



**UNIVERSIDAD
SERGIO ARBOLEDA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y ESTIMACIÓN
ESPECTRAL DE SEÑALES GPS CON TÉCNICAS NO
CONVENCIONALES USANDO SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR).**

Proyecto semillero IoT opción de grado.

**Presentado por:
Jefferson Dario Marin Giraldo**

**DIRECTOR:
Ing. Juan Manuel Aranda Lopez King, Ph.D.
Ing. Marco Tulio Teran De La Hoz, Ph.D.**

Resumen

La detección del espectro consiste en obtener una medida del espectro disponible, logrando determinar la presencia o ausencia de usuarios licenciados o transmisiones de radio frecuencia en una región geográfica determinada con el objetivo de acceder de forma oportuna al espectro e identificar señales de interés. Dicho lo anterior, esta investigación se centra en evaluar el desempeño para determinar la presencia o ausencia de señales de interés en las diferentes bandas del espectro electromagnético haciendo uso de diferentes métodos de estimación espectral tanto paramétricos (Burg, Yule-Walker) como no paramétricos (Periodograma, FFT, Correlograma) implementados. Esto se hace a través de la medición de probabilidades de detección en función de la relación señal/ruido (SNR) para una determinada probabilidad de falsa alarma mediante la implementación de un detector de energía, utilizando el software de procesamiento de señales GNU Radio (programados en Python), bloques externos al software (Módulos out-of-tree) y el hardware HackRF One para la implementación.

Se logró detectar señales de interés con cada uno de los métodos implementados y las mediciones experimentales muestran que los métodos paramétricos poseen un mejor desempeño que los métodos no paramétricos a pesar de tener un mayor nivel de complejidad computacional y depender su desempeño de los parámetros configurados, sin embargo, los métodos no paramétricos ofrecen un desempeño razonable en menor tiempo.

Contenido

| | |
|---|-----------|
| Resumen | II |
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 3 |
| 1.1.1. Descripción del problema | 3 |
| 1.1.2. Justificación | 3 |
| 1.2. Objetivos | 5 |
| 1.2.1. Objetivo General | 5 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 5 |
| 1.3. Hipótesis | 5 |
| 1.4. Alcance y limitaciones | 5 |
| 1.4.1. Alcances | 5 |
| 1.4.2. Limitaciones | 6 |
| 1.5. Diseño metodológico | 6 |
| 1.6. Recursos | 8 |
| 1.7. Cronograma de actividades | 9 |
| 2. Referente Teórico | 10 |
| 2.1. Marco teórico | 10 |
| 2.1.1. Introducción a SDR | 11 |
| 2.1.2. Software para SDR | 12 |
| 2.1.3. Dispositivos SDR relevantes en el mercado. | 13 |
| 2.1.4. Dispositivos para SDR | 13 |
| 2.1.5. Señal GPS | 15 |
| 2.1.6. SNR (Relación señal/ruido) | 19 |
| 2.1.7. Técnica de detección del espectro | 19 |
| 2.1.8. Estimación del espectro | 24 |
| 3. 3. Diseño e implementación | 28 |
| 3.1. Diseño | 28 |
| 3.1.1. Metodología | 28 |
| 3.1.2. Especificación de requerimiento | 28 |
| 3.1.3. Composición de la solución propuesta. | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2. Implementación | 32 |
| 3.2.1. Implementación de los métodos de estimación espectral | 33 |
| 3.2.2. Generación de la señal seleccionada (GPS) | 35 |
| 3.2.3. Generación del SNR (Relación señal/ruido) deseado | 39 |
| 3.2.4. Implementación de la técnica de detección del espectro (Detector de Energía) | 40 |
| 4. Experimentación | 44 |
| 4.1. Diseño de la experimentación | 44 |
| 4.2. Implementación de las simulaciones | 45 |
| 5. Resultados y Análisis | 49 |
| 5.1. Resultados de la ejecución de los bloques en GNU Radio | 49 |
| 5.1.1. Resultados del detector de Energía | 51 |
| 5.1.2. Resultados de las simulaciones | 53 |
| 5.2. Análisis de resultados | 56 |
| 5.2.1. Métodos de estimación espectral implementados | 56 |
| 5.2.2. Método de detección del espectro seleccionado | 56 |
| 5.2.3. Desempeño del detector variando los métodos de estimación espectral | 57 |
| 6. Conclusiones | 58 |
| 6.1. Conclusiones | 58 |
| A. Anexo 1. Generación del SNR (Relación señal/ruido) deseado. | 63 |
| B. Anexo 2. Parámetros de los métodos de estimación espectral | 67 |

1. Introducción

En la actualidad, el crecimiento de las tecnologías de radio, el despliegue de dispositivos inalámbricos y el desarrollo de nuevas aplicaciones han generado un mayor uso del espectro radioeléctrico. Siendo un recurso limitado, las políticas actuales de asignación fija del espectro bajo licencia por los entes reguladores de cada país generan que ciertas bandas de frecuencias se encuentren congestionadas mientras que otras se encuentren libres la mayor parte del tiempo, causando que el espectro sea subutilizado [17]. Por esta razón surgen iniciativas para el desarrollo de nuevas tecnologías que buscan hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico [1], una de ellas es la radio cognitiva (CR) la cual utiliza la capacidad de autoconfiguración para detectar el entorno electromagnético y cambiar los parámetros de configuración de radio modificando el comportamiento del sistema para adaptarse al entorno en el que opera [7],[17].

Para detectar la existencia de señales de interés en una región geográfica definida se requiere obtener un sentido del espectro disponible, esto comprende una serie de técnicas robustas de análisis de señales con una mayor complejidad desde el punto de vista computacional [1]. Existen diferentes técnicas de detección del espectro, entre las que se encuentran el detector de energía, el cual permite determinar la presencia o ausencia de una señal de interés comparando el nivel de salida del detector respecto a un umbral que depende del ruido [1],[7],[8]. Se puede realizar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia más comúnmente utilizado en la literatura a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), seguido de otros métodos de estimación espectral tanto paramétricos (Burg, Yule-Walker) como no paramétricos (Periodograma, FFT, Correlograma). Con el objetivo de conocer el desempeño de cada uno de los métodos mencionados este trabajo los implementa en GNU Radio como bloques en los que se usa un detector de energía para detectar señales GPS en condiciones de baja relación señal/ruido (SNR).

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el marco teórico, en la sección 3 el diseño e implementación del sistema, en la sección 4 experimentación, en la sección 5 resultados y análisis de los resultados y la sección 6 conclusiones.

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Descripción del problema

Las políticas actuales de asignación fija del espectro por los entes reguladores de cada país generan que ciertas bandas se encuentren congestionadas mientras que otras se encuentren libres la mayor parte del tiempo, como consecuencia se genera una utilización inadecuada y esporádica de este recurso [17]. Adicionalmente las implementaciones para detección y estimación del espectro están basadas en la FFT dejando a un lado otros métodos de estimación espectral que podrían brindar mejores métricas en detección, complejidad, tiempo de ejecución e inmunidad al ruido.

Tratar de obtener señales inalámbricas estables puede llegar a ser bastante complejo, ya que no siempre se hace con facilidad, la forma de configuración de los dispositivos transmisores, receptores, interferencias cercanas, el ruido, además de otros factores pueden incidir drásticamente en las comunicaciones inalámbricas, determinar la presencia o ausencia de una señal de interés en cierto espacio geográfico en una banda de frecuencias definidas, en algunas ocasiones se puede tornar complicado debido a los problemas anteriormente descritos. Los satélites del sistema de posicionamiento global (GPS) emiten señales de radio y estas llegan al receptor a baja potencia lo que hace a este tipo de señales susceptibles a interferencias, estas interferencias pueden provenir de diversas fuentes, incluidas emisiones de radio en bandas cercanas, interferencias intencionales, no intencionales [18], esto hace que no se pueda distinguir el contenido de la señal e incluso detectar. Detectar señales GPS es de vital importancia para obtener la ubicación de cualquier objeto en la tierra, determinar la precisión, velocidad y el tiempo preciso de vehículos aéreos, náuticos y otros tipos de usuarios con gran precisión en el globo terráqueo, también sirve para encontrar, predecir y modificar la trayectoria de objetos en movimiento.

Formulación del problema

¿Cómo detectar la presencia o ausencia de señales GPS en cierto espacio geográfico en bandas de frecuencias definidas aplicando diferentes métodos de estimación espectral de potencia de señales discretas sobre un detector de energía en el dominio de la frecuencia, que brinden mejor desempeño en condiciones de baja relación señal/ruido (SNR)?

1.1.2. Justificación

El crecimiento constante en los últimos años de las tecnologías de radio, el despliegue de dispositivos inalámbricos y aplicaciones genera retos importantes para hacer uso adecuado del espectro el cual es un recurso limitado. Las políticas actuales de asignación fija del espectro por los entes reguladores de cada país generan que ciertas bandas se encuentren congestio-

nadas mientras que otras se encuentren libres la mayor parte del tiempo, como consecuencia se genera una utilización inadecuada y esporádica de este recurso [17].

Los sistemas de radiocomunicación tradicionalmente se han implementado en su totalidad en hardware por lo que solo funcionan para un tipo de operación, limitando su alcance. Al establecerse un diseño con determinados parámetros, en este sistema resulta imposible modificarse a menos de que se cambien los módulos de hardware, representando una desventaja adicional. Para evitar este cambio constante de hardware en el proyecto se hace uso de la tecnología de radio definida por software (SDR). Una Radio Definida por Software consiste en que un mismo elemento de hardware es capaz de realizar diferentes funciones, en distintos periodos de tiempo cambiando parámetros de configuración mediante software [15]. Para detectar la existencia de señales de interés en una región geográfica definida se requiere obtener un sentido del espectro disponible, lo que conlleva una serie de técnicas robustas de análisis de señales con mayor complejidad desde el punto de vista computacional [1]. Existen diferentes técnicas de detección del espectro, una de ella es el detector de energía el cual permite determinar la presencia o ausencia de una señal de interés comparando el nivel de salida del detector respecto a un umbral que depende del ruido [1],[7]. Para determinar la presencia o ausencia de una señal de interés a través de un detector de energía se puede realizar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia; en el dominio de la frecuencia usualmente se usa la Transformada Rápida de Fourier (FFT), sin embargo, existen otros métodos de estimación espectral tanto paramétricos como no paramétricos que no se encuentran implementados en el software a utilizar (GNU Radio) los cuales permiten estimar el espectro, estos métodos implementados y usados a través de un detector de energía permiten determinar la presencia o ausencia de señales de interés en una banda de frecuencias determinadas incluso en condiciones de baja relación señal/ruido (SNR).

La implementación de los métodos de estimación espectral y su correspondiente evaluación de eficiencia brindan una visión de otros métodos de estimación para determinar cómo está distribuida la potencia o la energía de una señal sobre las distintas frecuencias con la que está formada y usar estos métodos para diferentes aplicaciones. Además, la implementación de diferentes métodos de estimación del espectro en el software GNU Radio permitirá el uso de los métodos que previamente no se encontraban implementados en el software y definir una metodología de implementación para nuevos bloques en GNU Radio.

De acuerdo con lo expuesto, este proyecto de investigación implementa un sistema de detección y estimación espectral usando Software Defined Radio (SDR), para no solo garantizar una solución de bajo coste, portable, mantenible, y auto configurable, sino también detectar la presencia o ausencia de señales GPS con bajos niveles de complejidad en implementación y computación. El presente proyecto es aplicado sobre señales GPS, sin embargo, abre campo para futuras investigaciones en las que se podría implementar soluciones de inteligencia de

señales con el fin de identificar objetivos vía RF.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Implementar un sistema de detección y estimación espectral de señales GPS utilizando métodos paramétricos, no paramétricos y Software Defined Radio (SDR).

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar una señal del sistema de posicionamiento global (GPS).
- Seleccionar e implementar como bloques en el software GNU Radio diferentes métodos de estimación espectral tanto paramétricos como no paramétricos.
- Implementar como bloque en el software GNU Radio un método de detección del espectro basado en el criterio de Neyman-Pearson.
- Evaluar el desempeño para los diferentes métodos de estimación espectral implementados midiendo la probabilidad de detección en función de la relación señal/ruido (SNR) con una probabilidad de falsa alarma dada.

1.3. Hipótesis

El desempeño para detectar señales a baja relación señal ruido (SNR) de los sistemas de detección se puede estudiar y mejorar variando los métodos de estimación espectral, por ende, la detección depende del método de estimación espectral seleccionado y de los parámetros configurados.

1.4. Alcance y limitaciones

1.4.1. Alcances

A continuación, se muestran los alcances que el proyecto presenta para su ejecución.

- Implementar diferentes métodos de estimación espectral contenidos en [4] de la librería spectrum en Python como bloques en GNU Radio.
- Implementar un método de detección (detector de energía) espectral como bloque en GNU Radio.

- Evaluar el desempeño de diferentes métodos de estimación espectral que brinde mejores métricas de rendimiento de acuerdo con la probabilidad de detección en función de la relación señal/ruido (SNR) y tiempo de ejecución.

1.4.2. Limitaciones

La principal limitación en el desarrollo de este proyecto es el bajo acceso a la información sobre implementaciones e investigaciones similares. Para algunos de los métodos de estimación del espectro existe poca documentación y su implementación resulta confusa, además la forma de adquisición de señales GPS está sujeta a implementaciones ya realizadas con información generalizada.

1.5. Diseño metodológico

En esta sección se presenta el diseño metodológico implementado para el desarrollo del proyecto de investigación, el cual consta de 4 fases expuestas en la Fig. 1-1.

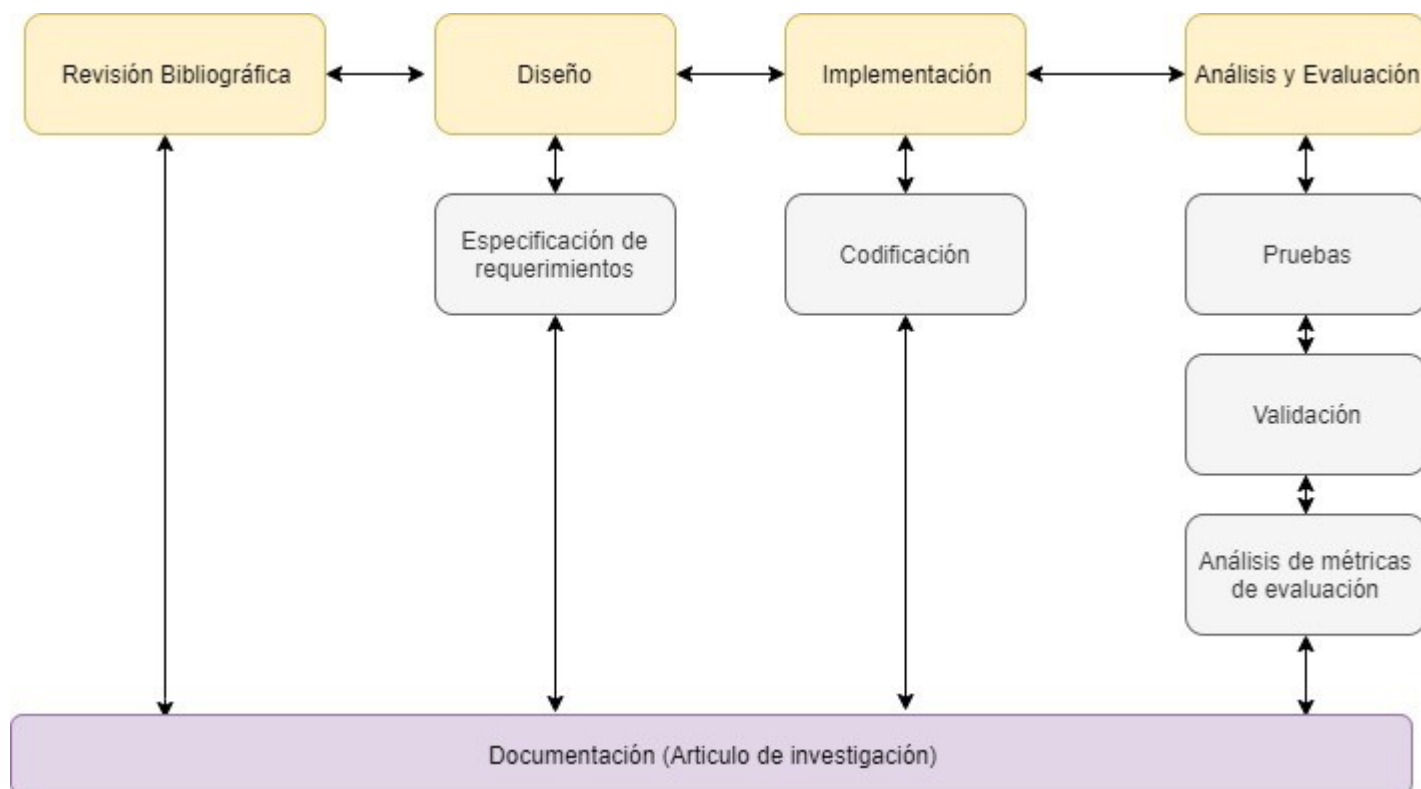


Figura 1-1.: Diseño Metodológico

Fase 1 - Revisión Bibliográfica: Consiste en obtener información referente al tema de investigación, de fuentes como revistas científicas, artículos de investigación, tesis, libros,

páginas web, repositorios, entre otros. Se llevarán a cabo los siguientes pasos:

1. Búsqueda bibliográfica
2. Establecimiento de criterios de selección
3. Recuperación de la información, fuentes documentales
4. Evaluación de la calidad de la información recopilada
5. Análisis de la variabilidad, fiabilidad y validez de la información
6. Estado del arte
7. Documentación

Fase 2 – Diseño: En esta fase se establecen y analizan los requerimientos, se identifican los métodos de estimación y detección del espectro a implementar, los componentes de hardware y software y el diseño de la solución propuesta para la captura y detección de señales de radio en las bandas de interés.

Fase 3 – Implementación: Consiste en llevar a cabo el proceso de implementación de los métodos de estimación del espectro, siguiendo estos pasos:

1. Instalación de los requerimientos en software
2. Generación de señales GPS
3. Implementación de los métodos de estimación del espectro como bloques en GNU Radio.
4. Implementación del método de detección.

Fase 4 – Evaluación: La evaluación de los métodos de estimación y detección del espectro se hace a través de la medición de probabilidades de detección en función de la relación señal/ruido (SNR) para una determinada probabilidad de falsa alarma, se establecen como métricas las curvas ROC (relación señal ruido (SNR) vs probabilidad de detección (Pd)) y se realizan simulaciones bajo condiciones controladas, donde se obtienen resultados, ajustes de parámetros y análisis.

La documentación es un proceso transversal en el desarrollo del presente proyecto por lo que en cada una de las fases se realiza la respectiva documentación.

1.6. Recursos

Se establecen los recursos tanto en Hardware como en software para llevar a cabo la elaboración del proyecto de investigación:

| Hardware | Costo |
|---------------------------|---------|
| Hardware SDR (HackRF One) | 300 USD |

Tabla 1-1.: Hardware

| | |
|--|---------------------------------|
| Lenguajes de programación | Python |
| Sistema operativo | Ubuntu |
| Hardware (PC) en el que se realiza las simulaciones. | i5-10, RAM 8 GB, 10 GB de disco |
| Formato de almacenamiento de los resultados | .csv |
| IDE | Visual Studio Code |
| Hardware SDR | HackRF one |
| Software SDR | GNU Radio |

Tabla 1-2.: Herramientas tecnológicas

2. Referente Teórico

Referente al análisis de la documentación obtenida en el estado del arte se puede concluir que en el mercado existen sistemas de detección y estimación, no obstante, la mayor parte están implementados en hardware por lo que tienden a ser costosos, no varían los métodos de estimación espectral; y no existen análisis concisos que comparen los diferentes métodos.

Para la elaboración del siguiente proyecto se toman diferentes fuentes tales como: revistas científicas, artículos de investigación, tesis, libros, repositorios, páginas web, entre otros, con el fin de recopilar información existente sobre el tema que sirvan de base para el inicio, desarrollo y culminación del presente proyecto.

Como referente teórico en primer lugar se obtiene información concerniente a la tecnología SDR tanto en hardware como software para identificar que dispositivo y software SDR se utilizara en el desarrollo del proyecto con su correspondiente configuración y uso, en segundo lugar, se obtiene información relacionada con el sistema GPS con el objetivo de obtener suficiente información teórica relacionada con el funcionamiento y configuración de este tipo de señales, en tercer lugar se obtiene información relacionada con la estimación de espectro, técnicas, métodos de detección y estimación, parámetros, funcionamiento teórico, como referente para posteriormente consultar los métodos de estimación espectral a implementar y finalmente se obtiene información de las métricas de evaluación.

2.1. Marco teórico

Desde su invención, los sistemas de radiocomunicación se han implementado en su totalidad en hardware, por lo que en los sistemas de radio tradicionales funcionan solo para un tipo de operación, una vez que se establece un diseño con determinados parámetros éstos no se pueden modificar a menos de que se cambien los módulos de hardware. El Software-defined radio (SDR) es una tecnología revolucionaria que involucra las telecomunicaciones con el desarrollo de software, permitiendo la utilización de este para controlar casi todas las funciones de un sistema de comunicaciones. En telecomunicaciones existen conceptos teóricos que podrían ser implementados de modo que a través de esta tecnología se pueden desarrollar módulos versátiles para la experimentación con comunicaciones de radio y conceptos de procesamiento de señales [24]. Con la implementación de SDR se pueden realizar diferentes implementación y aplicaciones, desde identificación y caracterización de señales, transmisión

de estas, análisis, entre otras, en definitiva, la funcionalidad es reconfigurable por software incluso en tiempo de ejecución [16].

2.1.1. Introducción a SDR

Un SDR se puede definir como un sistema de radiocomunicaciones donde la mayor parte de sus componentes son implementados a través de software en lugar de hardware, para ello se hace uso de un dispositivo embebido programable que obtiene la información y la transmite a un computador para ser procesada [19].

Este tipo de sistemas permite el uso de microprocesadores de uso general para el procesamiento de señales, lo que reduce la complejidad del sistema ya que no se requiere la implementación completa de los módulos en hardware reduciendo considerablemente los costos. Un sistema basado en Software Defined Radio (SDR) es flexible ya que posibilita gran variedad de configuraciones. Este tipo de sistema esta compuesto por dos elementos principales: un dispositivo de hardware que recibe las señales, y un software que se encarga de configurar el dispositivo y procesar las señales [19].

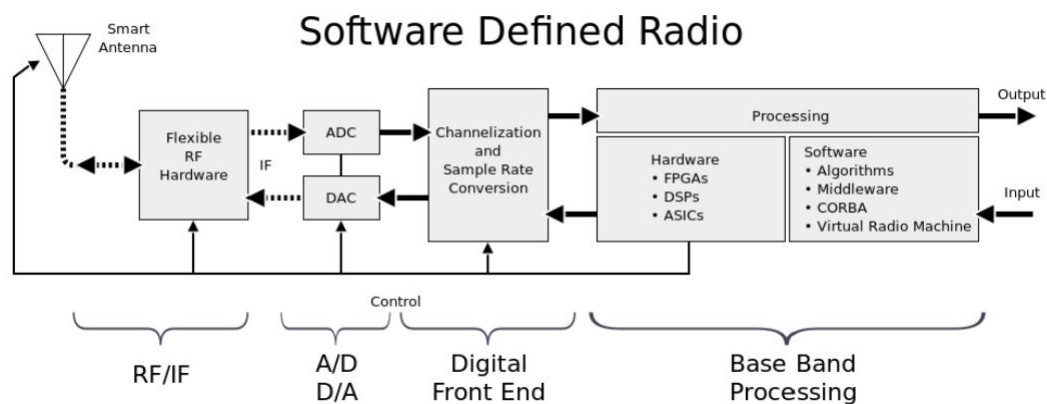


Figura 2-1.: Diagrama de bloque genérico de un sistema basado en Software Defined Radio (SDR). [19].

Ventajas de un sistema basado en Software Defined Radio (SDR):

- Permite crear y manipular dispositivos inalámbricos interoperables.
- Múltiples modos de operación.
- Reconfiguración.
- Menor costo de desarrollo.

- Son herramientas programables, rápidas, compactas y baratas.
- La mayoría de los componentes de un radio se implementen a través de software, las funciones de la capa física son definidas por software.
- Permite crear nuevos productos con un mismo hardware, los dispositivos pueden programarse remotamente corrección y actualización mientras estos están en funcionamiento, lo que reduce el costo en mantenimiento.
- Se pueden crear transmisores, receptores, para cualquier tipo de señal.
- Se pueden implementar en SDR filtros, ecualizadores, moduladores, demoduladores, codificadores, entre muchos otros.

2.1.2. Software para SDR

Un dispositivo SDR requiere un software para realizar su correspondiente configuración. En la red existe una amplia gama de software que permite la realización de esta tarea, en su mayoría son Open Source, de los cuales se destacan los siguientes:

- SigintOS
- SDR# (SDR Sharp)
- SDR CONSOLE V3
- Gqrx
- GNU Radio
- MATLAB y Simulink

GNU Radio

Es un conjunto de herramientas de software gratuito, libre y de código abierto que permite la creación de bloques de procesamiento de señales para implementar radios de software, permite el uso de hardware de radio frecuencia (RF) de bajo costo que sea disponible para la creación de SDR, o usado sin ningún dispositivo de hardware en entornos de simulación. Es ampliamente utilizado en la investigación, la industria, la academia, el gobierno y los entornos de aficionados para apoyar tanto la investigación de comunicaciones inalámbricas como los sistemas de radio del mundo real [20].

2.1.3. Dispositivos SDR relevantes en el mercado.

En el mercado existe una amplia gama de dispositivos para SDR, cada uno de estos poseen sus propias características mostrados en la Tabla 2-2.

| Nombre comercial | Frecuencia mínima (MHz) | Frecuencia máxima (MHz) | Ancho de Banda | Resolución ADC | ¿Transmite? | Precio |
|------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------|-------------|---------|
| RTL-SDR 2831 | 24 | 1766 | 3,2 | 8 | No | 10-20 |
| Funcube Pro | 64 | 1700 | 0,096 | 16 | No | 150 |
| Funcube Pro+ | 410 | 2050 | 0,192 | 16 | No | 200 |
| HackRF | 30 | 6000 | 20 | 8 | Si | 300 |
| BladeRF | 300 | 3800 | 40 | 12 | Si | 400-650 |
| USRP 1 | 10 | 6000 | 64 | 12 | Si | 700 |
| MatchStiq | 300 | 3800 | 28 | 12 | Si | 4500 |

Figura 2-2.: Dispositivos SDR más relevantes en el mercado. [22].

2.1.4. Dispositivos para SDR

RTL-SDR

RTL-SDR es un dongle USB de \$ 25, es un dispositivo de bajo costo, este dispositivo se puede usar como un escáner de radio basado en computadora para recibir señales de radio en vivo (no se requiere internet). Dependiendo del modelo en particular, podría recibir frecuencias desde 500 kHz hasta 1.75 GHz, posee una frecuencia de muestreo máxima es de 3.2 MS/s (millones de muestras por segundo) [21].



Figura 2-3.: RTL-SDR R820T2. [21].

HACKRF ONE

HackRF One (ver Fig. 2-4) es la plataforma de hardware actual para el proyecto HackRF. Es un dispositivo para Software Defined Radio capaz de transmitir o recibir señales de radio desde 1 MHz a 6 GHz fabricado por Great Scott Gadgets [19].



Figura 2-4.: HackRF One. [19].

El HackRF One es un dispositivo fabricado para la realización de pruebas y desarrollo de actuales y nuevas tecnologías de radio, consiste en una plataforma de hardware de código abierto que se puede usar como un periférico USB, o programado para operar de forma autónoma [19].

Características [19]:

- Frecuencia de funcionamiento: 1 MHz a 6 GHz.
- Half-duplex transceiver.
- Capacidad de muestreo desde 2 Msps hasta 20 millones de muestras por segundo.
- Muestreo de las señales con 8 bits en cuadratura, 8 bits para fase I y 8 para la componente en cuadratura Q.
- Compatible para los principales programas para SDR tanto en Linux como en Windows.
- Botones para configurar convenientemente el dispositivo.
- Uso de la interfaz USB.
- Es una plataforma de hardware libre.
- Posee entradas de reloj independientes para sincronización con un módulo externo.
- Ganancia de amplificadores configurable por software.

Se requiere de una antena para operar el dispositivo. Se recomienda el uso de ANT 500 que opera desde 75 MHz hasta 1 GHz, o ANT700 que opera desde 300 MHz hasta 1,1 GHz. HackRF One no cumple con las regulaciones de transmisión de señales de radio, por ende, el uso de ciertas bandas queda bajo la responsabilidad del usuario [19].

Consumo de hackrf One [19]:

- Stand-by Mode: 5 V 0.23 A
- Transmission Mode: 5 V 0.40 A
- Reception Mode: 5 V 0.44 A

A continuación se presenta la imagen del layout del dispositivo HackRF One [19].

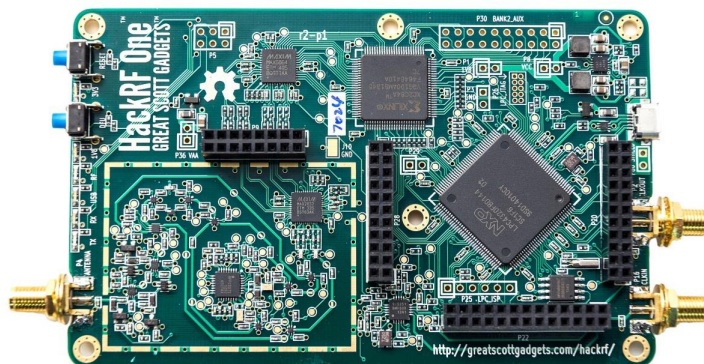


Figura 2-5.: Placa de circuito impreso de HackRF One. [19]

2.1.5. Señal GPS

Desde su inicio en la década de 1970 el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de EE. UU ha evolucionado en términos de precisión, rendimiento y disponibilidad, y ha incorporado constante mejoras en sus tres segmentos, el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario. Este sistema permite determinar en toda la tierra la posición de cualquier objeto con una precisión en metros e incluso centímetros [5].

Segmento Espacial: El segmento espacial está compuesto por la constelación de satélites del sistema, los cuales se encargan de transmitir las señales de radionavegación, consta de una constelación de 24 satélites distribuidos en 6 planos orbitales con 4 satélites en cada plano, lo que permite como mínimo que 4 satélites sean visibles las 24 horas del día en cualquier punto de la tierra [25].

Segmento de Control: El segmento de control terrestre es el encargado de monitorear y controlar la constelación GPS. Este segmento garantiza que los satélites envíen los mensajes correctamente en el momento adecuado, diagnostican el funcionamiento de cada satélite, resuelven anomalías en los satélites y actualizan los mensajes de navegación [25].

Segmento de Usuario: El segmento de usuario está conformado por todos los dispositivos receptores GPS, que pueden ser de tipo civil o militar, estos dispositivos reciben la señal de

los satélites del GPS y las procesa para calcular la posición tridimensional y la hora precisa [25].

Bandas de frecuencia de operación.

El sistema GPS usa tres bandas de frecuencias para transmitir las señales de los satélites, L1, L2, L5, y se derivan de una frecuencia fundamental de $f_0=10.23$ MHz [30].

L1: 1575.42 MHz, se usa para proporcionar los códigos de C/A y los códigos de cifrado de precisión P(Y) [30].

L2: 1227.60 MHz, Esta señal se utiliza para transportar el código P(Y), así como la señal L2C y códigos [30].

L5: 1176.45 MHz, Se está proponiendo para uso civil como una señal de salvaguarda de vida (Safety-of-life signal) [30].

Señal GPS.

En general la señal GPS consta de tres partes: una señal portadora, uno o más códigos de ruido pseudoaleatorio (PRN) y el mensaje de navegación [30].

La señal L1 consta de 3 códigos PRN: el código C/A, el Código P y Y, el Código P y el Código Y son de usos militares [30]. En la Fig. 2-6 se muestra la combinación del código C/A y el mensaje de navegación con la portadora en L1.

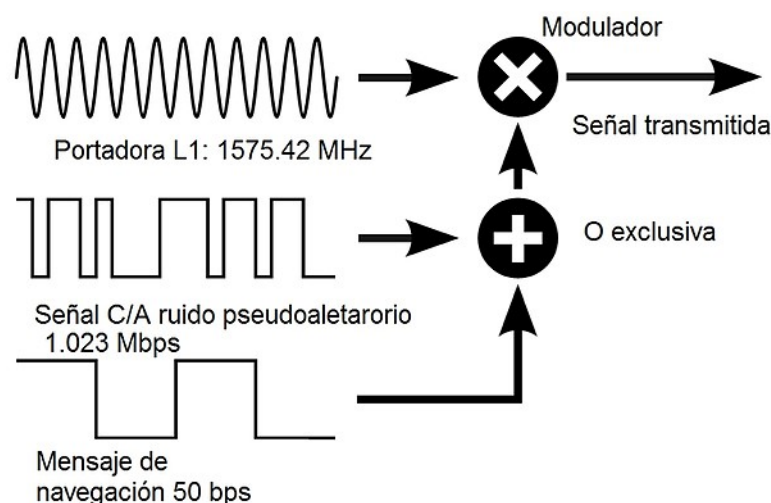


Figura 2-6.: Generación de señal GPS en L1. [30].

El código C/A sirve para identificar a cada satélite y se repite continuamente, estos códigos poseen muy poca correlación entre sí, el receptor se sincroniza al código e identifica al satélite y puede medir el retraso de la señal, así como el mensaje de navegación. Para los códigos C/A se utilizan los códigos Gold [30].

Las señales GPS poseen las siguientes características [30]:

- Modulación: PSK (Modulación por desplazamiento de fase)
- Técnica de acceso al medio: CDMA (Acceso múltiple por división de código)
- Bandas: UHF (Frecuencia ultra alta) de 1 GHz a 2 GHz.
- Longitud de onda: varios centímetros.
- Permiten transmisiones de menor potencia.
- Se propagan fácilmente por el espacio.
- Poca capacidad de transmisión de datos.

Visualización de la señal generada en frecuencia.

Las señales GPS llegan al receptor a un nivel de muy baja potencia, y La señal L1 (1575.42 MHz) de cada satélite está modulada por dos códigos pseudoaleatorios, el código de adquisición aproximada (C/A) y el código de precisión (P). Cada satélite tiene un código C/A diferente, lo que genera un ruido pseudoaleatorio distinto (PRN), clave para que el receptor identifique cada satélite. El ancho de banda de una señal GPS es superior al necesario para poder evitar en mayor medida interferencias y asegurar la comunicación entre el transmisor (satélites) y el receptor (usuario) [6]. El espectro GPS se representa en la Fig. **2-7**.

Thermal Noise Floor

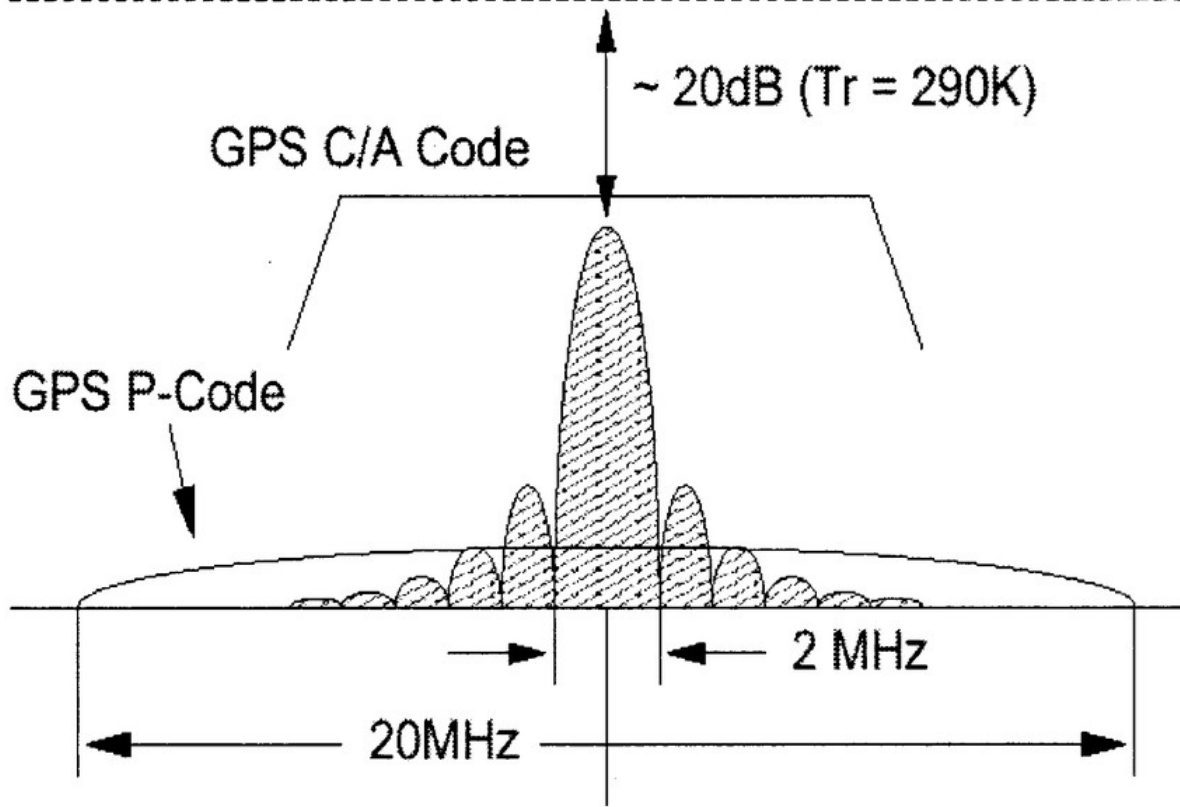


Figura 2-7.: Espectro GPS en la banda L1. [6].

La señal GNSS en la salida del RF Front-end se puede expresar mediante la siguiente forma (2-1).

$$y(t, \gamma) = \sqrt{2P} h_{NM}(t - t_{rec}) h_{PRN}(t - t_{rec}) \cdots \cdots \cos(2\pi(f_{IF} + f_d)t + \varphi_0) + \eta(t) \quad (2-1)$$

donde,

$\gamma[t_{rec}, f_d, \varphi_0]$ – vector de parámetros de radionavegación de la señal;

t_{rec} – tiempo de retardo;

f_d – corrimiento Doppler de frecuencia;

f_{IF} – frecuencia intermedia;

P – potencia de la señal;

h_{PRN} – función de código PRN;

h_{NM} – función envolvente del mensaje de navegación;

φ – fase inicial de la señal de radionavegación recibida;

$\eta(t)$ – AWGN con media cero.

2.1.6. SNR (Relación señal/ruido)

SNR se define como la relación entre la potencia de la señal (información significativa) y la potencia del ruido (señal no deseada) [7].

Se puede definir como [7].

$$SNR = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_w^2} \quad (2-2)$$

La potencia media RMS (Root Mean Square) se usa normalmente para medir la amplitud de una señal de dominio de tiempo.

De acuerdo con [14] el valor del SNR puede ser calculado como:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2 \quad (2-3)$$

Donde A es la raíz cuadrada media (RMS) de amplitud.

Para obtener el valor del SNR en dB tenemos [14]:

$$SNR_{db} = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2 \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right) = (A_{signal,db} - A_{noise,db}) \quad (2-4)$$

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{RMS(signal)}{RMS(noise)} \right) \quad (2-5)$$

Potencia promedio.

La potencia promedio se define como la energía por muestra [13].

$$P_x = \frac{\epsilon_x}{N} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2 \text{ (average power de x)} \quad (2-6)$$

2.1.7. Técnica de detección del espectro

La detección de espectro (Spectrum Sensing) consiste en obtener una medida del espectro disponible, determinando la existencia o la ausencia de usuarios licenciados o transmisiones en RF en una región geográfica definida [1]. Un correcto análisis del espectro permite

identificar las características de cada una de las bandas de frecuencia a través de diferentes métricas tales como el ancho de banda, retardo, capacidad, nivel de interferencia, patrones del uso del canal, entre otras; con el objetivo de reconocer las ventajas o desventajas de usar estas frecuencias, la presencia o ausencia de transmisiones y finalmente los huecos espectrales [1].

Técnicas de detección del espectro.

La Fig. 2-8 muestra las diferentes áreas que corresponden al sensado del espectro, donde se hace énfasis en los algoritmos disponibles, los cuales permiten identificar la presencia de una transmisión de interés en una frecuencia específica; estos conceptos son usados para radio cognitiva [7].

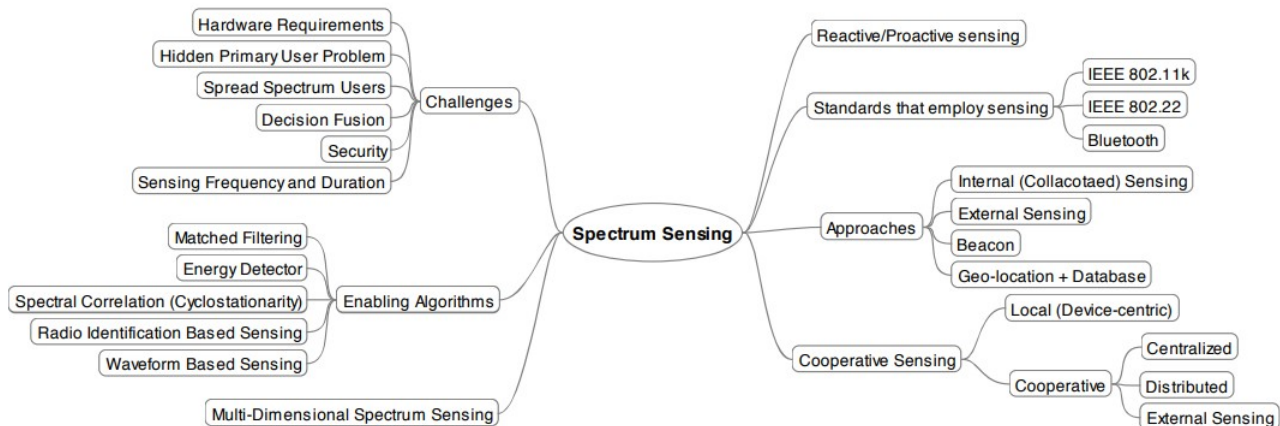


Figura 2-8.: Esquema de detección del espectro. [7].

Técnicas fundamentales.

Existen tres técnicas (detección de energía, detección por filtro adaptado, Detección basada en características cicloesta-cionarias) que representan información fundamental que permiten desarrollar algoritmos de detección más elaborados [1],[7].

1. **Detección de energía:** Se detecta la energía de las señales en las bandas de frecuencias de interés, lo que se busca es un balance adecuado entre la probabilidad de falsa alarma (P_{fa}) y probabilidad de detección (P_d) para obtener un umbral λ óptimo [1].
2. **Detección por filtro adaptado:** un filtro adaptado adecua su respuesta al impulso de manera tal que, al tomar las muestras de la señal en un tiempo específico, la salida del filtro sea equivalente a la salida de un receptor de correlación [1].

3. **Detección basada en características cicloestacionarias:** Se explota la naturaleza periódica de las señales moduladas, una señal que porta información es muy diferente al ruido y a interferencias [1].

El método de sensado seleccionado es el detector de energía, ya que permite detectar la energía en las bandas de frecuencias de interés y no requiere información previa de las propiedades de la señal transmitida, la información del canal o incluso el tipo de modulación, este método posee bajo nivel de complejidad en términos de implementación y computación [1],[7].

Detector de Energía.

Es la forma más común de detectar el espectro, debido al bajo nivel de complejidad en implementación y computación, y no requiere ningún conocimiento previo de la señal [1],[7]. Las señales son detectadas comparando el nivel de salida de un detector energía respecto a un umbral que depende del ruido, este método está basado en un problema de decisión binaria (presencia o ausencia de señal) a través de la observación de las muestras recibidas, la selección del umbral en esta técnica es crucial ya que depende de la varianza del ruido, un error en la estimación de la varianza del ruido disminuye significativamente el desempeño, esta técnica posee un desempeño limitado en condiciones de baja relación señal ruido, y en detección de señales en espectro ensanchado [1],[10]. La implementación de este método utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT), entonces el valor absoluto de las muestras es elevado al cuadrado y ponderado, para luego ser comparado con un umbral de decisión que depende del ruido [9], [23].

En la Fig. 2-9 se muestra el funcionamiento del detector de energía a través de un diagrama de bloques; inicialmente se recibe una señal compleja en banda base la cual pasa por un filtro pasa bajos para eliminar componentes indeseables que se encuentra fuera de la banda de interés, luego la señal pasa por un método de estimación espectral que generalmente es la FFT. Posteriormente, se calcula la magnitud al cuadrado de las muestras, y pasa por un bloque integrador donde se obtiene el promedio de las muestras y finalmente se realiza la comparación con el valor del umbral definido previamente el cual depende del ruido y las interferencias que pueda contener la señal.

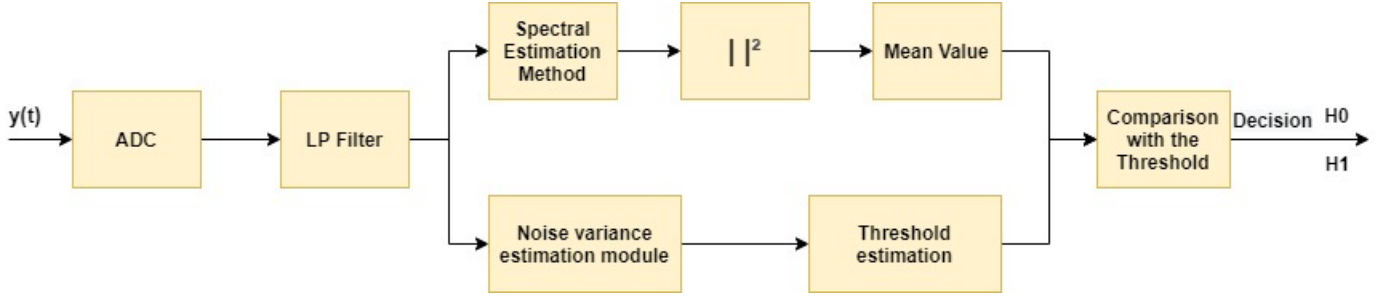


Figura 2-9.: Esquemático del detector de energía en el dominio de la frecuencia. [8].

El problema del sensado de espectro puede ser modelado como una prueba de hipótesis, lo cual es equivalente a decidir entre 2 hipótesis [8]:

$$y(t) = \begin{cases} H_0 = n(t) & \text{Señal Ausente} \\ H_1 = s(t) + n(t) & \text{señal presente} \end{cases} \quad (2-7)$$

$y(t)$: Señal recibida

H_1 : Indica que hay señal presente (señal primaria)

H_0 : Indica ausencia de señal (solo ruido)

$s(t)$: Señal transmitida

$n(t)$: Ruido blanco Gaussiano (AWGN)

H_0 : es la hipótesis nula, indica la ausencia de señal.

H_1 : es la hipótesis alternativa, indica presencia de señal

Para realizar la detección se define un umbral λ . La métrica utilizada generalmente por este tipo de detector es la energía media del total (T) de las muestras detectadas en una banda del espectro en particular [8].

$$T = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t)|^2 \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \lambda \quad (2-8)$$

λ : umbral de decisión

Cuando $T < \lambda$, el detector concluye la hipótesis H_0 que indica ausencia de señal primaria “solo ruido”, por el contrario, cuando $T > \lambda$ el detector determina la presencia de una señal primaria.

El detector está descrito mediante dos probabilidades:

1. **Probabilidad de falsa alarma (P_{fa}):** El detector determine que hay señal cuando realmente no había señal primaria.

2. Probabilidad de detección (P_d): El detector determina acertadamente la existencia de señal primaria cuando hay una señal primaria.

$$\begin{aligned} P_{fa} &= P(T > \lambda \mid H_0) \\ P_d &= P(T > \lambda \mid H_1) \end{aligned} \quad (2-9)$$

Probabilidad de detección fallida puede ser descrita como [8]:

$$P_{df} = 1 - P_d \quad (2-10)$$

Haciendo uso de la simplificación de considerar el estadístico de distribución normal se tiene [8]:

$$P_{fa} = P(T_y > \lambda)_{|H_0} = Q \left(\frac{\lambda - \sigma_n^2}{\sigma_n^2 \sqrt{\frac{2}{N}}} \right) \quad (2-11)$$

$$P_d = P(T_y > \lambda)_{|H_1} = Q \left(\frac{\lambda - (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}{(\sigma_s^2 + \sigma_n^2) \sqrt{\frac{2}{N}}} \right) \quad (2-12)$$

Donde $Q()$ representa la función Gaussian Q-Function [12],[11].

$$Q(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{\sqrt{2}}}^{\infty} \exp(-t^2) dt \right) \quad (2-13)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \quad (2-14)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \quad (2-15)$$

$$\operatorname{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (2-16)$$

La función inversa Q se puede relacionar con la función inversa del error y se representa de la siguiente manera.

$$Q^{-1}(y) = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2y) = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2y) \quad (2-17)$$

El umbral es obtenido de la ecuación de P_{fa} [8].

$$\lambda = \sigma_w^2 (Q^{-1}(P_{fa}) \sqrt{2N} + N) \quad (2-18)$$

donde:

σ_w^2 Desviación estándar del ruido.

2.1.8. Estimación del espectro

La estimación espectral es el problema de estimar el espectro de potencia de un proceso estocástico dados datos parciales, generalmente solo un número finito de muestras de la función de autocorrelación de precisión limitada. El análisis espectral considera el problema de determinar el contenido espectral de una señal en el dominio del tiempo a partir de un conjunto finito de mediciones, mediante técnicas paramétricas o no paramétricas [26, pp. 12]. En otras palabras, nos informa de cómo está distribuida la potencia o la energía (según el caso) de una señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada. La longitud de registro infinita de la secuencia de datos es una limitación importante en la calidad de la estimación del espectro de potencia [27, pp. 896].

Dada: una señal finita grabada.

Determinar: La distribución de la potencia de la señal sobre la frecuencia.

$\omega = (\text{angular}) \text{ frecuencia en radianes} / (\text{intervalo de muestreo})$

$f = \omega / 2\pi = \text{frecuencia en ciclos} / (\text{intervalo de muestreo})$

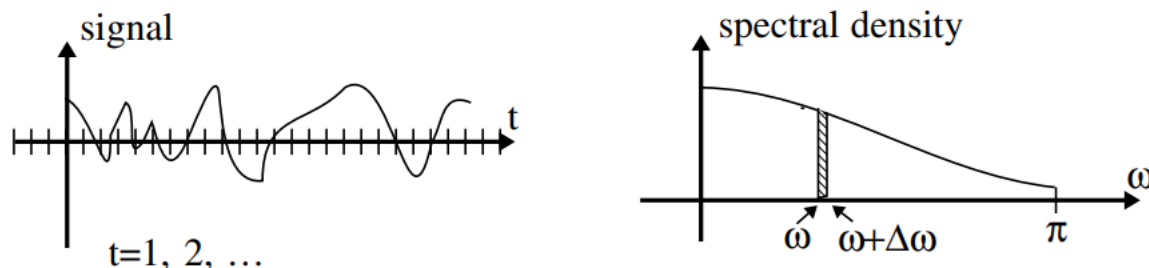


Figura 2-10.: Problema de la estimación espectral.

Métodos de estimación del espectro.

Existen dos tipos de métodos para realizar la estimación del espectro.

- **Paramétricos:** Consisten en postular un modelo para los datos, que proporciona un medio para parametrizar el espectro, y así reducir el problema de estimación espectral al de estimar los parámetros en el modelo asumido [26, pp. 2]. Se basan en modelos paramétricos de una serie temporal.
- **No paramétricos:** Se aplica un filtro pasa banda sobre la señal con un ancho de banda estrecho, que se extiende a través de la banda de frecuencia de interés, y la potencia de salida del filtro dividida por el ancho de banda del filtro se usa como una medida del contenido espectral de la entrada al filtro. Se les conoce con el nombre de métodos

clásicos o no paramétricos [26, pp. 2], se basan en la transformada discreta de Fourier. No necesita obtener los parámetros de la serie de tiempo antes de usar estos métodos.

Los métodos paramétricos pueden ofrecer estimaciones del espectro más precisas que los métodos no paramétricos en casos en que los datos satisfagan el modelo asumido, sin embargo, si los datos no satisfacen los modelos asumidos, los métodos no paramétricos superan a los paramétricos debido a la sensibilidad de los métodos paramétricos a errores en el modelo [26, pp. 2]. Los métodos paramétricos pueden obtener mejor estimación del espectro que los métodos no paramétricos en los casos de que la longitud de la señal es corta [29].

Aplicaciones [26, pp. 1]:

- Monitoreo de vibraciones y detección de fallas.
- Hallazgo de periodicidades ocultas.
- Procesamiento de voz y dispositivos de audio.
- Diagnóstico médico.
- Estudio de sismología y movimiento de tierra.
- Diseños de sistemas de control.
- Radar, Sonar.
- Análisis espectral espacial.
- Ubicación de origen utilizando matrices de sensores.
- **Sismología:** exploración petrolera, terremotos.
- **Radar y sonar:** ubicación de las fuentes.
- **Voz y audio:** reconocimiento.
- **Astronomía:** periodicidades.
- **Economía:** componentes estacionales y periódicos.
- **Medicina:** Electroencefalografía (EEG), Electrocardiograma (ECG), Imagen por resonancia magnética funcional (fMRI).
- Teoría de circuitos, sistemas de control.

En la Fig. 2-11, se puede visualizar el tipo de método de estimación espectral.

| Método de estimación espectral | no paramétrico | paramétrico |
|---------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Periodogram | X | |
| Correlogram | X | |
| Blackman–Tukey | X | |
| Bartlett Method | X | |
| Welch Method | X | |
| Daniell | X | |
| Yule–Walker | | X |
| Least Squares | | X |
| Burg | | X |
| ARMA | | X |
| Ma | | X |

Figura 2-11.: Métodos de estimación espectral (tipo).

Implementaciones de los métodos de estimación espectral de potencia.

Los métodos de estimación espectral están implementados en diferentes plataformas, en las que se destacan GNU Radio, Matlab y Python. Python y Matlab tienen implementaciones de la mayoría de los métodos de estimación espectral, sin embargo, GNU radio tiene implementado como método de estimación espectral la FFT. Para GNU Radio existe una implementación de diferentes métodos de estimación espectral como módulos (out-of-tree module) [28] los cuales ofrecen un conjunto de herramientas para la estimación espectral.

La Fig. 2-12 muestra la comparación de diferentes métodos de estimación espectral paramétricos, sus ventajas, desventajas y características.

| | Burg | Covarianza | Covarianza modificada | Yule-Walker |
|-------------------------------------|---|---|---|--|
| Características | No aplica ventana a los datos | No aplica ventana a los datos | No aplica ventana a los datos | Aplica la ventana a los datos |
| | Minimiza los errores de predicción hacia delante y hacia atrás en el sentido de mínimos cuadrados, con los coeficientes AR restringidos para satisfacer la recursividad L-D | Minimiza el error de predicción hacia delante en el sentido de mínimos cuadrados | Minimiza los errores de predicción hacia delante y hacia atrás en el sentido de mínimos cuadrados | Minimiza el error de predicción hacia delante en el sentido de mínimos cuadrados (también llamado "Método de autocorrelación") |
| Ventajas | Alta resolución para registros de datos cortos | Mejor resolución que Y-W para registros de datos cortos (estimaciones más precisas) | Alta resolución para registros de datos cortos | Funciona, así como otros métodos para registros de datos grandes |
| | Siempre produce un modelo estable | Capaz de extraer frecuencias de datos consistentes en o más sinusoides puros ^p | Capaz de extraer frecuencias de datos consistentes en o más sinusoides puros ^p | Siempre produce un modelo estable |
| | | | No sufre división de líneas espectrales | |
| Desventajas | Ubicaciones pico altamente dependientes de la fase inicial | Puede producir modelos inestables | Puede producir modelos inestables | Funciona relativamente mal para registros de datos cortos |
| | Puede sufrir división espectral de líneas para sinusoides en ruido, o cuando el orden es muy grande | Sesgo de frecuencia para estimaciones de sinusoides en ruido | Las ubicaciones de los picos dependen ligeramente de la fase inicial | Sesgo de frecuencia para estimaciones de sinusoides en ruido |
| | Sesgo de frecuencia para estimaciones de sinusoides en ruido | | Sesgo de frecuencia menor para estimaciones de sinusoides en ruido | |
| Condiciones para la no singularidad | | El orden debe ser menor o igual que la mitad del tamaño del fotograma de entrada | El orden debe ser menor o igual que 2/3 el tamaño del marco de entrada | Debido a la estimación sesgada, la matriz de autocorrelación está garantizada a una definición positiva, por lo tanto, no singular |

Figura 2-12.: Comparación de algunos métodos paramétricos [29].

3. 3. Diseño e implementación

3.1. Diseño

3.1.1. Metodología

Para el desarrollo del sistema se eligió la metodología de Proceso Unificado de Rational (RUP), por ser una metodología flexible, centrada en el producto que permite el desarrollo del sistema de extremo a extremo y reduce riesgos en el desarrollo.

A través de reuniones inicialmente se establecen los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema y se realiza un análisis detallado de los mismos obteniendo un documento que los especifique con formato IEEE 830. Luego se realiza el diseño de clases, definición de interfaces, casos de prueba y delimitación de la tecnología a usar. Se procede con la construcción del producto por medio de una serie de iteraciones y para cada una de ellas se asignan actividades relacionadas a los requerimientos con mayor prioridad, se gestionan cambios, se realizan pruebas, analizan los resultados obtenidos y se mitigan los problemas con el fin de reducir riesgos; este proceso tiene tantas iteraciones hasta que se termine la evaluación e implementación completa del producto.

3.1.2. Especificación de requerimiento

La especificación de requerimientos es expuesta en el documento con formato IEEE 830, el cual está constituido por 3 secciones. En la primera sección se realiza una introducción al mismo y se ilustra de manera general la visión del sistema. En la segunda sección se hace una descripción general del sistema, de esta manera se llega a conocer cómo funciona el sistema, los datos obtenidos, el manejo de datos, restricciones, suposiciones y dependencia. Y la última sección es donde están definidos de manera detallada los requisitos funcionales y no funcionales que debe cumplir el sistema.

A continuación se enuncian los requerimientos.

- **Funcionales.**

- El sistema debe permitir la modificación de parámetros de los bloques y la conexión entre los mismos.

- El sistema debe permitir estimar y visualizar el espectro seleccionando diferentes métodos de estimación espectral.
- El sistema debe permitir obtener los valores de la relación señal/ruido (SNR)
- El sistema debe permitir detectar señales de interés seleccionando una probabilidad de falsa alarma para los distintos métodos de estimación espectral de acuerdo con un piso de ruido seleccionado.
- El sistema debe permitir evaluar el desempeño de los diferentes métodos de estimación espectral para detectar señales bajo diferentes condiciones de relación señal/ruido (SNR).

■ **No funcionales.**

- **Requisitos de rendimiento:** La aplicación deberá mostrar los resultados en tiempos cortos y sin uso desmedido de recursos computacionales.
- **Seguridad:** Garantizar la seguridad del sistema con respecto a la información y datos
- **Fiabilidad:** Garantizar la validez de los resultados obtenidos.
- **Disponibilidad:** Ejecución en tiempo real en cualquier momento que el usuario lo requiera.
- **Mantenibilidad:** Actualización y documentación constante, mantenimiento en caso de fallos.
- **Portabilidad:** Portabilidad en ejecución sobre GNU Radio 3.7 y Linux (Ubuntu).

3.1.3. Composición de la solución propuesta.

Software.

Para la implementación del sistema se utiliza herramientas para radio definida por software (SDR), con este fin se seleccionó la herramienta de software GNU Radio dada sus ventajas por ser un software de código abierto, versátil y poseer herramientas disponibles para el procesamiento digital de señales (DSP).

Hardware.

Como hardware SDR se seleccionó el HackRF One debido a que es una plataforma de hardware libre, es compatible con diferentes plataformas SDR, permite realizar transmisiones en el caso de que esto sea requerido, su frecuencia de funcionamiento es amplia, permite capturar las señales de interés, su costo es asequible y cumple con los requerimientos para el desarrollo del sistema.

Solución Propuesta.

La Fig. 3-1 muestra un diagrama que corresponde a la arquitectura propuesta considerando los componentes de hardware y software, el sistema podrá detectar señales débiles transmitidas en condiciones de alto ruido. Con este fin, se evalúan varias técnicas de estimación espectral bajo diferentes condiciones de ruido para determinar cuál es la mejor para cumplir la tarea. El sistema propuesto consiste en un HackRF One como el hardware SDR, GNU Radio como el software. Inicialmente el HackRF One se conecta al computador mediante la interfaz USB y es reconocido mediante el controlador (libhackrf-dev), el bloque **Osmocom Source** en GNU Radio permite la conexión y configuración del hardware el cual captura el espectro convirtiendo las señales análogas recibidas a digitales a cierta frecuencia de muestreo, posteriormente a través de filtros se eliminan los componentes en frecuencia que no pertenecen a la señal de interés y se aplican diferentes métodos de estimación espectral codificados en Python, para detectar la señal se configura un piso de ruido aceptable y a través de un detector de energía se establece la presencia o ausencia de la señal de interés, finalmente se visualiza la señal en el dominio de la frecuencia a través de diferentes técnicas y la respuesta del detector de energía.

El almacenamiento de resultados de las simulaciones se hace sobre un archivo con extensión .csv con el fin de almacenar los datos en tiempo de ejecución para el posterior análisis.

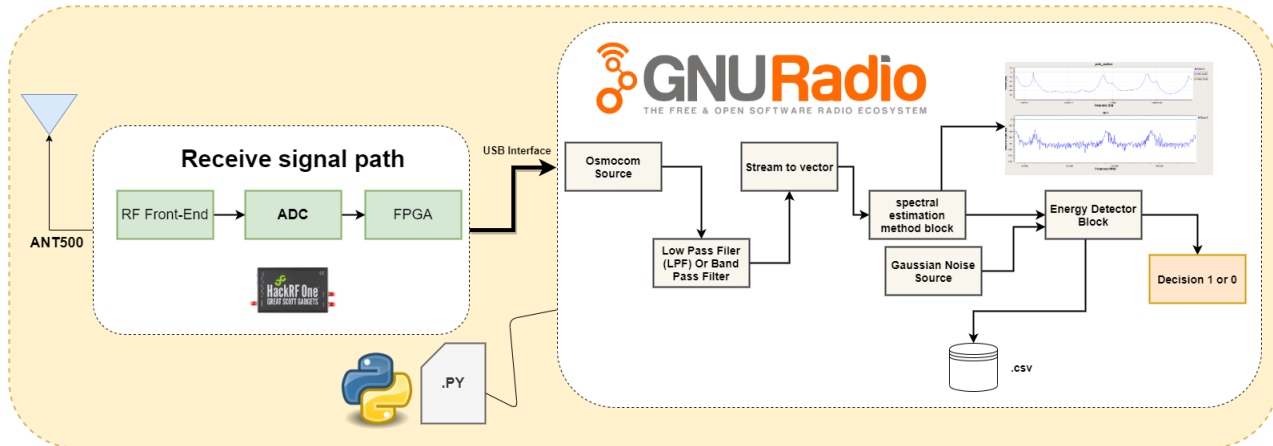


Figura 3-1.: Esquemático de la solución propuesta.

Diagrama de clases de los métodos de estimación espectral.

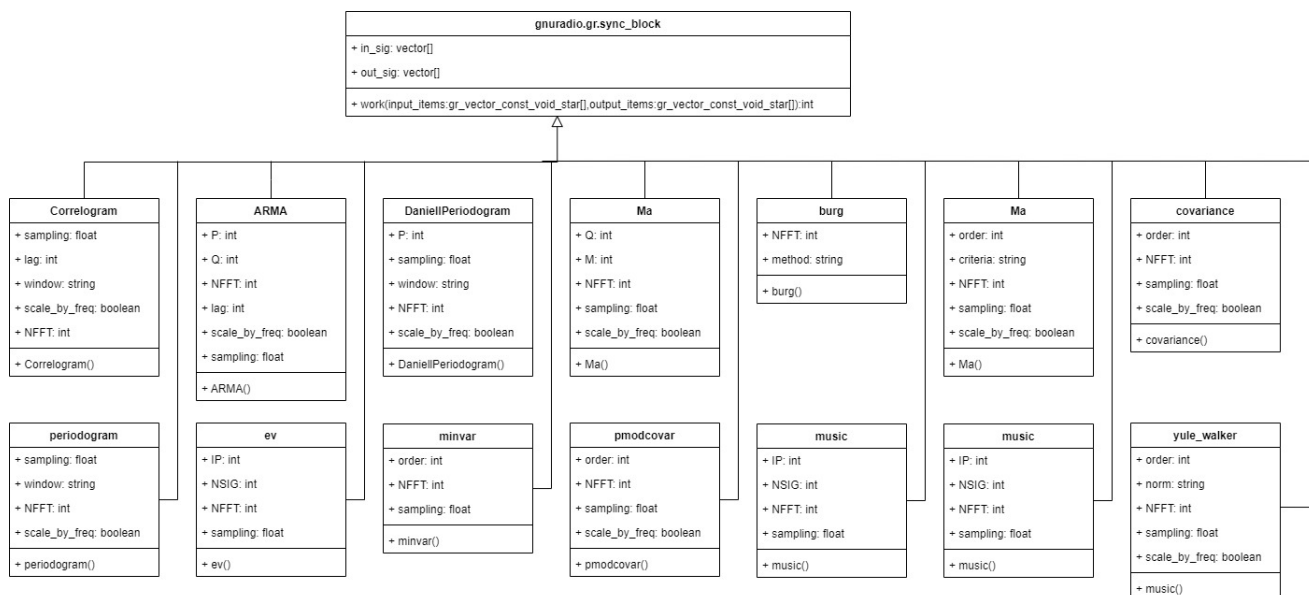


Figura 3-2.: Diagrama de clases de la solución propuesta para los bloques de los métodos de estimación espectral.

Diagrama de clases del detector de energía.

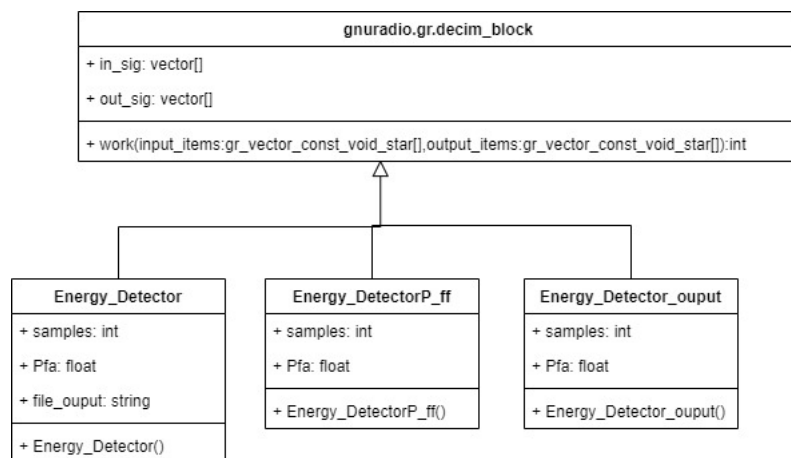


Figura 3-3.: Diagrama de clases de la solución propuesta para los bloques de detección de energía.

Pruebas.

Las pruebas del sistema se hacen a través del siguiente formato (ver Fig. 3-4) con el fin de validar las funcionalidades del sistema, se realizan pruebas de caja negra y pruebas de caja blanca.

| | |
|---------------------|--|
| ID Test | 0001 |
| versión | 1.0 |
| Historia de Usuario | Modificación de parámetros y conexiones de los bloques de estimación espectral. |
| Desarrollador | Jefferson Marín |
| Tester | Jefferson Marín |
| Fecha y Hora | 21/03/2020 12:00 pm |
| Interacción | 3 |
| Comit | 14 |
| precondición | Ninguna |
| Datos de entrada | GRC, señal FM almacenada con parámetros conocidos. |
| resultado esperado | Ejecución correcta del GRC y obtención de la densidad espectral de potencia de cada método (PSD) |
| resultado obtenido | Ejecución correcta del GRC y obtención de la densidad espectral de potencia de cada método (PSD) |
| Notas | Covarianza no permite amplitudes de señales altas |
| resultado de prueba | Exitoso |

Figura 3-4.: Formato de pruebas.

3.2. Implementación

Para realizar la implementación de los métodos de estimación espectral como bloques en GNU Radio (Módulos out-of-tree) desarrollados en Python se hace uso de la librería Spectrum, esta es una librería de Python que contiene herramientas para obtener la densidad espectral de potencia (PSD) tanto para métodos paramétricos como no paramétricos, además de ofrecer diferentes funcionalidades en el análisis de señales [4], se implementan nuevos bloques con el objetivo de establecer una metodología para implementar nuevos bloques en GNU Radio. La Fig. 3-5 muestra los métodos de estimación espectral y bloques adicionales implementados.

```
▼ spectrum_tools
  add_const_vector
  all_spectrum
  ARMA
  burg
  Correlogram
  covariance
  DaniellPeriodogram
  Energy_Detector
  Energy_Detector_ouput
  Energy_DetectorP_ff
  ev
  find_peaks_Marco
  Ma
  minvar
  music
  normalize
  periodogram
  pmodcovar
  SNR_Signal
  yule_walker
```

Figura 3-5.: Métodos de estimación espectral y módulos adicionales en GNU Radio.

3.2.1. Implementación de los métodos de estimación espectral

La implementación de los métodos de estimación espectral, el detector de energía, y módulos adicionales implementados en GNU Radio además de la documentación (Wiki) se pueden encontrar en un repositorio denominado SDRUSA-spectrum en Gitlab, la carpeta `gr-spectrum_tools` contiene la implementación del sistema de detección y estimación espectral de señales usando Software Defined Radio (SDR), el directorio “`gr-spectrum_tools/Python`” contiene los algoritmos implementados por cada bloque y el directorio “`gr-spectrum_tools/grc`” contiene los archivos XML que permiten la interfaz gráfica de los bloques en GNU Radio.

Repositorio: <https://gitlab.com/jefferson.marin/sdrusa-spectrum>

El proyecto cuenta con versionamiento y posee tres ramas:

- **master:** es la rama en la cual se publican versiones tipo release de la aplicación y es la rama principal dentro del ambiente de producción.

- **develop:** es la rama principal de desarrollo de la cual se desprenden todos los features de la aplicación, está en constante actividad y contiene versiones tipo debug de la aplicación
- **test:** es la rama en la cual se llevan a cabo las pruebas unitarias y de integración de la aplicación.

Cabe resaltar que el sistema de detección y estimación espectral hace uso de la librería spectrum de Python [4] para implementar los métodos de estimación espectral a través de los siguientes bloques:

- all_spectrum
- ARMA
- burg
- Correlogram
- covariance
- DaniellPeriodogram
- ev
- Ma
- minvar
- music
- periodogram
- pmodcovar
- yule_walker

los bloques restantes son algoritmos implementados y se agrupan de la siguiente forma:

- Detector de energía [3].
 - Energy_Detector
 - Energy_Detector_output
 - Energy_DetectorP_ff
- Bloque para obtener los valores de la relación señal/ruido (SNR).

- SNR_Signal
- Operaciones con señales.
 - add_const_vector
 - normalize

La documentación del uso, instalación, implementación, parámetros, creación de nuevos bloques, diagramas, ejecuciones se puede encontrar en la wiki del repositorio.

Wiki: <https://gitlab.com/jefferson.marin/sdrusa-spectrum/-/wikis/home>

3.2.2. Generación de la señal seleccionada (GPS)

Se seleccionó una sección del espectro en la banda L1 (1575.42 MHz) del sistema de navegación por satélite GPS, debido a su gran capacidad de propagación de este tipo de señales en el espacio son visibles y están disponibles las 24 horas en cualquier punto de la tierra, sus frecuencias de operación están en el rango del dispositivo receptor (HackRF One), precisan transmisiones de menor potencia y es una señal conocida.

Para la generación de la señal se usó GPS-SDR-SIM. GPS-SDR-SIM genera flujos de datos de señal de banda base GPS, que se pueden convertir a RF utilizando plataformas de radio definidas por software (SDR).

<https://github.com/osqzss/gps-sdr-sim>

Compilar y generar ejecutable.

```
gcc gpssim.c -lm -O3 -o gps-sdr-sim
```

El usuario especifica la constelación de satélites GPS a través de un archivo de efemérides de difusión GPS. El archivo de efemérides de transmisión diaria por GPS (brdc) es un archivo de navegación que contiene parámetros diarios como los datos de orbitales, los parámetros del reloj y la precisión de las medidas de pseudodistancia de los satélites observados sirven para la estimación de las posiciones satelitales.

El formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format), es un fichero de texto cuya función es almacenar de forma estandarizada las medidas proporcionadas por los receptores de los sistemas de navegación por satélite.

Se descarga el archivo de efemérides de transmisión diaria por GPS (brdc) en formato RINEX correspondiente al día actual (en curso) y se ubica en la carpeta gps-sdr-sim-master.

`ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/data/daily/`

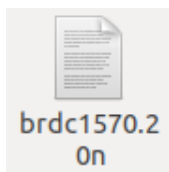


Figura 3-6.: Archivo de efemérides de transmisión diaria por GPS.

Estos archivos se utilizan para generar el pseudo rango simulado y Doppler para los satélites GPS a la vista. Estos datos de rango simulado se utilizan para generar las muestras I/Q digitalizadas para la señal GPS.

Comando para generar el archivo a transmitir.

```
./gps-sdr-sim -e brdc1570.20n -l 1.8605853,73.5213033,5 -o
gpssim_10M.s8 -s 10e6 -b 8 -v
```

- -l coordenadas en latitud y longitud a transmitir
- -o nombre del archivo a generar
- -s frecuencia de muestreo [Hz]
- -b I/Q formato de los datos [1/8/16]
- -e Archivo de navegación RINEX para efemérides GPS.

El HackRF requiere una frecuencia de muestreo como mínimo de 2.6 MHz.

Para transmitir a través del HackRF ONE con GPS-SDR-SIM se especifica el siguiente comando con una frecuencia central de 1575420000 Hz (L1) y una frecuencia de muestreo de 10e6

```
hackrf\_transfer -t gpssim.bin -f 1575420000 -s 10000000 -a 1 -x 0
```

```

Activities  Terminal  vie 18:32
jefferson@jeffry: ~/Downloads/gps-sdr-sim-master
9.31322574615e-10  5.32907051820e-15  61440  2109
18
ERROR: Invalid start time.
tmin = 2020/06/05,00:00:00 (2108:432000)
tmax = 2020/06/05,22:00:00 (2108:511200)
jefferson@jeffry:~/Downloads/gps-sdr-sim-master$ ./gps-sdr-sim -e brdc1570.20n -l 1.8605853,73.5213033,5 -o gpssim_10M.s8 -s 10e6 -b 8 -v
Using static location mode.
6.519e-09  2.235e-08  -5.960e-08  -1.192e-07
8.602e+04  9.830e+04  -6.554e+04  -5.243e+05
9.31322574615e-10  5.32907051820e-15  61440  2109
18
Start time = 2020/06/05,00:00:00 (2108:432000)
Duration = 300.0 [sec]
03 189.8 48.1 21544544.3 1.9
04 30.4 56.7 20987643.7 1.7
07 318.9 17.0 24355723.5 3.5
08 90.3 51.2 21146871.1 1.9
09 345.1 34.5 22387346.7 2.4
11 137.5 31.2 23080299.5 2.6
16 29.5 6.8 24825252.5 4.4
22 168.2 30.3 22650972.7 2.6
23 334.2 19.1 24037337.7 3.3
27 60.3 26.8 22840763.2 2.8
28 230.1 19.7 23344811.8 3.3
30 291.3 3.8 25491285.5 4.7
Time into run = 30.0
03 189.6 47.9 21557425.5 1.9
04 30.8 56.9 20979090.6 1.7
07 319.1 17.0 24353999.8 3.5
08 89.9 51.1 21147944.4 1.9
09 345.2 34.7 22370980.3 2.4
11 137.2 31.3 23074593.6 2.6
16 29.5 6.6 24845708.0 4.4
22 168.1 30.1 22666397.4 2.6
23 334.3 19.3 24018514.3 3.3
27 60.0 26.7 22850951.9 2.8
28 230.3 19.8 23331444.5 3.3
30 291.5 3.8 25488580.8 4.7

```

Figura 3-7.: Generación del archivo de datos RF de la señal GPS.

Una vez generado el archivo se lee este a través de GNU Radio para almacenar los datos de la señal en formato complejo y su posterior análisis en el software, esto se justifica a que a que GNU Radio maneja las señales en este formato para la transmisión y recepción de la señal en dispositivo HackRF One. En la Fig. 3-8 se observa la conversión del archivo binario en formato complejo, inicialmente se establece una variable **samp_rate=10e6** que hace referencia a la frecuencia de muestreo de la señal, el bloque “**File Source**” permite abrir el archivo generado anteriormente donde se almacena la señal GPS “gpssim.bim” se lee en bytes, estos datos se convierten a complejos en el bloque “**IChar To Complex**”, el bloque **Throttle** garantiza el flujo de datos para que no sobrepase la capacidad de CPU de la computadora, y por último se almacena la señal GPS en formato complejo en el bloque “**File Sink**” con nombre ‘data.dat’.

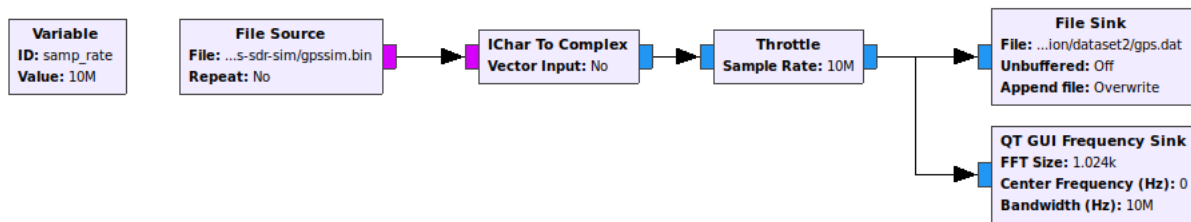


Figura 3-8.: Almacenamiento de la señal GPS generada en formato complejo en GNU Radio.

Visualización en dominio de la frecuencia de las señales GPS almacenadas.

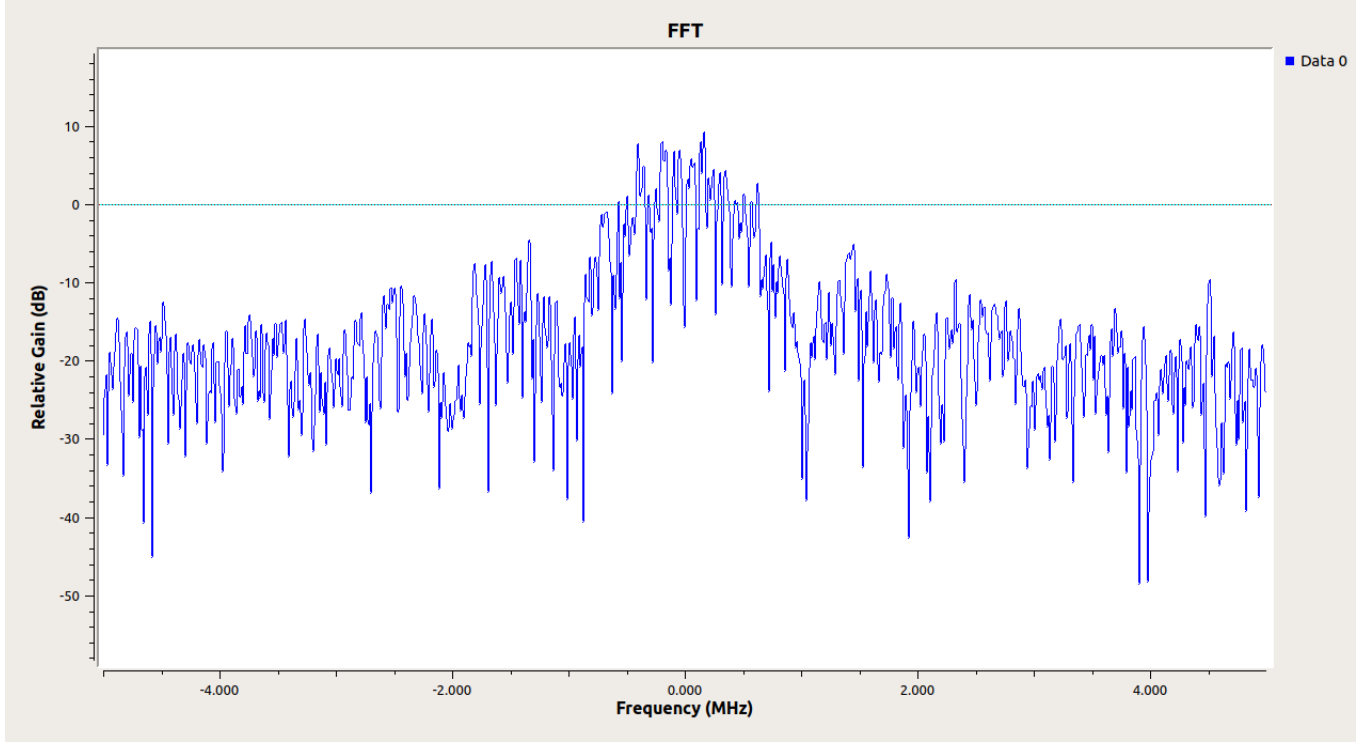


Figura 3-9.: Espectro de la señal GPS almacenada.

Obtención de las muestras de la señal GPS a evaluar

La señal almacenada en formato complejo posee una duración de 300 s con una frecuencia de muestreo de 10e6, sin embargo, solo se desea analizar 1 ms de la señal, ya que se quiere obtener una secuencia completa del código C/A (adquisición aproximada) sobre L1.

$$T = ts * Nsamples$$

$$T = 1ms * 10e6 \quad (3-1)$$

$$T = 10000muestras$$

Con mínimo 10000 muestras de la señal almacenada se garantiza la presencia de 1 ms de la señal GPS.

Por estándar en GNU Radio se suele optar por valores en potencia de 2 en el número de muestras de la señal para el cálculo de la FFT (512,1024,2048,4096, ...). En la Fig. 3-10. Se observa el diagrama de bloques que permite obtener en número de muestras deseadas de la señal y almacenarla, inicialmente el diagrama se establecen 2 variables: “samp_rate” es la frecuencia de muestreo, “n_samples” es el número de muestras de la señal que se desea obtener para almacenar, posteriormente se abre el archivo en formato complejo a través del bloque “*File Source*”, el bloque “*Head*” es un bloque de control que permite el paso de

las "n_samples" primeras muestras de la señal y por último se almacena estas muestras a través del bloque *"File Sink"*.

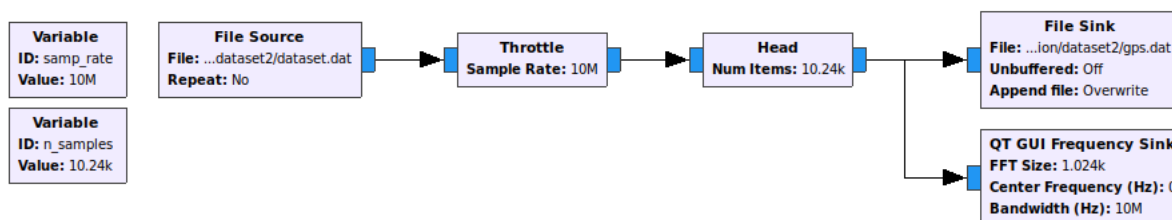


Figura 3-10.: Obtención de n muestras de la señal.

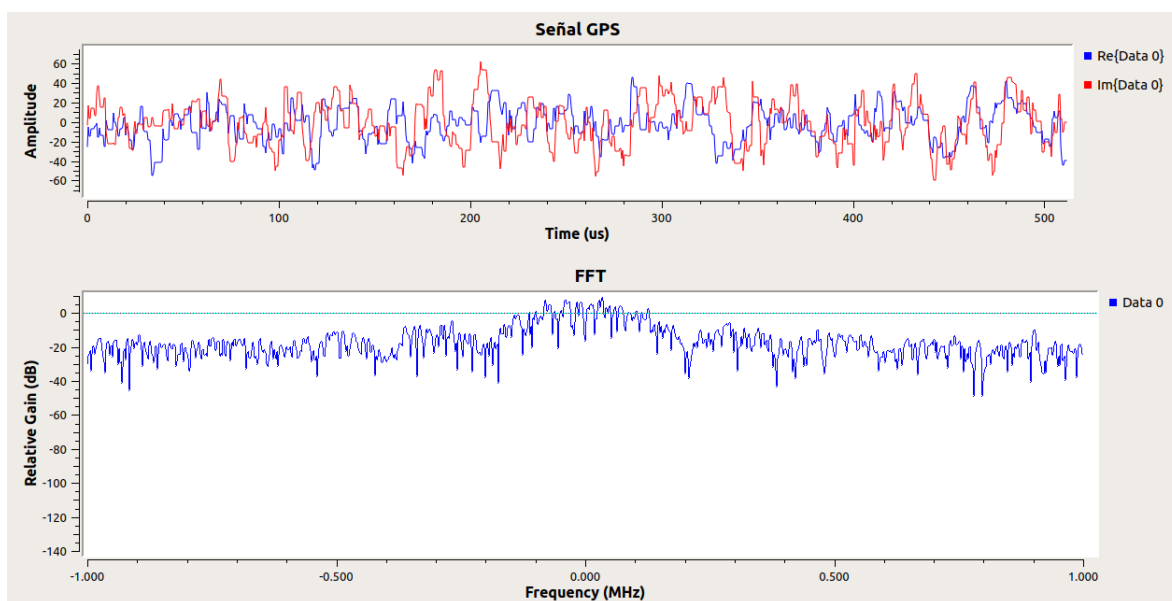


Figura 3-11.: Señal GPS en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia generados en GNU Radio.

3.2.3. Generación del SNR (Relación señal/ruido) deseado

Para la implementación de un detector de energía es importante tener un conocimiento acertado sobre la varianza del ruido, ya que un pequeño error disminuye considerablemente el desempeño, adicional a ello, conocer correctamente el piso de ruido garantiza para cualquier nivel de SNR cierta probabilidad de detección [1],[7].

Se realizó la implementación de dos métodos para la obtención del valor del SNR deseado, a través de la potencia promedio de las señales entrantes de acuerdo con la ecuación

(2-6) y a través del valor RMS de acuerdo con la ecuación (2-3), se realizó una comparación de los valores obtenidos por los dos métodos, ver Anexo A.

3.2.4. Implementación de la técnica de detección del espectro (Detector de Energía)

El método de sensado seleccionado es el detector de energía, ya que permite detectar la energía en las bandas de frecuencias de interés y no requiere información previa de las propiedades de la señal transmitida, la información del canal o incluso el tipo de modulación, este método posee bajo nivel de complejidad en términos de implementación y computación [1],[7].

Implementación del bloque `Energy_Detector`.

Energy_Detector es un bloque personalizado (módulo out-of-tree) implementado en GNU Radio donde se implementa el algoritmo de detección correspondiente a un detector de energía en el dominio de la frecuencia.

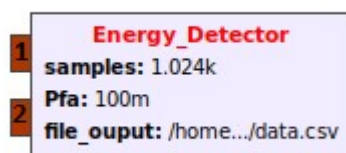


Figura 3-12.: Bloque en GNU Radio que implementa el algoritmo de detección.

La primera entrada 1 concierne a los valores de la señal (señal + ruido) en PSD (densidad espectral de potencia) de cada método de estimación espectral, la siguiente entrada 2 hace referencia a los valores en PSD del ruido, el parámetro `samples` es el número de muestras de las señales entrantes, que sea 1024 indica que tanto la primera entrada como la segunda son vectores de tipo float que contienen 1024 muestras complejas de la señal, el parámetro `Pfa` es la probabilidad de falsa alarma, y por último `file_output` es la ubicación de un archivo en formato `.csv` ver Fig. 3-13 que almacena los resultados. Todo este proceso se realiza en tiempo real.

| | A | B | C | D | E |
|---|------------|-----------|-----------|----------|-------|
| 1 | prediction | Threshold | signalAvg | NoiseAvg | stdev |

Figura 3-13.: Encabezado del archivo en formato `.csv` que almacena los resultados.

Implementación del detector de Energía.

El detector de energía es implementado a través de Radio Definida por Software (SDR), haciendo uso del software GNU Radio y el hardware HackRF One para transmitir y recibir.

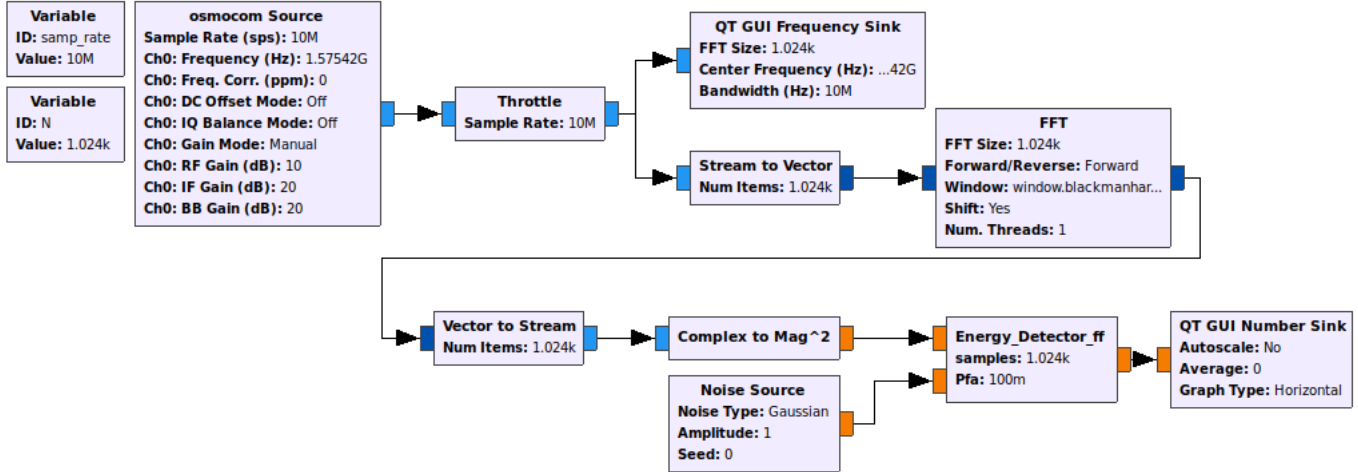


Figura 3-14.: Diagrama de bloques del detector de energía implementado en GNU Radio usando la FFT.

La Fig. 3-14 muestra el diagrama de bloques donde se realiza la detección de energía de la señal GPS usando la FFT como método de estimación espectral. **File Source** permite abrir las muestras de la señal GPS almacenada en un flujo de IQ de muestras complejas a una frecuencia de muestreo solicitada. El bloque **Throttle** es usado para controlar el uso de CPU del computador. Las muestras son agrupadas en vectores de tamaño $N=1024$ usando el bloque **Stream to Vector**, donde N es el número de puntos en la FFT. Los vectores de muestras complejas ingresan al bloque **FFT** de 1024 puntos, donde una ventana Blackman Harris se aplica a cada vector antes de calcular la FFT. Posteriormente, se calcula la Transformada Rápida de Fourier y la salida se envía al bloque **Complex to Mag²** para obtener la potencia a través de la magnitud de los valores complejos al cuadrado. Luego se envía la salida al bloque **Energy_Detector** el cual es un bloque personalizado donde se implementa el algoritmo de detección, que permite al usuario seleccionar el número de muestras y la probabilidad de falsa alarma que se usará para el cálculo, de los datos de entrada al bloque **Energy_Detector** se calcula la media (promedio) de la señal recibida su varianza y desviación estándar, estos parámetros son usados para determinar de forma dinámica el umbral de detección. La energía de señal promedio se compara con el umbral para determinar si la señal está presente o no, en donde si la energía de la señal es mayor que el umbral, entonces la señal está presente [2],[3],[10]. 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 [2].

Se usó la siguiente fórmula para implementar el promedio en el bloque del detector [2].

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |X[n]|^2 \underset{<}{\overset{>}{\geq}} \lambda \quad (3-2)$$

Donde $X[n]$ representa las muestras recibidas en el dominio de la frecuencia.

Para determinar el umbral de decisión de forma dinámica se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación [2].

$$\lambda = \mu + Q^{-1}(P_{fa})\sigma \quad (3-3)$$

donde μ y σ son la media y la desviación estándar de los puntos FFT promediados, Q inversa () representa la función Q inversa y P_{fa} es la probabilidad de que el módulo de detección elija H_1 mientras que la decisión correcta es H_0 .

La regla de decisión se puede definir como [2].

$$\begin{aligned} Y > \lambda &\rightarrow H_1(\text{Señal presente}) \\ Y \leq \lambda &\rightarrow H_0(\text{Señal ausente}) \end{aligned} \quad (3-4)$$

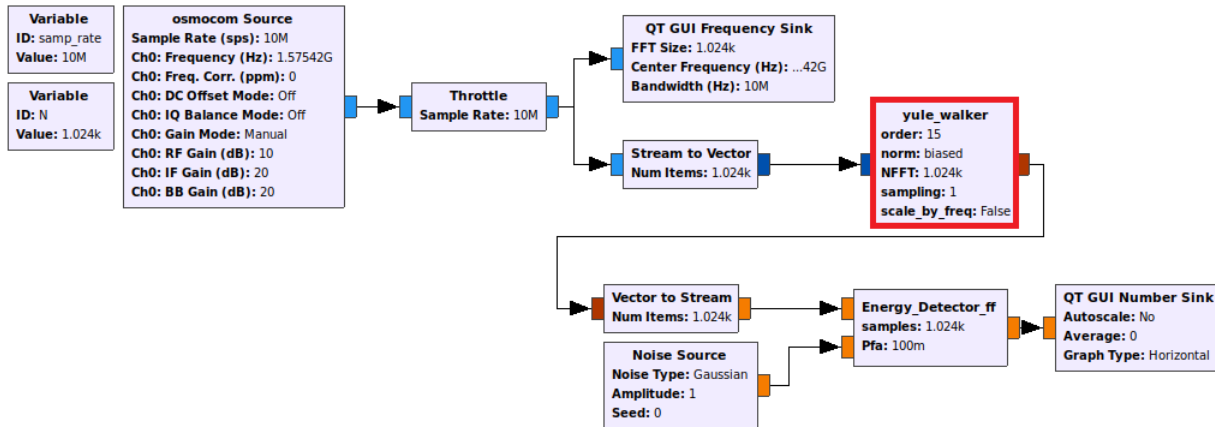


Figura 3-15.: Diagrama de bloques del detector de energía implementado en GNU Radio usando otros métodos de estimación espectral.

En la Fig. **3-15** se visualiza la implementación de un detector de energía en el que se usan otros métodos de estimación espectral no tan solo la FFT. Estos métodos son implementados en GNU Radio como módulos (out-of-tree) desarrollados en Python a través de la librería Spectrum. La diferencia de este diagrama con el anterior (Fig. **3-14**) es que los nuevos bloques de estimación espectral ya no hacen uso del bloque ***Complex to Mag²*** debido a que esta operación se realiza internamente en los bloques de cada método de estimación espectral, para cambiar el método de estimación espectral se cambia el bloque resaltado en rojo.

4. Experimentación

4.1. Diseño de la experimentación

Para evaluar el desempeño de los diferentes métodos de estimación espectral implementados en GNU Radio se hace uso de la metodología descrita en la Fig. 4-1.

Establecer señal conocida: Consiste en determinar una señal de la cual se conozcan cada uno de sus parámetros, tales como, amplitud, frecuencia, tipo de modulación, espectro, entre otros, con el fin de validar los resultados obtenidos por cada método de estimación espectral.

Identificar parámetros óptimos para cada método de estimación espectral a evaluar: Los métodos de estimación espectral implementados en GNU Radio permiten obtener la densidad espectral de potencia (PSD) tanto para métodos paramétricos como no paramétricos. Los métodos paramétricos poseen parámetros que de acuerdo con sus configuraciones modifican su comportamiento y desempeño, por ende, se encuentran los parámetros que maximicen el desempeño de forma empírica modificando parámetros y seleccionando los que brinden mejor desempeño; como métrica se usan las curvas ROC (SNR (Relación señal/ruido) vs P_d (probabilidad de detección)).

Implementar el método de detección del espectro: Un correcto análisis del espectro permite identificar las características de cada una de las bandas de frecuencia que a su vez dependen del método de detección del espectro que se seleccione. Se seleccionó como método de detección del espectro el detector de energía debido al bajo nivel de complejidad en implementación, computación, y que no requiere ningún conocimiento previo de la señal [1],[7].

Generación de archivos de simulación: Generar archivos de simulación requeridos para implementar cada uno de los métodos de estimación espectral con parámetros definidos previamente y evaluarlos, es necesario obtener el cálculo de la relación señal/ruido (SNR) para cada simulación y establecer la probabilidad de falsa alarma para el detector de energía implementado. Usar GNU Radio permite generar código en Python de los diagramas de bloques (.grc), y modificarlos.

Ejecución de las simulaciones y almacenamiento de resultados: Ejecutar los algoritmos de simulación midiendo el tiempo de ejecución de las simulaciones (.py) y posteriormente almacenamiento de los resultados. Obtención de gráficos: A través de Python se realiza la lectura y visualización de los archivos resultantes de la ejecución, con el fin de realizar el proceso de análisis posterior.

Documentación: Consiste en documentar cada proceso en el presente proyecto con el fin de almacenar, compartir y validar la información, con la posibilidad de replicar.

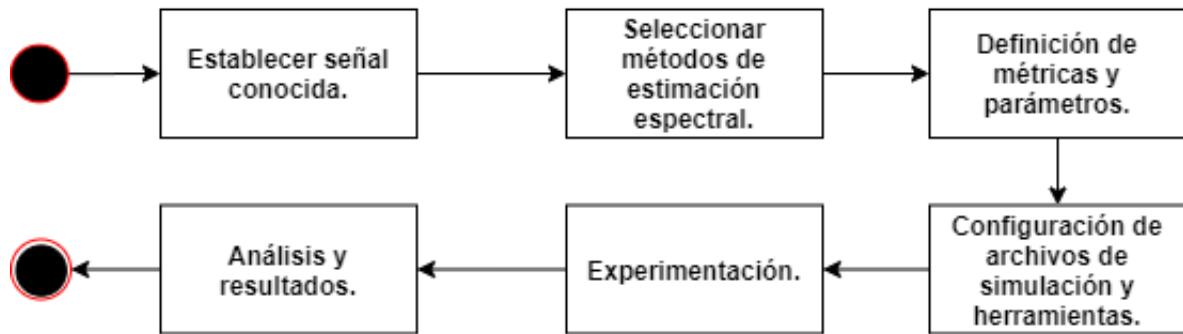


Figura 4-1.: Diagrama de la metodología de evaluación de desempeño adoptada.

4.2. Implementación de las simulaciones

Para evaluar el desempeño de los métodos se realizaron 10000 iteraciones con la finalidad de garantizar como mínimo una probabilidad de falsa alarma de 0.1 % para cada método de estimación espectral. Se establece un rango de SNR de $[-20, 20]$ con un paso de 1 entre $[-20, 5]$ y $[5, 20]$, un paso de 0.01 entre $(-5, 5)$ con el fin de obtener más detalle, con probabilidades de falsa alarma de $P_{fa} = 0, 1, 0,08, 0,05, 0,03, 0,01$, el número de puntos de la FFT $N=1024$. Se analizó el número de muestras correspondiente a 1 ms de la señal GPS.

$$P_d = \frac{\text{número de detecciones}}{\text{número de observaciones}} \quad (4-1)$$

Para obtener la probabilidad de detección se hace uso de la ecuación (4-1), para ello se realizaron 10000 iteraciones (número de observaciones), el número de detecciones se halló contando el número de veces que el detector de energía determina acertadamente la presencia de la señal cuando efectivamente está la señal.

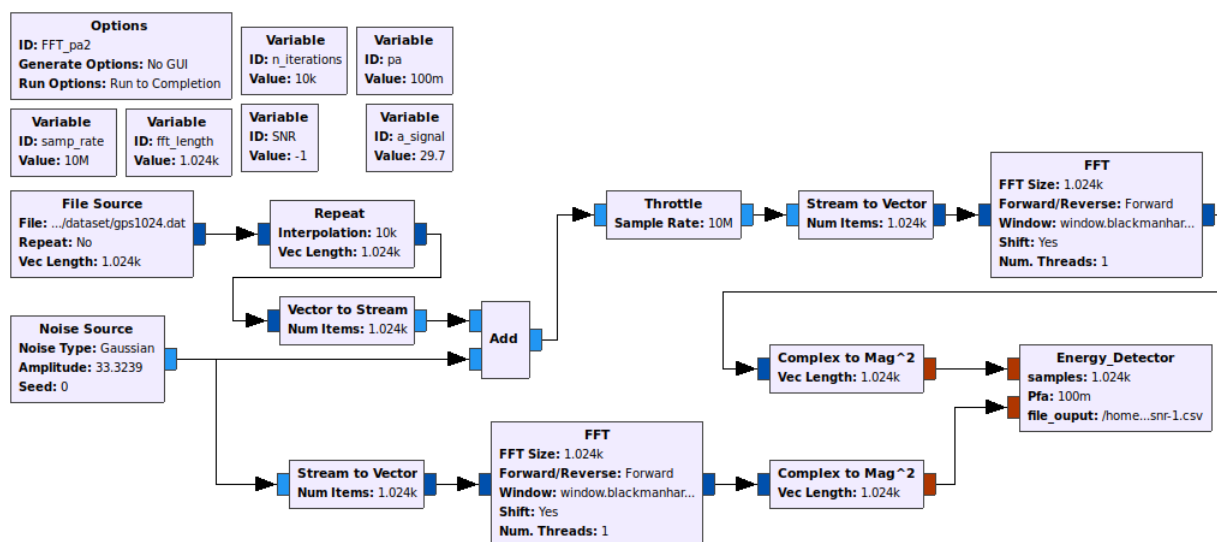


Figura 4-2.: Diagrama de bloques para el proceso de evaluación usando el método de estimación espectral (FFT).

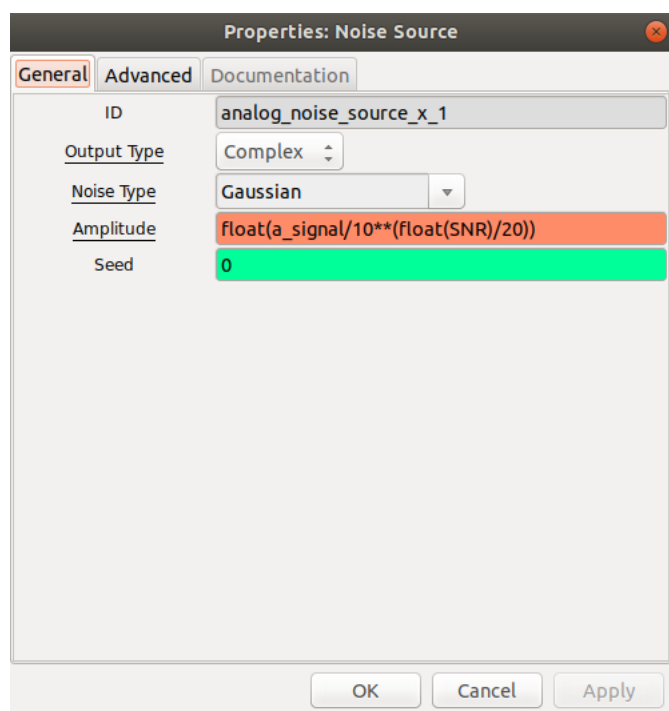


Figura 4-3.: Parámetros del bloque Noise Source GNU Radio.

La Fig. 4-2 corresponde al diagrama de bloques en GNU Radio usado para generar un script en Python el cual permite automatizar el proceso de evaluación en la ejecución de las 10000 iteraciones con los diferentes valores de SNR, inicialmente se establece la amplitud de la

señal GPS almacenada a través del bloque RMS ver Anexo A. el valor es almacenado en una variable denominada *a_signal*, la variable SNR equivale al valor del SNR aproximado deseado, *fft_length* es valor de los *n* puntos de la FFT. El bloque **File Source** permite abrir las muestras de la señal GPS almacenada en un flujo de IQ de muestras complejas. El bloque **Noise Source** es una fuente de ruido gaussiano, a este bloque se le modifica la amplitud (Amplitude) de tal forma que se genere el valor del SNR deseado de acuerdo con la ecuación (A-2), ver Fig. 4-3 Se establece una semilla (seed) de cero (0) para que el ruido siempre sea aleatorio, una misma semilla en valores negativos generará el mismo ruido para cada interacción. El bloque **Repeat** repite la entrada *n* veces, la entrada está agrupada como un vector, el cual vuelve a ser flujo de datos complejos a través del bloque **Vector to Stream**. El bloque **Add** realiza la suma de la señal con el ruido, posteriormente se realiza la FFT (Transformada rápida de Fourier) tanto sobre la señal como sobre el ruido con el fin de identificar la presencia o ausencia de la señal a través del bloque del detector de energía (**Energy_Detector**). El bloque del detector de energía establece un umbral de forma dinámica por cada interacción de *n* muestras de la señal, este bloque genera un archivo con extensión .csv (ver Fig. 3-13) por cada valor de SNR y probabilidad de falsa alarma el cual almacena las salidas 1 si se detecta la señal 0 en caso contrario.

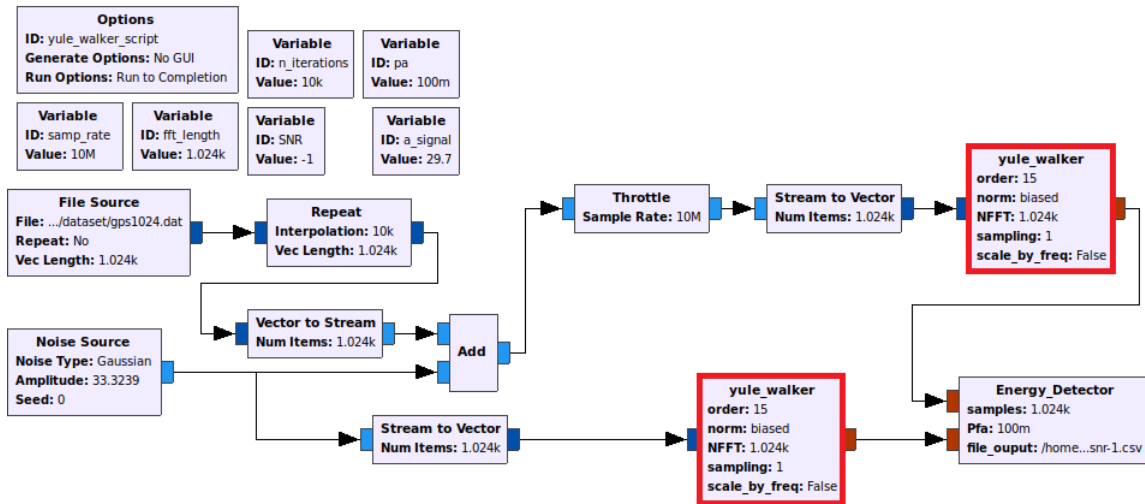


Figura 4-4.: Diagrama de bloques para el proceso de evaluación usando los diferentes métodos de estimación espectral.

La Fig. 4-4 representa el diagrama de bloques para realizar el proceso de evaluación sobre los nuevos bloques de estimación espectral implementados, la diferencia de este diagrama con el de la FFT (Fig. 4-2) radica en que los nuevos bloques de estimación espectral ya no hacen uso del bloque **Complex to Mag²** debido a que esta operación se realiza internamente en los bloques de cada método de estimación espectral, para probar otro método de estimación espectral el procedimiento consiste en cambiar los bloques en contorno rojo por el método de estimación espectral deseado.

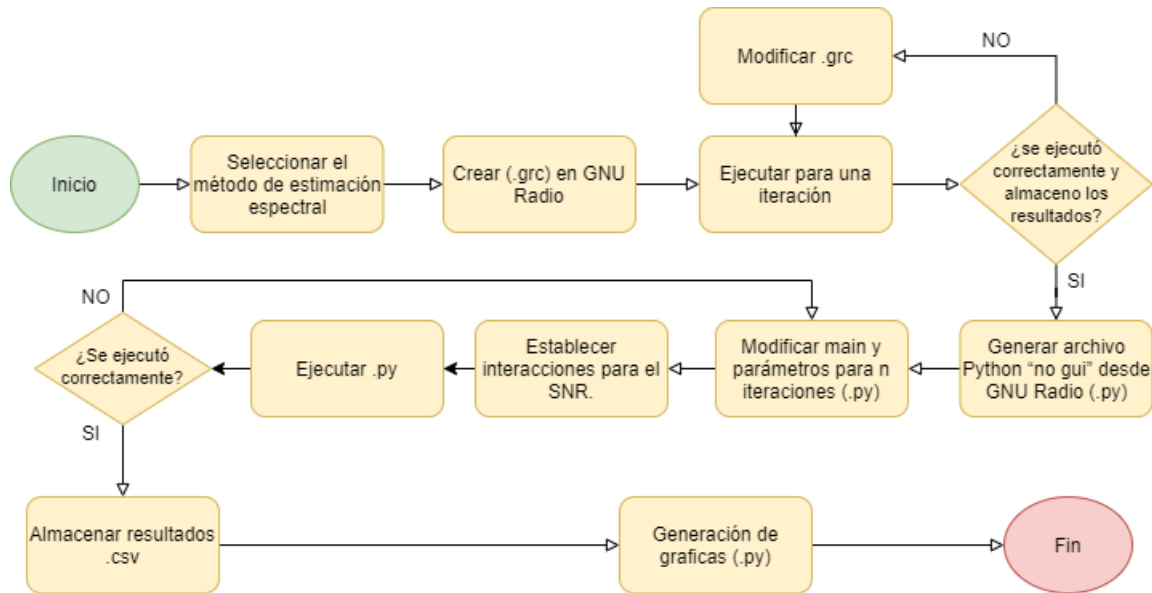


Figura 4-5.: Metodología para la generación del algoritmo de simulación.

Inicialmente se desarrolla el diagrama de bloques en GNU Radio (.grc) y usando GNU Radio se genera un script para automatización de la ejecución, en el script se establece en la función main los ciclos correspondientes a los SNR deseados y con los pasos deseados con el fin de automatizar la ejecución de los métodos de estimación espectral por cada SNR Fig. 4-5.

Luego de tener los resultados almacenados se procede con la obtención de las gráficas (SNR vs Pd), cada método de estimación espectral posee un archivo con formato .csv, para cada valor de SNR es una carpeta específica, para la obtención de la Pd se cuenta el número de veces que el detector de energía determina acertadamente la presencia de la señal cuando efectivamente está la señal, la lectura de los archivos con extensión .csv se realizan a través de Python, para el análisis de los .csv se utiliza pandas, y para las gráficas matplotlib.

Para cada valor de SNR y Pfa en cada uno de los métodos de estimación espectral se generan los resultados en un archivo en formato .csv, a través de Python se abre cada uno de los archivos y se obtiene la probabilidad de detección para cada método de estimación espectral de acuerdo con la ecuación (4-1), posteriormente se grafican los datos para realizar el correspondiente análisis de resultados.

5. Resultados y Análisis

5.1. Resultados de la ejecución de los bloques en GNU Radio

A continuación se presentan las gráficas con los resultados alcanzados en la ejecución de los métodos de estimación espectral implementados con parámetros por defecto para obtener el espectro de una señal FM en ambiente real obtenida a través del HackRF One con frecuencia central de 99.9 MHz, una frecuencia de muestreo y ancho de banda de 2 MHz, como referencia de comparación se visualiza los resultados obtenidos por la transformada rápida de Fourier (FFT) en cada gráfica.

Los diagramas de bloques usados están documentados en la Wiki del repositorio.

<https://gitlab.com/jefferson.marin/sdrusa-spectrum/-/wikis/Diagramas-de-Bloques>

Visualización en el espectro para cada método de estimación espectral implementado.

<https://gitlab.com/jefferson.marin/sdrusa-spectrum/-/wikis/Ejecuci%C3%B3n>

Visualización en espectro para el método Yule-walker.

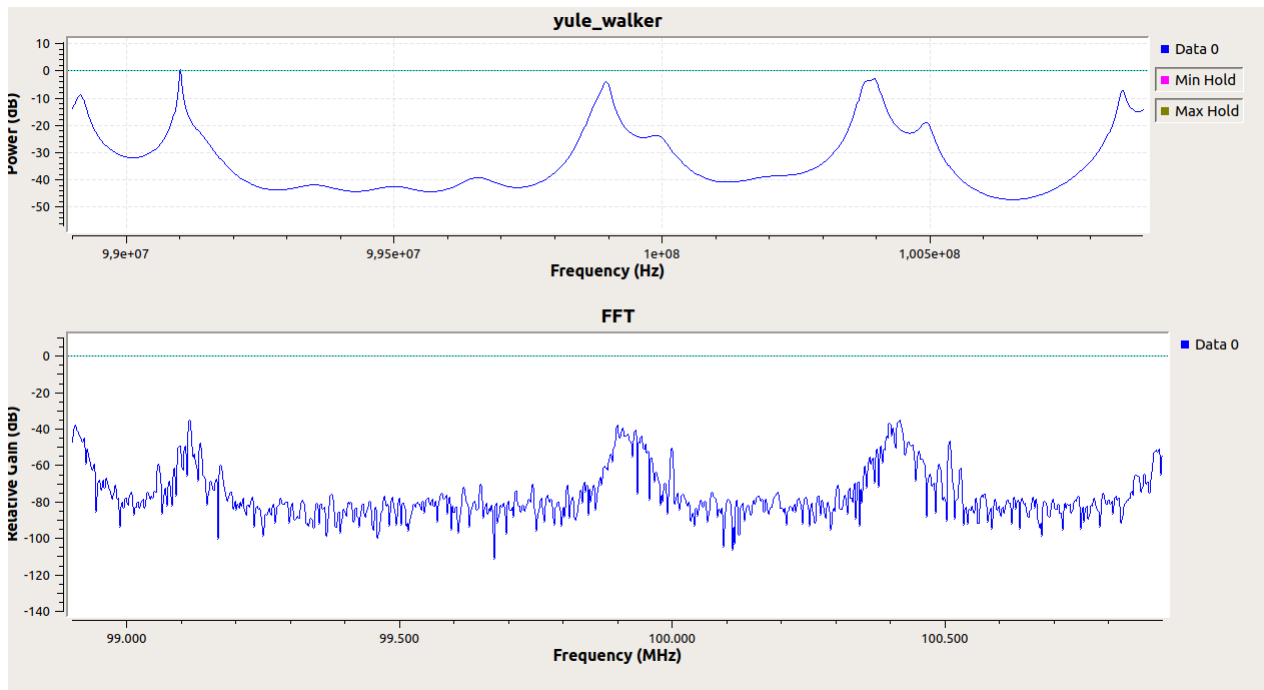


Figura 5-1.: Estimación del espectro del método Yule-Walker comparado con la FFT.

Visualización en espectro para el método ARMA.

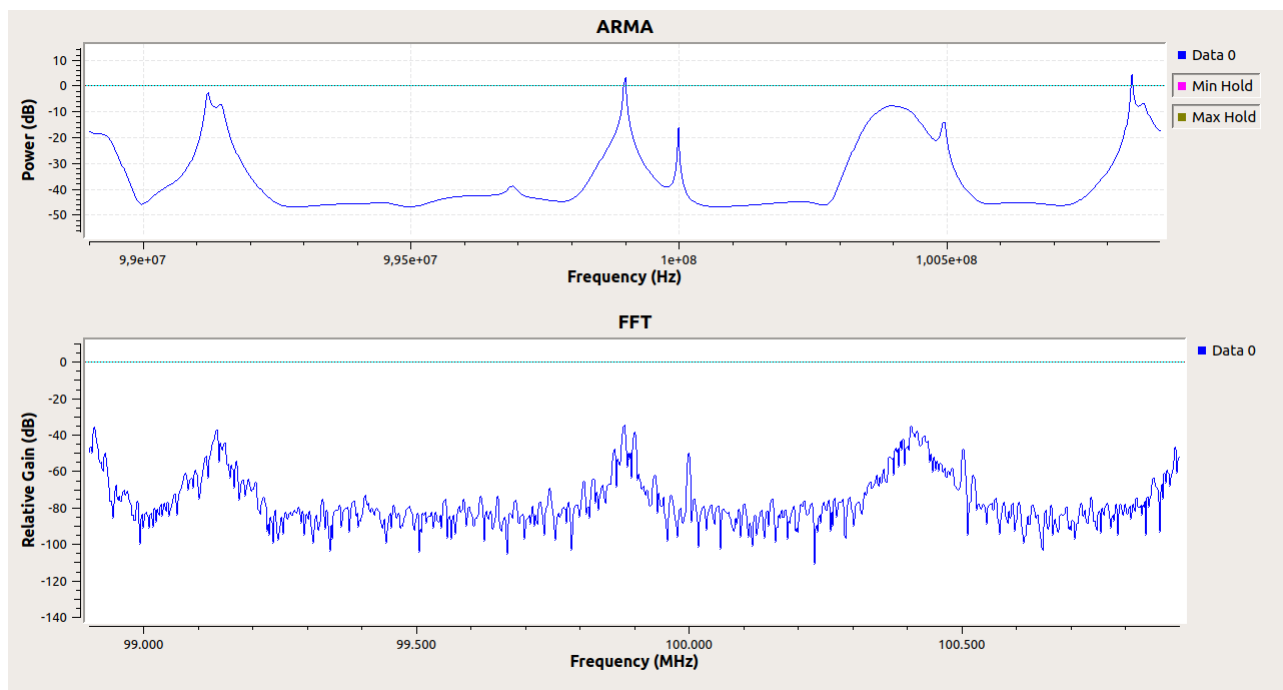


Figura 5-2.: Estimación del espectro del método ARMA comparado con la FFT.

5.1.1. Resultados del detector de Energía

En la Fig. 5-3 se visualiza la salida del detector de energía para evaluar la presencia o ausencia de dos señales senoidales con una frecuencia de 99.3 MHz y 100.5 MHz respectivamente, en la ejecución se puede modificar la amplitud de la señal, y se visualiza 1 si la señal está presente o 0 en caso contrario, el detector de energía tiene configurada una probabilidad de falsa alarma del 10 %.

La amplitud de la señal cosenoidal es 1, esto indica la presencia de señal y detector asertivamente informa en su salida presencia de señal, salida del detector de energía=1.

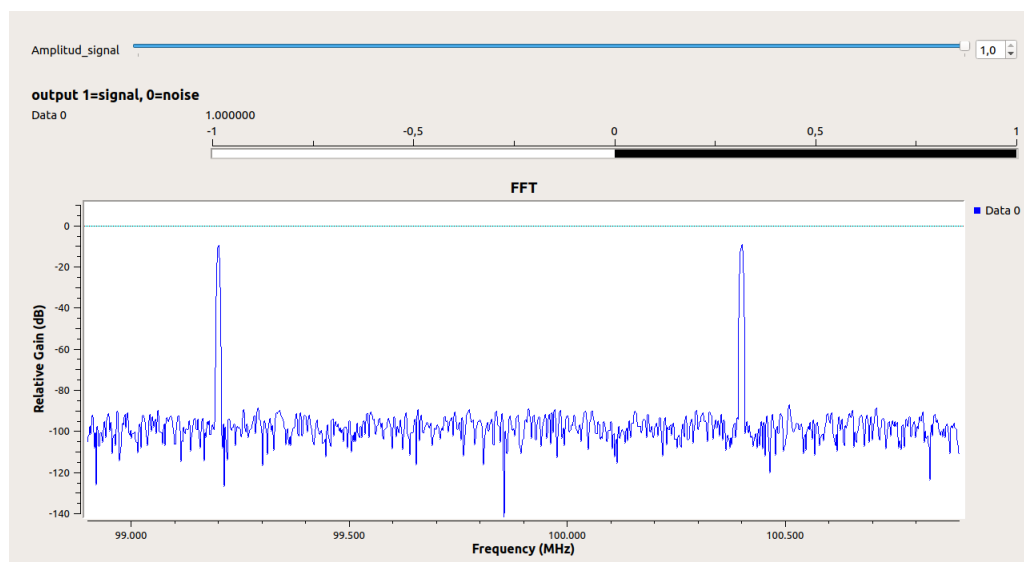


Figura 5-3.: Resultado del detector en presencia de señal.

En la Fig. 5-4 la señal está ausente debido a que la amplitud es igual a cero y la salida del detector es 0 indicando la ausencia de señal y solo presencia de ruido.

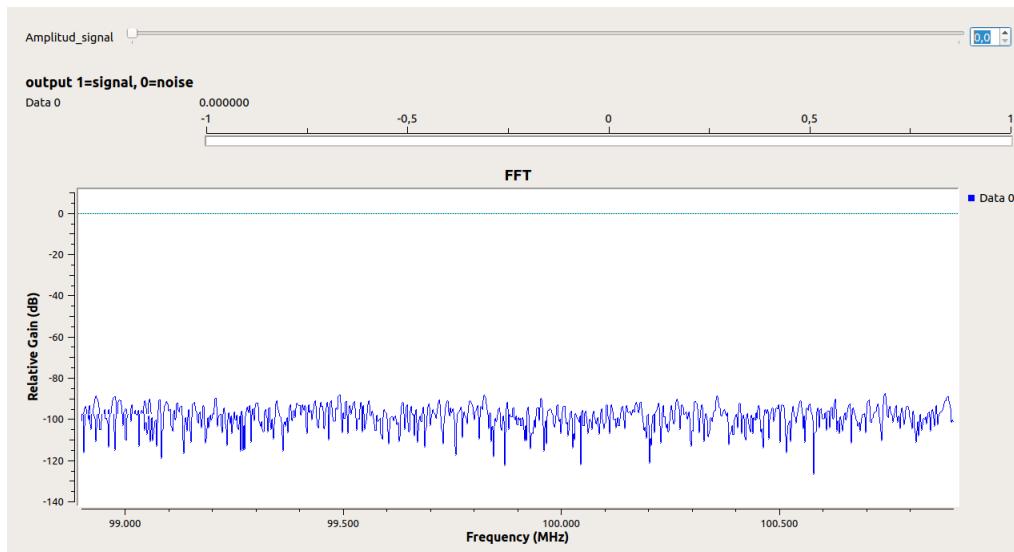


Figura 5-4.: Resultado del detector en ausencia de señal.

Modificación de la relación señal ruido (SNR).

Se establece en GNU Radio un slider que permite modificar el valor de SNR ver Fig. 5-5, con el fin de determinar el comportamiento del detector al momento de determinar la presencia de la señal usando los diferentes métodos de estimación espectral variando el valor de SNR.

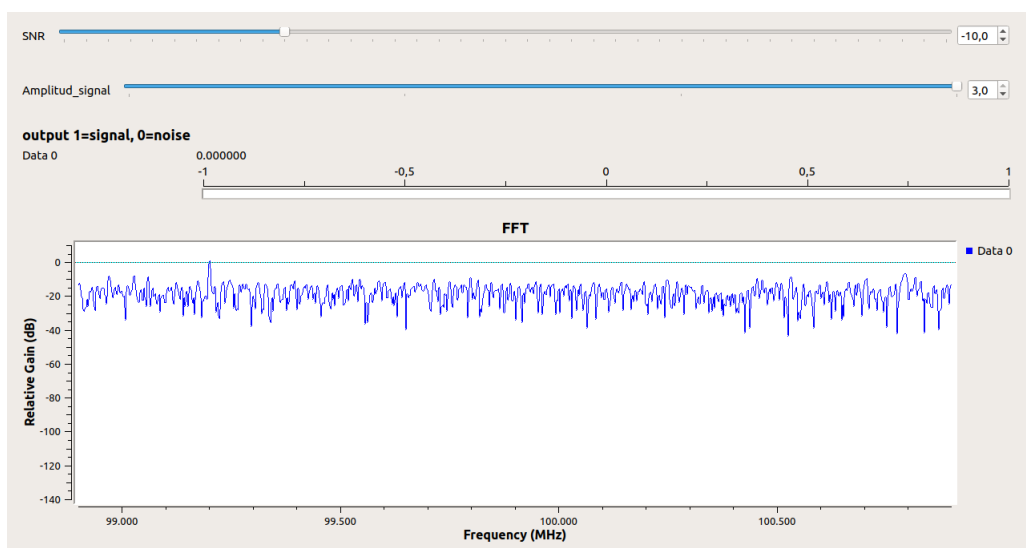


Figura 5-5.: Resultado del detector de energía para determinado SNR.

5.1.2. Resultados de las simulaciones

Se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para obtener el desempeño de los métodos de estimación espectral. Se grafica la probabilidad de detección vs la relación señal/ruido (SNR) para cada método de estimación espectral evaluado.

Se visualiza el desempeño del detector de energía usando como método de estimación espectral la FFT(Fig. 5-6), Periodograma(Fig. 5-10) , Correlograma(Fig. 5-8), yule-walker(Fig. 5-7),Burg(Fig. 5-9) con diferentes probabilidades de falsa alarma (1,3,5,8,10 %).

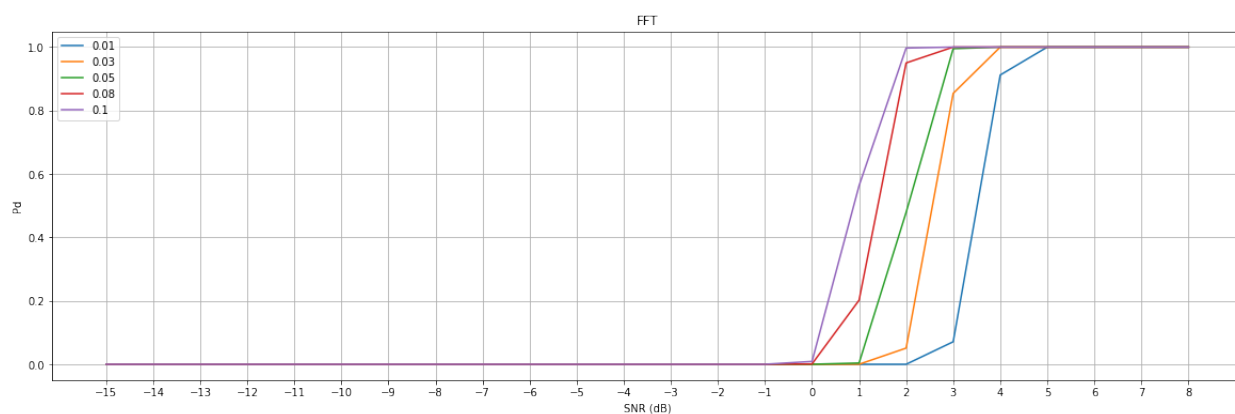


Figura 5-6.: SNR vs P_d para diferentes probabilidades de falsa alarma P_{fa} (1,3,5,8,10 %) para la FFT.

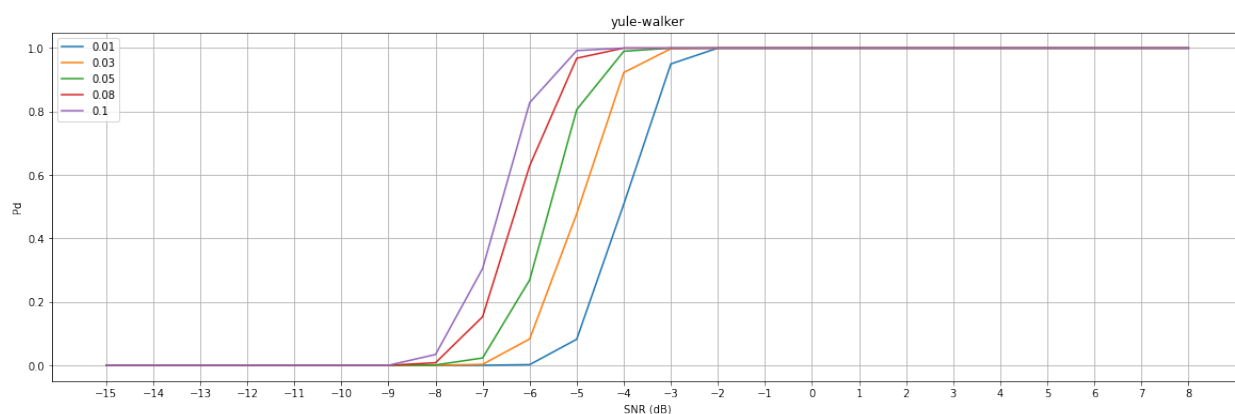


Figura 5-7.: SNR vs P_d para diferentes probabilidades de falsa alarma P_{fa} (1,3,5,8,10 %) para el método Yule-walker.

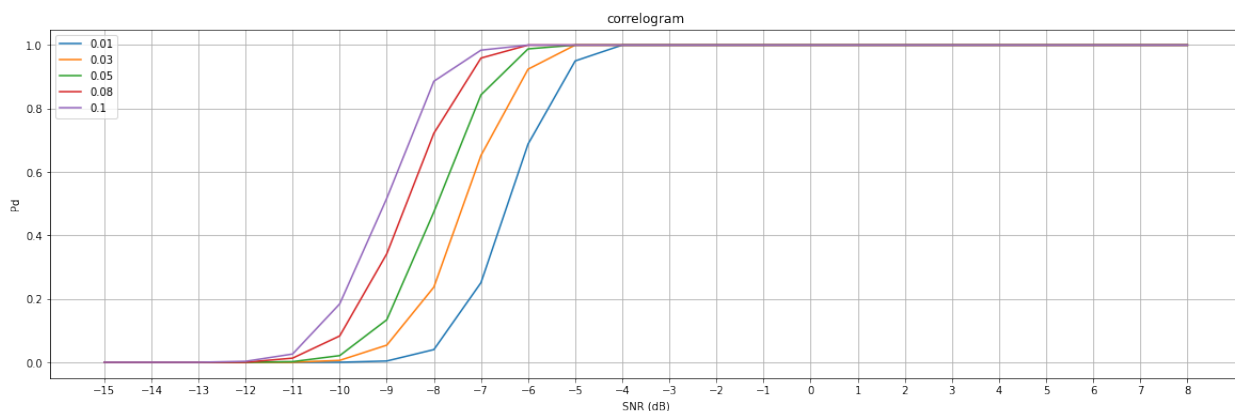


Figura 5-8.: SNR vs Pd para diferentes probabilidades de falsa alarma Pfa (1,3,5,8,10 %) para el correlograma.

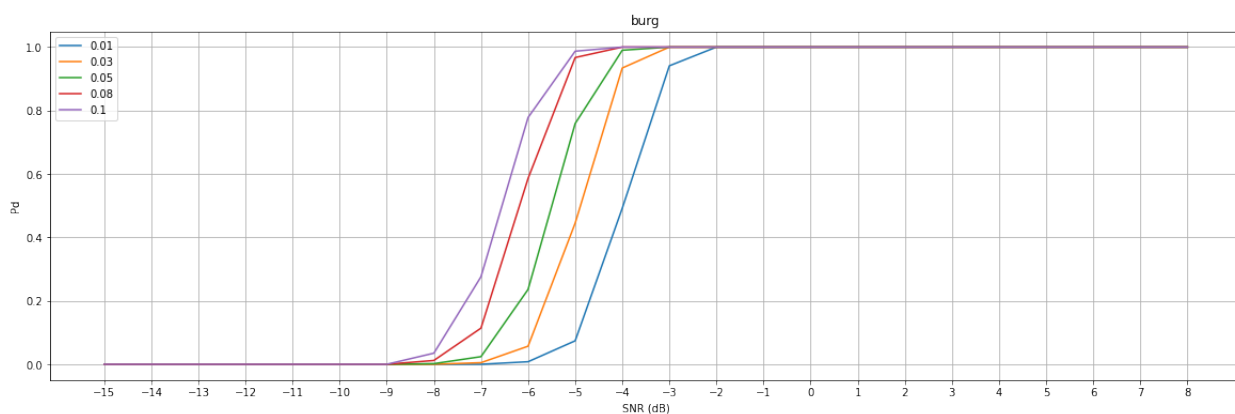


Figura 5-9.: SNR vs Pd para diferentes probabilidades de falsa alarma Pfa (1,3,5,8,10 %) para el método Burg.

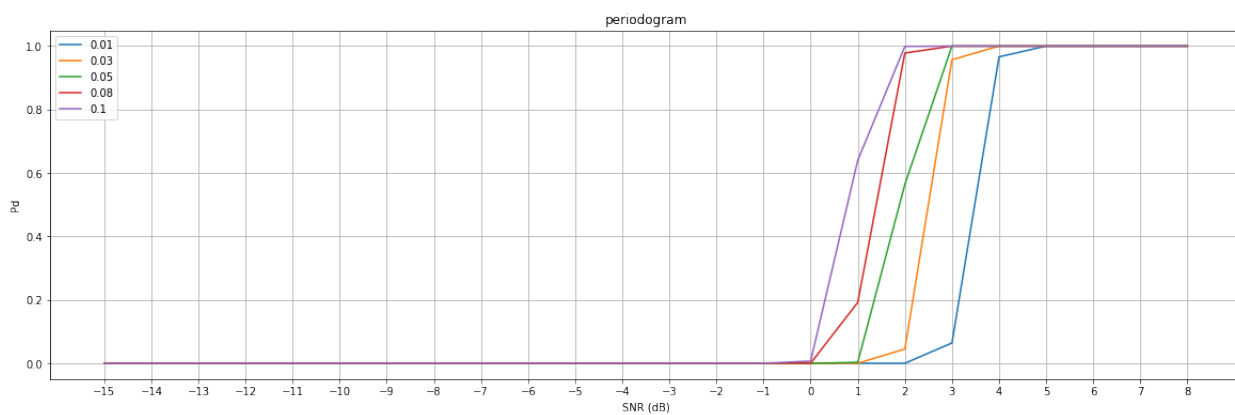


Figura 5-10.: SNR vs Pd para diferentes probabilidades de falsa alarma Pfa (1,3,5,8,10 %) para el método Periodograma.

| método de estimación espectral | Tiempo (Segundos) |
|--------------------------------|-------------------|
| FFT | 0,012261868 |
| Correlograma | 0,009383917 |
| Periodogram | 0,005033016 |
| Burg | 0,25022006 |
| Yule-Walker | 0,308240891 |

Tabla 5-1.: Tiempo de ejecución de 1 iteración para cada uno de los métodos de estimación espectral evaluados.

La Fig. 5-11 muestra el desempeño obtenido por la FFT y el Periodograma en escala logarítmica, con el fin de obtener mayor detalle de los resultados.

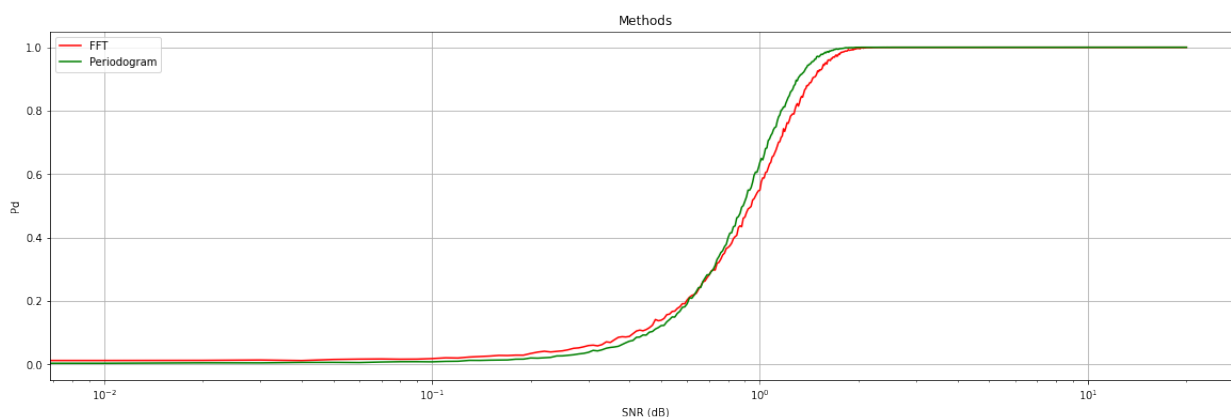


Figura 5-11.: SNR vs Pd para la FFT y el Periodograma en escala logarítmica.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para una probabilidad de falsa alarma del 10 % para los métodos evaluados, los parámetros configurados para cada bloque de estimación espectral se especifican en el Anexo B.

En la Fig. 5-12 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para obtener el desempeño de los métodos de estimación espectral implementados; para ello se estableció una probabilidad de falsa alarma del 10 % con diferentes valores de SNR.

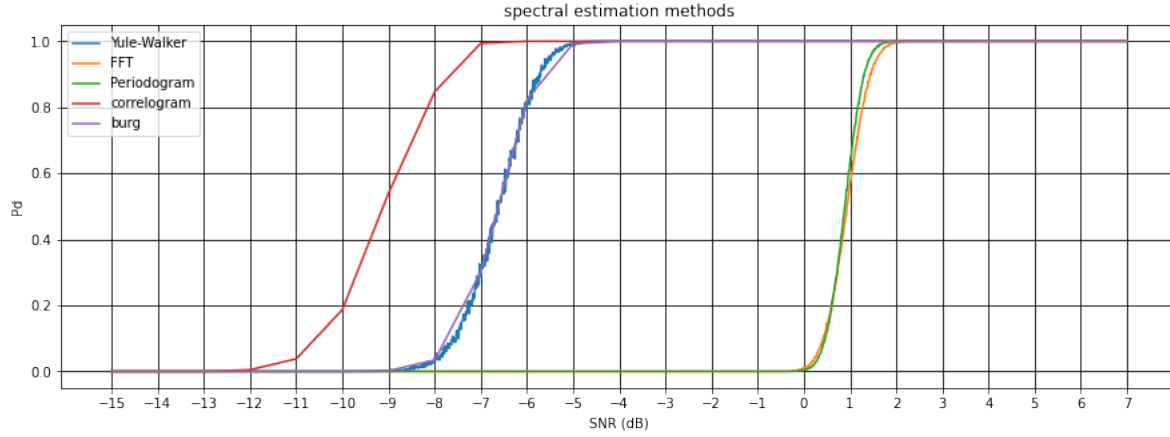


Figura 5-12.: SNR vs Pd para métodos paramétricos y no paramétricos evaluados con Pfa de 0.1.

5.2. Análisis de resultados

En esta sección se encuentran el análisis de los resultados de los métodos de estimación espectral implementados, del detector de energía y del desempeño de los métodos estimación espectral.

5.2.1. Métodos de estimación espectral implementados

De acuerdo con la Fig. 5-1 y la Fig. 5-2 los métodos de estimación espectral implementados muestran un buen desempeño para estimar el espectro frente a la comparación de estos métodos con la FFT, se observa fidelidad en el momento de determinar la densidad espectral de potencia (PSD) para caracterizar el contenido espectral. Los métodos paramétricos dependen de los parámetros configurados, entre más altos sean estos poseen más fidelidad para estimar el espectro, pero consume mayores recursos computacionales y el tiempo de ejecución aumenta considerablemente.

5.2.2. Método de detección del espectro seleccionado

Como se muestra en la Fig. 5-3 y la Fig. 5-4 el detector de energía implementado de acuerdo con un piso de ruido posee la capacidad de determinar la presencia o ausencia de una señal determinada con cierta probabilidad de falsa alarma y determinado SNR ver Fig. 5-5, el detector muestra a través de las simulaciones bajo nivel de complejidad en términos de computación y se puede aplicar sobre cualquier tipo de señal.

El detector de energía permitió detectar la presencia de señales de interés (señales GPS) con probabilidad de falsa alarma entre 1 % y 10 % de acuerdo al teorema de neyman pearson

implementado a través de un bloque en GNU Radio. La Fig. 5-6 y Fig. 5-7 muestran los resultados obtenidos para la FFT (no paramétrico) y Yule-Walker (paramétrico) evaluados de acuerdo a diferentes probabilidades de falsa alarma. Si la probabilidad de falsa alarma aumenta el detector es menos selectivo al momento de obtener la probabilidad de detección, por ejemplo, con una probabilidad de falsa alarma de 1 % para la FFT el detector obtiene una probabilidad de detección del 100 % a un valor SNR de 5 dB, mientras que una probabilidad de falsa alarma del 10 % el detector obtiene una probabilidad de detección del 100 % a un valor SNR de aproximadamente de 2 dB; en el caso de Yule-walker el detector determina una probabilidad de detección del 100 % a un valor SNR de -2 dB para una probabilidad de falsa alarma del 1 %, y para una probabilidad de falsa alarma de 10 % se obtiene a -5 dB. Cabe resaltar que una elevada probabilidad de falsa alarma puede ocasionar que el detector determine con mayor probabilidad la existencia de señal cuando realmente no había señal.

5.2.3. Desempeño del detector variando los métodos de estimación espectral

La metodología propuesta permitió evaluar el desempeño de los métodos de estimación ante diferentes escenarios (Pfa y SNR). En el desarrollo de las simulaciones ante un elevado número de iteraciones los métodos paramétricos toman más tiempo que los métodos no paramétricos debido a la complejidad computacional que estos exigen al realizar la estimación de los modelos de acuerdo con la Tabla. 5-1. El desempeño de los métodos depende de los datos tomados de la señal y parámetros configurados. De acuerdo con la Fig. 5-12 Los métodos paramétricos Burg y Yule-Walker poseen un desempeño similar en el sistema propuesto, al igual que los métodos no paramétricos FFT y Periodograma Fig. 5-11. El método del Correlograma es el que a través de las simulaciones permitió detectar señales a más bajo SNR.

6. Conclusiones

6.1. Conclusiones

El Software-defined radio (SDR) es una tecnología revolucionaria que involucra las telecomunicaciones con el desarrollo de software, para controlar casi todas las funciones de un sistema de comunicaciones; usualmente es usado bajo un enfoque académico para la realización de investigaciones basadas en medios inalámbricos de manera sencilla y económicamente rentable. Esta tecnología con el uso de hardware permite desarrollar módulos versátiles para implementarlos y validar sus funcionalidades en la práctica. Con una implementación sobre SDR se pueden realizar diferentes tareas y aplicaciones sobre señales, que van desde la detección, identificación, almacenamiento y caracterización de señales, hasta la transmisión, análisis, entre otras.

La implementación de nuevos métodos de estimación espectral y su correspondiente evaluación de eficiencia brindan una nueva visión de otros métodos para saber cómo está distribuida la potencia o la energía de una señal sobre las distintas frecuencias con la que esta se encuentra formada, y usarlo para diferentes aplicaciones en el campo del análisis de señales. Su desarrollo en el software GNU Radio permite el uso de los métodos que previamente no se encontraban implementados en software.

Implementar un sistema de detección y estimación espectral usando Software Defined Radio (SDR), permite tener una solución de bajo coste, portable, mantenible, y auto configurable, además de detectar la presencia o ausencia de señales con bajos niveles de complejidad en implementación y computación. Este proyecto se aplica sobre señales GPS, sin embargo, cabe resaltar que podría implementarse para soluciones de inteligencia de señales y la identificación de objetivos vía RF.

La implementación de un detector de energía permite detectar señales de forma eficiente debido al bajo nivel de complejidad en implementación y computación y no se requiere de ningún conocimiento previo de la señal, dependiendo del método de estimación espectral usado y de sus parámetros brinda muy buenas métricas para decidir la presencia o ausencia de señales de interés.

Los métodos paramétricos que dependen de sus parámetros permiten detectar señales de

interés a más bajos valores de relación señal/ruido (SNR) que los métodos no paramétricos, aunque en términos de complejidad de implementación y tiempo de ejecución son mejores los métodos no paramétricos. Dependiendo de la aplicación se pueden usar métodos paramétricos o no paramétricos, en el caso de GPS el correlograma muestra un buen desempeño en términos de tiempo de ejecución y detección a bajos niveles de SNR que los otros métodos de estimación espectral.

Se obtuvo una sección del espectro en la banda L1 (1575.42 MHz) del sistema de navegación por satélite GPS con parámetros conocidos, con el fin de realizar las simulaciones sobre esta sección del espectro; lo anterior permitió evaluar el desempeño para los diferentes métodos de estimación espectral implementados, midiendo la probabilidad de detección en función de la relación señal/ruido (SNR) con una probabilidad de falsa alarma dada bajo condiciones controladas.

Bibliografía

- [1] L. F. Pedraza, F. Forero, and I. P. Páez, “Detección de espectro para radio cognitiva,” *Ingeniare. Rev. chil. ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 197–210, Aug. 2012, doi: 10.4067/S0718-33052012000200007.
- [2] J. Jagannath, H. M. Saarinen, and A. L. Drozd, “Framework for automatic signal classification techniques (FACT) for software defined radios,” in *2015 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA)*, Verona, NY, USA, May 2015, pp. 1–7, doi: 10.1109/CISDA.2015.7208628.
- [3] A. Bello, B. Biswal, S. Shetty, C. Kamhoua, and K. Gold, “Radio frequency classification toolbox for drone detection,” in *Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi-Domain Operations Applications*, Baltimore, United States, May 2019, p. 69, doi: 10.1117/12.2514759.
- [4] T. Cokelaer and J. Hasch, “‘Spectrum’: Spectral Analysis in Python,” *JOSS*, vol. 2, no. 18, p. 348, Oct. 2017, doi: 10.21105/joss.00348.
- [5] E. D. Kaplan y C. Hegarty, Eds., *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*, Third edition. Boston; London: Artech House, 2017.
- [6] G. Montagna et al., “A 35-mW 3.6-mm² fully integrated 0.18- μ m CMOS GPS radio,” in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 7, pp. 1163–1171, July 2003, doi: 10.1109/JSSC.2003.813298.
- [7] T. Yucek and H. Arslan, “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications,” in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, First Quarter 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090109.
- [8] D. M. M. Plata and Á. G. A. Reátiga, “Evaluation of energy detection for spectrum sensing based on the dynamic selection of detection-threshold,” *Procedia Engineering*, vol. 35, pp. 135–143, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.04.174.
- [9] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. W. Brodersen, “Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation,” in *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum - TAPAS '06*, Boston, Massachusetts, 2006, pp. 12-es, doi: 10.1145/1234388.1234400.

- [10] A. Nafkha, M. Naoues, K. Cichon and A. Kliks, "Experimental spectrum sensing measurements using USRP Software Radio platform and GNU-radio," 2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), Oulu, 2014, pp. 429-434, doi: 10.4108/icst.crowncom.2014.255415.
- [11] Yixian Liu, Chunyan Zeng, Hongjiang Wang and Gang Wei, "Energy detection threshold optimization for cooperative spectrum sensing," 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control, Shenyang, 2010, pp. 566-570, doi: 10.1109/I-CACC.2010.5486887.
- [12] S. Malluri and V. K. Pamula, "Gaussian Q-function and Its Approximations," 2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, Gwalior, 2013, pp. 74-77, doi: 10.1109/CSNT.2013.25.
- [13] J. O. Smith, Mathematics of the discrete Fourier transform (DFT): with audio applications. North Charleston: BookSurge, 2010.
- [14] "Signal-to-noise ratio," Wikipedia. Jun. 30, 2020, Accessed: Jul. 25, 2020. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Signal-to-noise_ratio&oldid=965237241.
- [15] J. H. Aguilar Rentería and A. Navarro Cadavid, "Cognitive radio – State of the Art," sist.telemat., vol. 9, no. 16, p. 31, Mar. 2011, doi: 10.18046/syt.v9i16.1028.
- [16] J. M. Huidobro, "Radio Cognitiva. La radio se vuelve inteligente," Antena de telecomunicación, pp. 38–40, Apr. 2011.
- [17] B. Wang and K. J. R. Liu, "Advances in cognitive radio networks: A survey," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 5, no. 1, pp. 5-23, Feb. 2011, doi: 10.1109/JSTSP.2010.2093210.
- [18] "GPS.gov: GPS Spectrum and Interference Issues." <https://www.gps.gov/spectrum/> (accessed Jul. 20, 2020).
- [19] J. Rodríguez de Haro, "Análisis software y hardware del SDR HackRF One," Nov. 2017, Accessed: Jul. 25, 2020. [Online]. Available: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/48019>.
- [20] "About GNU Radio · GNU Radio," GNU Radio. <https://www.gnuradio.org/about/> (accessed Jul. 25, 2020).
- [21] "About RTL-SDR," rtl-sdr.com, Apr. 11, 2013. <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/> (accessed Jul. 25, 2020).
- [22] J. R. Machado-Fernández, "Software Defined Radio: Basic Principles and Applications," Fac. Ing., vol. 24, no. 38, p. 79, Dec. 2014, doi: 10.19053/01211129.3160.

- [23] G. J. M. Llamas and A. S. Banacia, “Spectrum sensing system in software-defined radio for determining spectrum availability,” in 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC), Danang, Vietnam, Jan. 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ELINFOCOM.2016.7562961.
- [24] R. W. Stewart et al., “A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 64–71, Sep. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263347.
- [25] “GPS.gov: El Sistema de Posicionamiento Global.” <https://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php> (accessed Jul. 30, 2020).
- [26] P. Stoica and R. L. Moses, *Spectral analysis of signals*. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall, 2005.
- [27] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital signal processing: principles, algorithms, and applications*, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1996.
- [28] “A decade of gr-specest – Free Spectral Estimation! · GNU Radio,” GNU Radio. https://www.gnuradio.org/grcon/grcon19/presentations/a_decade_of_gr-specest_-_free_spectral_estimation/ (accessed Jul. 31, 2020).
- [29] “Métodos paramétricos - MATLAB & Simulink - MathWorks España.” <https://es.mathworks.com/help/signal/ug/parametric-methods.html> (accessed Jul. 31, 2020).
- [30] Duarte, C, “Estructura de las Señales del GPS,” *Hacia el espacio*, May 01, 2016. <http://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=350> (accessed Jul. 31, 2020).

A. Anexo 1. Generación del SNR (Relación señal/ruido) deseado.

Para la implementación de un detector de energía es importante tener un conocimiento acertado sobre la varianza del ruido, ya que un pequeño error disminuye considerablemente el desempeño, adicional a ello, conocer correctamente el piso de ruido garantiza para cualquier nivel de SNR cierta probabilidad de detección [1],[7].

Para establecer el SNR deseado se realiza el cálculo de dos maneras con el fin de validar una correcta obtención del valor del SNR deseado, potencia promedio y amplitud de las señales (valor RMS) a través de GNU Radio.

Potencia promedio.

Inicialmente se halla la potencia promedio en el dominio del tiempo, a través de N muestras de la señal de acuerdo con la ecuación (2-6).

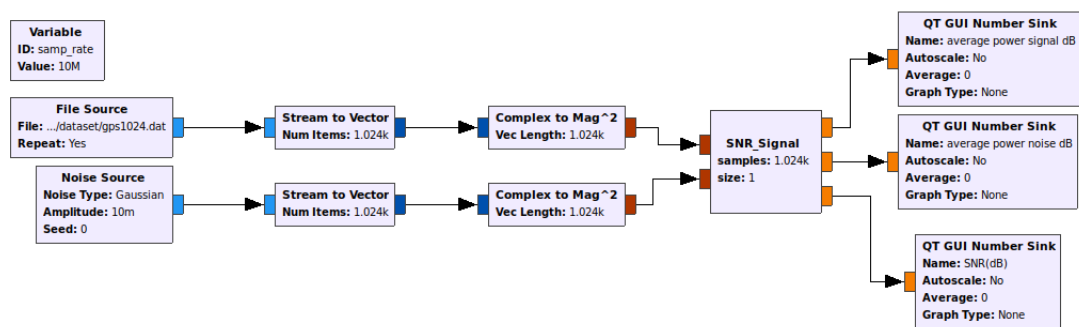


Figura A-1.: Potencia promedio en el dominio del tiempo para la obtención del SNR.

La Fig. A-1 representa el diagrama de bloques utilizado para obtener el valor del SNR de las señales entrantes; File Source permite abrir las muestras de la señal GPS almacenada en un flujo de IQ de muestras complejas, el bloque Noise Source genera ruido gaussiano, tanto el ruido como la señal son convertidas en un vector de N muestras a través del bloque Stream to Vector, luego al vector a cada muestra se obtiene su magnitud al cuadrado a través del bloque Complex to Mag², luego estos vectores pasan al bloque SNR.signal el cual calcula

el valor del SNR. Para hallar la potencia promedio en el dominio del tiempo de la señal se realiza la implementación del bloque SNR_Signal. Este bloque recibe dos vectores uno correspondiente al ruido y el siguiente a la señal, se halla el promedio de ambos vectores, la primera salida corresponde al promedio de la señal, la siguiente a la del ruido y por último la división entre la potencia de la señal y la potencia del ruido (SNR), posteriormente se realiza la correspondiente conversión a dB ($10(\log_{10}(\text{value}))$) de cada salida, y se visualizan a través de los bloques QT GUI Number sink.

Validación del Método (Potencia promedio).

$$x(n) = Ae^{j(\omega nT + \varphi)}$$

$$P_x = A^2$$
(A-1)

Cuando la señal de entrada es una sinusoidal compleja la potencia promedio es igual a la potencia instantánea que es la amplitud al cuadrado [13].

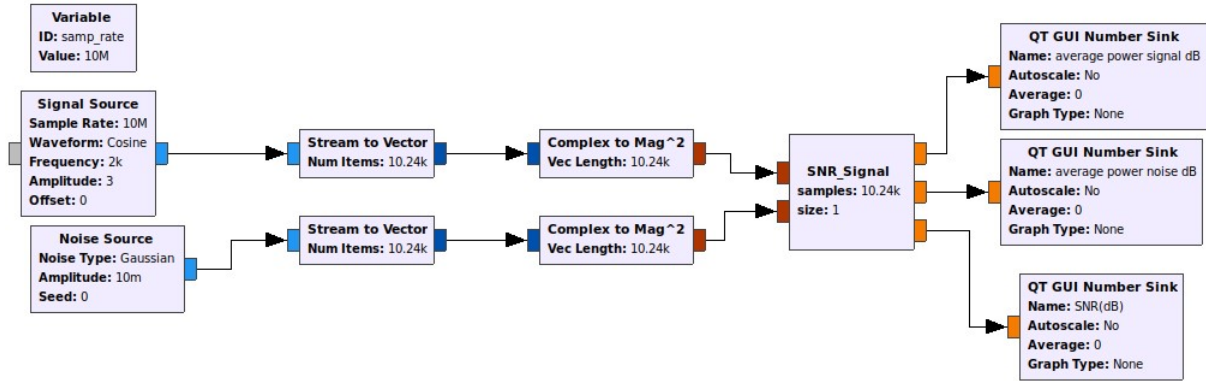


Figura A-2.: GRC para obtener la potencia promedio de una señal sinusoidal.

En la Fig. A-2 se observan los parámetros de la señal senoidal de prueba ($A=3$, $f_c=2$ kHz), los bloques de generación en GNU Radio Companion (GRC, la potencia de la señal de unidad 9 como era de esperarse).

Valor RMS.

A través de GNU Radio se establece que el valor RMS (Root Mean Square) de la señal es de unidad de aproximadamente 29.7, conociendo el valor RMS de la señal se puede establecer el valor del ruido para obtener el SNR deseado de acuerdo con la ecuación (2-3).

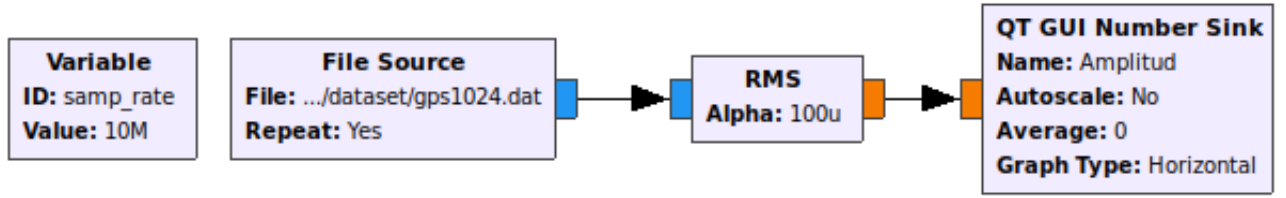


Figura A-3.: Obtención de la potencia media RMS de la señal.

Se implementa la ecuación (2-5) en GNU Radio para encontrar el SNR y validar la primera implementación (potencia promedio) para calcular el SNR.

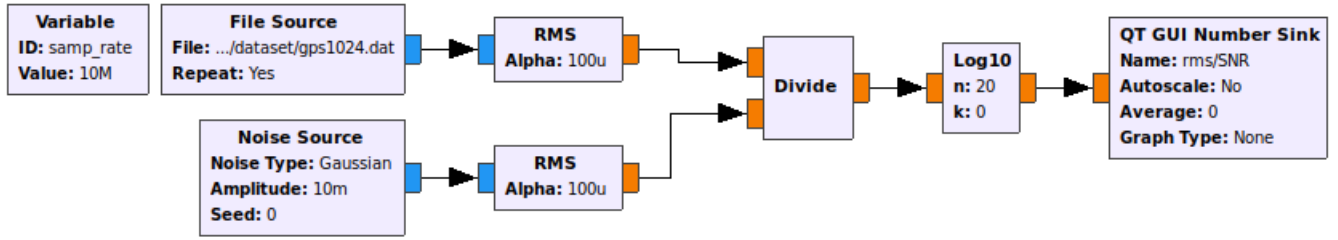


Figura A-4.: Obtención del SNR a través de la amplitud de las señales.

La Fig. A-4 hace referencia al diagrama de bloques que permite obtener el valor del SNR, el bloque File Source genera el flujo complejo de las muestras de la señal y el ruido gaussiano es generado por el bloque Noise Source, El bloque RMS calcula la potencia media RMS tanto para la señal como para el ruido, se divide el valor obtenido de la señal entre el valor RMS del ruido a través del bloque Divide, luego se aplica la ecuación (2-5) a través del bloque Log10, por último se visualiza el valor del SNR obtenido a través del bloque QT GUI Number Sink.

Para obtener el SNR deseado de acuerdo con el valor RMS de señal ya obtenido se cambia el parámetro RMS del ruido que corresponde al parámetro Amplitude del bloque Noise Source, calculando el valor RMS de la señal se obtiene el valor para el ruido con un SNR deseado en dB de acuerdo con la ecuación (A-2) obtenida de (2-4).

$$A_{noise} = \frac{A_{signal}}{10^{\left(\frac{SNR}{20}\right)}} \quad (A-2)$$

Ambos métodos muestran resultados similares al momento de calcular el valor del SNR ver Tabla A-1.

| Valor RMS (dB) | Potencia promedio (dB) |
|----------------|------------------------|
| -20.2 | -20.1 |
| 1.1 | 1.0 |
| 15 | 15.2 |
| -13 | -13.1 |

Tabla A-1.: Valores obtenidos de SNR mediante los métodos “Valor RMS” y el método de potencia promedio

B. Anexo 2. Parámetros de los métodos de estimación espectral

| FFT | |
|-----------------|-------------------------|
| Parámetro | Valor |
| FFT Size | 1024 |
| Forward/Reverse | Forward |
| Window | window.blackmanharris() |
| Shift | Yes |
| Num. Threads | 1 |

Tabla B-1.: Parámetros del bloque FFT

| Yule-Walker | |
|---------------|--------|
| Parámetro | Valor |
| order | 15 |
| norm | biased |
| NFFT | 1024 |
| sampling | 1 |
| scale_by_freq | False |

Tabla B-2.: Parámetros del bloque Yule-Walker

| Burg | |
|---------------|-------|
| Parámetro | Valor |
| order | 15 |
| criteria | None |
| NFFT | 1024 |
| sampling | 1 |
| scale_by_freq | False |

Tabla B-3.: Parámetros del bloque Burg

| Correlograma | |
|---------------|---------|
| Parámetro | Valor |
| sampling | 1 |
| lag | 30 |
| window | Hanning |
| NFFT | 1024 |
| scale_by_freq | False |

Tabla B-4.: Parámetros del bloque Correlograma

| Periodograma | |
|---------------|--------|
| Parámetro | Valor |
| sampling | 1 |
| window | kaiser |
| NFFT | 1024 |
| scale_by_freq | False |

Tabla B-5.: Parámetros del bloque Periodograma