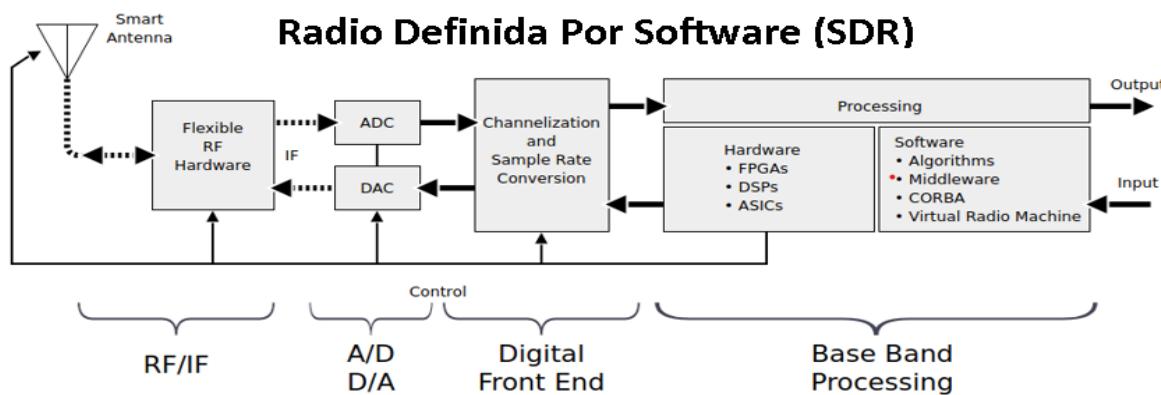


Figura 2: Diagrama de bloques para sistemas SDR

Algunas ventajas del SDR son: [7]

- Múltiples modos de operación
- Reconfiguración
- Actualizaciones Over-The-Air
- Menor coste de desarrollo

### 2.1.2. Software para SDR

- SDRSHARP: Es un software gratuito utilizado con dispositivos fáciles de configurar, dispone de constantes actualizaciones y complementos que pueden ser usados en diferentes receptores [15].
- GNU-Radio: Es un kit de herramientas de código abierto gratuito que proporciona una gran diversidad de bloques de procesamiento de señales para implementación de radios de software, el

cual puede ser utilizado con otros dispositivos receptores para crear radios definidas por software o versiones simuladas. Este software se utiliza en entornos de la industria e investigación [16].

- GNSS-SDR: Se trata de un proyecto de código abierto que implementa un receptor definido por software de un sistema de navegación por satélite global cuyo código se basa en C++. Los usuarios que utilicen este programa podrán construir un receptor de software GNSS al crear un gráfico de bloques de procesamiento de señales y las líneas representan el flujo de datos entre ellos. Su diseño con el que fue creado permite cualquier tipo de personalizar incluyendo: La intercambiabilidad de las fuentes de las señales, interoperabilidad con otros sistemas, algoritmos de procesamiento de señales, formatos de salida e interfaces para todas las señales intermedias [24].

### **2.1.3. Dispositivos para SDR:**

En el presente proyecto se trabajaron con 3 dispositivos SDR: el RTL-SDR 2831, el HackRF y el USRP B210.

Nombre Comercial	Frecuencia mínima (M Hz)	Frecuencia máxima (G Hz)	Ancho de Banda (M Hz)	Resolución ADC (bits)	¿Transmite?	Precio (USD)
RTL-SDR 2831	0.5	1.7	3.2	8	No	29.95
HackRF	1	6	20	8	Si	319.95
USRP	70	6	56	12	Si	1574

Cuadro 1: Tabla comparativa del Hardware utilizado

Como se puede observar en la cuadro 1 cada equipo con el que se trabajó contiene una serie de características únicas que si bien pueden llegar a tener mejor rendimiento que otros, no hay que descartar el hecho de que todos por lo general son buenos y tienen sus fortalezas como lo es en el caso del RTL-SDR 2831, el cual a pesar de tener un menor desempeño es más asequible económicamente.

- RTL-SDR: Es un receptor de radio definido por software basado en sintonizadores de TV DVB-T con chips RTL2832U. Este dispositivo no requiere de Internet y se puede emplear para un escáner de radio de banda ancha. Es comúnmente utilizado en radioaficionados, piratas informáticos y cualquier otra persona interesada en RF (Radiofrecuencia) [13]. Dependiendo del modelo que se

esté utilizando el rango de frecuencias va desde 500 kHz hasta 1.75 GHz, el rango de muestreo máxima es de 3.2 MS/s (Millones de muestras por segundo) [13]. Diagrama de bloques RTLSDR.

- HackRF One: Esta es la plataforma de hardware empleada para el presente proyecto. Es un dispositivo auxiliar e independiente utilizado por SDR para transmitir o recibir señales de radio desde 1 MHZ hasta 6 GHZ. Diseñado para facilitar el desarrollo de las tecnologías de la comunicación tanto actuales como en el desarrollo de las nuevas generaciones de tecnologías de radio junto con sus correspondientes protocolos de comunicación [14]. Algunas características con las que cuenta el HackRF son las siguientes [21]:

- Rango de frecuencia desde 1 MHz hasta 6 GH
- Capacidad de operación half-duplex
- Capacidad de muestreo de 20 millones de muestras por segundo
- Muestreo de 8 bits con cuadratura
- Compatible con programas de SDR, tanto para Linux como para Windows.
- Permite un control de la potencia con la que se le suministra a la antena, este rango varía entre los 50 mA y 3.3 V
- Cabeceras de pines internos para una posible expansión de placa

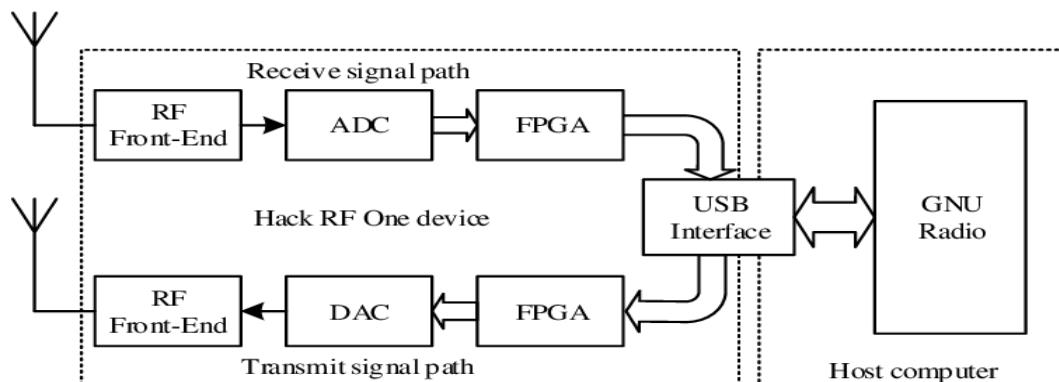


Figura 3: Diagrama del HackRF One [38]

- USRP B210: Es una plataforma de periféricos de radio de software universal (USRP, por sus siglas en inglés). Diseñado para ser utilizado en la experimentación de bajo costo de SDR, esta

combina un transceptor de conversión directa, el cual le provee al usuario 56 MHz de ancho de banda. Cuenta con una compatibilidad con el software USRP Hardware Driver (UHD) lo que a la vez le permite un desarrollo inmediato con el GNU Radio, creación de un prototipo de su propia estación base GSM y código de transición de mayor rendimiento entre las plataformas USRP [20]. El USRP B210 le da la posibilidad al usuario de experimentar con TV FM, celular, GPS, wifi, ISM y demás [19].

Algunas características con la que cuenta el USRP B210 son las siguientes:

- Dispositivo de dos canales con cobertura RF entre 70 MHz a 6 GHz
- Un ancho de banda de 56 MHz
- Conectividad USB 3.0
- Compatibilidad con GNURadio y OpenBts
- Un FPGA abierto y reconfigurable
- Plataforma de creación de prototipos
- Configuración MIMO y SISO

Diagrama de bloques USRP B210:

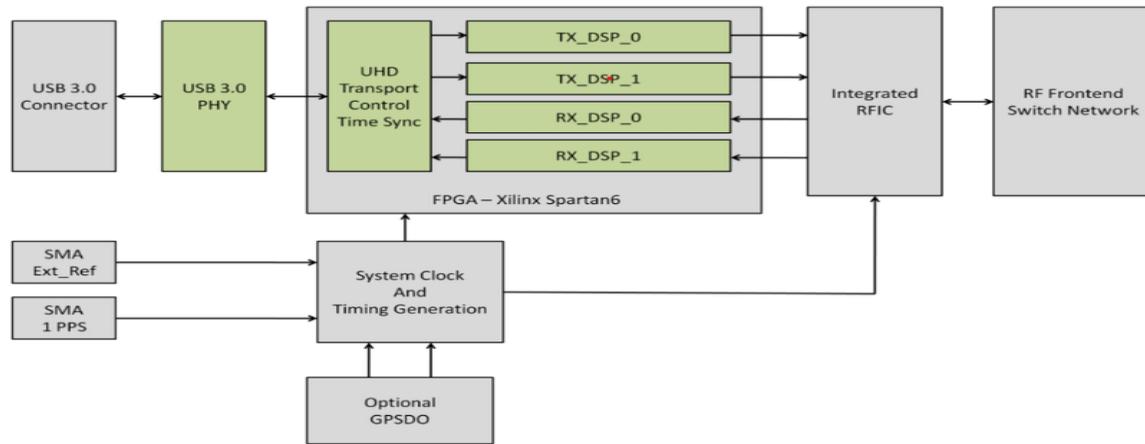


Figura 4: Diagrama de bloques del USRP B210 [40]

#### 2.1.4. Hardware Adicional

- Antena GPS: Estas antenas captan las señales de banda L transmitidas del espacio y las transfieren a una unidad de procesamiento para determinar la ubicación de los respectivos receptores. [22]

Algunas de las características de la antena son las siguientes [23]:

- El voltaje requerido varía entre 2.5 V y 5 V
- Cuenta con una impedancia de  $50\Omega$
- El rango de frecuencia que se utiliza es de 1575.42 MHz
- La polarización de la antena es vertical
- Tiene una ganancia de 27 dB
- NooElec Tiny TCXO: Este es un módulo que actualiza el HackRF con un reloj de precisión mucho más sofisticado sin necesidad de soldar al equipo [30].
  - Tiene un oscilador de cristal controlado por temperatura de 10 MHz es de 0,5 ppm y tiene un ruido de fase ultra bajo.

### **2.1.5. Señales GNSS**

El sistema GNSS está definido como el conjunto de todos los sistemas de posicionamiento tales como, el europeo (GALILEO), el sistema de navegación por satélite Global de la Federación de Rusia (GLONASS), el sistema de posicionamiento global (GPS) de Estados Unidos, la navegación de India (NavIC) y el sistema de satélite Quasi-Zenith de Japón (QZSS). Los sistemas GNSS proporcionan una información precisa y continua en todo el mundo, determinando la velocidad y una posición tridimensional de los equipos receptores. Regulando al principal estándar de tiempo de todo el mundo UTC (Tiempo Universal Coordinado). Las constelaciones centrales (conocidas mayormente como constelaciones globales del GNSS), consisten en al menos 24 satélites ubicados en la órbita Terrestre Media (MEO) repartidos en 3 o 6 planos orbitales, teniendo como mínimo 4 satélites por plano. Existe una red de control que monitorea en todo momento el estado en el que se encuentra cada satélite, esta red a la vez se encarga de sus datos y su dirección orbital a excepción del servicio de radio-determinación (RDSS). Las transmisiones satelitales están referenciadas a estándares de frecuencia atómica de alta precisión en satélites que estén sincronizados con una base de tiempo en el sistema interno. [3]

Los satélites que utilizan más de un canal para transmitir frecuencias utilizan una técnica llamada espectro ensanchado de secuencia directa. Los datos de navegación proporcionan los medios para que

el receptor determine la ubicación del satélite en el momento de la transmisión de la señal, mientras que el código de distancia permite que el receptor determine el tiempo de tránsito (la propagación que tiene la señal) determinando la distancia entre el satélite y el usuario. Esta técnica requiere que el receptor del usuario también contenga un reloj. Para medir la ubicación tridimensional del receptor se requiere que las mediciones de rango TOA se realicen en cuatro satélites. Ya que si el reloj del receptor estuviera sincronizado con los relojes de los satélites solamente se necesitan 3 medidas para el alcance [3]. Normalmente se emplea un reloj de cristal en los receptores de navegación para minimizar el costo, la complejidad y el tamaño del receptor. Teniendo esto en cuenta se necesitaría de 4 mediciones para determinar la latitud del usuario, la longitud, la altura y el desfase del reloj del receptor con respecto a la hora interna del sistema. En caso de que se conozcan a precisión, la hora o la altitud del sistema, requeriría menos de cuatro satélites para obtener la ubicación del usuario. Los equipos que tienen los usuarios en el ámbito comercial utilizan mediciones de múltiples constelaciones SATNAV para formar la solución de PVT (determinación de la posición, la velocidad y el tiempo) lo que en cierta manera asegura la disponibilidad de la señal en caso de percances con uno o más sistemas [4]. Las señales GNSS son generadas a partir de una o varias señales portadoras de radiofrecuencia (RF). Este tipo de señal está caracterizada por su intervalo de tiempo ( $T_0$ ) como se muestra en la imagen 5 y el recíproco del período ( $F=1/T_0$ ) expresada en la unidad de ciclo/segundo. [3]

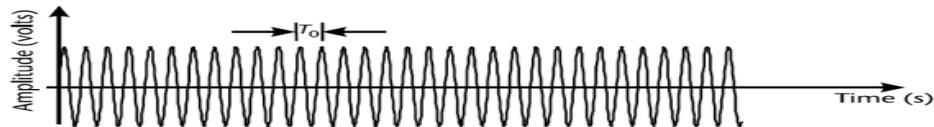


Figura 5: Portadora de radio frecuencia [3]

Actualmente las señales GNSS utilizan frecuencias de portadora en la banda L que varía entre 1 y 2 GHz. La aplicación de bajas frecuencias en la atmósfera ocasiona retrasos y la falta de homogeneidad que esta presenta tiene como consecuencia un desvanecimiento en la intensidad de la señal. Cuando se están aplicando frecuencias mayores la señal puede llegar a tener una alta atenuación. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ha designado dos subconjuntos de frecuencias de banda L con respecto a los servicios de radio-navegación por satélite (RNSS), el primero de ellos varía entre 164 a 1300 MHz y el segundo varía entre 1559 y 1610 MHz [3].

Las señales GNSS están diseñadas para que puedan tener un alcance con el equipo del usuario, poder realizar una transmisión de información de la ubicación de los satélites GNSS y tener una frecuencia portadora común. Con el fin de lograrlo se han establecido algunas características para que la señal portadora RF pueda variar con el tiempo [3]. A esta variación se le denomina modulación dada por la siguiente ecuación:

$$s(t) = \cos(2\pi f(t)t + \phi(t)) \quad (1)$$

La amplitud  $a(t)$ , la frecuencia  $f(t)$  y la compensación de fase  $\phi(t)$  son constantes con respecto al tiempo teniendo una señal portadora no modulada. La modulación digital usada por los satélites GNSS se conoce como modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK). Con el BPSK el RF se transmite de igual manera o con un cambio de fase de 180 grados en intervalos sucesivos. La señal BPSK puede formarse a partir de dos ondas de tiempo, la portadora de RF no modulada y una onda que varía entre +1 y -1, la amplitud de la forma de onda para el intervalo  $k$ -ésimo de TB son los segundos que se pueden generar a partir de la  $k$ th biy de datos transmitidos usando el siguiente mapeo:  $[0, 1] \rightarrow [-1, +1]$  o  $[0, 1] \rightarrow [+1, -1]$  [3]. La cual se puede representar de la siguiente forma:

$$d(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k p(t - kT_b) \quad (2)$$

Donde el  $D_k$  es el  $k$  bit y el  $p(t)$  es una forma del pulso. La forma de onda de datos es considerada como una banda base, implicando que la frecuencia se encuentre alrededor de los 0 Hz en lugar de la frecuencia portadora. La modulación de la portadora de RF centra el contenido de frecuencia de la señal sobre la frecuencia que tiene la portadora [3], creando de esta manera la señal de paso de banda.

Para los GNSS modernos se emplea una corrección de errores de reenvío (FEC), en el caso de que los datos de navegación transmiten bits redundantes permitiendo que el receptor del usuario pueda detectar y corregir la mayor cantidad de error introducido por el ruido, interferencia o desvanecimiento. Para la implementación del FEC usualmente se reemplaza el  $T_b$  con  $T_s$  y  $R_b$  con  $R_s$  para distinguir los bits de datos que realmente se transmitieron con los bits de datos que contienen la información

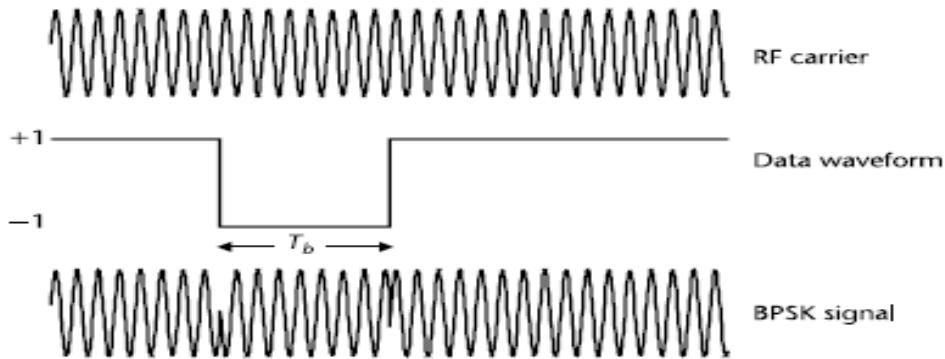


Figura 6: Modulación BPSK [3]

antes del FEC [3]. La modulación de espectro de ensanchado de secuencia directa (DSSS), es empleada debido a las siguientes razones: Las frecuentes inversiones de fase de la señal introducida por la forma de ensanchada posibilitan una medición de manera precisa. Admiten el uso de diferentes secuencias de difusión permitiendo que múltiples satélites transmiten señales de una forma simultánea y en la misma frecuencia, y debido a que el receptor puede discriminar señales según su código. Siendo así que la transmisión de múltiples señales DSSS se designa como acceso múltiple por división de código (CDMA). En la figura 7 se muestra la señalización DSSS de una portadora de RF con una onda de ruido pseudoaleatorio (PRN). La forma de la onda de propagación es determinista, puesto que la secuencia digital que se utiliza para crearla es conocida. La forma de onda de dispersión es mucho mayor que la tasa de símbolos de la forma de onda que tienen los datos de navegación. La secuencia digital que se emplea para poder generar una onda de dispersión son nombradas de las siguientes maneras: código de rango, secuencia pseudoaleatorio y código PRN. [3]

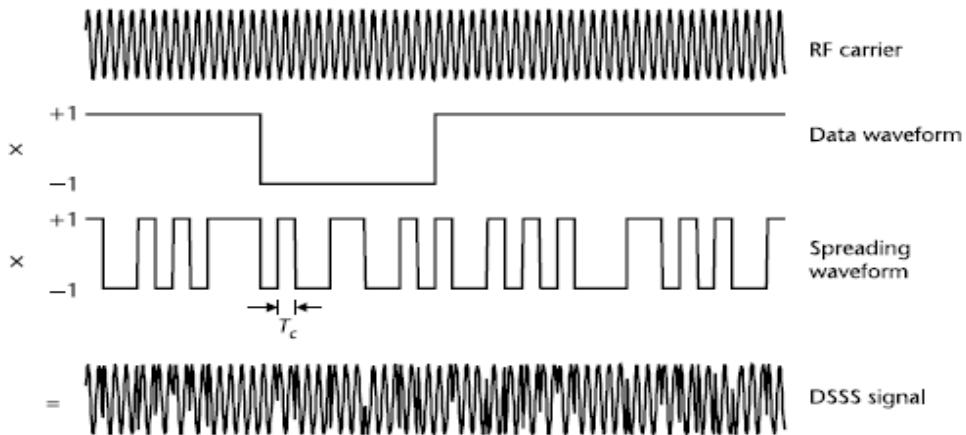


Figura 7: Modulació DSSS [3]

Las señales GNSS urbanas se caracterizan con el nombre de señales abiertas, estas señales usan códigos de rango que no se encuentran encriptadas y son periódicas, cuyas longitudes pueden variar entre 511 a 767,250 bits. Mientras que las señales GNSS de uso autorizado o restringido utilizan códigos encriptados y no periódicos [3]. Los receptores satelitales fueron diseñados para estar en diferentes mercados, siendo así, que a menudo se pueden encontrar variaciones entre la forma y algunas características significativas, como lo sería el resultado de compensaciones de rendimiento, interferencia de ruido (incluida la interferencia natural e intencional), limitaciones de atenuación y el bloqueo de la señal por objetos físicos. Existen receptores con más resistencia a estas limitaciones, más sin embargo depende de las aplicaciones GNSS que se le esté dando, de igual manera la constelación. Los receptores cuentan con una batería interna recargable que proporciona una energía de reserva para mantener vivo el oscilador de referencia y la función de cronometraje (cuando el receptor está en espera y en ocasiones cuando el receptor se encuentra totalmente apagado). El poder principal del receptor puede ser una batería interna reemplazada, recargable o por una alimentación externa de corriente alterna (CA) o de corriente directa (CC). [3]

### **2.1.6. Interferencias del GNSS**

Los receptores que captan señales GNSS son vulnerables a cualquier interferencia con relación a la radio frecuencia (RF) degradando significativamente la precisión de la navegación, en caso de que la interferencia sea mayor a la aceptable la pérdida del seguimiento puede llegar a ser inevitable. Estas interferencias se clasifican según su ancho de banda, estas pueden ser anchas o estrechas, ver el cuadro 2. Más sin embargo estas no son las únicas interferencias con las que cuenta este sistema puesto que los satélites GNSS distinguidos como auto-interferencia, estas se encuentran divididas en dos partes, la interferencia intrasistema y la interferencia entre sistemas. La interferencia intrasistema es el entrometimiento de la señal entre sus semejantes que existe en su misma constelación, mientras que la interferencia entre sistema es la intromisión que hay entre dos constelaciones, como lo sería en el caso de señales GLONASS O Galileo. [3]

Clase	Tipo	Fuentes Potenciales
Banda ancha	Banda limitada	Bloqueadores de ruido de ancho de banda coincidente intencional
	Modulación de fase/-frecuencia	Armónicos de transmisores de televisión o transmisores de enlace de microondas de banda cercana que superan los filtros de un receptor GNSS
	Espectro adaptado	Bloqueadores de espectro coincidente intencionales, suplantadores de identidad o pseudolitros cercanos.
	Pulso	Cualquier tipo de transmisores de ráfaga como radar o banda ultra-ancha (UWB).
Banda Angosta	Fase / Frecuencia amplitud	Hammers de chirp intencionales o armónicos de una modulación de estación de radio (AM), radio de banda ciudadana (CB) o transmisor de radioaficionado.
Banda Estrecha	Barrido de onda continua	Interferencias intencionales de barrido de onda continua (CW) o armónicos de transmisor de estaciones de modulación de frecuencia (FM).
	Continua ola	Bloqueadores de CW intencionales o portadores de transmisores no modulados de banda cercana.

Cuadro 2: Tipos de Banda [3]

### 2.1.7. Relación señal a ruido (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR o S/N) es la proporción entre la potencia de una señal que ha sido transmitida y la potencia del ruido que la contamina. Esta relación se mide en decibelios. Esta relación se describe como:

$$SNR = \frac{P_s}{P_N} \quad (3)$$

En ingeniería se suele expresar en decibelios (dB) y se describe así.

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_N} \quad (4)$$

Potencia promedio para una señal determinista.

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) \cdot dt \quad (5)$$

### 2.1.8. Señal GPS

Conjunto de satélites estadounidenses de radio-navegación cuya finalidad es proporcionar servicios de posicionamiento, navegación y cronometría gratuitos a usuarios de todo el mundo. El GPS se basa en

ondas electromagnéticas entre 1000 y 2000 MHz, por lo general el ancho de banda utilizado es mayor al necesario para reducir la atenuación que se va adquiriendo entre el satélite emisor y el usuario receptor [9]. Para realizar el proceso del GPS se requiere de una modulación enfocada a la señal a transmitir para llevar los códigos P y C/A. El código P es una secuencia de aproximadamente 1024 bits de modulación pseudoaleatorias bifásicas en la fase portadora GPS, este código es único para cada satélite GPS el cual es alterado cada semana. El código C/A o código de Adquisición Cruda es una secuencia de modulaciones pseudoaleatorias bifásicas binarias entre 1023 MHz [11], [12], esta es una señal estándar de determinación de la posición que transmite el satélite GNSS al usuario civil provocando un ruido pseudoaleatorio distinto (PRN), el PRN es fundamental para la identificación de cada satélite, puesto que el receptor la identifica al tenerla previamente almacenada para posteriormente hacer una réplica del código recibido desfasado ya que el que se obtuvo del satélite tuvo que recorrer una cierta distancia. Al realizar la correlación entre la señal transmitida y la señal generada se puede obtener el tiempo y la distancia recorrida [9], [10].

La infraestructura que este posee se divide en los siguientes tres segmentos:

- **Segmento espacial:** En este segmento se encuentra la constelación de satélites los cuales son usados para obtener la información de la coordenada del usuario. Los satélites transmiten señales codificadas con ruido pseudoaleatorio (PRN) usado para las mediciones de alcance. Convirtiendo al sistema GPS en un sistema pasivo para el usuario ya que solamente pueden transmitir mientras que el usuario recibe de forma pasiva las señales. Por lo tanto, no existe un número predeterminado que limite la cantidad de usuarios que puedan tomar este servicio. La señal de la distancia que se transmite se modula con datos de la distancia de los satélites [3]. El segmento espacial consta de una red de 24 satélites que orbitan alrededor, estos satélites tienen una distancia aproximada de 20.000 Km y una órbita distribuida en 6 planos distintos, además de esto cada satélite cuenta con una inclinación de 55° con respecto al plano ecuatorial terrestre. El propósito de estas características hacer que en cualquier superficie de la Tierra (y de igual forma, en cualquier altitud) puedan estar en el rango de al menos 4 satélites visibles sobre el horizonte (OTH) [3].

- **Segmento de control:** En este segmento se encuentran 5 estaciones en la superficie de la tierra distribuidas por todo el mundo, estas estaciones son conectadas a una estación de control llamada estación de control principal o MCS (por sus siglas en inglés). Este segmento tiene como tarea principal rastrear los satélites que se encuentren en órbita, actualizar sus posiciones, sincronizar y calibrar sus relojes [3].
- **Segmento de usuario:** Este segmento es el destinatario final de la cadena, consiste en usar cualquier dispositivo GPS para obtener las coordenadas de su ubicación actual [3].

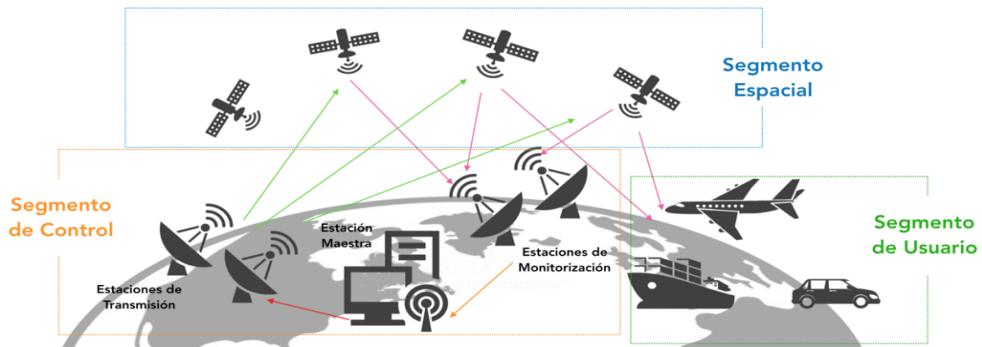


Figura 8: Segmentos del sistema GPS [39]

En la década de 1970 el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de EE. UU ha mejorado continuamente en términos de precisión, disponibilidad e integridad. Contribuyendo significativamente a los 3 segmentos (espacio, control y usuario). El GPS proporciona 2 principales servicios [3]:

- **Servicio de posicionamiento preciso (PPS):** Este servicio se encuentra encriptado por lo que se encuentra destinado a trabajar con militares y usuarios gubernamentales autorizados [3].
- **Servicio de posicionamiento estándar (SPS):** Este servicio está libre de tarifas de usuario directo y lo utilizan millones de usuarios civiles en todo el mundo. Los usuarios que utilizan el SPS, pueden elegir receptores varios tipos de receptores como lo sería el reloj de pulsera, un equipo portátil y aplicaciones de telefonía móvil [3].

La constelación nominal de GPS consta de 24 satélites en 6 planos orbitales MEO, también conocida

por algunos como la constelación de líneas de base de 24 ranuras. En junio del año 2011, la Fuerza Aérea de los EE. UU actualizó el diseño de la constelación GPS para poder expandirlo a 27 satélites en ranuras definidas [3]. Teniendo como resultado una mejor cobertura y mejores propiedades geométricas. Se han realizado mejoras en los segmentos de control y espacial de manera que el valor cuadrático medio (rms) del segmento espacial es de aproximadamente 0,5 m. El segmento de control continúa evolucionando a la par con el segmento de control operativo de la siguiente generación conocido como OCX, se espera que para antes del año 2025 se vean inicios de esta tecnología. [3]

### 2.1.9. Adquisición de señales GPS

La principal tarea realizada durante la detección de una señal GNSS es la estimación del tiempo de retardo  $t_{rec}$  de la misma y el corrimiento Doppler de la frecuencia  $f_d$ . El estimado de la fase inicial y la amplitud misma de la señal se pueden desestimar, ya que estos parámetros no presentan ningún tipo de información durante la toma de decisión sobre la detección de la señal de radio-navegación. Tal cual como se había expresado, en el lazo de recepción del usuario, la señal de radio-navegación recibida GNSS se define como una señal con fase aleatoria en un fondo de ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN) [3]–[6]. Tradicionalmente el proceso de búsqueda y detección de la señal se realiza mediante procesos de correlación en el dispositivo receptor. Para ejecutar el procesamiento de correlación de la señal de radio-navegación recibida en el trazo de recepción se puede utilizar un detector de fase (PD, *ing.* Phase detector), el cual y casi por regla se realiza bajo del principio de procesamiento de correlación en cuadratura de IQ, mediante la correlación de la señal recibida con una copia local compleja de referencia  $\dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda})$ . La copia de la señal local compleja,  $\dot{s}_{LO}$ , formada localmente en el aparato receptor presenta la siguiente forma [3]–[6]:

$$\dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda}) = h_{PRN}^X(t - \tilde{t}_{rec}) e^{i(2\pi(f_{IF} + \tilde{f}_d)t)}, \quad (6)$$

donde,  $h_{PRN}^X(t - \tilde{t}_{rec})$  es la función de amplitud modulada de referencia para un código de pseudodistancia (*ing.* ranging code) de tipo  $X$ ;  $\tilde{\lambda} = [\tilde{t}_{rec}, \tilde{f}_d]$  es el vector de estimaciones de los parámetros de radio-navegación de la señal recibida;  $\tilde{t}_{rec}$  representa la estimación del retardo del código de pseudodistancia; y  $\tilde{f}_d$  indica la estimación del corrimiento Doppler de la frecuencia portadora de la

señal de radio-navegación recibida [3]–[6].

En la práctica la señal local de referencia puede no ser totalmente idéntica a la señal recibida. Por consiguiente, la expresión IQ en la salida de la correlación de tipo cuadratura se puede definir bajo la forma de integral de la siguiente correlación [3]–[6]:

$$\dot{z}(\lambda, \tilde{\lambda}) = \int_0^{T_N} y(t, \lambda) \dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda}) dx, \quad (7)$$

donde,  $\dot{z}$  representa la función estadística de decisión (resultado de correlación);  $T_N$  es el intervalo de acumulación (integración) de la energía de la señal GNSS, el cual a su vez generalmente es igual a la duración de un período del código de pseudodistancia. El método de detección está basado en la realización de la correlación de la señal de entrada de GNSS con la serie del código de interés. El algoritmo de detección está basado en el criterio de Neyman-Pearson donde se calcula la potencia total de la señal en un conjunto de  $n$  muestras, puede ser modelado como una prueba de hipótesis, lo cual es equivalente a decidir entre 2 hipótesis [3]–[6].

### 2.1.10. Método de estimación convencional

La transformada rápida de Fourier (FFT) es un método de medición empleado para descomponer la señal en componentes espectrales de forma individual implementando la Transformación Discreta de Fourier (DFT). Los componentes en que se descomponen son osciladores sinusoidales simples a frecuencias discretas cuya amplitud y fase se encuentran determinadas. La FFT es utilizado comúnmente para el análisis de errores, el control de la calidad y la monitorización de las condiciones de los sistemas. [33]

Para utilizar la FFT se necesita de una muestra de la señal, una tasa de muestreo ( $f_s$ ) y un número de muestras a muestrear (BL). Tanto la  $f_s$  como el BL son utilizados para calcular los otros parámetros como:

- Ancho de banda de la frecuencia de Nyquist ( $f_n$ ): Frecuencia máxima teórica

$$f_n = f_s/2 \quad (8)$$

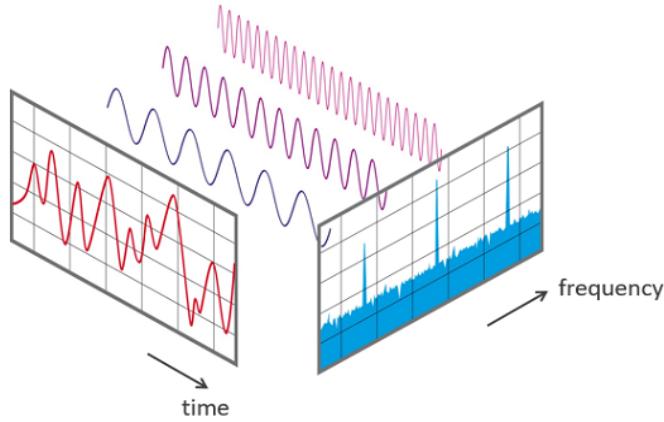


Figura 9: Vista de una señal en el dominio del tiempo y la frecuencia [33]

- Duración de la medición (D): Tiempo en el que transcurre la medición

$$D_x = BL/f_s \quad (9)$$

- Resolución de frecuencia (df): Indicador de la diferencia de la frecuencia entre dos resultados de medición

$$d_f = f_s/BL \quad (10)$$

### 2.1.11. Métodos de estimación no convencionales

- Método de estimación del Periodograma: Sencillo estimador espectral que representa la variabilidad de la radiación luminosa, esta consiste en una FFT disminuyendo la varianza en un factor  $\sqrt{L}$  a costa de disminuir la resolución espectral [34].

$$\frac{T}{2}a = \int_{t_1}^{t_1+T} f(t)\cos(kt)dt \quad (11)$$

$$\frac{T}{2}b = \int_{t_1}^{t_1+T} f(t)\sin(kt)dt \quad (12)$$

Donde T se puede elegir por conveniencia como un entero múltiplo de:

$$2\pi/k \quad (13)$$

Dibujando una curva con  $2\pi/k$  como abscisas y  $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ , el espacio entre esta curva y el eje de abscisas, representa el periodograma de  $f(t)$ .

- Método de estimación Yule-Walker: Este método estima la densidad espectral de la potencia (PSD), también se le conoce como el método de auto correlación minimizando el error de predicción. [34], el proceso autorregresivo de orden p se define por [35]:

$$X_n = \begin{cases} -\sum_{k=1}^p a_k X_{n-k} + W_n & n = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Donde la sucesión  $(W_n)_{n \in \mathbb{N}_0}$  de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (idd) es un proceso de ruido blanco con las siguientes propiedades:

- Para toda  $n \in \mathbb{N}_0$ ,  $\mathbb{E}[W_n] = 0$
- Para toda  $n \in \mathbb{N}_0$ ,  $\mathbb{E}[W_n^2] = \sigma^2$
- Para toda  $n \neq k$ ,  $Cov[W_n, W_K] = 0$

El proceso autorregresivo de orden 3, está dado por:

$$X_n = \begin{cases} -a_1 X_{n-1} - a_2 X_{n-2} - a_3 X_{n-3} + W_n & n = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (15)$$

La covarianza de orden j , es:

$$\gamma_j = \mathbb{E}[(X_n - \mathbb{E}[X_n])(\mathbb{E}[X_{n-j}])] \quad (16)$$

Las ecuaciones

$$\gamma_j = -a_1 \gamma_{j-1} - a_2 \gamma_{j-2} - a_3 \gamma_{j-3} \quad (17)$$

para  $j = 1, 2, 3$ , o equivalente

$$\gamma_1 = -a_1\gamma_0 - a_2\gamma_1 - a_3\gamma_2, \quad \gamma_2 = -a_1\gamma_1 - a_2\gamma_0 - a_3\gamma_1, \quad \gamma_3 = -a_1\gamma_2 - a_2\gamma_1 - a_3\gamma_0 \quad (18)$$

junto con la ecuación

$$\gamma_0 = -a_1\gamma_1 - a_2\gamma_2 - a_3\gamma_3 + \sigma \quad (19)$$

son las ecuaciones de Yule-Walker para el proceso autor regresivo. En forma matricial el sistema se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \gamma_0 & \gamma_1 & \gamma_2 \\ \gamma_1 & \gamma_0 & \gamma_1 \\ \gamma_2 & \gamma_1 & \gamma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ -a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones de Yule-Walker para un proceso autor regresivo de orden p están dadas por:

$$\gamma_j = - \sum_{k=1}^p a_k \gamma_{j-k} \quad (20)$$

para  $j = 1, 2, \dots, p$  y para  $j = 0$

$$\gamma_0 = - \sum_{k=1}^p a_k \gamma_k + \sigma \quad (21)$$

- Método de estimación de Correlograma: Método indirecto en el que se realiza una estimación previa a la auto correlación para aplicar posteriormente la FFT y obtener la estimación del DEP. Esta estimación para que proporcionar matrices de auto correlación semidefinidas positivas y a la vez tener un menor error cuadrático medio que la estimación sesgada. La varianza de la estimación de la función de correlación aumenta con el índice de retardo (k) al promediar menos datos de la señal obtenida con retardos aumentados. El método correlograma estima la DEP mediante la expresión de Blackman-Tukey: [36]

$$\widehat{P}_c(f) = T \sum_{n=-(N-1)}^{N-1} w(n) \widehat{r}_{xx}(n) e^{-2j\pi f n T} \quad -\frac{1}{2T} \leq f \leq \frac{1}{2T} \quad (22)$$

donde  $w(n)$  es una ventana de retardos de longitud L. El valor esperado del estimador espectral

es el siguiente:

$$\epsilon \left\{ \widehat{P}_c(f) \right\} = \int_{-\frac{1}{2T}}^{\frac{1}{2T}} W(f - \delta) \epsilon \{ \widehat{P}_s s(\delta) d\delta \} = W(f) * (W_B(f) * P_{xx}(f)) \approx$$

$$\{N \gg L\} \approx W(f) * P_{xx}(f) \quad (23)$$

Si  $w(n)$  es diferente de la ventana rectangular y de Barlett, se reduce el efecto de los lóbulos secundarios, leakage, del periodograma o sample spectrum. No obstante, si  $w(n)$  tiene valores no nulos en  $-L \leq n \leq L$  y  $L < N$ , el lóbulo principal de la ventana  $W(f)$  será más ancho que  $W_b(f)$ .

### 3. Metodología

Se presenta la metodología y el diseño con el cual se desarrolló el proyecto de investigación. Se tienen 5 fases presentadas en la figura 10.

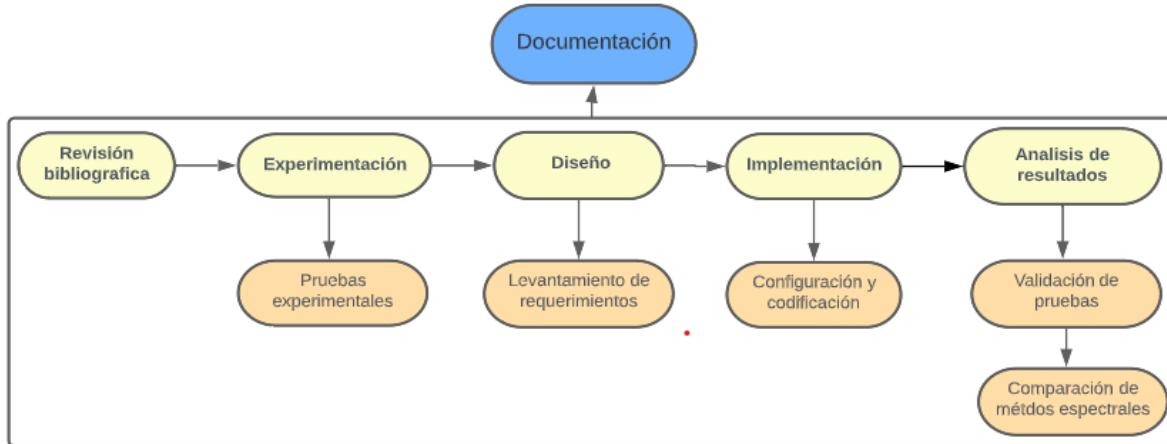


Figura 10: Metodología aplicada

- Fase 1 - Revisión bibliográfica: Radica en obtener la información afín de libros, repositorios, sitios web, artículos científicos y tesis.
- Fase 2 - Experimentación y aprendizaje: Según la revisión bibliográfica se inicia la experimentación con el hardware utilizado para conocer las funciones y posibles usos dentro del proyecto.
- Fase 3 - Diseño: Se realiza el levantamiento de requerimientos, se proponen los componentes de hardware y software junto con el diseño de la solución propuestas para la adquisición de señales GPS.
- Fase 4 - Implementación: Se llevan a cabo los procesos de implementación de los métodos de estimación espectral.
  1. Aplicación de los requerimientos.
  2. Grabación de la señal GPS como archivo de extensión **.dat**.

3. Implementación de los métodos de estimación espectral como funciones ya incluidas en Matlab sobre el programa SoftGNSS v3.0.
- Fase 5 - Análisis de resultados: Para el análisis de resultados se efectúan pruebas con varias grabaciones de señales GPS en distintas condiciones climáticas y se procesan en SoftGNSS v3.0.
  - La documentación es un proceso que se realiza simultáneamente con el desarrollo del proyecto, por lo que se realiza en todas las fases.

## 4. Diseño e implementación

### 4.1. Diseño

Para llevar a cabo la investigación se necesitó de un computador que funcione con el sistema operativo de Linux y/o Windows. El software que se requiere tener instalado en Linux es **GNSS-SDR**. El otro software que se requiere es MATLAB, existen versiones tanto para Windows como para Linux. Otros elementos de hardware que se aplicaron en el proyecto fueron las siguientes: RTL-SDR, su rango de muestreo equivale a 3.2 millones de muestras por segundo y su rango de frecuencias puede variar entre 500 kHz y 1.75 GHz; HackRF One, recibe señales de radio entre 1 MHz y 6 GHz, con una capacidad de obtener un total de 20 millones de muestras por segundo, antena GPS, receptor físico de los sistemas de navegación por satélite (GNSS) que permite rastrear y localizar la ubicación de cualquier objeto que se encuentre en el rango de los satélites. Este tipo de antena capta las señales de banda L, contando con una impedancia de 500 , una ganancia de 27 dB; NooElec Tiny TCXO, Módulo que actualiza el Hack RF al tener un reloj de precisión más sofisticado y un oscilador de cristal controlado por temperatura.

#### 4.1.1. Metodología de trabajo

Para el desarrollo del presente proyecto se eligió la metodología de Kanban al ser una metodología fácil de aplicar, implementar y actualizar. A través de reuniones con el docente se establecen las tareas necesarias para la capacitación y desarrollo de los objetivos plasmados una lista de tareas secuencial junto con un tiempo establecido para la culminación de las mismas. La lista creada se dividió en 3 etapas: Captación de las señales GPS, grabado de señales GPS. Aplicación de métodos de estimación espectral.

- En la primera etapa se hace la revisión del estado del arte y el trabajo previo del semillero, manejo y control de software para la visualización y manipulación del espectro.
- En la segunda etapa se busca obtener en tiempo real.
- Finalmente aplicar el método convencional y los métodos de estimación no convencionales.

#### 4.1.2. Especificación de requerimientos

La especificación de requerimientos esta expuesta de manera mas detallada y con formato IEE830 en el documento de **Especificación de requerimientos para el barrido de frecuencia en GNU Radio y la actualización de SoftGNSS v3.0 para el uso de métodos de estimación espectral paramétricos y no paramétricos.** El cual se encuentra separado de este documento.

Listado de requerimientos

- Requerimientos funcionales:
  - El sistema debe permitir hacer un barrido en la frecuencia.
  - El sistema debe permitir al usuario estipular la frecuencia de inicio del barrido. De igual forma deberá permitir al usuario estipular la frecuencia final.
  - El sistema debe permitir al usuario modificar el paso con el que se avanza durante el barrido.
  - El sistema debe permitir al usuario definir el tiempo que permanecerá en cada frecuencia que recorra durante el barrido.
  - El sistema de recepción GPS debe registrar y guardar la señal GPS en un formato con extensión **.dat** para el procesamiento
  - El sistema debe mostrar gráficamente los resultados obtenidos de la señal usando métodos de estimación espectral convencionales y no convencionales
- Requerimientos no funcionales:
  - **Rendimiento:** El barrido de frecuencia no deberá usar de manera desmedida los recursos computacionales.
  - **Seguridad:** Se deben garantizar la seguridad de la información y los datos generados.
  - **Fiabilidad:** Se deben garantizar la validez de los datos generados.
  - **Disponibilidad:** La ejecución debe ser posible cada vez que el usuario así lo deseé.
  - **Mantenibilidad:** Documentación y mantenimiento constante para la continuidad del proyecto y posibles fallos.

#### 4.1.3. Composición de la solución propuesta

Para llevar a cabo la investigación se necesitó de un computador que funcione con el sistema operativo de Linux y/o de Windows. El software que se requiere tener instalado en el Linux es el GNSS-SDR. El otro software que se requiere es MATLAB, existen versiones tanto para Windows como para Linux. Otros elementos de hardware que se aplicaron en el proyecto fueron las siguientes: RTL-SDR, un receptor de radio definido por software basado en sintonizadores de TV con chips RTL\_2832U, su rango de muestreo equivale a 3.2 millones de muestras por segundo y su rango de frecuencias puede variar entre 500 kHz y 1.75 GHz; HackRF One, dispositivo auxiliar e independiente usado para transmitir y/o recibir señales de radio entre 1 MHz y 6 GHz, con una capacidad de obtener un total de 20 millones de muestras por segundo; Antena GPS, receptor de los sistemas de navegación por satélite (GNSS) que permite rastrear y localizar la ubicación de cualquier objeto que se encuentre en el rango de los satélites. Este tipo de antena capta las señales de banda L, contando con una impedancia de 500 , una ganancia de 27 dB.

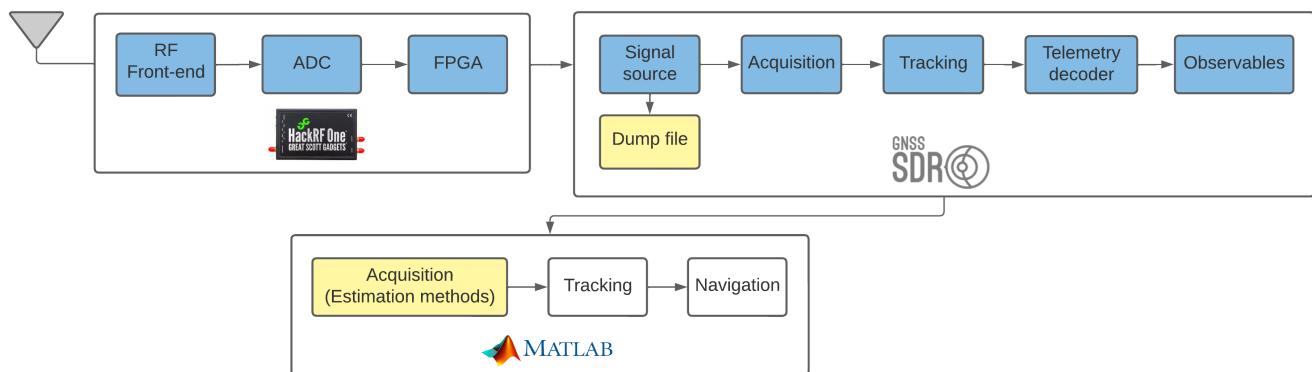


Figura 11: Diagrama de solución propuesto

Para la adquisición de las ondas de radio emitidas por los satélites en la banda L1 (1575.42 MHz) se utiliza una antena GPS conectada al Hack RF One, el resultado de este proceso se guarda en un ordenador, gracias al software GNSS-SDR. Con GNSS-SDR se realiza el proceso de la adquisición fin de detectar la presencia y/o ausencia de la señal. El tracking es la etapa donde se sigue la evolución de los parámetros de sincronización de la señal. Una vez que la señal esté lo suficientemente estable, el decodificador de telemetría (Telemetry Decoder) irá obteniendo los bits de datos del mensaje de

navegación del satélite GNSS, una vez hecho lo anterior el observable se encargara de la recopilación de datos de sincronización de todos los canales de procesamiento, obteniendo como resultado el pseudorango, la fase de la portadora y el desplazamiento Doppler.

## 4.2. Implementación

### 4.2.1. Implementación y puesta a punto GNSS-SDR

Para la grabación de la señal de los satélites GPS se utiliza el software GNSS-SDR se utiliza para configuración de la fuente los siguientes parámetros:

- Tipo de elemento: gr\_complex.
- Frecuencia de muestreo: 2 MHz.
- Frecuencia: 1575.42 MHz.
- Ganancia: 40 dB.

Luego la señal pasa por un filtro *XlatingfrequencyFIRFilter* teniendo como propósito reducir la muestra y extraer una porción de la banda de la señal. Este filtro cuenta con los siguientes parámetros:

- Diezmación de factores: 1
- tipo de elemento de entrada: gr\_complex
- tipo de elemento de salida: gr\_complex
- tipo de filtro: Pasa banda.

### 4.2.2. Implementación del receptor GPS

La señal que previamente se almacenó será utilizada en SoftGNSS v3.0, a fin de evaluar los métodos de estimación espectral en la fase de adquisición, realizar el tracking y finalmente obtener las coordenadas a partir de la navegación, como se puede apreciar en la Figura 11 la cual es la base de la solución propuesta.

La grabación que se obtuvo del software GNSS-SDR se procesa en el código de MATLAB configurándose de la siguiente manera:

- Tipo de dato: flotante.

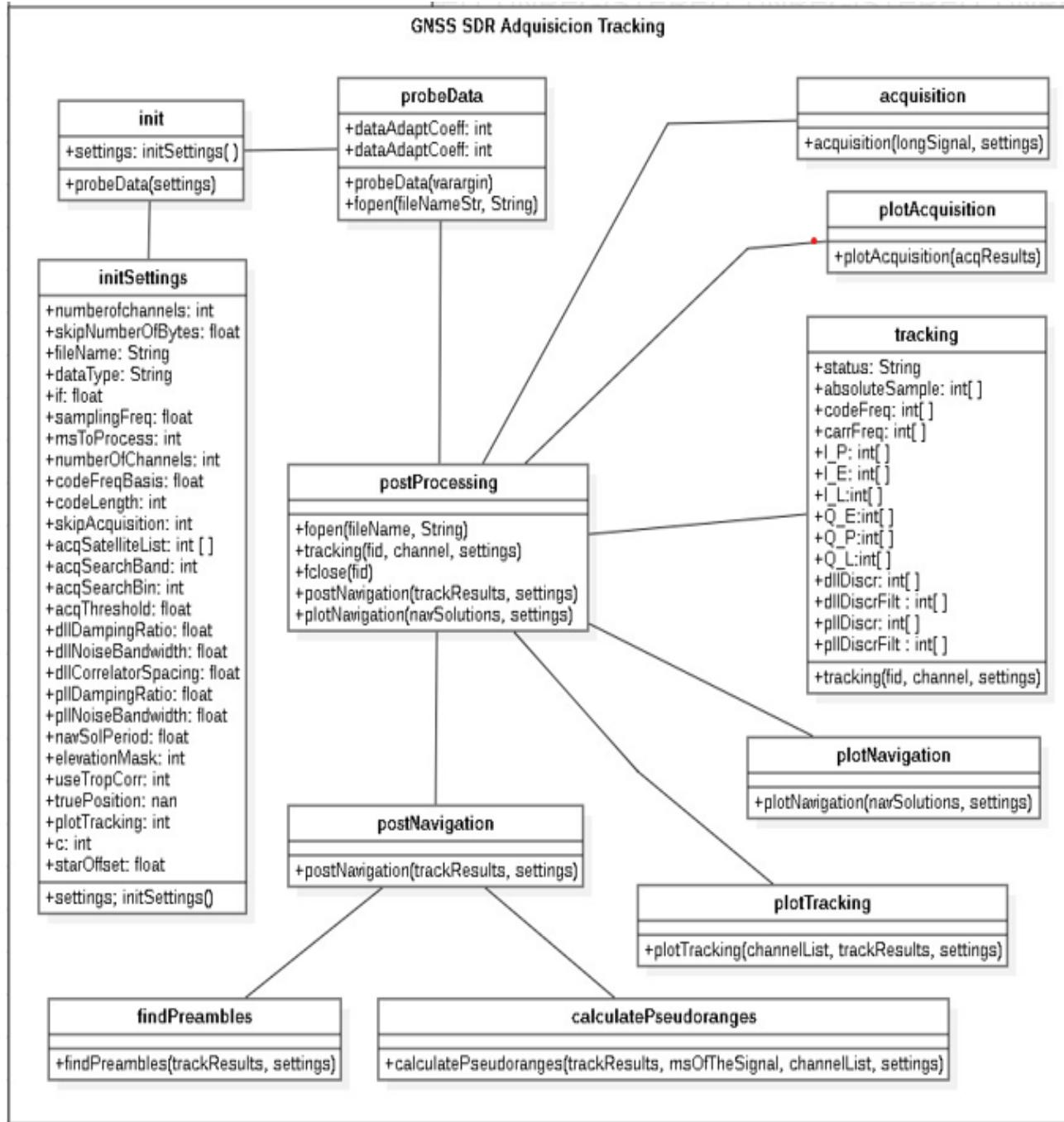


Figura 12: Diagrama de clases del receptor GPS.

- Tipo de archivo: IQ 32 bits.
- Frecuencia intermedia: 0 Hz.
- Frecuencia de muestreo: 2 MHz.
- Número de canales: 7

A continuación se muestra el diagrama de clases del Software de adquisición en MATLAB:

#### 4.2.3. Implementación barrido de frecuencia

Para la implementación del barrido de frecuencia se tiene un diagrama de bloques de GNU Radio en la figura 13. Según los requerimientos, el barrido de frecuencia se mueve desde una frecuencia inicial

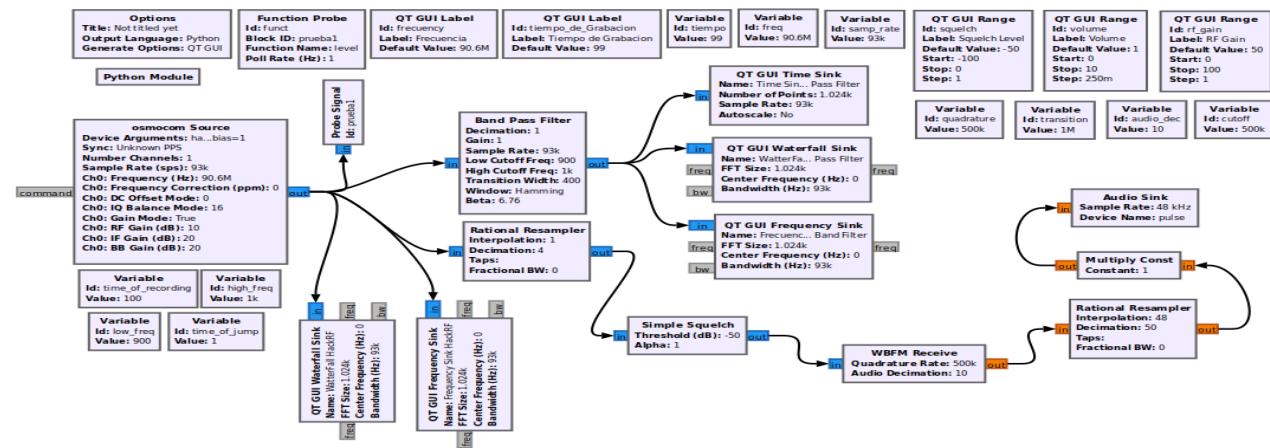


Figura 13: Barrido de Frecuencia en GNU Radio

a una final, con un paso especificado por el usuario y un tiempo de permanencia en cada frecuencia que también es estipulado por el usuario. Cabe resaltar que durante el desarrollo de este se presentaron varios inconvenientes. Siendo un problema en especial de los mas críticos, que obligó a la modificación de los archivos fuente del propio GNU Radio. En la figura 14 se aprecia el archivo fuente que se modificó. En la tercera linea debe especificarse la visualización del ID del bloque **probe signal**.

```

id: blocks_probe_signal_x
label: Probe Signal
flags: [ python, cpp ]

parameters:
- id: type
  label: Input Type
  dtype: enum
  options: [complex, float, int, short, byte]
  option_attributes:
    fcn: [c, f, i, s, b]
    hide: part

inputs:
- domain: stream
  dtype: ${ type }

templates:
imports: from gnuradio import blocks
make: blocks.probe_signal_${type.fcn}()

cpp_templates:
includes: ['#include <gnuradio/blocks/probe_signal.h>']
declarations: 'blocks::probe_signal_${type.fcn}::sptr ${id};'
make: 'this->${id} = blocks::probe_stgnal_${type.fcn}::make();'

documentation: |-
  Available functions to probe: level()
  Use with the function probe block.

file_format: 1

```

Figura 14: Barrido de Frecuencia en GNU Radio

## 5. Resultados

### 5.1. Pruebas de adquisición

En este apartado se usará el receptor GNSS-SDR, para ello se usará el campus de la Universidad Sergio Arboleda con vista al cielo, la antena estará ubicada en posición horizontal ver figura 15.



Figura 15: Ubicación del hardware para pruebas de adquisición

Para probar el programa GNSS-SDR se usará el script del siguiente [repositorio](#), este script contiene los parametros de configuracion del dispositivo de recepción SDR. Para ejecutarlo se necesitará ir a ubicación del archivo y abrir una terminal en esa carpeta, posteriormente se ingresará el siguiente comando **gnss-sdr --config\_file=./rtl-sdr-test-gps.conf**

```
(jhongarcia@jhongarcia) [~/Documentos/Semillero/GPS/Recibir]
$ gnss-sdr --config_file=rtl-sdr-test-gps.conf
Initializing GNSS-SDR v0.0.15 ... Please wait.
Logging will be written at "/tmp"
Use gnss-sdr --log_dir=/path/to/log to change that.
OsmoSDR arguments: rtl,bias=1
gr-osmosdr 0.2.0.0 (0.2.0) gnuradio 3.8.2.0
built-in source types: file fcd rtl rtl_tcp uhd hackrf bladerf rfspace airspy air
spyhf soapy redpitaya freesrp
Using device #0 Realtek RTL2838UHIDIR SN: 00000001
Found Rafael Micro R820T tuner
[R82XXX] PLL not locked!
Exact sample rate is: 2000000.052982 Hz
[R82XXX] PLL not locked!
Actual RX Rate: 2e+06 [SPS] ...
Actual RX Freq: 1.57542e+09 [Hz] ...
PLL Frequency tune error: 0 [Hz] ...
AGC enabled
Actual Bandwidth: 0 [Hz] ...
RF Channels: 1
Starting a TCP/IP server of RTCM messages on port 2101
The TCP/IP server of RTCM messages is up and running. Accepting connections ...
Allocating 15 zero-copy buffers
TcpCmdInterface: Telecommand TCP interface listening on port 3333
```

Figura 16: Terminal GNSS-SDR

El tiempo de tardanza de la adquisición de las coordenadas dependerá del lugar y el clima en donde se encuentre ubicado el usuario, en este caso el tiempo de adquisición de las coordenadas fue de 1m y 4s. Una vez que el sistema haya establecido una conexión estable con 4 satélites mostrara la longitud, latitud, altura y velocidad.

```
First position fix at 2021-Nov-04 21:31:18.140000 UTC is Lat = 4.6609 [deg], Long = -74.0599 [deg], Height= 2575.97 [m]
Position at 2021-Nov-04 21:31:18.500000 UTC using 4 observations is Lat = 4.66092
1501 [deg], Long = -74.059964782 [deg], Height = 2579.336 [m]
Velocity: East: -1.453 [m/s], North: 0.798 [m/s], Up = 2.867 [m/s]
Current receiver time: 1 min 6 s
Position at 2021-Nov-04 21:31:19.000000 UTC using 4 observations is Lat = 4.66090
6671 [deg], Long = -74.059951383 [deg], Height = 2578.855 [m]
Velocity: East: 0.523 [m/s], North: -0.073 [m/s], Up = -0.010 [m/s]
Position at 2021-Nov-04 21:31:19.500000 UTC using 4 observations is Lat = 4.66091
4356 [deg], Long = -74.059934608 [deg], Height = 2577.014 [m]
Velocity: East: -1.263 [m/s], North: 0.275 [m/s], Up = 0.539 [m/s]
Current receiver time: 1 min 7 s
Position at 2021-Nov-04 21:31:20.000000 UTC using 4 observations is Lat = 4.66091
8616 [deg], Long = -74.059920211 [deg], Height = 2576.617 [m]
Velocity: East: 0.845 [m/s], North: -2.400 [m/s], Up = -4.034 [m/s]
Position at 2021-Nov-04 21:31:20.500000 UTC using 4 observations is Lat = 4.66092
3676 [deg], Long = -74.059925244 [deg], Height = 2577.886 [m]
Velocity: East: -0.721 [m/s], North: -0.407 [m/s], Up = 1.407 [m/s]
Current receiver time: 1 min 8 s
```

Figura 17: Coordenadas dadas en GNSS-SDR

Para obtener una mejor visualización de los satélites que se van adquiriendo se instala un complemento del GNSS-SDR, una interfaz gráfica de usuario denominada monitor con el cual se visualizará los satélites que se han encontrado, un mapa, una gráfica de la altitud vs el tiempo y por último una gráfica comparativa de los DOP vs el tiempo. [25]

Los satélites que se encontraron a las 4:32 PM (hora de Colombia) fueron los satélites 1, 2, 3 y 5.

- El código de pseudoruido aleatorio (PRN) es un espectro similar a una secuencia aleatoria de bits pero que a la vez se va generando de forma determinista. En los satélites GPS la velocidad con la que se transfieren los datos es de 50 bits por segundo, cada satélite modula sus datos con

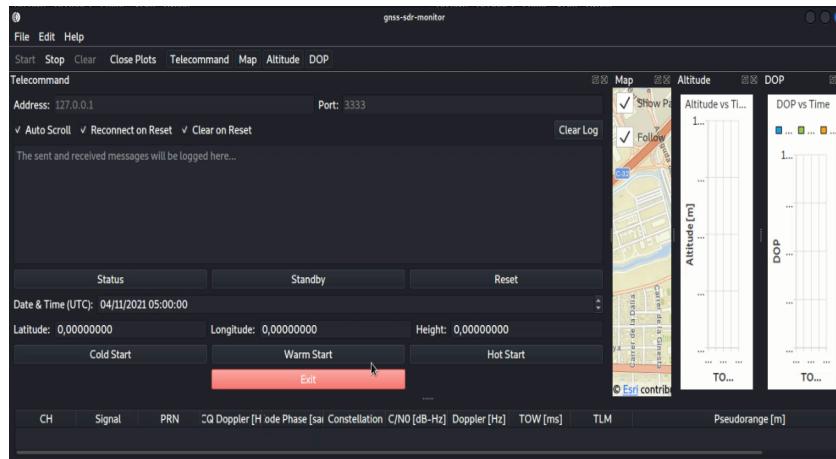


Figura 18: Monitor GNSS-SDR

un flujo de bits PN a 1.023 millones de chips por segundo. En los receptores GPS correlacionan el flujo de PN que se recibe con una referencia local para medir la distancia que el satélite tenga.

[?]

CH	Signal	PRN	CQ Doppler [Hz]	Phase [sai]	Constellation	C/N0 [dB-Hz]	Doppler [Hz]	TOW [ms]	TLM	Pseudorange [m]
5	GPS L1 C...	16	2750	1623	1	43.8	2770.7	423122660	●	2,41775e+07
2	GPS L1 C...	21	1500	1510	1	46.0	1386.1	423123360	●	2,83976e+07
1	GPS L1 C...	26	0	160	1	43.9	-249.2	423123380	●	2,37244e+07
3	GPS L1 C...	3	4000	1990	1	44.3	3962.7	423122100	●	2,76578e+07

Figura 19: Satélites encontrados con GNSS-SDR

Al encontrar las coordenadas GNSS-SDR mostrara la posición de la ubicación en un mapa. Cada satélite cuenta una serie de características como lo es el PRN (ruido pseudoaleatorio aleatorio)

El sistema GPS tiene un defecto en su configuración geométrica como consecuencia de los errores que se dan en la interpretación de la distancia que existe entre su emisor y su receptor. [26]

**GPOD (Dilución de Precisión Geométrica):** Este considera 3 parámetros del posicionamiento tridimensional y el tiempo. Este valor es una medida que se encuentra compuesta por el reflejo de la influencia de la constelación de satélites sobre la precisión combinada de las estimaciones de un tiempo y de la posición que tiene la antena. [26]. Algunos parámetros que tienen en cuenta esta problemática son:

- **PDOP (Dilución de precisión para la posición):** Manifiesta la relación que hay entre el error en

la posición del usuario y el error en la posición del satélite [27]

- HDOP (Dilución de precisión para la posición): Refleja los efectos de la geometría satelital en el componente horizontal de los cálculos de posición. [28]
- VDOP (Dilución de Precisión Vertical): Refleja los efectos de la geometría satelital en el componente vertical del cálculo de posición. [29]

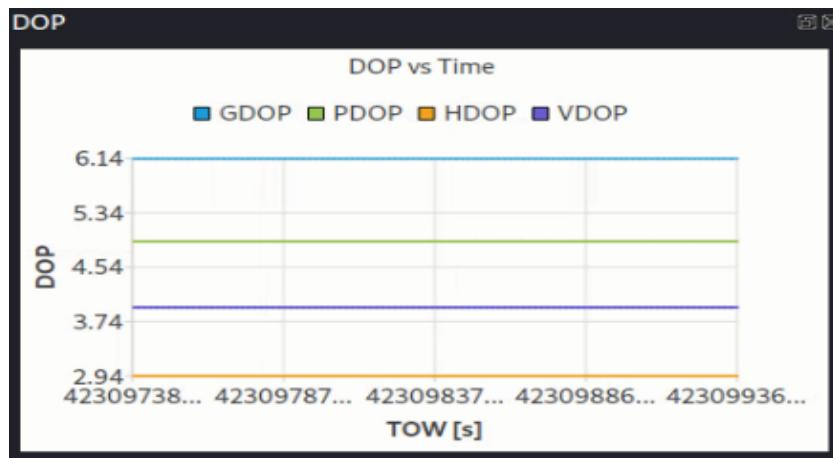


Figura 20: Diagramas GDOP, PDOP, HDOP, VDOP

La imagen que se obtuvo al obtener la posición satelital dio un error aparentemente fue constante en cada una de las variables de GDOP, PDOP, HDOP Y VDOP. Llegando a tener error de 6.14 en GDOP.

## 5.2. Coordenadas

Con el programa de código abierto GNSS-SDR disponible para Ubuntu, se realizaron las pruebas de adquisición, tracking y decodificación sobre señales recibidas en tiempo real.

Como se evidencia en la Figura 17, se logró obtener las coordenadas (latitud, longitud y altitud) luego de un minuto de iniciar la adquisición y el rastreo.

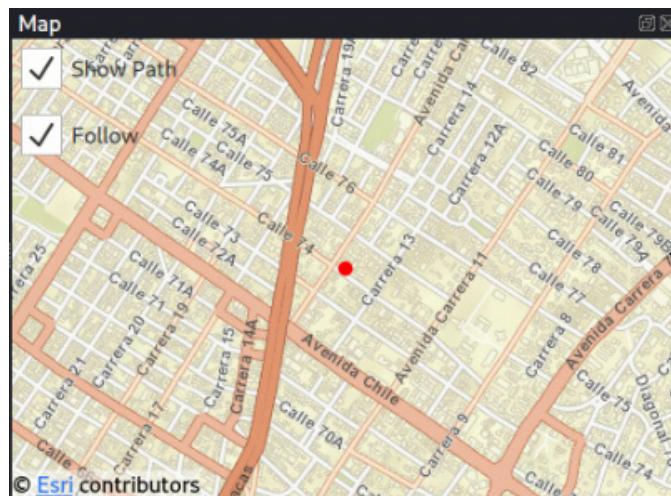


Figura 21: Resultados de la adquisición para cada satélite GPS.

La Figura 21 muestra en el mapa las coordenadas recibidas, estos resultados se obtuvieron en el campus principal de la Universidad Sergio Arboleda, la ubicación de estas coordenadas es verificable en el mapa gracias al Monitor GNSS-SDR.

### 5.3. Métodos de estimación

Con una grabación de la señal GPS arrojada desde GNSS-SDR procesada en MATLAB, se replica la fase de adquisición, es en esta fase donde los métodos de estimación espectral cobran importancia. La Figura 22 muestra la presencia o ausencia de los distintos satélites identificados por el código PRN y con la FFT como método de estimación.

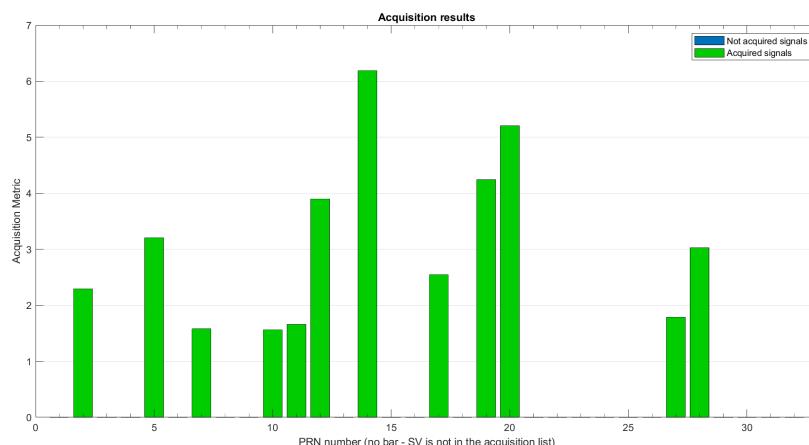


Figura 22: Resultados de la adquisición para cada satélite GPS.

En el Figura 22 el máximo de la función estadística de decisión  $\dot{z}$  se puede identificar fácilmente a simple vista, también se puede observar que los lóbulos laterales, cuyos valores dependen en gran medida del nivel de ruido [2].

Estadística de decisión del registro real de una realización de la señal GPS L1 mediante la implementación del método de detección FFT (a) en presencia del satélite de PRN 23 y (b) en la ausencia del satélite PRN 5.

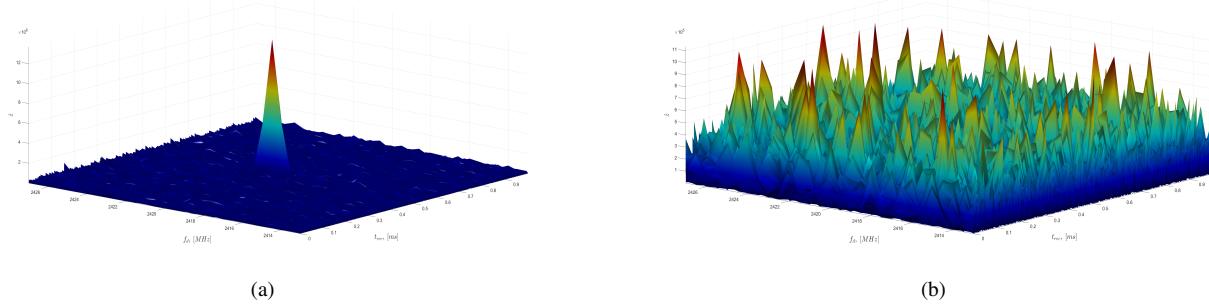


Figura 23: Estadística de decisión del registro real de una realización de la señal GPS L1 mediante la implementación del método de detección FFT (a) en presencia del satélite de PRN 23 y (b) en la ausencia del satélite PRN 5.

En las Figuras 24 26 25 27 se pueden observar las formas de estimación espectral utilizando los métodos no convencionales: 24 Transformada rápida de Fourier (FFT), 26 Periodograma, 25 Yule-Walker, 27 Correlograma. En el Figura 23 el máximo de la función estadística de decisión  $\dot{z}$  se puede identificar fácilmente a simple vista, también se puede observar que los lóbulos laterales, cuyos valores dependen en gran medida del nivel de ruido [2].

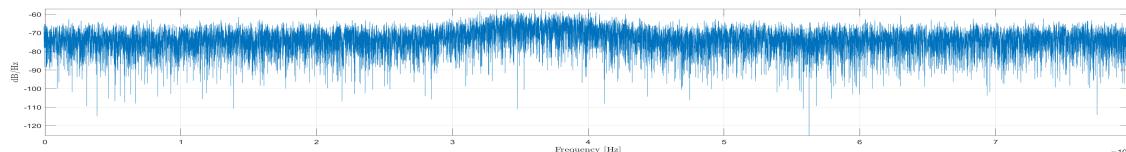


Figura 24: Transformada rápida de Fourier (FFT)

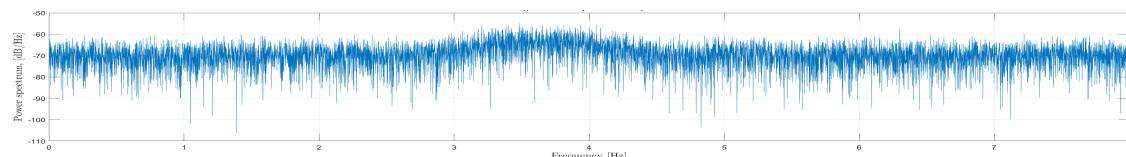


Figura 25: Yule-Walker

El proceso de tracking se inicia con los satélites adquiridos.

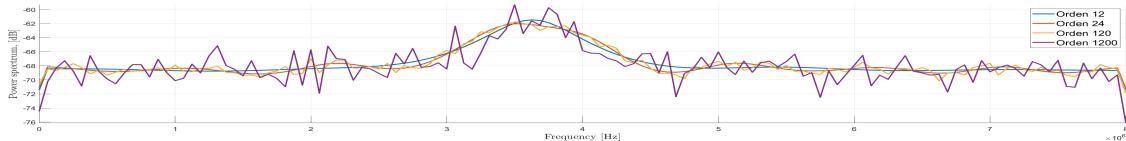


Figura 26: Periodograma

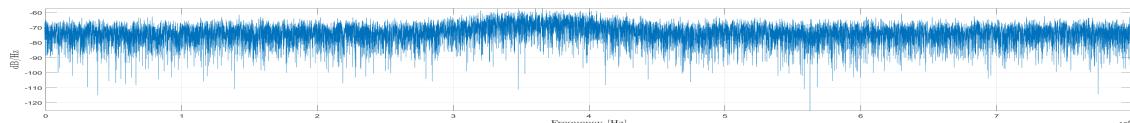


Figura 27: Correlograma

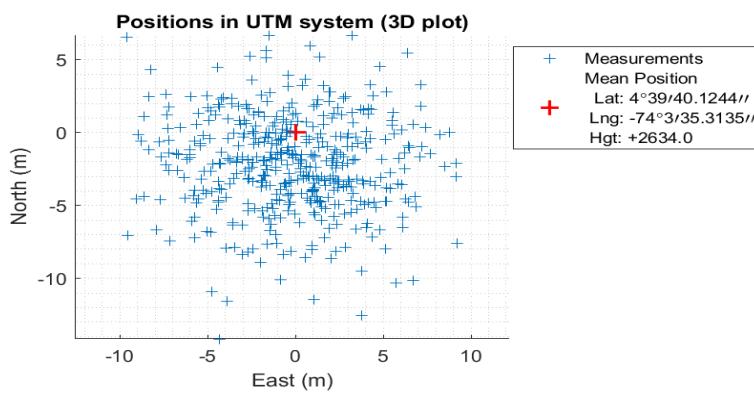


Figura 28: Resultado de la navegación: estimación de coordenadas.

Una vez se completado el tracking para cada satélite, se obtienen los resultados de navegación según la Figura 28, cada punto marcado son mediciones iniciales en el proceso de tracking, cada punto se acerca más al centro debido a que a medida que el tracking avanza la precisión mejora. El punto rojo indica la posición al finalizar el tiempo estipulado para tracking.

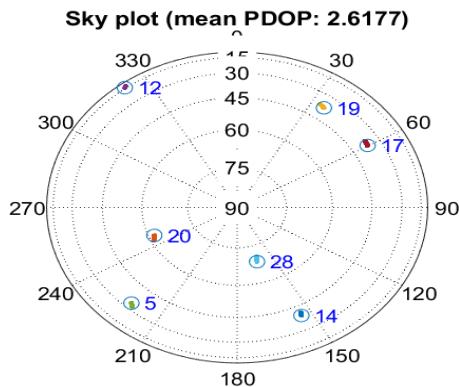


Figura 29: Trazado espacial GNSS.

En la Figura 29 se aprecia el trazado espacial que muestra la ubicación de los satélites visibles. Además, el promedio de la PDOP (Dilución de Precisión en Posición) es de  $2,6177\text{ m}$ , es decir, la

precisión es bastante alta.

## 5.4. Barrido de frecuencia en banda FM

En general, el barrido de frecuencia es funcional para todo el espectro, su limitación radica en el Hardware, la porción de espectro sobre la cual tenga capacidad de detección y la velocidad con la que transmite las muestras de la señal recibida al computador.

Para un uso perceptible y eficiente el barrido de frecuencia se probó en la banda de radio FM.

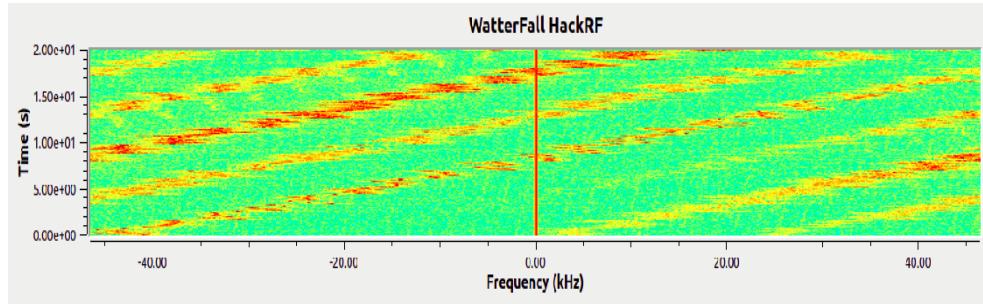


Figura 30: Waterfall barrido de frecuencia

En la Figura 30 es apreciable como en la vista de la gráfica **waterfall** se mueven. Son muy notables los rastros de potencia ya se está usando la banda de radio FM que transmiten a alta potencia.

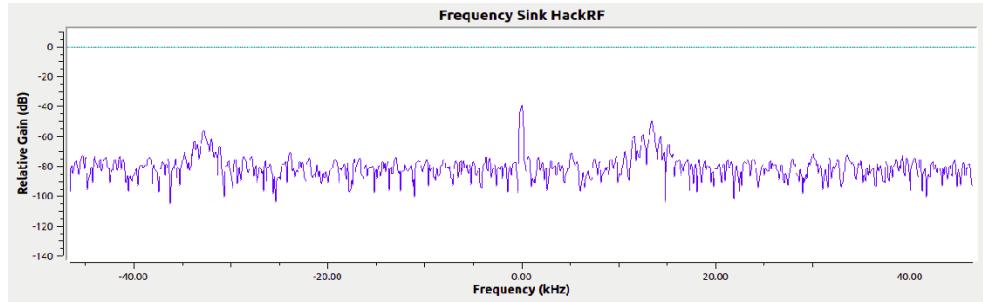


Figura 31: Espectro barrido de frecuencia

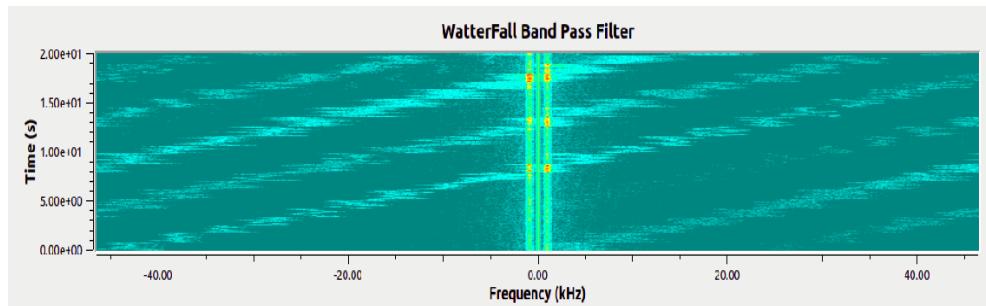


Figura 32: Waterfall con filtro pasa banda

El espectro que se puede ver en la figura 31 va variando a medida que el barrido de frecuencia avanza, es decir, los picos de energía irán moviéndose hacia la izquierda en la ventana de visualización del espectro. Mientras que la figura 32 se ve al igual que en la figura 30 como los rastros de energía de las diferentes frecuencias FM se mueven en la gráfica **waterfall** es una forma en la cual solo se detectan señales mas potentes.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

- Para el desarrollo futuro del proyecto es necesario de mejores equipos tales como, antena GPS de tipo topografía junto con paral y alimentación Bias-Tee que proporcione la potencia suficiente a la antena GPS. Esto con el fin de mejorar los resultados para cada método de estimación espectral, además de facilitar el desempeño del barrido de frecuencia, actualmente no se encuentra muy bien optimizado.
- El espectro es un recurso muy valioso en los sistemas de comunicaciones inalámbricas.
- A través de las oportunidades que ofrece la radio cognitiva y la detección de oportunidades de espectro disponible, se puede utilizar este recurso de manera más eficiente.
- Mediante la implementación de nuevos métodos de estimación espectral y su correspondiente evaluación de eficiencia, se obtiene una visión de otros métodos para diferentes aplicaciones en el campo del análisis de señales.
- Su desarrollo en el software GNU Radio permite tener una solución potable, mantenible, y auto configurable.
- En este trabajo, se propuso un esquema de recepción de señales bajo el paradigma del SDR, que permitirá realizar y validar un estudio comparativo de diferentes métodos de estimación espectral no convencionales (i.e., diferente a la FFT comúnmente aplicada en todos los receptores GNSS) y aplicados a señales GPS en condiciones de alto ruido.
- Se creó un esquema automatizado para la captura de señales GNSS utilizando SDR, GNSS-SDR y su posterior análisis en el paquete matemático de MATLAB.
- En un trabajo futuro, se pretenderá validar con señales GNSS de mejor calidad el desempeño de los métodos, permitiendo su comparación y recomendación para una implementación de un receptor GNSS robusto y complejo.

# Referencias

- [1] Marin, J., Terán, M., Aranda, J. Estudio comparativo de técnicas de estimación espectral paramétricas y no paramétricas para la detección de señales GPS bajo condiciones de alto ruido Comparison of parametric and non-parametric spectral estimation techniques for GPS signals detection in noisy conditions. *potencia*, 7, 896.
- [2] Borre, K., Akos, D., Bertelsen, N., Rinder, P., & Hold Jensen, S. (2007). A Software-Defined GPS and Galileo Receiver (1.<sup>a</sup> ed.).
- [3] KAPLAN, E., & HEGARTY, C. (2017). UNDESTANDING GPS/GNSS Principles and Applications (3.<sup>a</sup> ed.). Boston: ARTECH HOUSE.
- [4] Hofmann, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). GNSS Global Navigation Stelite Systems GPS,GLONASS, Galileo & more (3.<sup>a</sup> ed.). Austria: SpringerWienNewYork.
- [5] Pany, T. (2010). Navigation Signal Processing for GNSS SOFTWARE RECEIVERS (1.<sup>a</sup> ed.). BOSTON: ARTECH HOUSE.
- [6] Ziedan, N. (2006). GNSS Receivers for Weak Signals (1.<sup>a</sup> ed., pp.). BOSTON: ARTECH HOUSE. BOSTON: ARTECH HOUSE.
- [7] Radio Definida por Software - Software Defined Radio (SDR) — J\_RPM [Video]. (2017). Recuperado 9 de agosto de 2022, de <https://www.youtube.com/watch?v=-QNj5rcWeqE>
- [8] Todo lo que necesitas saber sobre Filtros RC. (s/f). Solectroshop.com. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://solectroshop.com/es/blog/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-filtros-rc-n52>
- [9] Garrido-Villén, N. (2014, septiembre 9). Señal GPS - GNSS: portadora, código y mensaje (5). Natalia Garrido-Villén. <https://nagarvil.webs.upv.es/señal-gps/>
- [10] Bienvenidos a Gps.gov. (s/f). Gps.gov. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de [https://www.gps.gov/spanish.php#:~:text=El/20Sistema/20de/20Posicionamiento/20Global/20\(GPS\)/20es/20un/20sistema/20de,civiles/20en/20todo/20el/20mundo](https://www.gps.gov/spanish.php#:~:text=El/20Sistema/20de/20Posicionamiento/20Global/20(GPS)/20es/20un/20sistema/20de,civiles/20en/20todo/20el/20mundo)
- [11] Código C/A (S/f). Servidor-alicante.com. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de [https://glosarios.servidor-alicante.com/gps/codigo-c\\_a](https://glosarios.servidor-alicante.com/gps/codigo-c_a)
- [12] Emergencia-REMER, R. R. (s/f). VADEMECUM REMER. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum17/vdm02560.htm>
- [13] Rt-sdr.com. (s/f). Rt-sdr.com. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://www.rt-sdr.com/>
- [14] Carrera, D. E., & Rodríguez De Haro, J. (2016). Análisis software y hardware del SDR HackRF One. Ugr.es. [https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/48019/RodriguezHaro\\_PFC\\_SDR\\_HackRF.pdf;jsessionid=144FFD6511FB03A9C52D53BA509D33F3?sequence=1](https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/48019/RodriguezHaro_PFC_SDR_HackRF.pdf;jsessionid=144FFD6511FB03A9C52D53BA509D33F3?sequence=1)
- [15] SDRSharp users guide. (2018, mayo 8). Rt-sdr.com. <https://www.rt-sdr.com/sdrsharp-users-guide/>
- [16] About GNU Radio. (s/f). GNU Radio. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://www.gnuradio.org/about>
- [17] ¿Qué significa GPS?. (S/f). Geotab.com. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://www.geotab.com/es-latam/blog/qu%C3%A9-significa-gps/>
- [18] Trilateración .(S/f). Wikipedia.org. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Trilateraci%C3%B3n>
- [19] Ettus Research, & a National Instruments Brand. (s/f). USRP B210 USB software defined radio (SDR). Ettus Research. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>

- [20] Ettus USRP B210: 2x2, 70MHz-6GHz SDR/cognitive radio. (s/f). Digilent. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://digilent.com/shop/ettus-usrp-b210-2x2-70mhz-6ghz-sdr-cognitive-radio/>
- [21] Rodríguez de Haro, J. (2017). Análisis software y hardware del SDR HackRF One. Universidad de Granada.
- [22] Las últimas antenas GPS/GNSS hacen que el posicionamiento en centímetro sea una realidad. (S/f). Digikey.com. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://www.digikey.com/es/blog/latest-gps-gnss-antennas-making-centimeter-positioning-a-reality>
- [23] Antena Gps (1575.42mhz) Conector Sma Navegación Gps - \$ 29.000. (s/f). Com.co. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-522129438-antena-gps-157542mhz-conector-sma-navegacion-gps-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-522129438-antena-gps-157542mhz-conector-sma-navegacion-gps-_JM)
- [24] Fernández-Prades, C. (2022, agosto 3). Overview. GNSS-SDR. <https://gnss-sdr.org/docs/overview/>
- [25] Juan, Á. C. 2021. Gnss-sdr-monitor. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://github.com/acebrianjuan/gnss-sdr-monitor>
- [26] Wikipedia contributors. (s/f). GPS. Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=GPS&oldid=144640344>
- [27] -alicante.com. (2015). Dilución de precisión de posición (PDOP- Position Dilution of Precision) (Topografía, Geodesia y GPS). <https://glosarios.servidor-alicante.com/topografia-geodesia-gps/dilucion-de-precision-de-posicion-pdop-position-dilution-of-precision>
- [28] -alicante.com. (2015). Dilución de Precisión Horizontal (HDOP) (Topografía, Geodesia y GPS). <https://glosarios.servidor-alicante.com/topografia-geodesia-gps/dilucion-de-precision-horizontal-hdop>
- [29] -alicante.com. (2015). Dilución de Precisión Vertical (VDOP) (Topografía, Geodesia y GPS). <https://glosarios.servidor-alicante.com/topografia-geodesia-gps/dilucion-de-precision-vertical-vdop>
- [30] (S/f). Amazon.com. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de [https://www.amazon.com/NooElec-Tiny-TCXO-compatible-ultrabaja/dp/B077H7Q7GL/ref=sr\\_1\\_1\\_sspa?adgrpid=129433964044&gclid=CjwKCAiAvOeQBhBkEiwAxutUVPJqRlsZ5laK7SwCPIyGX0Q2OO8JT5qcJBfZ4YmEoy\\_RIJgFyZ3s1hoC96YQAvD\\_BwE&hvadid=548821195112&hvdev=c&hvlocphy=1003659&hvnetw=g&hvqmt=e&hvrand=4060572710725449840&hvtargid=kwd-700991853780&hydadcr=11423\\_13270161&keywords=nooelec+tiny+tcxo&qid=1645891939&sr=8-1-spons&psc=1&spLa=ZW5jcnlwGVkUXVhbGlmaWVvPUExUkYwUEtaTjlFMIZOJmVuY3J5cHRIZElkPUEwNDEzMjEwTU5MUU9VQUISS0UzJmVuY3J5cHRIZEFkSWQ9QTA2MDY5NzJEVU1YMklaNjRESTYmd2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGYmYWNOaW9uPWNsaWNrUmVkaXJIY3QmZG9Ob3RMb2dDbGlja10cnVI](https://www.amazon.com/NooElec-Tiny-TCXO-compatible-ultrabaja/dp/B077H7Q7GL/ref=sr_1_1_sspa?adgrpid=129433964044&gclid=CjwKCAiAvOeQBhBkEiwAxutUVPJqRlsZ5laK7SwCPIyGX0Q2OO8JT5qcJBfZ4YmEoy_RIJgFyZ3s1hoC96YQAvD_BwE&hvadid=548821195112&hvdev=c&hvlocphy=1003659&hvnetw=g&hvqmt=e&hvrand=4060572710725449840&hvtargid=kwd-700991853780&hydadcr=11423_13270161&keywords=nooelec+tiny+tcxo&qid=1645891939&sr=8-1-spons&psc=1&spLa=ZW5jcnlwGVkUXVhbGlmaWVvPUExUkYwUEtaTjlFMIZOJmVuY3J5cHRIZElkPUEwNDEzMjEwTU5MUU9VQUISS0UzJmVuY3J5cHRIZEFkSWQ9QTA2MDY5NzJEVU1YMklaNjRESTYmd2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGYmYWNOaW9uPWNsaWNrUmVkaXJIY3QmZG9Ob3RMb2dDbGlja10cnVI)
- [31] es/EFE, R. (2021, diciembre 5). Europa lanza dos nuevos satélites de navegación Galileo. RTVE.es. <https://www.rtve.es/noticias/20211205/europa-lanza-nuevos-satelites-navegacion-galileo/2236862.shtml>
- [32] Fernández-Prades, C. (2016, julio 8). GNSS signals. GNSS-SDR. <https://gnss-sdr.org/docs/tutorials/gnss-signals/>
- [33] FFT. (s/f). Nti-audio.com. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de <https://www.nti-audio.com/es/servicio/conocimientos/transformacion-rapida-de-fourier-fft>
- [34] (S/f). Upc.edu. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9988/11\\_analisis\\_alta\\_resolucion.pdf?sequen ce=11&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9988/11_analisis_alta_resolucion.pdf?sequen ce=11&isAllowed=y)
- [35] Leon, A. G. (s/f). Ecuaciones de Yule-Walker. Egormaximenko.com. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de [http://esfm.egormaximenko.com/students/Garcia\\_Leon\\_2015\\_ecuaciones\\_de\\_Yule\\_Walker.pdf](http://esfm.egormaximenko.com/students/Garcia_Leon_2015_ecuaciones_de_Yule_Walker.pdf)
- [36] Mañanas Villanueva, M. Á. (1999). Análisis de la actividad muscular respiratoria mediante técnicas temporales, frecuenciales y estadísticas. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [37] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media.

- [38] Perdoch, J. (2019, octubre). Block diagram of GNU Radio software and HackRF One hardware system [Gráfico]. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-GNU-Radio-software-and-HackRF-One-hardware-system\\_fig1\\_336578019](https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-GNU-Radio-software-and-HackRF-One-hardware-system_fig1_336578019)
- [39] de Cabecera, H. (s/f). GPS Spoofing con HackRF desde entornos Windows. Hackerdecabecera.com. Recuperado el 12 de agosto de 2022, de <https://www.hackerdecabecera.com/2020/05/gps-spoofing-con-hackrf-desde-entornos.html>
- [40] Diseño e implementación de un sistema radar utilizando sistema SDR a través de tecnología USRP para aplicaciones topográficas. (s/f). 1Library.co. Recuperado el 12 de agosto de 2022, de <https://1library.co/document/zpn67loy-diseno-implementacion-sistema-utilizando-sistema-tecnologia-aplicaciones-topograficas>.
- [41] FFT. (s/f). Nti-audio.com. Recuperado el 12 de agosto de 2022, de <https://www.nti-audio.com/es/servicio/conocimientos/transformacion-rapida-de-fourier-fft>

## 7. Anexos

- El manual del usuario para la ejecución del trabajo se puede obtener en el siguiente enlace:  
**Tutorial de uso**
- Para una información adicional se puede ingresar en el siguiente repositorio: **GitHub**
- Cronograma de actividades.

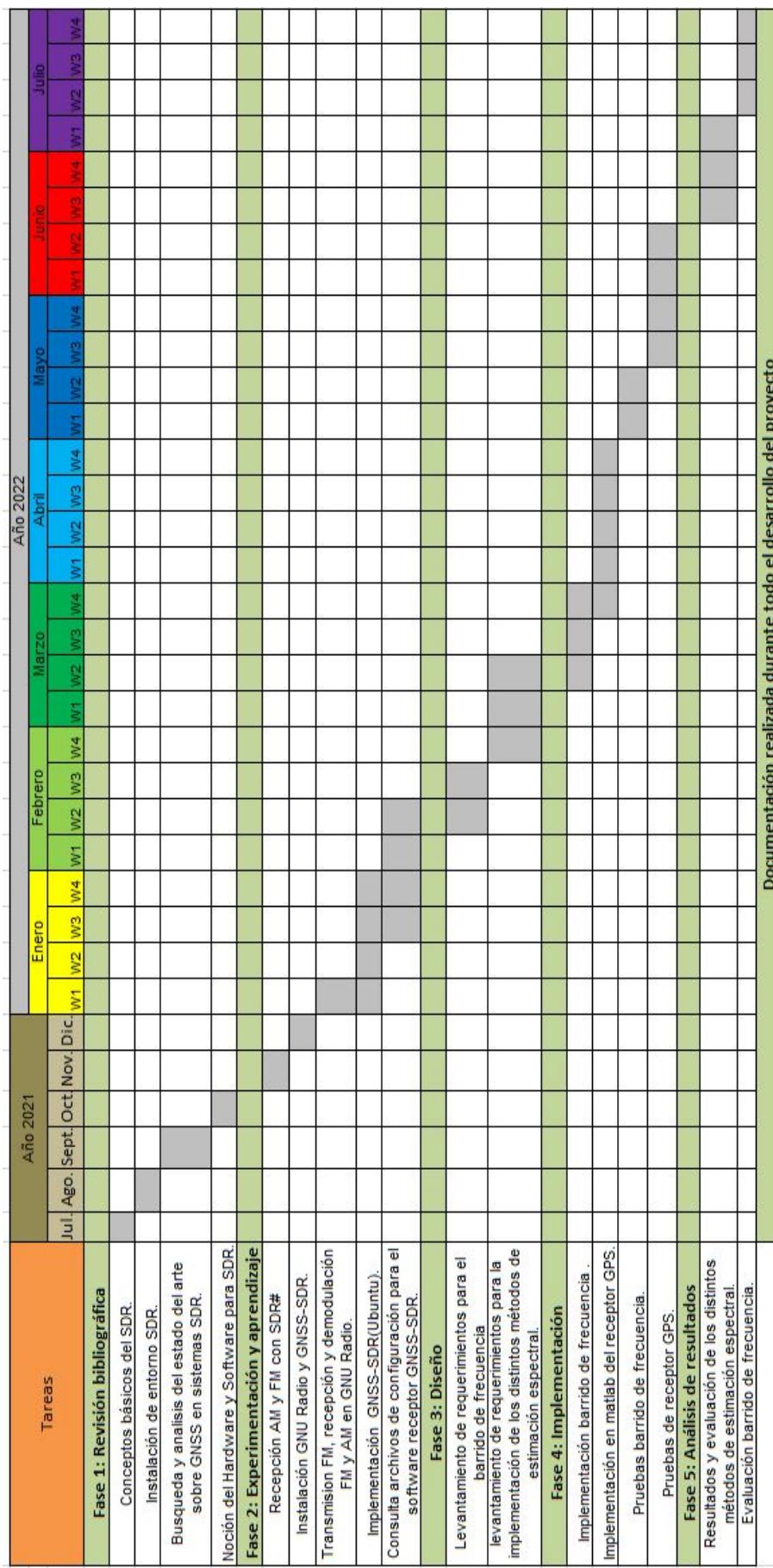


Figura 33: Cronograma de actividades