

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE RECEPCIÓN DE
SEÑALES ADS-B POR MEDIO DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE



PABLO ERNESTO MUÑOZ HINCAPIÉ

Tesis de Pregrado en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Director(a)
HAROLD ARMANDO ROMO ROMERO
M.Sc en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, 2022

PABLO ERNESTO MUÑOZ HINCAPIÉ

IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE RECEPCIÓN DE
SEÑALES ADS-B POR MEDIO DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones

Título de pregrado en:
Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Director(a):
HAROLD ARMANDO ROMO ROMERO
M.Sc en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Popayán, 2022

*Dedico este logro especialmente a mi madre, a mi padre, a mi hermano, a mi
prometida y demás seres queridos,
quienes me han brindado siempre su apoyo incondicional,
a mis profesores que me formaron a lo largo de la carrera
y a todos aquellos que de alguna u otra manera hicieron parte de este proceso,
sin ustedes nada de esto sería posible.*

Pablo Ernesto Muñoz Hincapié.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios el haberme permitido llegar hasta este punto, que sería de mi sin su guía. Agradezco a mi madre Aura María Hincapié y a mi padre Iván Ernesto Muñoz por absolutamente todo, son mi motor y a quienes estarán siempre dedicados todos mis triunfos. A mi hermano Juan Daniel Muñoz por su acompañamiento y apoyo constante en toda esta difícil etapa y a mi nana Rosalba Quintero por su amor incondicional durante tantos años de mi vida. Un agradecimiento muy especial a mi novia Ana María Rodríguez, quien llegó a mi vida y le dio un motivo más para salir adelante, gracias por ser mi compañía. Agradezco también a los demás miembros de toda mi familia y a mis amigos más cercanos que siempre han creído en mí, aun en los momentos de más incertidumbre y zozobra. Y finalmente un agradecimiento muy especial para el Ingeniero Harold Romo a quien admiro por su profesionalismo y rectitud, muchas gracias ingeniero por creer que era capaz, aun cuando muchos decidieron darme la espalda, usted fue el único que me recibió y apoyó. Es algo que jamás podré olvidar.

Contenido

Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	X
Lista de Acrónimos	XI
Introducción	XIV
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Sistemas de Vigilancia Aérea	1
1.1.1. Radar primario de vigilancia (PSR, Primar Surveillance Radar)	1
1.1.2. Radar Secundario de Vigilancia (SSR, Secondary Surveillance Radar)	3
1.1.3. Sistema de Multilateración (MLAT, Multilateration System) . .	4
1.2. Sistema ADS-B	6
1.2.1. Diagrama general del sistema ADS-B	8
1.2.2. Formato del mensaje de ADS-B	9
1.2.3. Arquitectura del sistema ADS-B	11
1.3. SDR	12
1.3.1. Estructura Funcional de un Sistema SDR	13
1.3.2. Arquitectura de SDR	14
2. DESARROLLO METODOLÓGICO	16
2.1. Herramientas utilizadas	16
2.1.1. SOFTWARE	17
2.1.2. HARDWARE	18
2.2. REQUERIMIENTOS	22
2.2.1. DESARROLLO DE ETAPAS DEL SISTEMA	24
2.3. DESARROLLO DE ETAPA DE RECEPCIÓN	36
3. MÉTRICAS, CASOS DE ESTUDIO, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
3.1. Métricas	47
3.1.1. Tasa de Error de Bit (BER, Bit Error Rate)	47
3.1.2. Estimación de la BER	47
3.2. CASOS DE ESTUDIO	48

3.2.1. Consideraciones y limitaciones a tener en cuenta previo al análisis y presentación de cada caso de estudio	48
3.2.2. Caso 1: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 1 metro.	51
3.2.3. Caso 2: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 4 metros.	54
3.2.4. Caso 3: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 9 metros.	56
3.2.5. Caso 4: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 6 metros.	58
3.2.6. Caso 5: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 9 metros.	60
3.2.7. Caso 6: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 11 metros.	62
3.2.8. Caso 7: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 10 metros.	64
3.2.9. Caso 8: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 20 metros.	66
3.2.10. Caso 9: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 40 metros.	68
3.2.11. Caso 10: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 10 metros.	70
3.2.12. Caso 11: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 20 metros.	72
3.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTRICAS OBTENIDAS.	74
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	76
4.1. CONCLUSIONES	76
4.2. RECOMENDACIONES	76
4.3. TRABAJOS FUTUROS	77
Bibliografía	79

Lista de figuras

1.1. Funcionamiento del Radar Primario de Vigilancia (PSR). Tomado de [1].	2
1.2. Funcionamiento del Radar Secundario de Vigilancia SSR. Tomado de [1].	3
1.3. Funcionamiento del Sistema de Multilateración. Tomado de [1].	4
1.4. Descripción general de la tecnología ADS-B. Tomado de [2].	6
1.5. Funcionamiento general del Sistema ADS-B. Tomado de [1].	7
1.6. Composición general del Sistema ADS-B. Tomado de [3].	8
1.7. Formato del Mensaje ADS-B. Tomado de [3].	10
1.8. Arquitectura del sistema ADS-B. Tomado de [4].	11
1.9. Diagrama de bloques funcionales de la tecnología SDR. Tomado de [5].	13
1.10. Arquitectura SDR. Tomado de [5].	15
2.1. Metodología RUP.	16
2.2. Dispositivo RTL SDR.	20
2.3. Dispositivo USRP B210. Tomado de [6].	20
2.4. Arquitectura de la tarjeta USRP (B200-B210). Tomado de [6].	22
2.5. Arquitectura del Sistema Prototipo.	24
2.6. Diagrama de flujo del Sistema.	26
2.7. Portada GUI Transmisión.	27
2.8. GUI Transmisión.	28
2.9. GUI Transmisión, conexión establecida.	29
2.10. Inicio de transmisión.	30
2.11. Código de creación objeto transmisor.	30
2.12. Trama ADS-B conformada.	32
2.13. Bits “crudos” vs bits mapeados en BPPM.	33
2.14. Señal ADS-B banda base en el dominio temporal.	34
2.15. Señal ADS-B banda base en el dominio temporal ampliada.	34
2.16. Espectro de la señal transmitida en banda base.	35
2.17. Configuración del objeto receptor para el dispositivo USRP.	37
2.18. Respuesta al impulso del filtro conformador de pulsos.	39
2.19. Salida del preámbulo de sincronización	39
2.20. Interfaz de visualización de información recibida.	41
2.21. Ultima frame capturada en un proceso de recepción.	42
2.22. Paquete ADS-B dentro de la trama capturada.	43
2.23. Señal de Energía en recepción.	43
2.24. Espectro de la señal.	44
2.25. Salida de la señal capturada al pasar a través del filtro correlacionador.	45
2.26. Tabla de visualización de información recibida.	46
2.27. Diagrama de bloques Receptor BPPM.	46

3.1. Posibles formas de conseguir una correcta visualización de lo que se esta transmitiendo y recibiendo.	50
3.2. Ubicación de Transmisor y Receptor a 1 mt de distancia en ambiente indoor con LOS.	52
3.3. Espectro de la señal recibida.	53
3.4. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	53
3.5. Ubicación de Transmisor y Receptor a 4 mts. de distancia en ambiente indoor con LOS.	55
3.6. Espectro de la señal recibida.	56
3.7. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	56
3.8. Ubicación de Transmisor y Receptor a 9 mts. de distancia en ambiente indoor con LOS.	57
3.9. Espectro de la señal recibida.	58
3.10. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	58
3.11. Ubicación de Transmisor y Receptor a 6 mts. de distancia en ambiente indoor sin LOS.	59
3.12. Espectro de la señal recibida.	60
3.13. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	60
3.14. Ubicación de Transmisor y Receptor a 9 mts. de distancia en ambiente indoor sin LOS.	61
3.15. Espectro de la señal recibida.	62
3.16. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	62
3.17. Ubicación de Transmisor y Receptor a 11 mts. de distancia en ambiente indoor sin LOS.	63
3.18. Espectro de la señal recibida.	64
3.19. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	64
3.20. Ubicación de Transmisor y Receptor a 10 mts. de distancia en ambiente outdoor con LOS.	65
3.21. Espectro de la señal recibida.	66
3.22. Últimos 5 ms de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	66
3.23. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	66
3.24. Ubicación de Transmisor y Receptor a 20 mts. de distancia en ambiente outdoor con LOS.	67
3.25. Espectro de la señal recibida.	68
3.26. Últimos 5 ms de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	68
3.27. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	68
3.28. Ubicación de Transmisor y Receptor a 40 mts. de distancia en ambiente outdoor con LOS.	69
3.29. Espectro de la señal recibida.	70
3.30. Últimos 5 ms de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	70
3.31. Ubicación de Transmisor y Receptor a 10 mts. de distancia en ambiente outdoor sin LOS.	71
3.32. Espectro de la señal recibida.	72
3.33. Últimos 5 ms de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	72

3.34. Ubicación de Transmisor y Receptor a 20 mts. de distancia en ambiente outdoor sin LOS.	73
3.35. Espectro de la señal recibida.	74
3.36. Últimos 5 <i>ms</i> de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.	74

Lista de Tablas

1.1. Funcionamiento de SDR en transmisión y Recepción. Tomado de [5].	14
2.1. Cuadro comparativo de dispositivos SDR.	19
3.1. Planificación de Casos de Estudio.	49
3.2. Valores propuestos de L_0 y n según la Universidad de Bristol [7].	51
3.3. Valores propuestos de los parámetros $\alpha \beta \gamma, \sigma$ según la recomendación de la ITU-R P.1411-9 [8].	52
3.4. Tabla comparativa de resultados, donde P_{Rx} : Potencia de Recepción.	75

Lista de Acrónimos

1SM	<i>One Slope Model</i> , Modelo de 1 Escalón
AA	<i>Aircraft Address</i> , Dirección de Aeronave
ADC	<i>Analog to Digital Conversor</i> , Conversor Análogo Digital
ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance - Broadcast</i> , Difusión Automática de Vigilancia Dependiente
ALRS	<i>Alerting Service</i> , Servicio de Alerta
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i> , Circuito Integrado de Aplicación Específica
ATC	<i>Air Traffic Control</i> , Control de Tráfico Aéreo
ATM	<i>Air Traffic Management</i> , Gestión de Tráfico Aéreo
ATS	<i>Air Traffic Services</i> , Servicios de Tráfico Aéreo
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit
BPPM	<i>Binary Pulse Position Modulation</i> , Modulación por Posición de Pulso Binario
CA	<i>Capability</i> , Capacidad
CPR	<i>Compact Position Reporting</i> , Reporte Compacto de Posición
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , Código de Redundancia Cíclica
DAC	<i>Digital to Analog Conversor</i> , Conversor Digital Análogo
DAQ	<i>Data Acquisition</i> , Adquisición de Información
DC	<i>Direct Current</i> , Corriente Continua
DDC	<i>Digital Down Conversion</i> , Conversión Digital de Bajada
DF	<i>Downlink Format</i> , Formato de Enlace de Bajada
DL	<i>Down Link</i> , Enlace de Bajada

DSP	<i>Digital Signal Processor</i> , Procesador Digital de Señal
DUC	<i>Digital Up Conversion</i> , Conversión Digital de Subida
ES	<i>Extended Squitter</i> , Squitter Extendido
FAA	<i>Federal Aviation Association</i> , Asociación Federal de Aviación
FIS	<i>Flight Information Service</i> , Servicio de Información de Vuelo
FIS - B	<i>Flight Information Service - Broadcast</i> , Servicio de Información de Vuelo - Difusión
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> , Respuesta al Impulso Finito
FM	<i>Frequency Modulation</i> , Modulación en Frecuencia
FPGA	<i>Field Programmable Gate Arrays</i> , Matriz de compuertas programables
F_s	<i>Frequency Sampling</i> , Frecuencia de Muestreo
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> , Sistema Global de Navegación Satelital
GPL	<i>General Public License</i> , Licencia Pública General
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> , Paquete General de Servicio de Radio
HF	<i>High Frequency</i> , Alta Frecuencia
IATA	<i>International Air Transport Association</i> , Asociación Internacional de Transporte Aéreo
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i> , Organización Internacional de Aviación Cívil
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> , Ambiente Integrado de Desarrollo
IF	<i>Intermediate Frequency</i> , Frecuencia Intermedia
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet
I/Q	<i>In-Phase/Quadrature</i> , En Fase/Cuadratura
LOS	<i>Line Of Sight</i> , Línea de Vista
MIMO	<i>Multiple Inputs Multiple Outputs</i> , Entradas Múltiples Salidas Múltiples
MLAT	<i>Multilateration System</i> , Sistema de Multilateración
NLOS	<i>No Line Of Sight</i> , Sin Línea de Vista
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i> , Modulación por Posición de Pulsos

PPM	<i>Pulse Per Minute</i> , Pulsos por Minuto
PSK	<i>Phase Shift Keying</i> , Modulación por cambio de Fase
PSR	<i>Primary Surveillance Radar</i> , Radar de Vigilancia Primario
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia
R_s	<i>Rate Symbol</i> , Tasa de Símbolo
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Racional Unificado
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , Radio Definido por Software
SPC	<i>Samples Per Chip</i> , Muestras por Chip
SPS	<i>Samples Per Symbol</i> , Muestras por Símbolo
SSR	<i>Secondary Surveillance Radar</i> , Radar de Vigilancia Secundario
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo
TD_{oA}	<i>Time Difference of Arrival</i> , Diferencia de Tiempo de Llegada
TIS-B	<i>Traffic Information Service - Broadcast</i> , Servicio de Tráfico de Información - Difusión
UAT	<i>Universal Access Transceiver</i> , Tranceptor de Acceso Universal
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , Ultra Alta Frecuencia
USD	<i>United States Dollar</i> , Dolar Estado Unidense
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> , Software Universal de Radio Perimetral
VHF	<i>Very High Frequency</i> , Muy Alta Frecuencia
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica

Introducción

Dada la naturaleza dinámica del sector, la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO, International Civil Aviation Organization) se ve en la necesidad de adoptar un enfoque proactivo hacia la seguridad operacional para abordar los asuntos emergentes y posibles riesgos activos. Hoy en día el Control de Tráfico Aéreo (ATC, Air Traffic Control) y la Gestión del Tráfico Aéreo (ATM, Air Traffic Management) son servicios encargados de satisfacer los requerimientos de seguridad y eficacia de los diferentes vuelos, convirtiéndolos en una parte fundamental de la aviación.

El camino recorrido por las telecomunicaciones en el campo de la aviación ha sido muy largo, la radio y el código Morse dieron los primeros pasos para lograr la transmisión de mensajes cortos desde una aeronave a tierra. Con el tiempo, el desarrollo de la radio de Alta Frecuencia (HF, High Frequency) y más tarde de Muy Alta Frecuencia (VHF, Very High Frequency) permitieron una comunicación constante entre aire y tierra [9].

Los servicios que prestan los sistemas de control de tráfico aéreo convencionales y que permiten dicha comunicación están constituidos por los sistemas de Radar de Vigilancia Primario (PSR, Primary Surveillance Radar) y el Radar de Vigilancia Secundario (SSR, Secondary Surveillance Radar) en funcionamiento desde 1994, los cuales permiten obtener la posición e información de aeronaves dentro de un área de cobertura determinado, realizando actualización de los datos obtenidos cada 4,8 segundos.

Debido a las limitaciones de los sistemas PSR y SSR y teniendo en cuenta el incremento en la demanda de pasajeros, fue creado el sistema de Difusión Automática de Vigilancia Dependiente (ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast), el cual permite realizar vigilancia o seguimiento del tráfico aéreo y obtener información de vuelo mediante la comunicación de datos por enlaces tierra - aire (avión) o aire (avión) - aire (avión). En comparación con los métodos tradicionales tiene una mayor precisión, ya que su funcionamiento está basado en el Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS (Global Navigation Satellite System), por lo que es de gran utilidad en zonas de vuelo de alta densidad [10].

La implementación de un sistema ADS-B completamente hardware tiene un costo bastante elevado, por esta razón, se buscan alternativas para poderlo realizar de una manera más viable en su relación costo beneficio lo que conlleva al uso de los sistemas de Radio Definido por Software (SDR, Software Defined Radio), los cuales están compuestos por un dispositivo hardware programable por software que permiten implementar y gestionar sistemas de comunicaciones de manera flexible, mediante software radio de Licencia

Pública General (GPL, General Public License), el cual puede realizar un procesamiento en tiempo real de las señales captadas y de la misma forma realizar cambios en tiempo real.

Al vincular un sistema SDR para el monitoreo de tráfico aéreo haciendo uso de señales ADS-B se obtienen ventajas tales como: facilidad de actualización, precisión, bajo costo y fácil implementación. Los dispositivos SDR se pueden utilizar como un radar aéreo de muy bajo costo en tiempo real al poder entender el tipo de señalización que utilizan las aeronaves lo que conlleva a entender el gran potencial que se podría explotar con la ayuda de este tipo de tecnología.

El documento consiste en cuatro capítulos, que se describen a continuación:

Capítulo 1: Se parte con la idea de entrar en contexto sobre los diferentes sistemas de vigilancia aérea que operan en la actualidad, tener un entendimiento básico de los diferentes componentes de cada uno de ellos y de comprender cuáles son sus virtudes y desventajas al momento de operar. En el presente trabajo se revisa el funcionamiento de 3 sistemas utilizados actualmente en las comunicaciones aéreas tales como:

- Sistema de Radar Primario.
- Sistema de Radar Secundario.
- Sistema Multilateración.

Adicionalmente el capítulo 1 realiza una introducción a los Sistemas ADS-B para posteriormente tener un contacto cercano con su arquitectura y el formato del mensaje que maneja con el fin de entender su implementación. Así mismo, se aborda el tema de SDR, sus características principales, la estructura funcional del sistema.

Capítulo 2: Se plantea el desarrollo metodológico del proyecto y las expectativas que se tienen al momento de comenzar el diseño y planificación del mismo. Se muestra una serie de decisiones de suma importancia que se deben analizar para tener el funcionamiento más adecuado del sistema como lo es la elección del dispositivo SDR a usarse. Posteriormente se describe detalladamente la implementación mediante diferentes etapas establecidas dentro de la transmisión y recepción del sistema.

Capítulo 3: Se presentan los resultados obtenidos de unas métricas propuestas en una serie de casos de estudio donde se pone a prueba el sistema, arrojando determinada cantidad de resultados que permiten evaluar su desempeño y robustez. Adicionalmente este capítulo realiza un análisis del comportamiento del sistema al momento de exponerlo a diferentes ambientes y circunstancias.

Capítulo 4: Este capítulo presenta las conclusiones del trabajo de investigación y las recomendaciones pertinentes para trabajos futuros que se lleguen a implementar.

emptypage

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Sistemas de Vigilancia Aérea

Los Servicios de Tráfico Aéreo (ATS, Air Traffic Services) son servicios proporcionados a las aeronaves dentro de un espacio aéreo determinado y que permiten prevenir colisiones entre aeronaves mientras se mantiene un flujo eficiente del tránsito aéreo. Los ATS están en la capacidad de asistir y proporcionar información útil para una operación aérea segura y eficaz, así como de alertar a los organismos pertinentes acerca de aeronaves que requieran auxilio. Para poder cumplir con estas funciones, los ATS se dividen en tres dependencias:

- Control de Tráfico Aéreo (ATC, Air Traffic Control).
- Servicio de Información de Vuelo (FIS, Flight Information Service).
- Servicio de Alerta (ALRS, Alerting Service).

Actualmente, los sistemas ATS se componen de dos sistemas de radar: el sistema PSR y el sistema SSR, y un Sistema de Multilateración (MLAT, Multilateration System). A continuación, se describe en detalle cada uno de ellos.

1.1.1. Radar primario de vigilancia (PSR, Primar Surveillance Radar)

Es un sistema de detección de aeronaves en cercanías a los aeropuertos y a lo largo de las rutas aéreas, proporcionando únicamente información de dirección y distancia. Su funcionamiento básico se asemeja al de un eco. El PSR está equipado con una antena de rotación continua, que emite ondas de radiofrecuencia de alta energía para detectar la presencia de los objetos. Como se ilustra en la figura 1.1, cuando las ondas tocan una aeronave, se reflejan y regresan de nuevo hasta el radar. En ese punto se mide el tiempo de respuesta o del viaje de ida y regreso de las ondas, así como la dirección de la reflexión para determinar la posición.

La gran ventaja del PSR es su capacidad de detección, ya que puede ubicar a la totalidad de aeronaves que se encuentren dentro de su área de cobertura sin ningún equipo adicional dentro de la aeronave. Esto se conoce como vigilancia independiente. Lo que implica que no requiere de equipo adicional en las aeronaves para su operación [1].

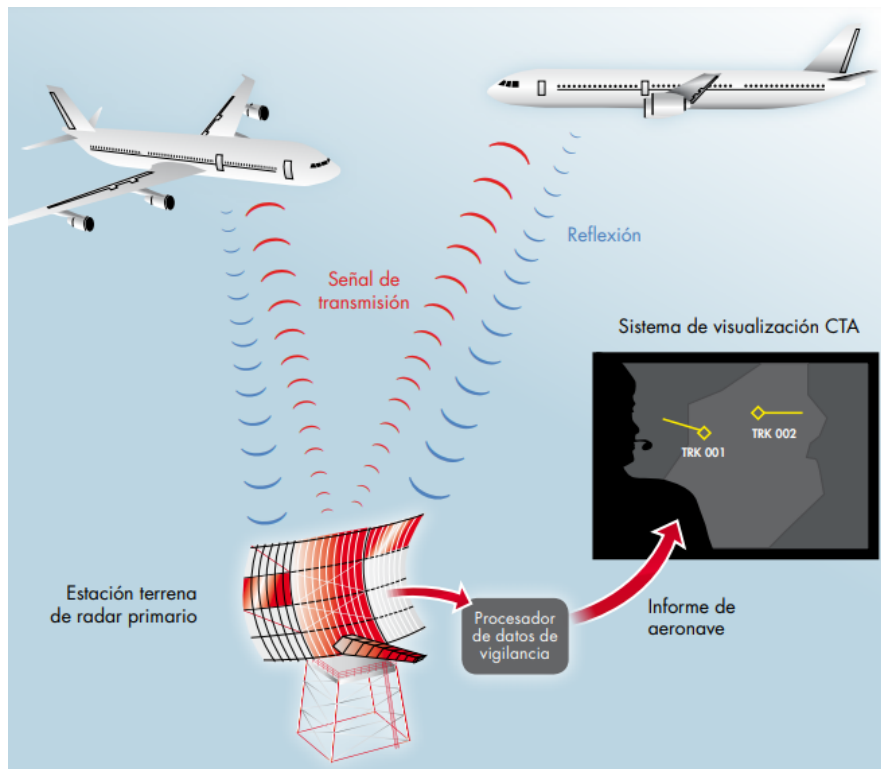


Figura. 1.1. Funcionamiento del Radar Primario de Vigilancia (PSR). Tomado de [1].

En cuanto a los aspectos negativos se encuentran:

- El *clutter* que son aquellas señales reflejadas no deseadas emitidas por objetos del entorno que recibe el radar y que producen una interferencia que dificulta la detección de la señal del radar.
- Imposibilidad de identificación de aeronaves, dado que la manera en que el radar identifica la ubicación del avión es simplemente mediante una onda de radiofrecuencia enviada periódicamente por el avión, la cual no transporta información alguna.
- Información obtenida reducida: en el caso de detectar un objeto, este tipo de radar solo es capaz de aproximar la posición y el tamaño del objeto. Sin embargo, no es capaz de identificar el objeto por sí solo.
- Alcance limitado.
- Baja tasa de actualización.
- Dimensiones y costo del equipo: Los sistemas usados para este tipo de radares pueden llegar a ser de gran tamaño, bastante costosos e ineficientes para algunas aplicaciones de detección e identificación de objetos con dimensiones reducidas como los drones.

1.1.2. Radar Secundario de Vigilancia (SSR, Secondary Surveillance Radar)

El sistema emite una señal codificada mediante una antena de rotación, la cual es recibida por los equipos a bordo de las aeronaves llamados transpondedores. El transpondedor recibe la interrogación, la decodifica y, como se ilustra en la figura 1.2, emite una respuesta al radar interrogante con información relevante como lo es la identificación de la aeronave y su altitud. Como la antena gira y tiene un lóbulo de radiación direccional, tiene la capacidad de obtener el azimut de la aeronave respecto al radar. De esta manera la ATC obtiene un panorama de los vehículos aéreos que se encuentran dentro de su cobertura. Los radares secundarios transmiten la señal a una frecuencia de 1030 MHz para activar los transpondedores los cuales responden en 1090 MHz [1].

Existen diferentes tipos de interrogaciones, las del sistema SSR se emiten anónimamente para que respondan todos los transpondedores dentro de la zona de cobertura.

- **Modo 3 o Modo A:** Interroga a las aeronaves con un código de vuelo que es fijado por el controlador.
- **Modo S:** Permite establecer un enlace de datos de forma selectiva con cada aeronave.
- **Modo C:** Interroga la altura barométrica del avión.

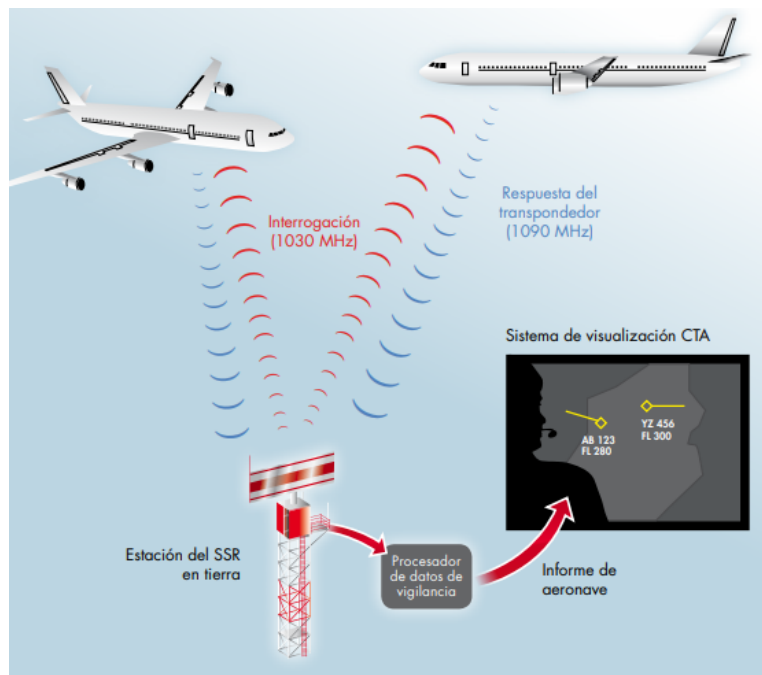


Figura. 1.2. Funcionamiento del Radar Secundario de Vigilancia SSR. Tomado de [1].

Recientemente han sido desarrollados los Radares Secundarios de Modo S o Selectivo, los cuales permiten la selección de una aeronave específica para obtener la información suministrada por el transpondedor. Es una medida que fue adoptada pensando en espacios aéreos muy congestionados en los cuales las aeronaves pueden generar respuestas simultáneas y con ello colisión de los mensajes, lo que imposibilitaría la recuperación de la información para la identificación de las aeronaves o que podrían generar un cruce de respuestas de dos aeronaves que estuviesen muy próximas imposibilitando la recuperación de los datos [10].

1.1.3. Sistema de Multilateración (MLAT, Multilateration System)

Se trata de un sistema utilizado para el seguimiento de los movimientos en tierra, aproximaciones al aeropuerto y para el seguimiento en ruta de las distintas aeronaves.

Como se puede apreciar en la figura [1.3], se compone de un grupo de sensores con forma de baliza que reciben las señales emitidas por el transpondedor de la aeronave. Se determina la posición de una aeronave calculando la diferencia de tiempo con la que llega la señal al grupo de sensores. Este cálculo se denomina *principio de Diferencia de Tiempo de Llegada* (TDoA, Time Difference of Arrival). La posición de la aeronave se encuentra en la intersección de las superficies generadas por la posición de los sensores.

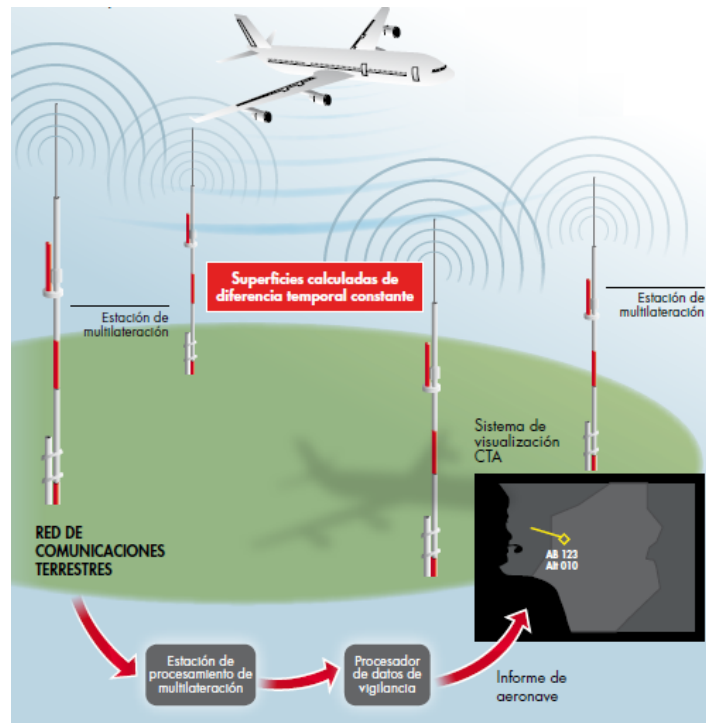


Figura. 1.3. Funcionamiento del Sistema de Multilateración. Tomado de [1].

Estas señales se pueden dar como respuesta a interrogaciones de una estación MLAT o pueden ser señales no solicitadas (*squitters*, o señales espontáneas).

El sistema MLAT cuenta con las siguientes ventajas:

- No requiere ningún equipamiento adicional en las aeronaves.
- Flexibilidad del sistema para extender la cobertura, mediante la instalación de sensores.
- Fácil implementación.
- Gran precisión y altas velocidades de actualización.
- Bajo costo para regiones pequeñas.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Plena integración y compatibilidad con ADS-B.

Las siguientes son las que se consideran desventajas del sistema:

- Alto costo para la implementación en grandes regiones.
- El sistema de gestión tiende a ser complejo por las múltiples consultas que pueden existir.

1.2. SISTEMA DE DIFUSION AUTOMÁTICA DE VIGILANCIA DEPENDIENTE

Consiste en un sistema que permite la difusión de información desde las aeronaves a estaciones en tierra y a otras aeronaves que se encuentren dentro del área de cobertura, la información difundida corresponde a diferentes parámetros de vuelo tales como: posición, identificación, altitud, velocidad, dirección, entre otras, sin requerir ningún tipo de consulta. El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, Global Navigation Satellite System) permite obtener el registro con alta precisión de las coordenadas en latitud y longitud de las aeronaves para determinar su posición. ADS-B transmite y recibe constantemente vía radio la información por parte de aeronaves que cuenten con los equipos para realizar dicho proceso. En tierra, la información recibida por un receptor puede ser enviada al sistema de control de tráfico aéreo para su gestión y operación. En la figura [1.4](#) se puede entender las características principales del sistema ADS-B.

- **A**utomatic: Las aeronaves equipadas con ADS-B transmiten automáticamente información sobre Identificación, Posición, Vector de Velocidad, Status del Vuelo....
- **D**ependant: La información depende de las capacidades del equipamiento de la aeronave.
- **S**urveillance: ADS-B proporciona vigilancia de las aeronaves equipadas con ADS-B.
- **B**roadcast: La información es transmitida por la aeronave mediante broadcast usando mensajes a una frecuencia de 1090Mhz del tipo Extended Squitter , que se corresponde al Modo S DF17.



Figura. 1.4. Descripción general de la tecnología ADS-B. Tomado de [\[2\]](#).

Como los mensajes ADS-B son transmitidos mediante difusión, pueden recibirse y procesarse en cualquier receptor acondicionado para ello. Es por esto que el diseño del sistema ADS-B se basa en dos subsistemas denominados “ADS-B IN” y “ADS-B OUT”. ADS-B OUT es la parte del sistema que transmite la información de la aeronave a las estaciones ADS-B en tierra. Por el contrario, ADS-B IN permite que las aeronaves debidamente equipadas reciban e interpreten la información proveniente de otras aeronaves en una pantalla compatible con ADS-B. Como se puede observar en la figura [1.5](#), este subsistema permite que tanto los controladores aéreos en tierra como los pilotos en el aire tengan una visualización de todo el tránsito a su alrededor [\[12\]](#). Por otro lado, gra-

cias al subsistema ADS-B IN, la aeronave recibe datos de tráfico mediante el Servicio de Difusión de Información de Tráfico (TIS-B, Traffic Information Service-Broadcast) y datos meteorológicos y de restricciones de espacio aéreo por medio del Sistema de Difusión de Información de Vuelo (FIS-B, Flight Information System-Broadcast) el cual recopila información mediante el uso de estaciones terrestres ADS-B y transmite esos datos a la pantalla de la cabina de vuelo de la aeronave en forma de alertas, información del aeropuerto y otros informes.

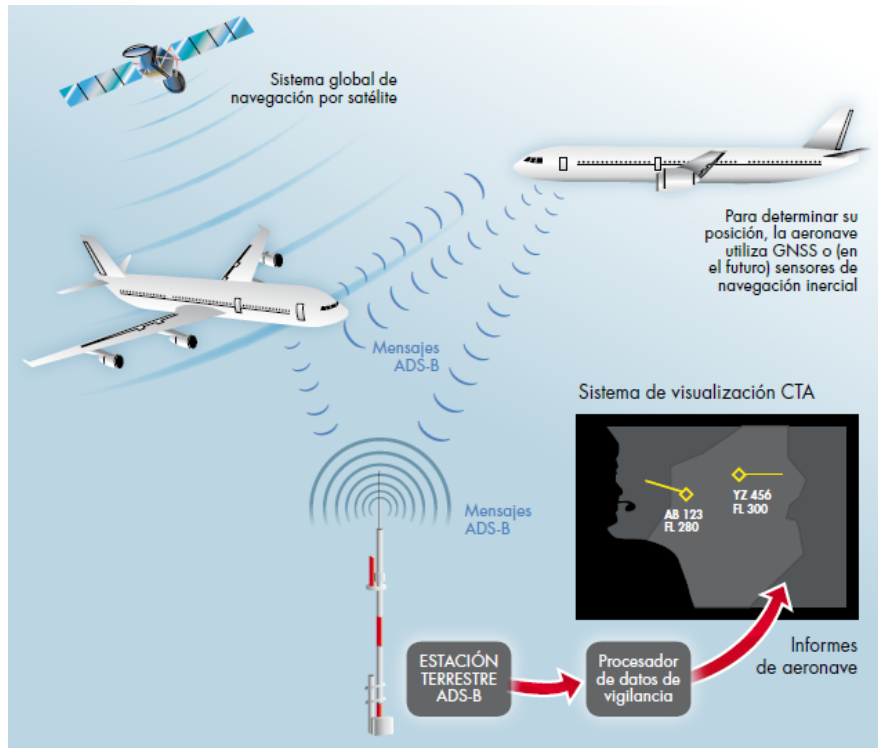


Figura. 1.5. Funcionamiento general del Sistema ADS-B. Tomado de [1].

Las ventajas que presenta este sistema son:

- Información específica: cada aeronave emite su posición, velocidad, estado y número de vuelo de forma periódica, cosa que no hace ningún otro sistema de vigilancia aérea.
- Reducción de costos: ADS-B reduce la emisión de potencia ya que solo necesita emitir señales desde el transpondedor.
- Mínima infraestructura para su instalación.
- Utilizado en seguimiento y vigilancia tanto aérea como terrestre.
- Baja latencia.
- Alta tasa de actualización: Una vez cada 0,5 segundos.

- Niveles confiables de precisión.
- Facilita el intercambio de la información en vuelo.
- Servicio de comunicación entre aeronaves, ayuda a la reducción de las distancias recorridas en la trayectoria de vuelo.
- Aumento de la información disponible para el controlador de tránsito aéreo.

1.2.1. Diagrama general del sistema ADS-B

Actualmente el sistema está compuesto por [3]:

- Equipos destinados a la navegación.
- Un transmisor que incluye un generador del mensaje.
- El medio de propagación.
- Un sistema de recepción que procesa el mensaje recibido para obtener la información enviada desde la aeronave.

En la figura 1.6 Se puede analizar la manera como se encuentran organizados los elementos anteriormente mencionados.

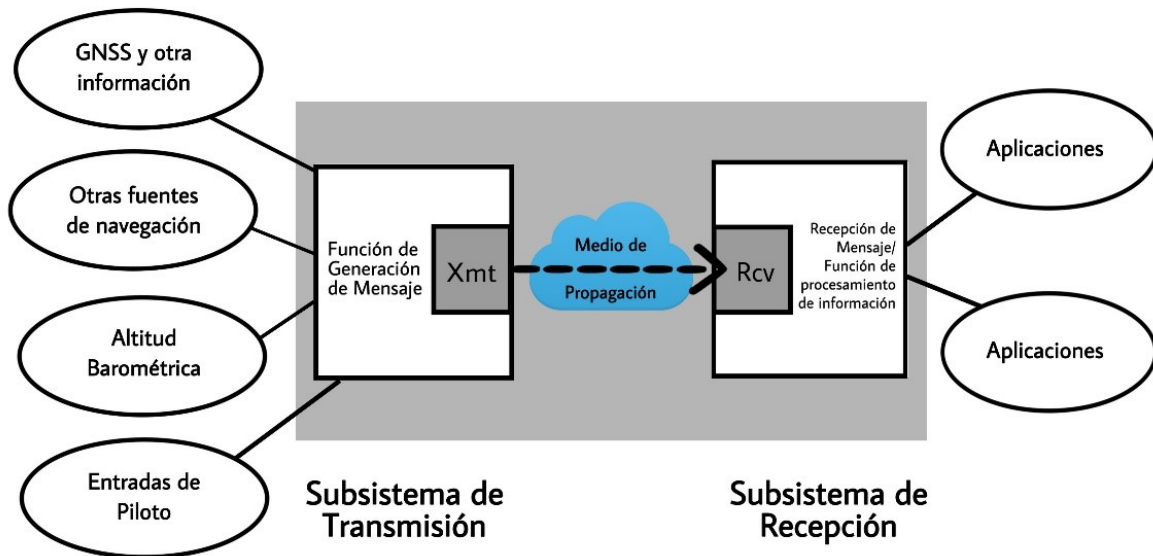


Figura. 1.6. Composición general del Sistema ADS-B. Tomado de [3].

Para tener la capacidad ADS-B, la aeronave debe contar con un enlace de datos que permita transmitir información periódicamente.

Existen tres enlaces de datos aplicables a ADS-B [3]:

1. 1090ES: Aceptado a nivel mundial, squitter extendidos (ES, Extended Squitter) emitidos de forma espontánea en Modo S.
2. UAT (Universal Access Tranceiver): Aprobado en Estados Unidos, debido a la congestión excesiva de la frecuencia 1090 MHz. Este enlace UHF(Ultra High Frequency) que utiliza técnicas TDMA (Time Division Multiple Access) en la frecuencia de 978 MHz, aprobado por la Asociación Federal de Aviación (FAA, Federal Aviation Association) puede ser utilizado en alturas inferiores a los 18000 pies, a partir de esa altura se debe utilizar 1090ES.
3. Enlace de datos digitales en la banda VHF (VDL modo 2 o 4): No implementado en la actualidad.

El modo que está estandarizado en la mayoría de aeronaves son los transpondedores de modo S o de radar secundario, que son compatibles con ADS-B. Sin embargo, el transpondedor modo S no envía información tan frecuentemente como lo requiere el sistema ADS-B, por lo tanto fue implementado el ES, el cual es una modificación del transpondedor modo S para permitir la radiodifusión de la información de una manera más frecuente. Es así como se consigue que, con un solo equipo instalado, se pueda llevar a cabo la operación con sistemas SSR y ADS-B.

1.2.2. Formato del mensaje de ADS-B

La señal emitida por el transpondedor de ADS-B está contemplada dentro del protocolo del Modo S. La señal viaja sobre una portadora de 1090 MHz. Como se puede apreciar en la figura 1.7, el mensaje está compuesto por un preámbulo codificado en amplitud, con una duración de 8 μ s y el bloque de datos de duración de 56 o 112 μ s (dependiendo de la longitud del mensaje), con Modulación por Posición de Pulso (PPM, Pulse Position Modulation) a una tasa de bits de 1 Mbps donde se utiliza codificación Manchester. En la figura 1.7 se muestra un esquema de la señal que utiliza ADS-B [3].

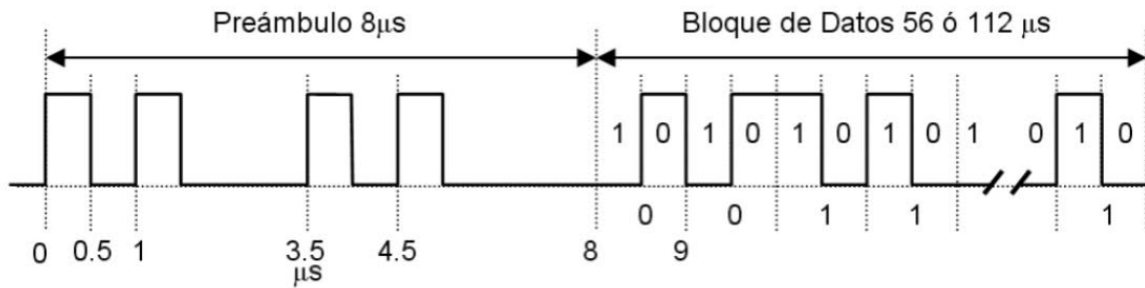


Figura. 1.7. Formato del Mensaje ADS-B. Tomado de [3].

El preámbulo está conformado por una secuencia especial de bits que permite al receptor identificar y sincronizar el comienzo del mensaje ADS-B. El bloque de datos contiene:

- El formato del enlace de bajada (DL, Down Link), el cual proporciona información sobre el tipo de protocolo utilizado.
- La capacidad (CA, Capability) del transpondedor Modo S.
- La Dirección de la Aeronave (AA, Aircraft Address), el cual consta de un código único de 24 bits.
- Los datos del mensaje ADS-B (Data)
- El código de redundancia cíclico de 24 bits para detección de errores que permite al receptor determinar la integridad del mensaje. Este código de redundancia cíclico de 24 bits (CRC - 24), tiene un polinomio generador de la forma:

$$G(x) = x^{24} + x^{23} + x^{22} + x^{21} + x^{20} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{15} + x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^3 + x^1 \quad (1.1)$$

1.2.3. Arquitectura del sistema ADS-B

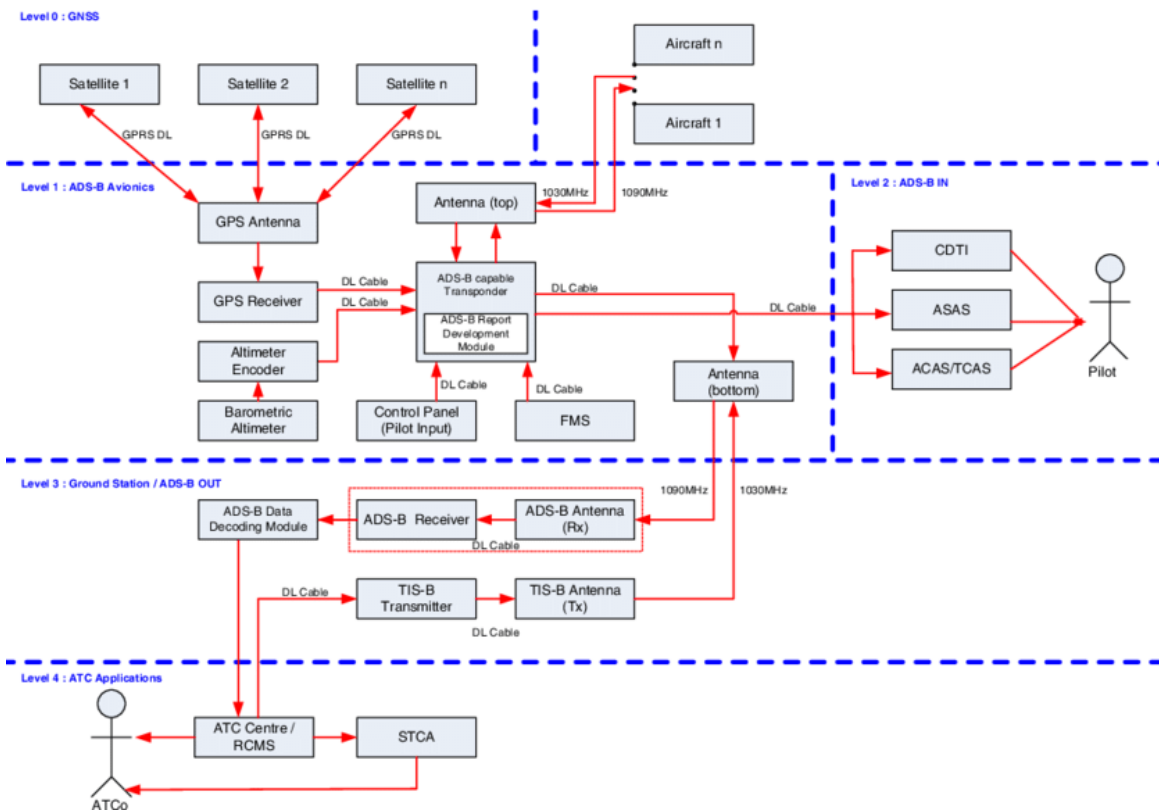


Figura. 1.8. Arquitectura del sistema ADS-B. Tomado de [4]

La figura 1.8 permite apreciar la arquitectura del sistema ADS-B distribuida en 5 niveles (tomando en cuenta un nivel 0) los cuales se describen a continuación:

- **Nivel 0:** Muestra la comunicación, mediante GPRS (General Packet Radio Service), de los diferentes satélites y las aeronaves, permitiendo su geolocalización.
- **Nivel 1:** Corresponde al funcionamiento del subsistema de ADS-B OUT el cual transmite los datos obtenidos por satélites (geolocalización) y parámetros a bordo.
- **Nivel 2:** Especifica el subsistema de ADS-B IN y el proceso mediante el cual los distintos pilotos obtienen la información de otras aeronaves.
- **Nivel 3:** Indica el subsistema de la estación en que recibe la información de las distintas aeronaves en zona.
- **Nivel 4:** Corresponde a la gestión de la información obtenida durante todo el proceso por parte del ATC.

1.3. Radio Definido por Software

Los sistemas de comunicación por radio, en los últimos años, han experimentado una enorme y constante evolución. El termino Software Radio fue adoptado por Joseph Mitola III a inicios de los noventa, al referirse a tipos de radio reconfigurables o reprogramables. Como ya es costumbre, las primeras aplicaciones de la tecnología SDR fueron de tipo militar y con el pasar de los años fueron adoptadas al campo de los sistemas y redes de comunicaciones.

SDR es una tecnología de comunicación por radio en el que algunas o todas las funciones de la capa física (mezcladores, filtros, amplificadores, moduladores, demoduladores, detectores, etc.) son definidas en software, lo que implica que los diferentes diseños y módulos (como esquemas de modulación o algún código corrector de error) puedan ser utilizados cuando sean necesarios [10].

Las siguientes son las ventajas que presenta la tecnología:

- El contar con hardware cada vez más programable proporciona alternativas en interfaces de programación que aumenta la independencia del hardware.
- Reutilización oportuna de frecuencia: Un SDR puede tomar ventaja del espectro subutilizado.
- Bajo costo: El dispositivo tiene un reducido costo debido a su múltiple aplicación.
- Desarrollo e investigación: Implementación de muchas y distintas formas de onda.

Esta tecnología tiene amplias aplicaciones en el área de las comunicaciones ya que brinda facilidades para una investigación a un menor costo mediante simulación, permitiendo su experimentación y estudio a profundidad en entidades profesionales, comerciales y académicas.

El impacto generado por SDR en las comunicaciones ha provocado que este tema sea incorporado a los planes de estudios de las carreras de telecomunicaciones en diversas instituciones.

Uno de los proyectos de mayor impacto en relación a SDR es el Smart Radio Challenge de Wireless Innovation Forum. El objetivo de esta competición es exponer a los estudiantes los problemas del mundo real, además de fomentar la interacción entre la industria y la academia. En el desarrollo de la competición, equipos de estudiantes de ingeniería diseñan, desarrollan y prueban tecnologías SDR atendiendo diversos problemas en las tecnologías inalámbricas. Los principales patrocinadores de este proyecto son los desarrolladores de MATLAB, MathWorks Inc.

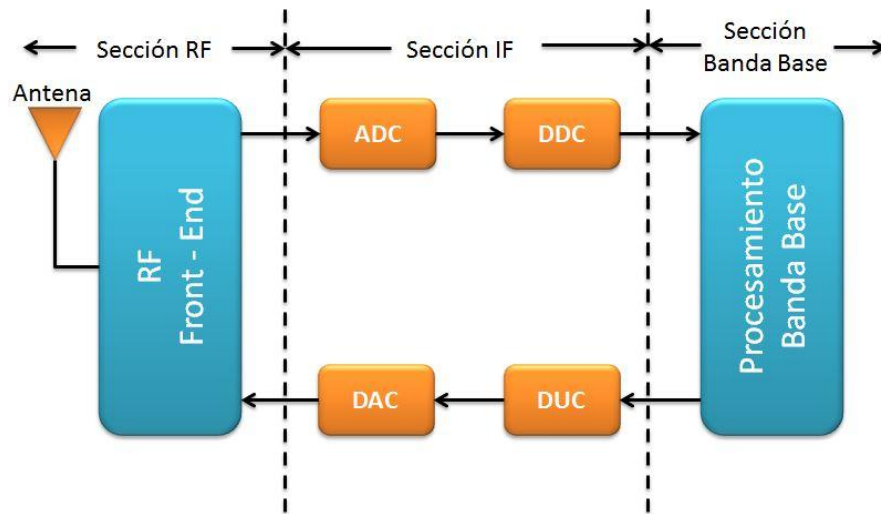


Figura. 1.9. Diagrama de bloques funcionales de la tecnología SDR. Tomado de [5].

1.3.1. Estructura Funcional de un Sistema SDR

Como se puede apreciar en la figura 1.9, el concepto de SDR está compuesto por tres etapas o secciones funcionales: Sección de RF, sección de IF y sección de Banda Base. Las dos primeras etapas se implementan en hardware mientras que la etapa Banda Base se implementa en software.

Para comprender mejor el funcionamiento de estas etapas, es necesario dividir la descripción en transmisión y recepción.

Sección	Transmisión	Recepción
<i>Banda base</i>	Esta etapa se encarga del procesamiento software de la señal como la modulación, el análisis en frecuencia de la señal, filtrado de la señal, detectores, etc.	La señal banda base recibida es procesada mediante software, en el que se implementa la demodulación, filtrado o el análisis espectral de la señal, entre otros.
<i>IF</i>	Pasa la señal de banda base a una frecuencia intermedia mediante el módulo de Conversión Digital de subida (DUC, Digital Up Conversion) y convierte la señal digital en analógica para su envío mediante un Conversor Digital Análogo (DAC, Digital to Analog Converter).	Recibe una señal de IF y la convierte a banda base a través del módulo Conversión Digital de Bajada (DDC, Digital Down Conversion) que se encarga de disminuir la tasa de muestreo de la señal. A continuación, digitaliza la señal mediante un Conversor Analógico Digital (ADC, Analog to Digital Converter).
<i>RF</i>	Se encarga de transmitir las señales de RF, para ello, antes amplifica y modula las señales de IF que recibe de la etapa anterior.	Se encarga de recibir las señales de RF, acondicionarlas para la siguiente etapa y convertirlas de RF a IF.

Tabla. 1.1. Funcionamiento de SDR en transmisión y Recepción. Tomado de [5].

1.3.2. Arquitectura de SDR

Consta de un subsistema digital y un subsistema analógico como se muestra en la figura 1.10 Las funciones analógicas son restringidas a aquellas que no pueden ser mejoradas digitalmente, como son:

- Antena.
- Filtrado de RF.
- Combinación de RF.
- Pre amplificación en recepción.
- Transmisión de potencia de amplificación.
- Generación de frecuencia de referencia.

El software del sistema está dividido en capas, con el objetivo de hacerlo modular y adaptable al hardware sobre el cual va a operar. No obstante, la tendencia es a que dicha arquitectura de software esté basada completamente en objetos, de tal manera que el hardware pueda ser de alguna forma mapeado a estos objetos para proporcionar

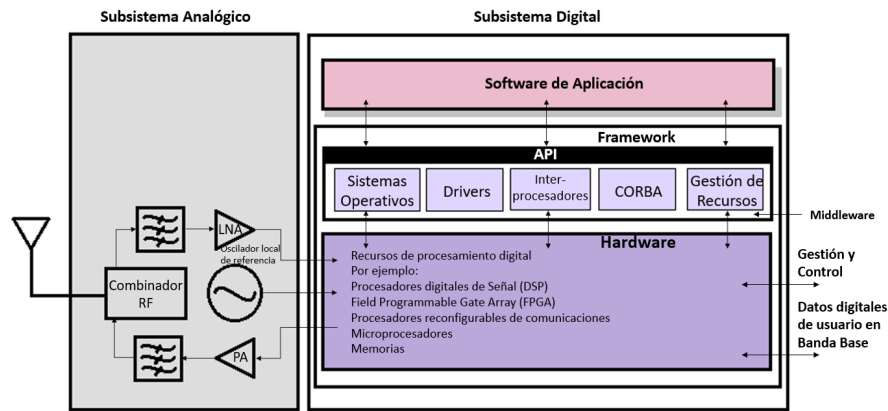


Figura. 1.10. Arquitectura SDR. Tomado de [5]

servicios de comunicación entre capas utilizando interfaces estándar.

La idea de la arquitectura es que las etapas de conversión analógico/digital estén lo más cercanas posible a la antena, de hecho, la separación de portadoras y la conversión de frecuencias up/down es realizada por los recursos de procesamiento digital al igual que la codificación de canal y las modulaciones [13].

La capa intermedia incluye:

1. Sistema Operativo.
2. Controladores del hardware.
3. Recursos de administración.
4. Otras aplicaciones no específicas de software.

La combinación del hardware y la capa intermedia frecuentemente se llama *framework*.

El hardware existente dentro del subsistema digital es el encargado de proporcionar toda la flexibilidad y re-configurabilidad. Normalmente este hardware está constituido por dispositivos DSP, pero cada vez son más frecuentes las implementaciones que combinan DSP con FPGA y ASIC para la ejecución de las diversas funciones que desempeña este subsistema, para las cuales cada tipo de dispositivo ofrece ventajas y desventajas significativas en su elección como plataforma hardware de implementación.

Capítulo 2

DESARROLLO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el proceso de diseño e implementación del sistema de recepción de señales ADS-B mediante Radio Definido por Software, planteando además los requisitos del sistema. Así mismo, se caracterizan los diferentes algoritmos que conforman el bloque de transmisión y recepción mediante casos de uso y finalmente, por medio de diagramas de bloques, se muestra un esquema general del sistema.

La metodología empleada para el desarrollo del trabajo es adoptada del Proceso Racional Unificado (RUP, Rational Unified Process), que tiene como ventaja la retroalimentación entre las etapas, lo que permite realizar modificaciones o adiciones si es necesario. En la figura [2.1](#) se muestran las etapas de desarrollo que se contemplan.

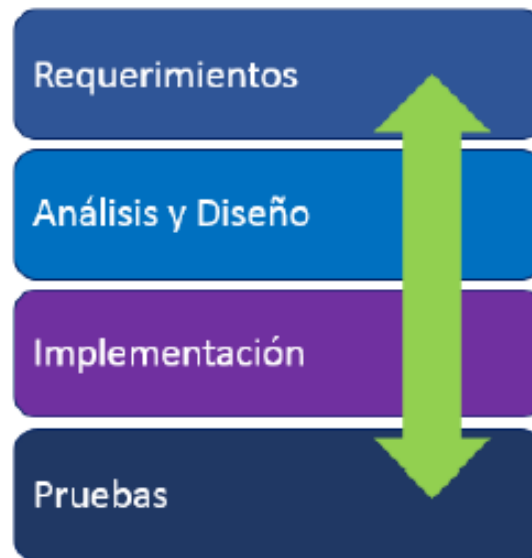


Figura. 2.1. Metodología RUP.

Para la elaboración de los casos de uso del sistema primero se realiza un análisis de requerimientos, estos pueden ser funcionales o no funcionales y permiten enumerar las diferentes características del sistema.

2.1. Herramientas utilizadas

A continuación, se realiza una breve descripción de las herramientas software y hardware necesarias para el desarrollo del sistema de recepción de señales ADS-B.

2.1.1. SOFTWARE

MATLAB

MATLAB abreviado de MATrix LABoratory, en español Laboratorio de Matrices, es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio de alto nivel, lenguaje M. Fue originalmente escrito para proveer acceso fácil al software matricial, desarrollado por los proyectos LINPACK y EISPACK, que juntos representan el estado del arte de software para computación matricial. Hoy en día es usado para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, telecomunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos. Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. [\[14\]](#)

Características principales

- Lenguaje de alto nivel, optimizado para cálculos científicos y de ingeniería.
- Entorno de escritorio optimizado para la exploración iterativa, el diseño y la solución de problemas.
- Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados.
- Toolboxes complementarias para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería.
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas.
- Interfaces para C/C++, *Java*, .NET, Python, SQL, Hadoop y *Microsoft Excel*.

Librerías y Toolbox utilizadas

Ya que el proyecto se desarrolló sobre la herramienta Matlab, es necesario tener en cuenta los diferentes toolbox que se emplean al momento de realizar las diferentes scripts que contienen las conexiones al hardware y el uso de herramientas para procesamiento digital de señales. A continuación se realiza una breve descripción de los diferentes toolbox a los que se hace referencia.

DSP (Digital signal processing toolbox): El toolbox de procesamiento digital de señales permite hacer uso del analizador de espectro y del osciloscopio, que a su vez permiten observar las señales en el dominio del tiempo y la frecuencia, y de esta manera evidenciar la señal que se desea transmitir.

Communications Toolbox: Con el toolbox de Comunicaciones es posible realizar un análisis en frecuencia y en tiempo de los objetos que se requieren, así mismo proporciona la posibilidad de crear un objeto generador de códigos de redundancia cíclicos

el cual recibe el polinomio especificado dentro de la teoría de la trama ADS-B [1.2.2](#).

Communications Tollbox support package for USRP Radio: Es un paquete adicional que brinda soporte a conexiones con dispositivos hardware (en este caso para la tarjeta seleccionada USRP b210) o permitiendo encontrar la tarjeta conectada. Adicionalmente permite la creación de objetos transmisores y receptores y su respectiva configuración. De igual manera, tiene la capacidad de retornar el número de paquetes correctos e incorrectos enviados.

Communications Tollbox support package for RTL SDR Radio (que requiere una instalación de un driver denominado CubicSDR 0.25): De la misma forma que con el paquete para USRP, permite generar la conexión y configuración con dispositivos hardware del tipo RTL SDR Radio.

GNU RADIO

Es un conjunto de herramientas de desarrollo de software libre y de código abierto que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar software de radio. Se puede utilizar con el hardware de RF externo para crear radios definidos por software o sin hardware en un entorno de simulación similar. Se utiliza ampliamente en entornos de investigación, industria, academia y aficionados para respaldar tanto la investigación de comunicaciones inalámbricas como los sistemas radio del mundo real.

GNU Radio provee todas las herramientas necesarias para generar, modular, demodular y filtrar digitalmente las señales recibidas por dispositivos SDR tales como tarjetas USRP, permitiendo implementar un radio definido por software. El equipo es capaz de transmitir y recibir señales moduladas en dbpsk, dqpsk, d8psk y gmsk [\[15\]](#).

2.1.2. HARDWARE

SELECCIÓN DISPOSITIVO SDR

La primera decisión que se debe tomar es la de una adecuada selección del dispositivo SDR que se pretende utilizar para la implementación del receptor y el prototipo del transmisor. Para ello, se evaluarán diferentes factores que buscarán la opción más conveniente dependiendo de algunos criterios que se pretenden establecer. En la elección del dispositivo SDR se tendrán en cuenta factores como el costo del dispositivo y factores técnicos de cada uno de ellos.

En esta parte del documento se plantea mencionar determinada variedad de dispositivos dentro de los cuales se realizará la selección basada en los parámetros anteriormente señalados, además de los objetivos planteados por el trabajo de grado. Dado el perfil académico que se quiere proponer en el trabajo de grado, se han seleccionado de entre una gran variedad de dispositivos, un listado de los dispositivos “candidatos” que cum-

plen con determinados criterios que se especifican a continuación, teniendo un rango de precios (de los \$ USD 80 hasta los \$USD 200) como un criterio de máxima prioridad al momento de la selección para la implementación del sistema de transmisión y recepción de las señales ADS-B.

	Eloics E4000	SDR-RTL	AirSpy Mini	HackRF	USRP B210	PLUTO SDR
Rango de frecuencias [MHz]	52 - 2200	24 - 1766	24 - 1800	0.1 - 6000	70 - 6000	325 - 3800
Ancho de banda [MHz]	3.2	3.2	10	20	56	20
ADC-DAC [bits]	8	8	12	8	12	12
Rango dinámico [dB]	45	45	80	48	78	65
Precisión del Reloj [PPM]	0.5	0.5	0.5	30	5	25
Precio [USD]	28	14	92	277	1500	150
Otras características	Bajo consumo	USB 2.0	USB 2.0	Transmisor USB 2.0	USB 2.0	Transmisor USB 2.0

Tabla. 2.1. Cuadro comparativo de dispositivos SDR.

En este caso específico y dadas facilidades que proporciona la Universidad del Cauca, se decide trabajar con 2 dispositivos:

1. **RTL R820T:** Es un dispositivo USB pequeño, compacto, sencillo de utilizar y de bajo costo. La figura [2.2](#) muestra el diseño y presentación del dispositivo. Es capaz de recibir señales de radiofrecuencia, convertirlas a digital y procesarlas para obtener los datos. Originalmente utilizados como receptores de televisión, se descubrió que se podían utilizar como receptores SDR al cambiarlos a modo test. En este modo no se ejecuta la decodificación final, el RTL-SDR aporta directamente las muestras I/Q en banda base. Además, el dispositivo deja de estar limitado a recibir solo señales en la banda de frecuencias de televisión digital. Puede captar cualquier frecuencia en la que opere su sintonizador. La salida del dispositivo puede conectarse a un ordenador que permita su control, y los datos que transmite se pueden utilizar con una gran variedad de programas.
2. **USRP B210:** El Periférico de Radio Software Universal (USRP, Universal Software Radio Peripheral) es un equipo que permite el desarrollo de radios definidos por software soportados principalmente por el software de desarrollo GNU Radio y la herramienta Matlab. Gracias a que la Facultad de Ingeniería Electrónica cuenta con estos dispositivos, se puede presentar una opción que, aunque es mucho más



Figura. 2.2. Dispositivo RTL SDR.

costosa, cuenta con muchas más prestaciones que las demás, como el tener dos entradas receptoras y dos transmisoras con la posibilidad de hacer full-dúplex. La capacidad de hacer el procesamiento dentro de la FPGA contenida por la misma placa, hacen que el dispositivo no solo pueda ser utilizado para desarrollo de prototipos de sistemas radio, sino para soluciones finales y permanentes. En la figura [2.3](#) se puede apreciar la presentación del dispositivo SDR - USRP B210.



Figura. 2.3. Dispositivo USRP B210. Tomado de [\[6\]](#)

Características principales [6]

En la figura [2.4] se puede apreciar el diagrama de la arquitectura de los dispositivos USRP B210 con las siguientes características:

- Rango de Frecuencias de 70 MHz a 6 GHz.
- APIs para GNU Radio, C++ y Python.
- Interfaz USB 3.0 SuperSpeed.
- Conector estándar USB 3.0.
- Tasa flexible de 12 bits ADC/DAC.
- 2 Tx & 2 Rx con capacidad Half o Full Duplex.
- Capacidad MIMO 2x2.
- FPGA XC6SLX150 Spartan6 reprogramable.
- Ancho de Banda de hasta 56 MHz en tiempo real.
- Capacidad GPIO.

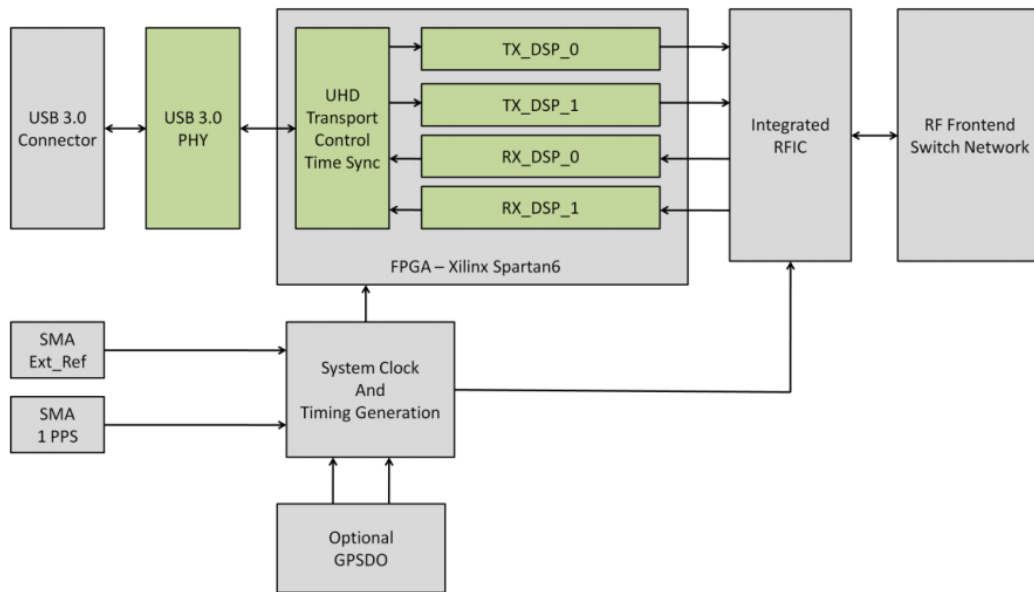


Figura. 2.4. Arquitectura de la tarjeta USRP (B200-B210). Tomado de [6]

El rango de frecuencias que cubre la tarjeta USRP B210 permite la experimentación con una amplia gama de señales incluyendo transmisión de FM, TV, Celular, WiFi y ADS-B, siendo ésta última la de mayor importancia para el desarrollo del trabajo actual. Gracias a que el Controlador Hardware de la tarjeta USRP (UHD, USRP Hardware Driver) es multiplataforma y de código abierto y ejecutable en Microsoft, Linux y MacOS, los diferentes usuarios (estudiantes o miembros de esta comunidad) están en la capacidad de desarrollar diferentes aplicaciones, compartir conocimiento y contribuir con futuras innovaciones relacionadas con la tecnología SDR.

2.2. REQUERIMIENTOS

Para el estudio de los requerimientos, es necesario iniciar con la explicación del problema de estudio, seguidamente se definen los requerimientos funcionales y no funcionales planteados para el receptor.

Problema de estudio

Dado que el enfoque del proyecto es académico, se pretende reforzar los conocimientos en cuanto al procesamiento de señales radio como lo son las ADS-B.

Surge la necesidad de comprender el comportamiento de este tipo de señales y la manera como se deberá realizar la transmisión de las mismas y el estudio de su comportamiento al momento de recibirlas, poniendo en práctica, en gran medida, la teoría desarrollada a lo largo de la carrera.

Requerimientos Funcionales

Los requerimientos funcionales del sistema receptor representan las acciones que este es capaz de realizar y describen los procesos que se ejecutan sobre las entradas para conseguir las salidas.

Requerimiento 1: El sistema debe desplegar una interfaz de usuario de transmisión para su gestión.

Requerimiento 2: El sistema debe permitir la asignación del tiempo de duración de funcionamiento del radio enlace.

Requerimiento 3: El sistema debe permitir el ingreso de diferentes tipos de datos de la aeronave a ser simulada (identificación, latitud, longitud y altitud).

Requerimiento 4: El sistema debe permitir el ingreso de características propias del radio enlace (frecuencia de portadora, ganancia y factor de interpolación).

Requerimiento 5: El sistema permite la visualización de los datos obtenidos a través de una tabla.

Requerimiento 6: El sistema será portátil para poder permitir su ejecución en diferentes ambientes de simulación.

Requerimientos No Funcionales

Estos requerimientos son dedicados a aspectos tales como la interfaz de usuario, además de requerimientos necesarios para garantizar la calidad de la implementación.

Requerimiento 1: El sistema funcionará mediante la herramienta Software de matlab.

Requerimiento 2: El sistema permite la verificación, mediante el analizador de espectro, de una captación adecuada de la señal en recepción.

Requerimiento 3: El sistema exige que los campos del factor de interpolación y muestras por chip sean únicamente valores enteros que siguen los criterios de la ecuación 2.1.

Requerimiento 4: Los campos de filtro acepta la selección de un solo tipo de filtro entre rectangular, coseno alzado y raíz de coseno alzado.

Requerimiento 5: El campo de tiempo de transmisión acepta únicamente enteros.

2.2.1. ARQUITECTURA GENERAL DEL DISEÑO DEL SISTEMA

Resulta necesario tener presente el panorama general del diseño de lo que será el sistema de transmisión y posterior recepción de las señales ADS-B simuladas que tal y como se puede observar en la figura 2.5, se trata de una adecuación de la arquitectura macro del sistema real ADS-B. La arquitectura consta de 3 niveles donde se pueden encontrar:

Nivel 1: La introducción por parte de un usuario 1 o de transmisión de los diferentes datos a ser simulados además de su modulación, codificación y transmisión por medio de una antena.

Nivel 2: Correspondiente a la etapa de recepción del sistema junto con su demodulación y decodificación.

Nivel 3: Corresponde a la información recibida y mostrada en pantalla al usuario 2 o de recepción.

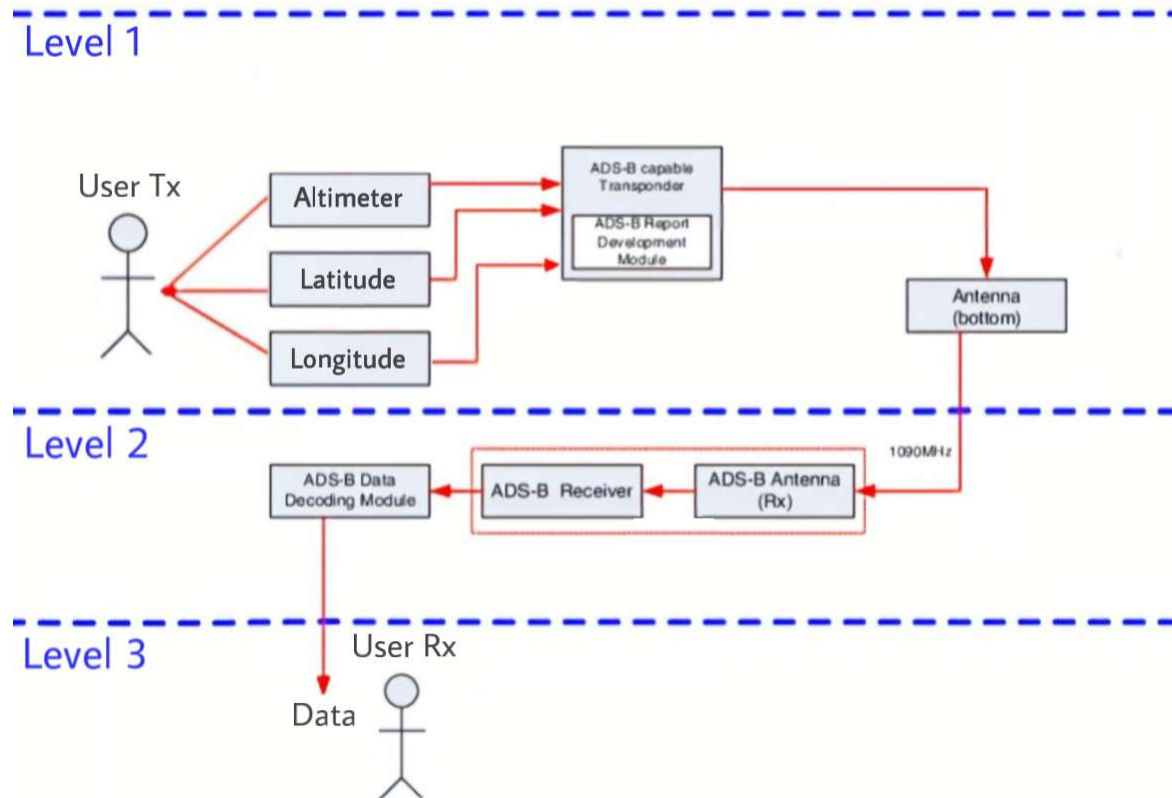


Figura. 2.5. Arquitectura del Sistema Prototipo.

2.2.2. DESARROLLO DE ETAPAS DEL SISTEMA

Diagrama de Flujo General del Simulador

En la figura [2.6](#) se despliega el diagrama de flujo en el cual se basa el actual trabajo donde se visualizan las diferentes etapas para la implementación de un transmisor, un receptor y el análisis del desempeño del enlace. El desarrollo comienza implementando la etapa de transmisión mediante SDR, validando el funcionamiento del mismo por medio de un receptor proporcionado por Matlab, una vez validado se procede a la implementación de la etapa de recepción corroborando su funcionamiento a través del transmisor previamente desarrollado. Finalmente se procede a definir métricas y casos de estudio que permiten evaluar el desempeño del enlace establecido.

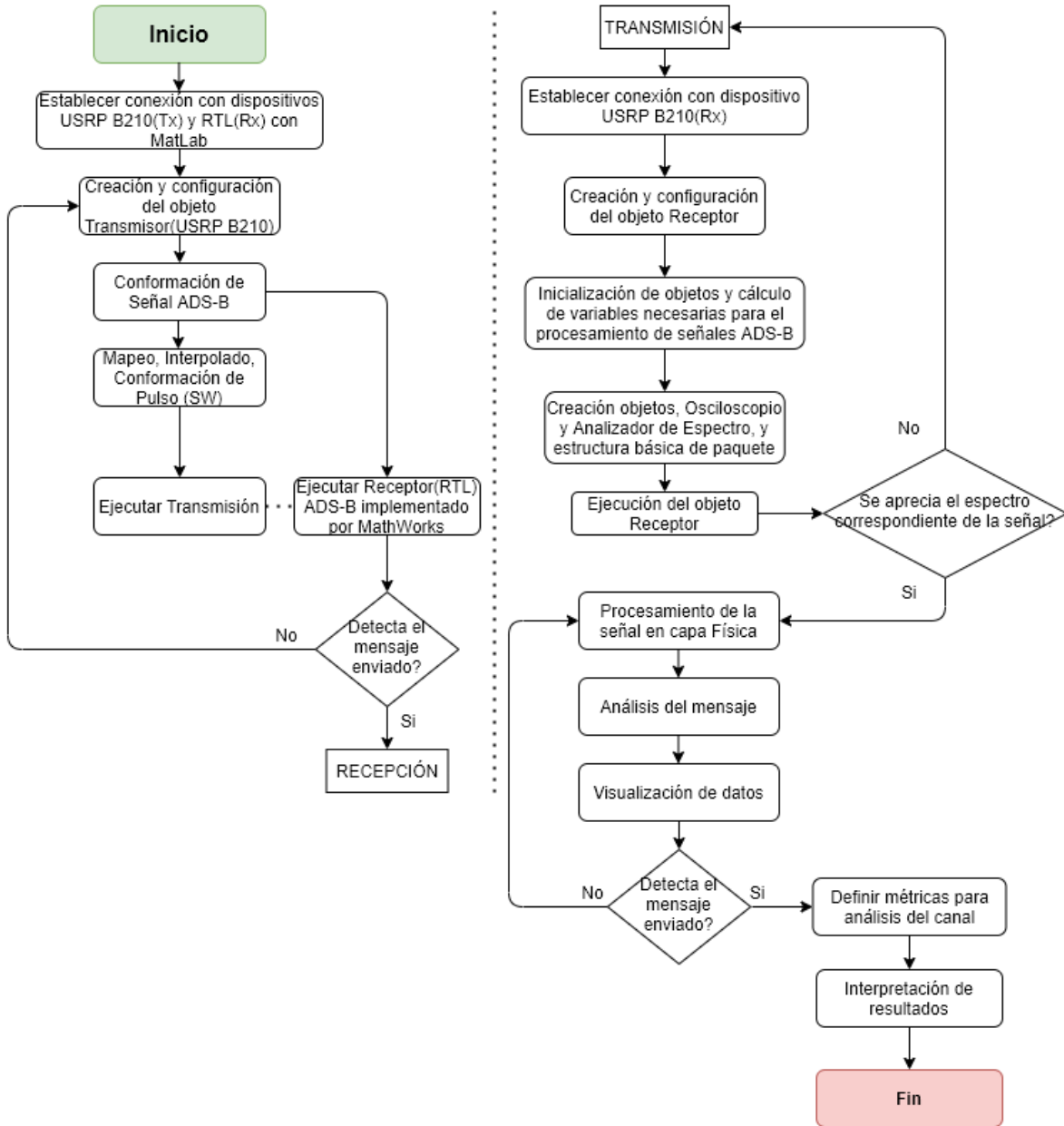


Figura. 2.6. Diagrama de flujo del Sistema.

A continuación se procede a realizar una breve descripción del propósito y posterior desarrollo de cada una de las sub-etapas que se tienen en cuenta al momento de realizar el proceso de transmisión utilizando la herramienta de Matlab.

Ejecutar Interfaz Gráfica de configuración para Transmisión



Figura. 2.7. Portada GUI Transmisión.

Inicialmente se ejecuta la GUI de transmisión, la cuál consta de una portada que se puede apreciar en la figura 2.7 que al clickear en el botón de 'Entrar' da lugar a la figura 2.8, desde la cuál es posible configurar los diferentes parámetros usados en la etapa de transmisión, ya sea estableciendo los campos de información que componen a una trama ADS-B según los estándares, como latitud, id del aeronave, etc, ó estableciendo parámetros del proceso de modulación como tal, tales como, el tipo de pulso conformador que se desea usar, el número de muestras por símbolo, la frecuencia central, entre otros.

MATLAB App

Parámetros de Transmisión

Establecer Conexión con el dispositivo B210 Ready? ● Tx? ● Cerrar Conexión

Id Avión	<input type="text" value="FF2020"/>	Frecuencia Portadora [GHz]	<input type="text" value="0.95"/>
Latitud [°]	<input type="text" value="2.45"/>	Offset IF [MHz]	<input type="text" value="0.0"/>
Longitud [°]	<input type="text" value="37.10"/>	Ganancia [dB]	<input type="text" value="60"/>
Altitud [m]	<input type="text" value="11552.4"/>	Factor de Interpolación [Z+]	<input type="text" value="1"/>
		Tiempo de Transmisión [s]	<input type="text" value="30"/>

Muestras por Chip Tipo de Filtro ▼

Roll Off filtro

Iniciar Tx

Figura. 2.8. GUI Transmisión.

Establecer conexión con el dispositivo USRP (Tx)

Luego, se pretende encontrar el dispositivo conectado y establecer la conexión con el mismo.

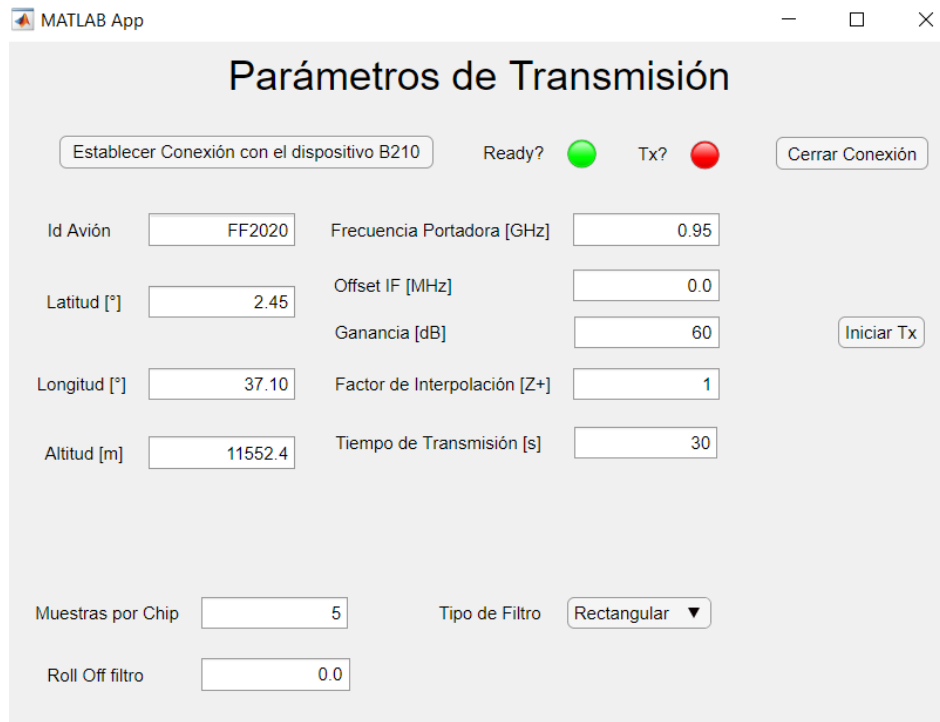


Figura. 2.9. GUI Transmisión, conexión establecida.

Esta primera etapa comienza con un objeto que nos provee la toolbox para el soporte de hardware USRP. Este objeto nos va a brindar el estado del radio “conectado”, si éste estado es ‘Success’, quiere decir que la conexión ha sido exitosa, de lo contrario se asignan valores por defecto de plataforma y dirección IP. Una vez se comprueba el éxito de la conexión, se establecen las variables de plataforma y de acuerdo a éstas se establece una dirección IP y/o un número serial que nos va brindar la misma variable `connectedRadios`.

Al seleccionar el botón de **Establecer Conexión con el dispositivo B210**, se realiza la acción previamente mencionada.

Creación y Configuración de Objeto Transmisor

Desde la interfaz gráfica, una vez se haya establecido la conexión con el dispositivo USRP, se puede ejecutar el botón de **Iniciar Tx**, el cual llama una función de MatLab en la que se crea y se configura el objeto transmisor de acuerdo al estándar para transmisión de señales ADS-B. Para finalmente iniciar la transmisión. Mientras el dispositivo se encuentre transmitiendo el segundo led se encontrará en color verde, como se aprecia

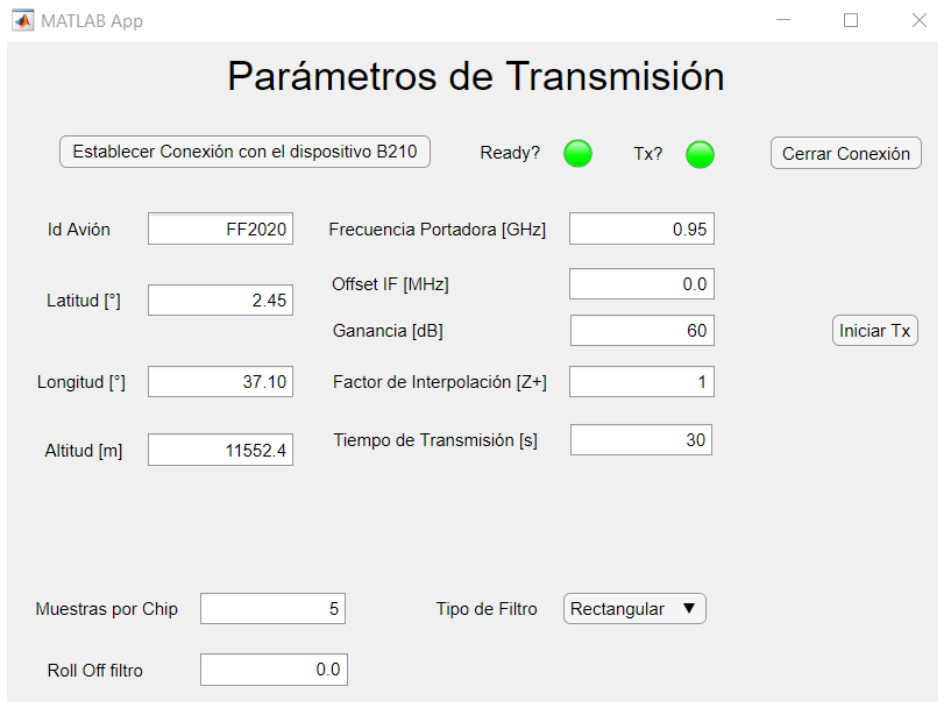


Figura. 2.10. Inicio de transmisión.

```

%% Creación Objeto Transmisor
%fc -> Frecuencia central (Hz)
FrontEndSampleRate = Fs;
mCR = iF*FrontEndSampleRate; % Master Clock Rate [Hz]
%iF = mCR/FrontEndSampleRate; %Interpolation Factor
tx = comm.SDRuTransmitter(...
    'Platform', platform, ...
    'SerialNum',address, ...
    'MasterClockRate',mCR, ...
    'InterpolationFactor',iF, ...
    'Gain',gain, ...
    'CenterFrequency',fc, ...
    'TransportDataType','int8', ...
    'LocalOscillatorOffset', offsetIF);

```

Figura. 2.11. Código de creación objeto transmisor.

en la figura [2.10](#)

La figura [2.11](#) corresponde al código mediante el cual el transmisor soportado por el dispositivo USRP B210 se crea y configura de acuerdo al estándar para transmisión de señales ADS-B.

Dado que se cuenta con antenas VERT900 de doble banda (824-960 MHz, 1710-1990 MHz), la frecuencia portadora establecida para señales ADS no es soportada, por lo que fue necesario realizar un cambio en la frecuencia central a 946MHz dado el poco

uso del rango espectral de 930 a 950 MHz.

A continuación se exponen las diferentes variables que hacen las veces de parámetros de configuración para el prototipo de transmisor ADS-B.

- Frecuencia Portadora de 946 MHz.
- Se establece la frecuencia de muestreo de acuerdo a la tasa de transmisión de bits, equivalente a 1 MHz. Debido a que la Modulación por Posición de Pulso Binaria (Binary Pulse Position Modulation, BPPM) representa un bit en dos chips de igual duración equivalente a la mitad de la duración del bit, se tiene una tasa de símbolo equivalente a 2 MHz.
- Se establece la Frecuencia de Reloj (MCR - Master Clock Rate) en un valor dependiente de la relación entre muestras por chip (SPC - Samples Per Chip) y factor de interpolación (IF - Interpolation Factor) que puede elegir el usuario, está relación es de la forma:

$$2 \leq SPC \times IF \leq 28 \text{ de manera que } 4 \text{ MHz} \leq MCR \leq 56 \text{ MHz}. \quad (2.1)$$

- Se establece el factor de interpolación igual 1, pues el proceso de sobremuestreo se hizo previamente mediante software. Recordando que el resultado debe ser un valor entero.
- Se establece un valor de ganancia para la transmisión igual a 60 dB.

Conformación de la señal ADS-B

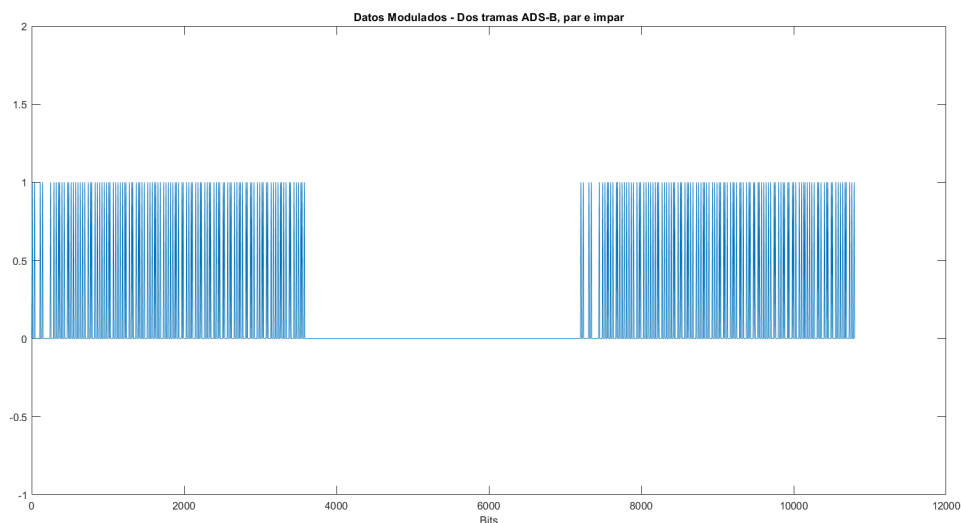


Figura. 2.12. Trama ADS-B conformada.

En la figura [2.12](#) se puede apreciar una trama ADS-B long squitter generada de $120 \mu\text{s}$ de duración de los cuales $112 \mu\text{s}$ representan la información y los otros $8 \mu\text{s}$ conforman la secuencia de sincronización o preámbulo.

Dentro de la carga útil de la trama se encuentran 88 bits, de los cuales se definen desde el bit 9 hasta el bit 13 el formato del enlace de bajada de la forma $[10001]_2 = 17_{10}$, indicando que se va utilizar el modo broadcasting, desde el bit 14 hasta el 16 se establece la capacidad $[110]_2 = 6_{10}$, que nos indica que los mensajes transmitidos serán recibidos por estaciones tanto aéreas como terrestres, y del bit 17 hasta el bit 40 se establece el identificador del objeto volador de la forma $[\text{FF}2020]_{16}$ el cual es de gran ayuda al momento de comprobar si el receptor, implementado por Mathworks, es capaz de detectar y mostrar la información enviada por el prototipo de transmisor. Los demás parámetros se establecen aleatoriamente y se concatenan en una sola variable como la carga útil de la trama para finalmente pasar 88 bits de información a través de un generador de códigos de redundancia cíclico para detección de errores cuyo polinomio se encuentra definido en el documento de referencia y que genera 24 bits de paridad adicionales para un total de 112 bits que luego son pasados a través de un mapeador BPPM generando 224 chips de información los cuales a su vez se concatenan con el preámbulo que cuenta con 16 chips de información, recordando que cada chip tiene una duración de $0.5 \mu\text{s}$.

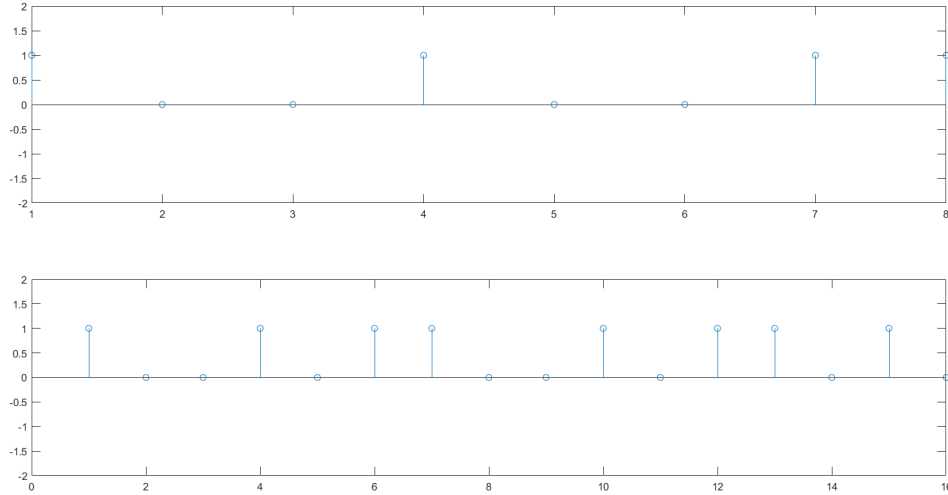


Figura. 2.13. Bits “crudos” vs bits mapeados en BPPM.

A partir de este punto se ejecuta una etapa de sobremuestreo para los bits mapeados en donde se introducen ceros entre las Muestras Por Símbolo (SPS, Samples Per Symbol), después de cada valor de chip. Luego se establece el filtro conformador de pulso como un pulso rectangular en tiempo discreto (n) con SPS muestras:

$$h(n) = \Pi\left(\frac{n}{SPS}\right) \text{ donde } n \in \mathbb{Z}^+, \quad (2.2)$$

el cual se convoluciona con los datos mapeados sobremuestreados para obtener la señal en banda base.

Finalmente, se obtiene la frecuencia de muestreo F_s , la cual es usada en la sección del transmisor a partir de la tasa de símbolo R_s , como:

$$F_s = R_s \cdot SPS. \quad (2.3)$$

Cabe resaltar que se envían dos tramas ADS-B, una par y otra impar de acuerdo al formato de Reporte de Posición Compacto (CPR, Compact Position Reporting) el cual permite enviar datos de latitud y longitud del objeto volador.

Visualización de la Señal Transmitida en Banda Base y Ejecución de la Transmisión.

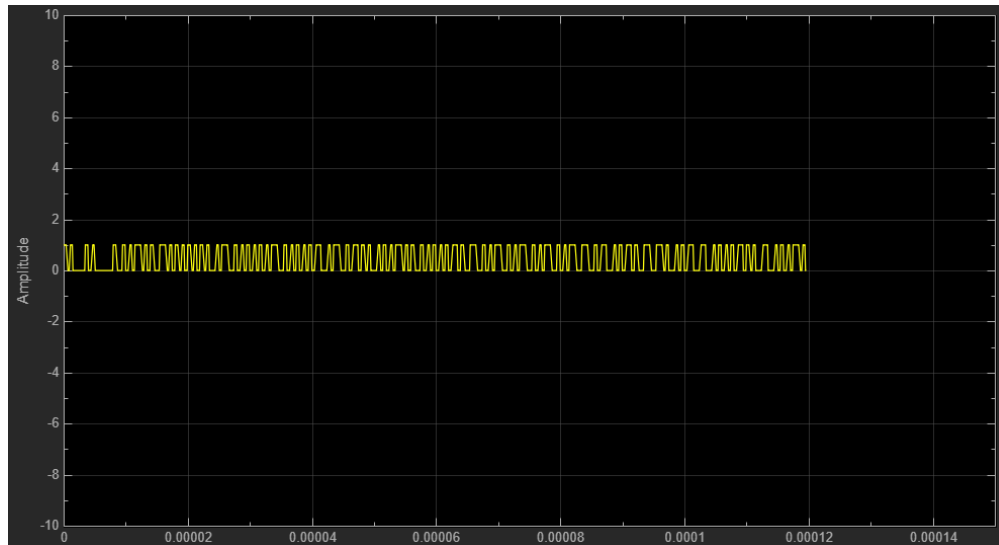


Figura. 2.14. Señal ADS-B banda base en el dominio temporal.

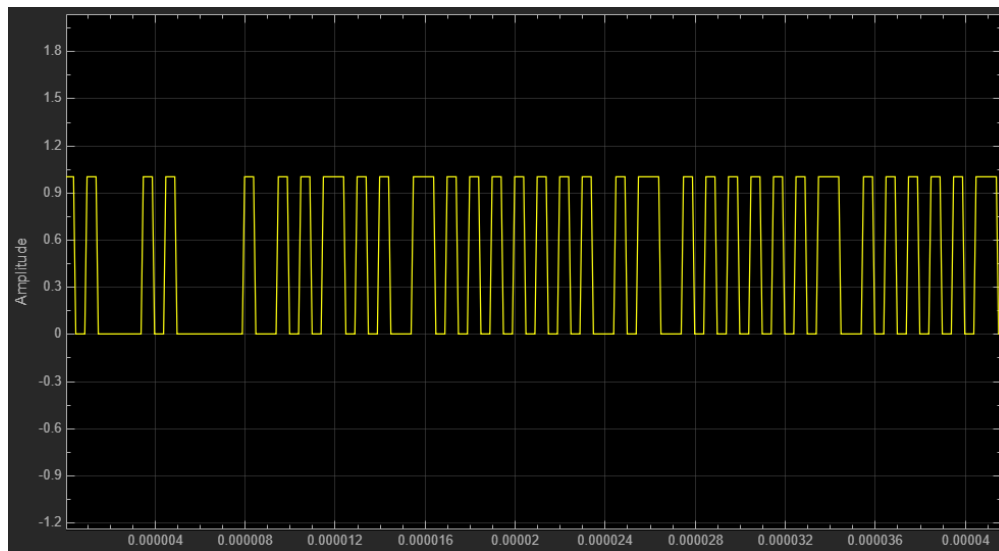


Figura. 2.15. Señal ADS-B banda base en el dominio temporal ampliada.

Para una mayor claridad, a continuación se presenta la expresión de la señal en el tiempo, compuesta por uno valores discretos de amplitud y una forma de pulso en el tiempo:

$$a_n = \begin{cases} A & \text{si } b_n = 1, \\ -A & \text{si } b_n = 0, \end{cases} \quad (2.4)$$

en este caso con una amplitud $A = \frac{1}{2}$

$$h(t) = \Pi\left(\frac{t + \frac{T_b}{4}}{\frac{T_b}{2}}\right) - \Pi\left(\frac{t - \frac{T_b}{4}}{\frac{T_b}{2}}\right), \quad (2.5)$$

luego de que un conjunto de bits sea codificado mediante el esquema Manchester, llamese $x(t)$ a dicha señal, se le añade un nivel DC de valor A. Es decir:

$$y(t) = x(t) + A, \quad (2.6)$$

por lo que al final si la señal oscilaba entre 0.5 y -0.5, ahora oscilará entr 1 y 0. Ahora

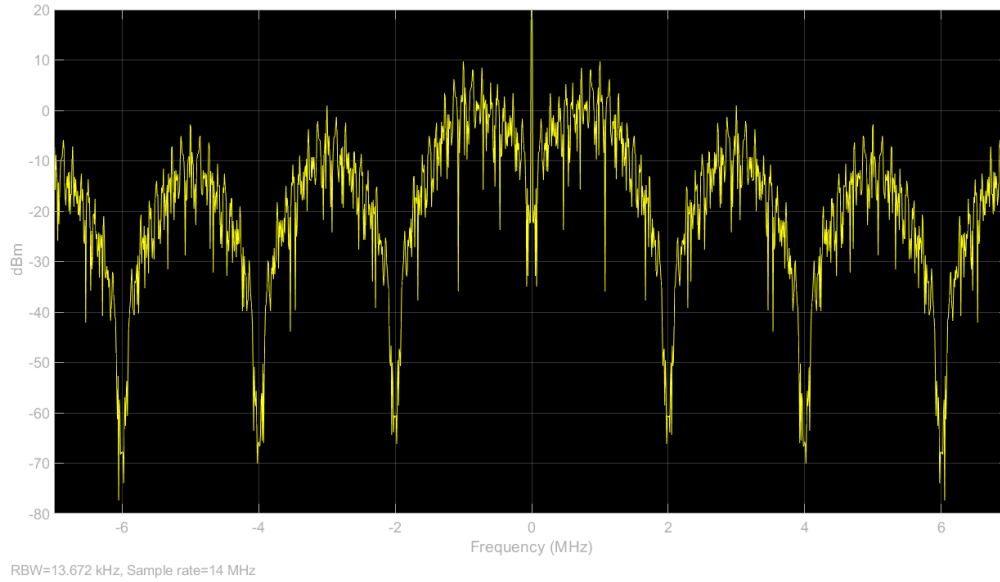


Figura. 2.16. Espectro de la señal transmitida en banda base.

se demuestra matemáticamente que la figura [2.16](#), corresponde a la densidad espectral de potencia de las ecuaciones 2.4 y 2.5:

$$R_{aa}(K) = \begin{cases} E[a_n a_n] = E[a_n^2] = \frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2} = A^2 = \frac{1}{2} & \text{si } K = 0, \\ E[a_n a_{n+k}] = E[a_n]^2 = \left(\frac{A}{2} + \frac{-A}{2}\right)^2 = 0^2 = 0 & \text{si } K \neq 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

$$H(f) = \frac{T_b}{2} \cdot \text{Sinc}\left(\frac{fT_b}{2}\right) \cdot e^{\frac{jwT_b}{4}} - \frac{T_b}{2} \cdot \text{Sinc}\left(\frac{fT_b}{2}\right) \cdot e^{-\frac{jwT_b}{4}}, \quad (2.8)$$

$$H(f) = jT_b \cdot \text{Sinc}\left(\frac{fT_b}{2}\right) \cdot \left(\frac{e^{\frac{jwT_b}{4}} - e^{-\frac{jwT_b}{4}}}{2j}\right), \quad (2.9)$$

$$H(f) = jT_b \cdot \text{Sinc}\left(\frac{fT_b}{2}\right) \cdot \text{Sin}\left(\frac{\pi fT_b}{2}\right), \quad (2.10)$$

la densidad espectral de potencia se define cómo:

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{T_b} \cdot |H(f)| \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} R_{aa}(k) \cdot e^{-j2\pi ft}, \quad (2.11)$$

por lo tanto:

$$S_{xx}(f) = A^2 \cdot T_b \cdot \text{Sinc}^2\left(\frac{fT_b}{2}\right) \cdot \text{Sin}^2\left(\frac{\pi fT_b}{2}\right), \quad (2.12)$$

finalmente con la adición del nivel DC, se obtiene que:

$$S_{yy}(f) = A^2 \cdot T_b \cdot \text{Sinc}^2\left(\frac{fT_b}{2}\right) \cdot \text{Sin}^2\left(\frac{\pi fT_b}{2}\right) + \delta(f). \quad (2.13)$$

En esta sección se crean los objetos osciloscopio y analizador de espectro mediante el toolbox de procesamiento digital de señales los cuales, como se puede apreciar en las figuras [2.14](#) y [2.16](#), ayudan a visualizar la señal en banda base que se esta enviando al dispositivo USRP B210. En este caso al usar un filtro conformador de pulso rectangular, el espectro que se obtiene es el de una codificación Manchester, que tiene un ancho de banda, de acuerdo al primer nulo después de cero, de 2 MHz, y en donde se aprecia que los lóbulos secundarios tienen una potencia comparable frente a la del lóbulo principal. Por otro lado si se hubiesen usado otros filtros conformadores de pulso, de coseno alzado o raíz de coseno alzado, la potencia de los lóbulos secundarios sería mucho menor en comparación a la del lóbulo principal, además el ancho de banda no sería exactamente 2 MHz, si no que dependería del factor de roll-off, así:

$$BW = \frac{1 + \alpha}{T_s}, \quad (2.14)$$

donde:

- BW: Corresponde al ancho de banda del primer nulo después de cero.
- α : Es el factor de Roll - Off de los filtros de Coseno y Raíz de Coseno Alzado.
- T_s : Corresponde al periodo de símbolo.

2.3. DESARROLLO DE ETAPA DE RECEPCIÓN

Creación y configuración del objeto receptor

```

%% Creamos objeto Receptor
fc = 945e6; % Frecuencia de Portadora.
mCR = 10e6; % Master Clock Rate.
dF = 1; %Factor de Diezmado.
frontEndSampleRate = mCR/dF; % Tasa de Muestreo del Receptor Físico.
gain = 60; % Ganancia de Antena.
Rx = comm.SDRuReceiver(... %Creación y configuración Objeto Receptor.
    'Platform',platform, ...
    'SerialNum',address, ...
    'TransportDataType','int16',...
    'OutputDataType','single', ...
    'MasterClockRate',mCR, ...
    'DecimationFactor',dF, ...
    'Gain',gain, ...
    'CenterFrequency',fc);

```

Figura. 2.17. Configuración del objeto receptor para el dispositivo USRP.

En esta etapa se crea un objeto de recepción para un dispositivo USRP, el cual, posteriormente se va a configurar de acuerdo a la frecuencia portadora que se usó en transmisión, una ganancia y una tasa de muestreo.

Inicialmente se establecen una serie de variables apreciables en la figura [2.17](#), que corresponden a los parámetros de configuración del objeto receptor el cual es creado con el apoyo de las librerías de comunicaciones disponibles en Matlab.

A continuación, se exponen las diferentes variables que hacen las veces de parámetros de configuración para el prototipo de receptor ADS-B.

- Frecuencia Portadora de 945 [MHz].
- Un factor de diezmado (Downsample Factor) igual a 1 para obtener una tasa de muestreo igual a la *Master Clock Rate*, ya que su relación se define de acuerdo a la ecuación [2.15](#):

$$F_s = \frac{MasterClockRate}{DownsampleFactor} \rightarrow F_s = MasterClockRate, \quad (2.15)$$

- se establece la Frecuencia de Reloj (Master Clock Rate) en un valor de 10 MHz (Igual a la de la transmisión) para que el receptor tome muestras cada $0.1 \mu s$, es

decir que se está tomando 5 muestras por chip o 10 por símbolo.

$$R_b = 1Mbps; \quad \frac{chips}{bit} = 2; \quad R_c = R_b \cdot \frac{chips}{bit} = 2Mcps, \quad (2.16)$$

$$SamplesPerChip = SPC = \frac{F_s}{R_c} = \frac{10MHz}{2Mcps} = 5, \quad (2.17)$$

- se establece la ganancia de antena receptora en 60 dB.
- Se establece el Output DataType como *single* es decir, un valor numerico pero con menor precisión (32 bits).

Inicialización de objetos y cálculo de variables necesarias para el procesamiento de señales ADS-B.

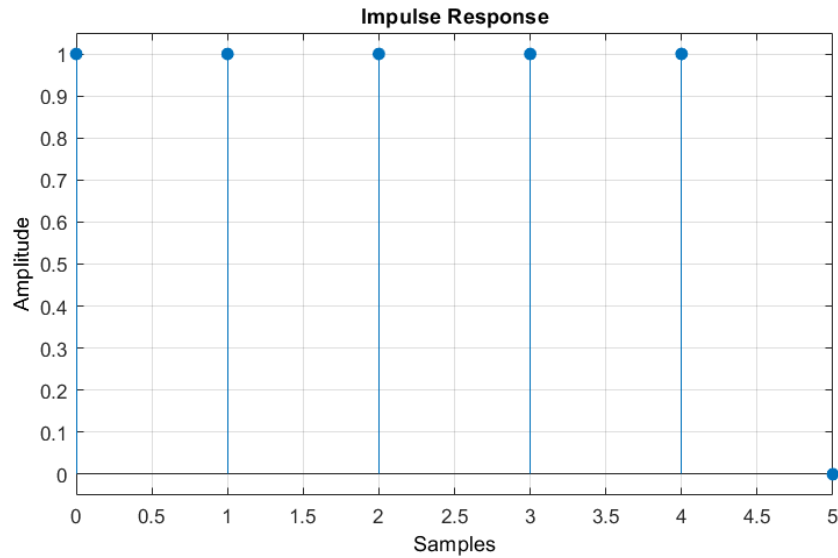


Figura. 2.18. Respuesta al impulso del filtro conformador de pulsos.

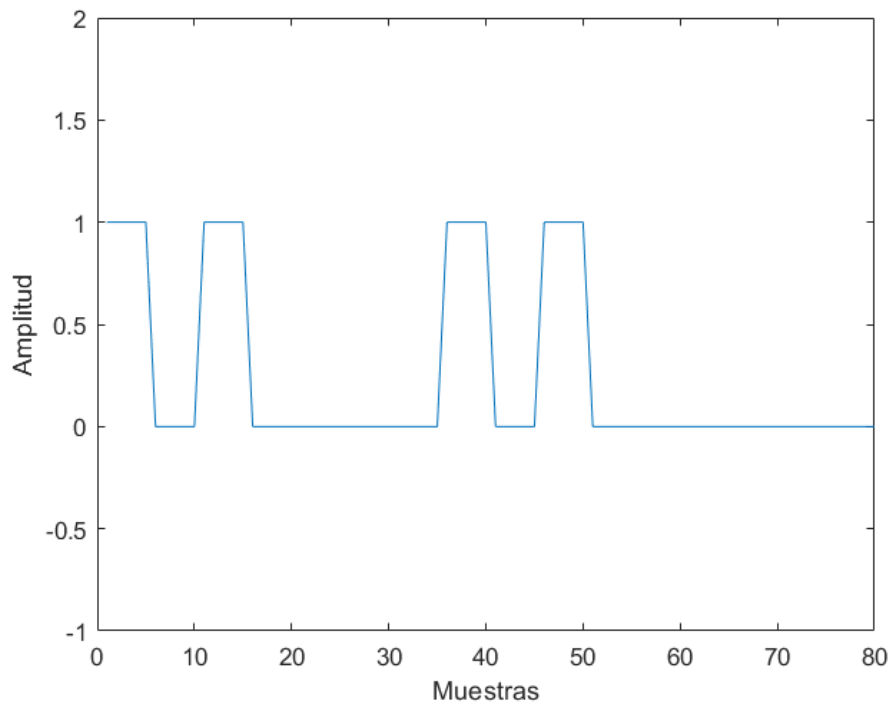


Figura. 2.19. Salida del preámbulo de sincronización

En esta etapa se realiza el cálculo de múltiples datos de tiempos, longitudes y secuencias de sincronización o preámbulo (Figura 2.19), necesarios para el procesamiento de la señal ADS-B. Estos parámetros serán asignados a variables dentro de una estructura de Matlab. Además, también se crean dos objetos y una variable que va contener los coeficientes de un filtro acoplado:

- Un *buffer* asíncrono el cual se crea con una librería de Matlab y permite manejar en tiempo real las tramas recibidas en cada iteración.
- Un filtro de Respuesta al Impulso Finito (FIR, Finite Impulse Response), el cual se crea con la librería de procesamiento digital de señales de Matlab, que a su vez se genera a partir de unos coeficientes de la señal de sincronización de acuerdo al preámbulo de una señal ADS.
- Como se puede apreciar en la figura 2.18, una variable *h* contiene los coeficientes de un pulso conformador rectangular.

Creación de Objetos Osciloscopio, Analizador de Espectro, Definición de tiempo de escucha y Estructura Básica de Paquete

En esta etapa, gracias a la librería de procesamiento digital de señales de Matlab, se crean los objetos de osciloscopio y analizador de espectro los cuales son configurados de acuerdo a la tasa de muestreo que se estableció para el receptor para posteriormente, dentro del bucle principal, visualizar tanto en el dominio temporal como frecuencial, la señal en crudo, es decir, la señal que se está recibiendo tal cual como la entrega el dispositivo USRP sin realizar ninguna operación desde el entorno software, en este caso, Matlab.

	Id_Aeronave	Id_Vuelo	Latitud	Longitud	Altitud	Velocidad	Time
1	empty	empty	0	0	0		0 18:29:56....

Figura. 2.20. Interfaz de visualización de información recibida.

Luego, se pregunta al usuario el tiempo durante el cual se desea que permanezca activo el receptor, además se define la estructura básica para interpretar los paquetes y se crea el objeto `msgParser`, el cual es proporcionado por Matlab y es útil para analizar las cadenas de bits que componen el cuerpo del mensaje. Adicionalmente, se puede observar que en la figura [2.20](#) se crea una estructura de tabla en Matlab y una estructura de tabla que se van a encargar de desplegar la información de los aviones detectados en tiempo real.

Ejecución del Bucle Principal

Esta etapa corresponde a la inicialización del proceso de recepción y el procesamiento de las señales recibidas, además de su visualización en tiempo y frecuencia.

Inicialmente, al ejecutar el objeto receptor, se captura una trama de determinada duración que puede contener n paquetes ADS-B. Esa trama corresponde a una porción de la señal temporal que ya ha sido muestreada y bajada de pasa banda a banda base por el dispositivo USRP B210 de acuerdo a la configuración establecida. Todas las muestras capturadas que componen esta trama son almacenadas dentro de un vector columna y a su vez cada muestra es un tipo de dato complejo, es decir, que tiene una parte real

(en fase) modulada con un coseno y una parte imaginaria (cuadratura) modulada por un seno, es decir que el coseno asume los símbolos mapeados en fase o parte real en el eje X y el seno asume los símbolos mapeados en cuadratura o parte imaginaria en el eje Y; esto es porque a pesar de que desde el software se envíen muestras reales, los sistemas SDR suelen utilizar un muestreo complejo, en el que, en lugar de un único conjunto de muestras de señal de valor real, se pone a disposición un conjunto bidimensional de muestras de valor real e imaginario. Presentar los datos muestreados en este formato complejo tiene la ventaja de permitir un procesamiento de señal sin alias hasta la frecuencia de muestreo (en lugar del límite habitual de Nyquist de la mitad de la frecuencia de muestreo). Por lo tanto, las restricciones en la frecuencia de muestreo del sistema se reducen un poco, y los requisitos del convertidor analógico a digital (ADC) también se reducen [16].

A continuación, en la figura 2.21 se pueden apreciar en perspectiva las partes real e imaginaria de la señal entregada por el dispositivo USRP. Se podría decir que es una señal en crudo dado que no se le ha realizado ningún proceso o tratamiento digital.

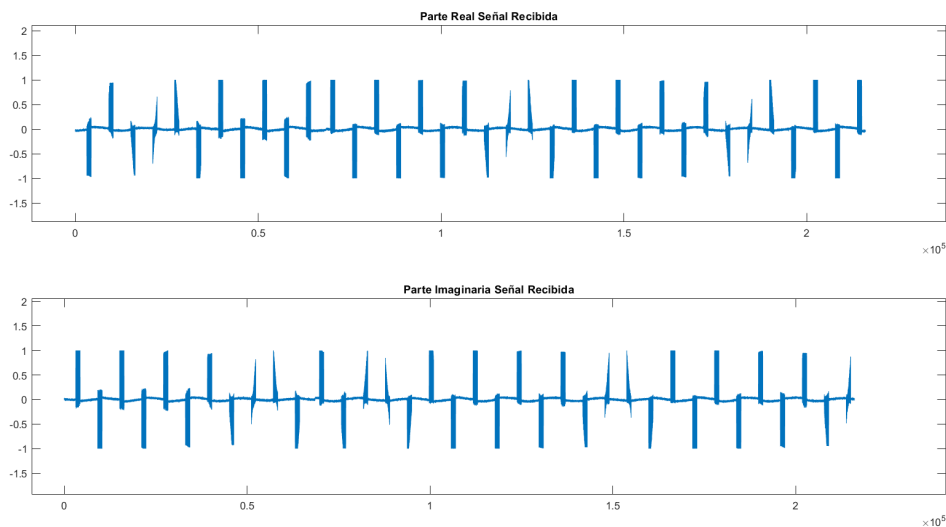


Figura. 2.21. Ultima frame capturada en un proceso de recepción.

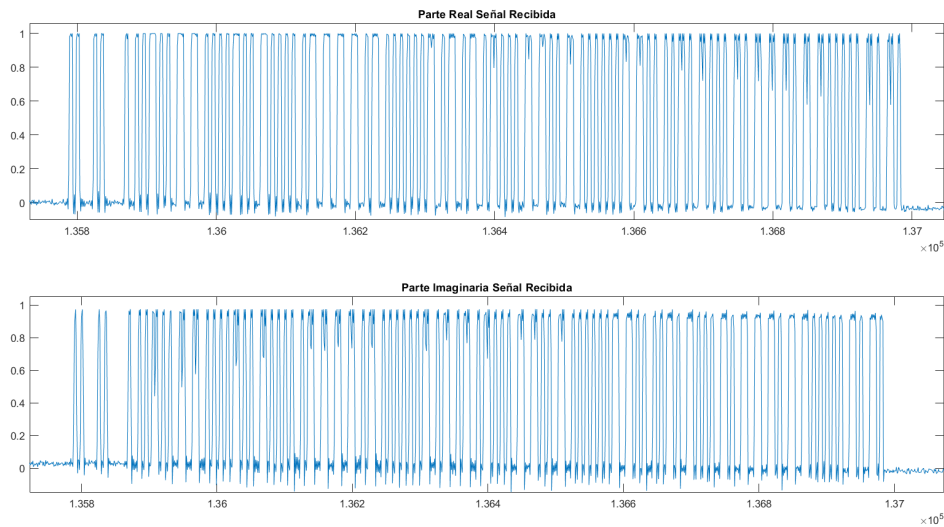


Figura. 2.22. Paquete ADS-B dentro de la trama capturada.

La figura [2.22](#) corresponde a todos los paquetes ADS-B capturados en la totalidad de la trama. Se puede distinguir el preámbulo de una señal ADS-B al inicio del paquete. Las muestras complejas (parte real y parte imaginaria) captadas serán convertidas a muestras reales, dado que se necesita la envolvente de esta señal, la cual se obtiene como:

$$E = |S_{Rx}|^2, \quad (2.18)$$

donde E: Envolvente y S_{Rx} : Señal Recibida. En la figura [2.23](#) se puede apreciar la señal resultante que es un conjunto de muestras a las cuales se les ha calculado la envolvente. Obteniendo una señal completamente real positiva con pulsos de amplitud que oscila entre 0 y 2 Voltios aproximadamente.

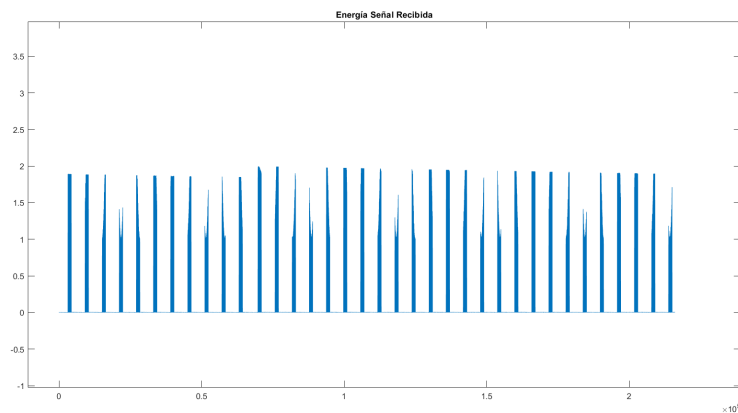


Figura. 2.23. Señal de Energía en recepción.

El espectro de la señal recibida permite visualizar cómo se tiene un ancho de banda de acuerdo al primer lóbulo de 2 MHz, tal y como respondería a la tasa de chip. Se puede observar que la forma del espectro corresponde a la de una codificación Manchester con un nivel DC.

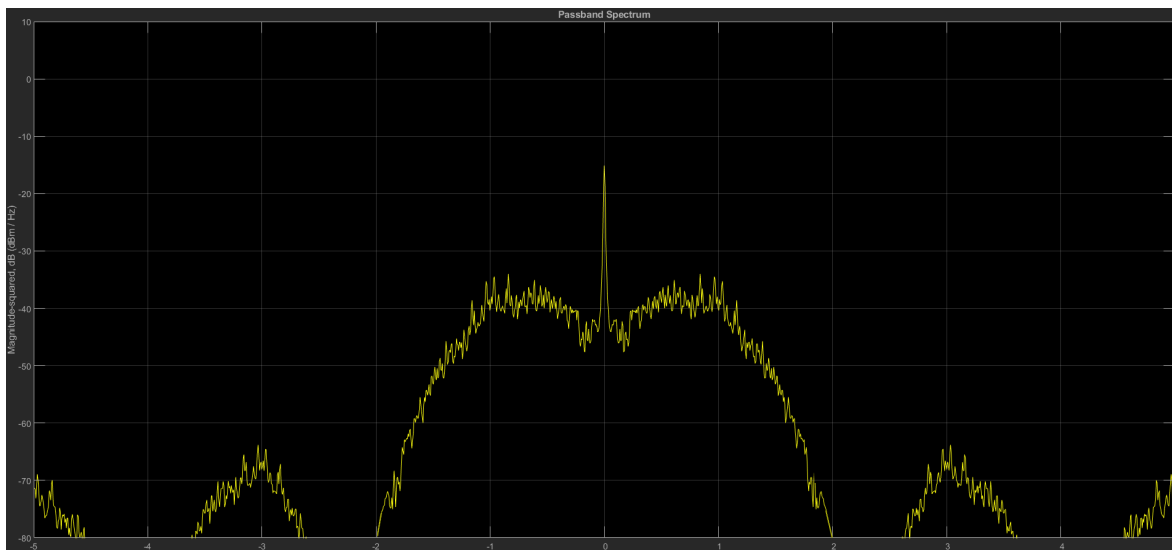


Figura. 2.24. Espectro de la señal.

Cabe mencionar que este espectro es generado a partir de la señal recibida que se aprecia en la figura [2.22](#), la cuál al ser comparada con la imagen [2.15](#), deja en evidencia que no es una señal ideal en el dominio temporal, por lo que el espectro tampoco es el ideal, aunque pueda notarse similar.

Una vez obtenida la envolvente de la señal, se copia este vector que la contiene dentro de un buffer asíncrono, al inicio de cada iteración antes de que se llené el buffer con nueva información entrante se extrae el último posible paquete de la iteración anterior y se concatena con el inicio de la siguiente señal capturada, esto, con el objetivo de que en caso de que un paquete haya quedado cortado en la primer trama recibida, este paquete se pueda recuperar con la siguiente trama capturada.

Con la nueva trama capturada y concatenada a ese posible ultimo paquete de la trama anterior se procede a ser leída desde el mismo buffer para pasar a través de un filtro FIR correlacionador, el cual maximiza la respuesta en amplitud si encuentra una secuencia similar al preámbulo que se le ha pasado como plantilla.

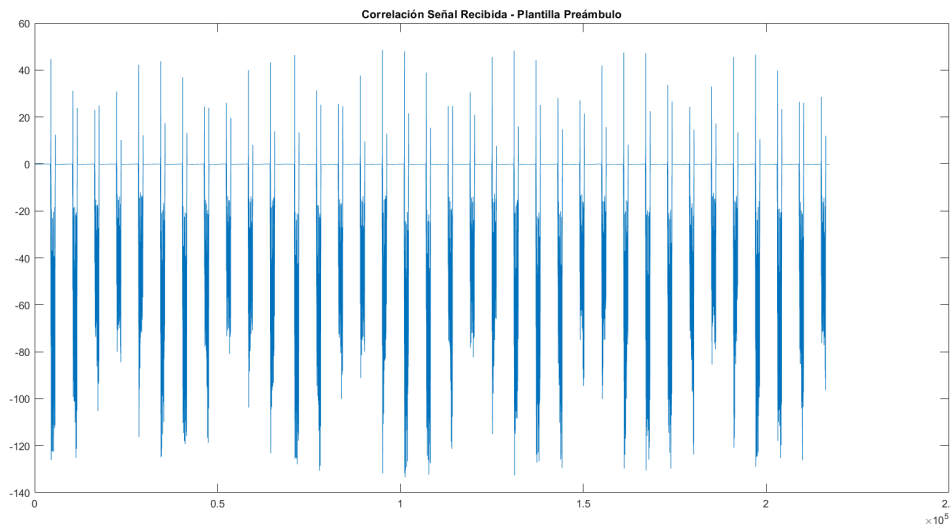


Figura. 2.25. Salida de la señal capturada al pasar a través del filtro correlacionador.

Como se puede observar en la figura [2.25](#), se encuentra un número de valores picos cada determinado número de muestras, es decir, está detectando el preámbulo de cada paquete que a su vez se encuentra separado una cantidad de ceros con respecto a los paquetes vecinos. En contra parte, se aprecian mínimos cuando las muestras son poco o nada similares a la plantilla del preámbulo, obteniendo para cada uno de ellos un coeficiente negativo que se irá acumulando.

Una vez obtenida la salida de la señal a través del filtro correlacionador, se almacena en una variable llamada `zFilt`, la cual a su vez es pasada por la función `SearchingPackets` que tiene el objetivo de encontrar los máximos de la variable y verificar si efectivamente corresponden a un preámbulo de una señal ADS-B para posteriormente recuperar la porción de información adjunta del preámbulo.

Una vez que ya se tiene certeza de cuáles son los paquetes que contienen el preámbulo ADS, es decir, son candidatos a ser procesados, se recorren todos y se procede a demodular, uno por uno, cada uno de estos paquetes mediante una función creada, llamada `ppmDemod`, la cual entrega los 112 bits de información de cada paquete. De la misma manera para cada paquete se procede a analizar su información en bits que permitirá conformar la trama ADS. Comenzando con el analizador de cabecera que es implementado mediante la función `parseHeader`, el cual retorna los valores en decimal del campo DF y CA de una trama ADS. Posteriormente, se chequea la integridad de ese paquete mediante la validación con el Código de Redundancia Cíclico, tarea de la cual se encarga la función `detCRC`, para que al final del procesamiento de cada paquete se agregue una marca de tiempo y el resultado del valor de verificación del CRC.

Una vez recorridos todos los paquetes se llama al objeto analizador de mensajes proporcionado por Matlab el cual convertirá los campos de información de la trama ADS de bits a texto.

Finalmente, como se puede apreciar en la figura 2.26, los datos se despliegan en una tabla gráfica de Matlab que se va actualizando a medida que se vayan procesando nuevas tramas y nuevos paquetes, así como también se va actualizando el tiempo de control del bucle.

	Id_Aeronave	Id_Vuelo	Latitud[\hat{A}°]	Longitud[\hat{A}°]	Altitud[m]	Velocidad
1	FF2020	empty	2.45	37.1	11582.4	empty

Figura. 2.26. Tabla de visualización de información recibida.

Diagrama de bloques Receptor BPPM

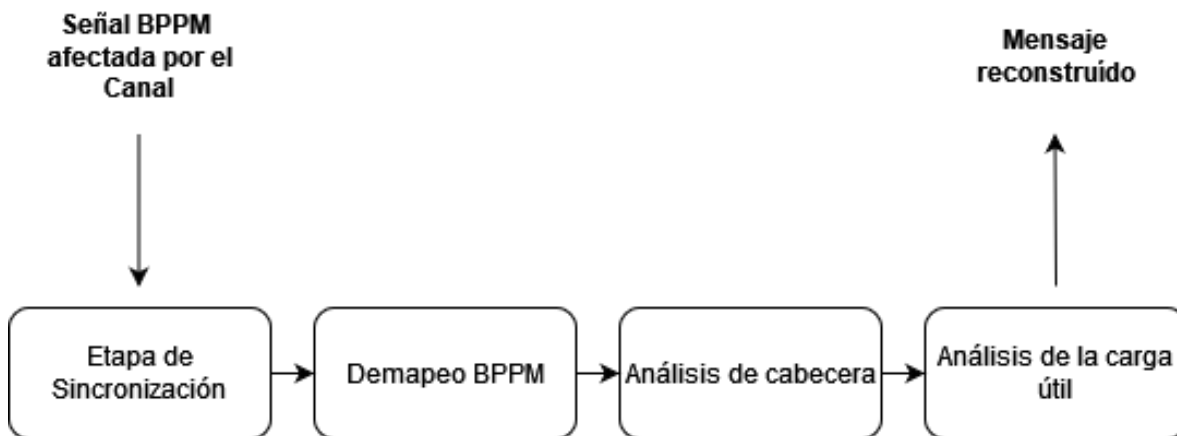


Figura. 2.27. Diagrama de bloques Receptor BPPM.

Como se aprecia en la figura 2.27, se dividió en 4 bloques o etapas, el receptor BPPM, éstas son:

- **Etapa de Sincronización:** En esta etapa se comienza por calcular la envolvente de la señal compleja recibida, para después almacenarla en un buffer que permita ir analizando datos pasados mientras se siguen almacenando los datos que van llegando en el presente. Este análisis consiste en tomar una cantidad de datos, y pasarlos a través de un filtro correlacionador que detecte los potenciales índices (valores pico a la salida del filtro) del vector de datos tomado, en donde se encuentre el preámbulo establecido para ADS-B. Luego, en los puntos en donde se detecto un potencial preámbulo, se verifica que el paquete al que pertenece dicho preámbulo se encuentre totalmente contenido dentro los datos que están siendo

analizados. Para finalmente validar si la secuencia de unos y ceros del preámbulo es la correcta.

- Etapa de Demapeo BPPM: Es aquí donde se toma la decisión mediante un umbral si el bit es 1 o 0, es decir que en esta etapa se recibe una cadena de chips y se entrega una cadena de bits.
- Etapa de análisis de cabecera: Se obtienen los campos de cabecera como **Capability** y **Downlink Format** paquete por paquete ADS-B, y se chequea la integridad de los mismos mediante la validación del CRC, en caso de que falle el paquete es descartado, pues ha llegado con errores.
- Etapa de análisis de la carga útil: En esta etapa se reciben paquetes ADS-B previamente validados en forma de cadenas de bits, siendo el trabajo de esta etapa agrupar los bits de diferentes posiciones para decodificarlos de binario a decimal, obteniendo así el valor de un campo específico de la trama.

Capítulo 3

MÉTRICAS, CASOS DE ESTUDIO, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se da a conocer las métricas y los diferentes escenarios en los cuales se evaluó el prototipo del sistema bajo radio definido por software de un transmisor y receptor de señales aéreas como lo son las señales ADS-B. De igual manera, se exponen los diferentes resultados obtenidos y el análisis que se realizó para cada uno de ellos.

3.1. Métricas

Para la evaluación del desempeño del sistema prototipo de transmisión y el sistema de recepción de señales ADS-B se decidió realizar la medición de valores asociados a las siguientes métricas:

3.1.1. Tasa de Error de Bit (BER, Bit Error Rate)

La tasa de error de bit se define como la tasa a la cual ocurren errores en un sistema de telecomunicaciones. Esto puede traducirse directamente en el número de errores que se producen en una cadena de un número determinado de bits o como la probabilidad de recibir erróneamente un bit transmitido [17]. Se puede definir la BER dentro un intervalo de tiempo definido, como:

$$BER = \frac{\#Bits\ Errados}{Total\ Bits\ Transmitidos} \quad (3.1)$$

A diferencia de muchas otras formas de evaluación, la BER evalúa el rendimiento completo de extremo a extremo de un sistema, incluyendo el transmisor, el receptor y el medio entre ambos. De esta forma permite comprobar el rendimiento real de un sistema en funcionamiento, en lugar de probar los componentes y esperar a que funcionen satisfactoriamente cuando estén en su lugar.

3.1.2. Estimación de la BER

Esta métrica es estimada mediante el envío repetido de un par de tramas predefinidas ADS-B, es decir tramas ya conocidas, que se usan para probar el transmisor, luego estas tramas se exportan a un archivo .mat que almacena estos vectores de bits para posteriormente cargar los mismos en el código del receptor, una vez se encuentre

realizando el rearmado de las tramas en formato binario, se comparan con las tramas originales enviadas y ya precargadas, para así hacer una estimación a lo largo de la duración de la transmisión de cuantos bits llegan errados, sobre el total de bits pertenecientes a tramas válidas recibidas. Con la expresión "tramas válidas recibidas" se hace referencia a las tramas que fueron identificadas correctamente en el proceso de sincronización.

3.2. CASOS DE ESTUDIO

Una vez seleccionadas las métricas, se generan los escenarios de simulación, con sus respectivos casos de estudio, sobre los cuales se realiza el análisis comparativo del desempeño en dos entornos como lo son Indoor y Outdoor, como se muestra en la tabla [3.1](#).

LOS						NO LOS				
INDOOR			OUTDOOR			INDOOR		OUTDOOR		
Distancias[metros]										
1	4	9	10	20	40	6	9	11	10	20

Tabla. 3.1. Planificación de Casos de Estudio.

3.2.1. Consideraciones y limitaciones a tener en cuenta previo al análisis y presentación de cada caso de estudio

La decisión de realizar pruebas, tanto indoor como outdoor, radica en el hecho de que estos dispositivos no son los dispositivos reales usados para señalización aérea ADS-B, por lo que se quiso verificar si existía efectos multitrayecto al trabajar con estos dispositivos en entornos cerrados, es decir, entornos indoor, puesto que su propósito es académico. En caso de existir estos fenómenos, evaluar qué tanto afectaba el desempeño o la emulación de la transmisión. Por otro lado, dado que no se podía manipular a voluntad la potencia de transmisión (a diferencia de la ganancia de transmisión y recepción) desde la herramienta de Matlab, se quiso evaluar hasta qué distancia podían trabajar estos dispositivos con el propósito de verificar si eran aptos para recrear de una mejor manera la transmisión y recepción de la señalización ADS-B.

Por otro lado, según estudios realizados enfocados en la medición de la potencia de salida de los dispositivos USRP, la potencia es dependiente de cuatro factores [\[18\]](#):

- La frecuencia de Portadora.
- El Driver del Hardware USRP (dependiente del Software utilizado: Matlab, GNU Radio, Python, etc.).

- El nivel de ganancia establecido para transmisión y recepción.
- Estado del Dispositivo.

De esta manera se puede apreciar que la única forma de validar la potencia de salida del dispositivo para la aplicación puntual que se esté desarrollando es mediante la conexión del puerto de transmisión del mismo a un analizador de espectro externo o mediante un sistema antena – analizador de espectro, algo que también sería necesario para realizar una comparación adecuada del espectro de la señal transmitida y la señal recibida. Esto se puede apreciar en la figura [3.1](#)

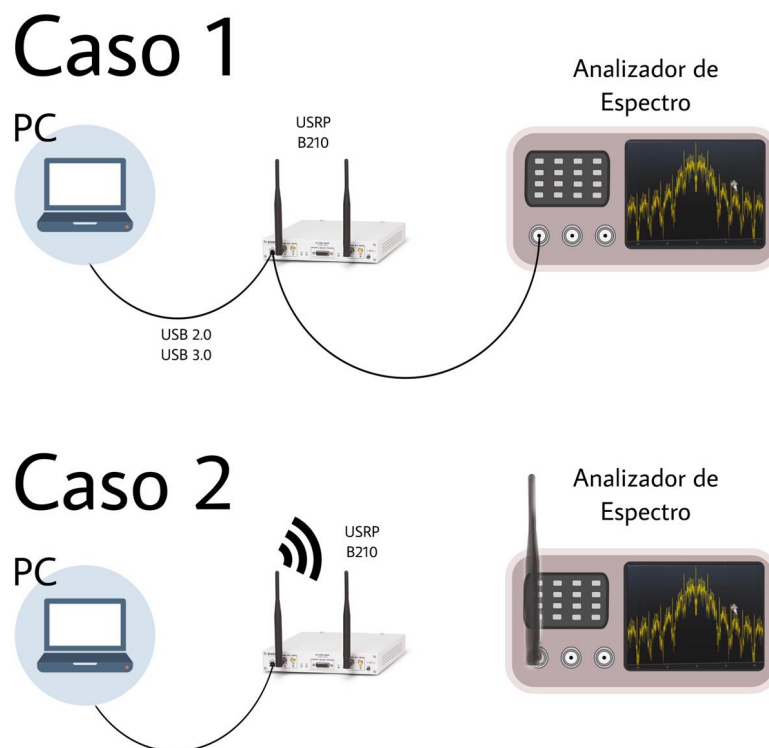


Figura. 3.1. Posibles formas de conseguir una correcta visualización de lo que se está transmitiendo y recibiendo.

Para lograr entender de una mejor manera el impacto que tienen los diferentes fenómenos de propagación sobre la señal es necesario realizar una comparación visual entre el espectro de la señal transmitida, discreta, ideal y en banda base apreciado en la figura [2.16](#) y los diferentes espectros de la señal recibida en los distintos casos de estudio propuestos. Sin embargo, cabe resaltar que aunque estos recursos visuales son útiles, por parte de la transmisión es el espectro de la señal conformada en Software el que se está visualizando, mientras que en recepción es el espectro de la señal recibida posterior a procesos de amplificación de bajo ruido, de bajada de pasa banda a banda base, de

filtrado pasa bajas, de conversión analógica a digital y de diezmo entre otros, el que se esta visualizando.

Modelos utilizado para la verificación de las pérdidas

Indoor

Para entornos indoor se hizo uso del modelo de pérdidas por propagación para interiores, como el 1SM(One Slope Model) [7]:

$$L(dB) = L_0 + 10n \log_{10}(d[m]) \quad (3.2)$$

Donde:

- n : corresponde al índice de variación de la potencia con la distancia.
- L_0 es la constante que representa las pérdidas de propagación a una distancia de referencia igual a 1 metro.
- d corresponde a la distancia en metros.

De acuerdo a la Universidad de Bristol - Reino Unido, para ambientes con LOS y NLOS se tiene en general:

	L_0	n
LOS	21.2	1.5
NLOS	23.6	3.2

Tabla. 3.2. Valores propuestos de L_0 y n según la Universidad de Bristol [7].

Outdoor

Para entornos outdoor de corto alcance se hizo uso del modelo de pérdidas por propagación propuesto por la recomendación UIT-R P.1411-9, que propone [8]:

$$L(dB) = 10\alpha \log_{10}(d[m]) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f[GHz]) + N(0, \sigma) \quad (3.3)$$

Donde:

- d : Distancia directa 3D entre las estaciones transmisora y receptora (m).
- f : Frecuencia de Operación (GHz).
- α : Coeficiente asociado al aumento de las pérdidas de trayecto con la distancia.
- β : Coeficiente asociado con el valor de compensación de la pérdida de trayectoria.
- γ : Coeficiente asociado al aumento de las pérdidas de trayecto con la frecuencia.
- $N(0, \sigma)$: Una variable aleatoria gaussiana de media cero con una desviación estándar σ (dB).

Estos parámetros son escogidos de acuerdo a la siguiente tabla:

Frecuencia [GHz]	Distancia [m]	Tipo de entorno	LOS/NLOS	α	β	γ	σ
0.8-73	5-660	Urbano con o sin Edificios, sub-urbano	LOS	2.12	29.2	2.11	5.06
0.8-38	30-715	Urbano con Edificios	NLOS	4.00	10.2	2.36	7.60

Tabla. 3.3. Valores propuestos de los parámetros α β γ , σ según la recomendación de la ITU-R P.1411-9 [8].

3.2.2. Caso 1: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 1 metro.

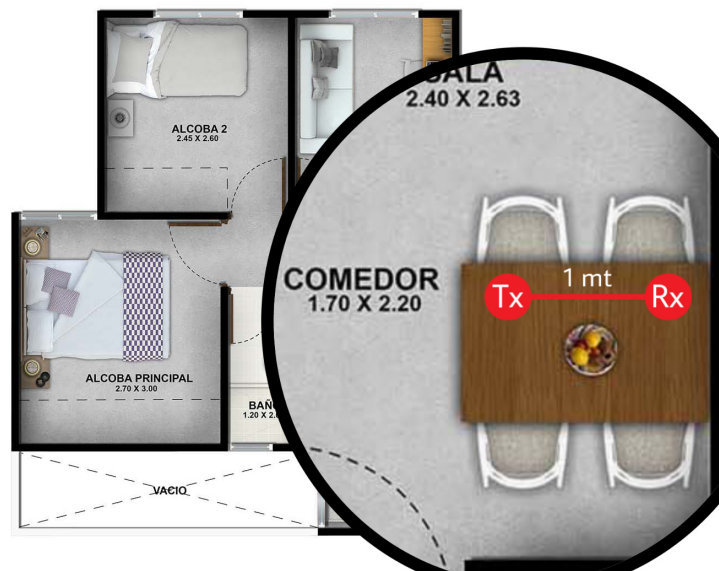


Figura. 3.2. Ubicación de Transmisor y Receptor a 1 mt de distancia en ambiente indoor con LOS.

En la figura 3.2 se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 1 metro entre sí, con línea de vista directa. Cabe recordar que el canal de transmisión es de 946 MHz. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

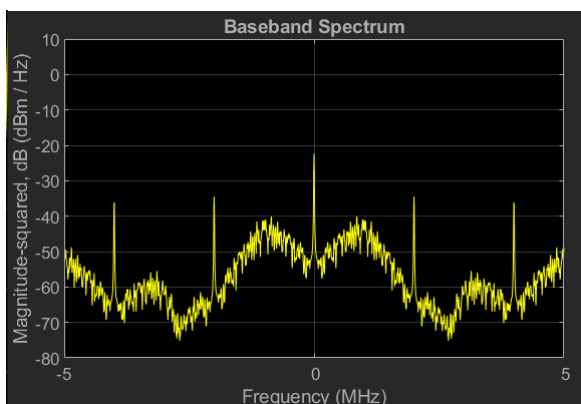


Figura. 3.3. Espectro de la señal recibida.

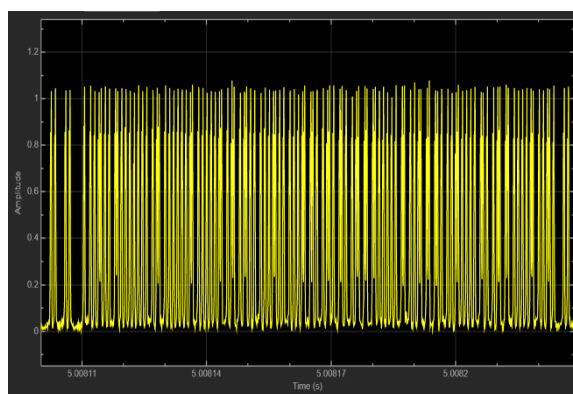


Figura. 3.4. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

Observando la figura [3.3](#) y comparando el espectro de la señal recibida con respecto al espectro de la señal en banda base, se logra notar una deformación del mismo en cuanto a sus lóbulos secundarios, pues se esperaría que fueran decayendo en potencia, tal como en el espectro ideal de la señal, pero como se menciona anteriormente en el párrafo final de la sub-sección de consideraciones y limitaciones [3.2.1](#), al no contar con el espectro real de lo que se está transmitiendo por medio de la USRP, no se podría afirmar que exista algún fenómeno de multitrayecto o ruido en el canal y esto puede deberse meramente a un efecto en el dispositivo hardware. Por otro lado los lóbulos principales y las ubicaciones de los picos de potencia debido al nivel DC en esta codificación tipo Manchester corresponden exactamente a los del espectro de la señal ideal en transmisión, algo favorable pues a pesar de no saber la potencia real de la señal transmitida, si se está recibiendo un espectro de señal acorde al de la señal ideal transmitida. No es que sea favorable percibir un nivel DC en el espectro pues se considera como energía innecesaria, si no que se considera favorable ver que la forma del espectro de una codificación Manchester que ha sido la implementada ya que es la codificación usada por BPPM, es decir que eso confirma que lo que se ha enviado, a pesar de no poder visualizarlo en Osciloscopio, si corresponde a la señal deseada de transmitir. Dentro de la trama visualizada en el tiempo mostrada en la figura [3.4](#), se puede notar que las oscilaciones presentes alrededor de los valles o ceros de la señal son casi despreciables en comparación con la amplitud máxima de la señal, la cual también se mantiene en niveles constantes, lo que permite suponer que la cantidad de ruido acumulado en la señal es bastante bajo, aspecto que resulta positivo al momento de evaluar el sistema; recordando que la señal que estamos recibiendo ya ha pasado por unos procesos a través de la USRP, mencionados previamente en la sub-sección [3.2.1](#).

La BER obtenida en promedio después de realizar 20 repeticiones para este escenario de simulación fue de $6,7224 \times 10^{-4}$, y la potencia percibida en el lóbulo principal es de aproximadamente $-40 \left[\frac{dBm}{Hz} \right]$. Mencionando una vez más la imposibilidad de tener certeza sobre el nivel de la potencia de transmisión y dado que los resultados obtenidos

corresponden al caso de estudio con mejores condiciones, se toman como valores de referencia para la evaluación del desempeño de los casos de estudio posteriores.

3.2.3. Caso 2: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 4 metros.

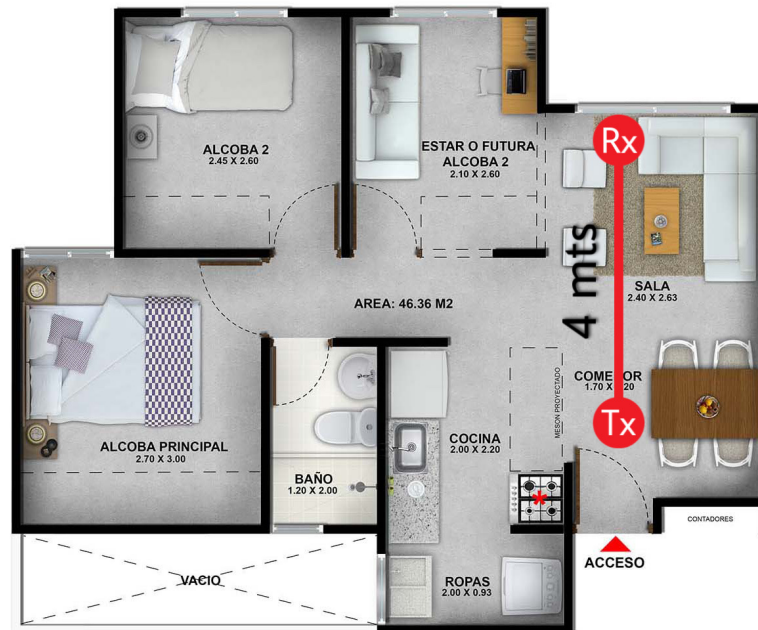


Figura. 3.5. Ubicación de Transmisor y Receptor a 4 mts. de distancia en ambiente indoor con LOS.

En la figura [3.5](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 4 metros entre sí, con línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

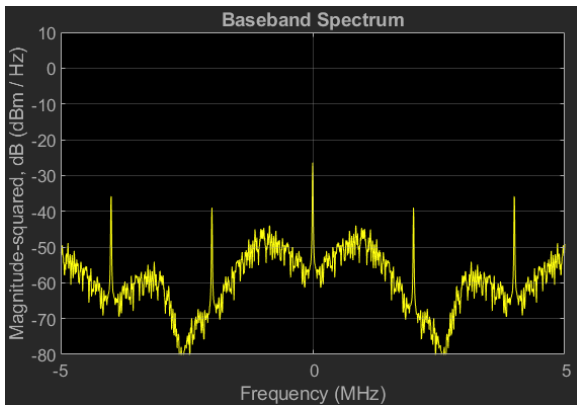


Figura. 3.6. Espectro de la señal recibida.

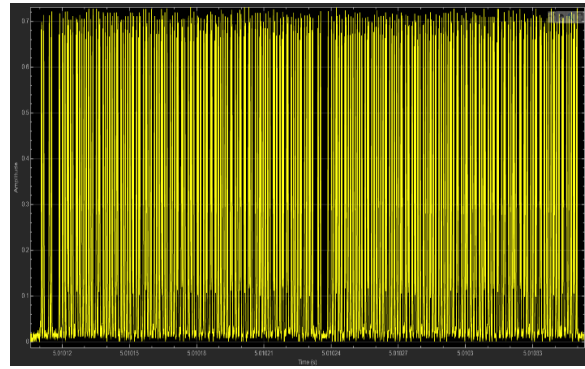


Figura. 3.7. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

En este caso es posible apreciar en la figura [3.7](#) un poco de ruido en la imagen de la trama en el tiempo el cual se puede considerar despreciable comparado con la amplitud de la señal. En la gráfica espectral, gracias a la figura [3.6](#), es posible notar que ha habido una pérdida en la potencia con la que llega la señal al receptor, algo esperado dado que se ha aumentado la distancia entre el dispositivo de transmisión y de recepción.

Dada la disminución en la potencia de recepción, se puede apreciar un aumento en la BER frente al caso de estudio anterior, cuyo valor ahora es de $1,346822 \times 10^{-3}$, y la potencia de recepción percibida para el lóbulo principal es de aproximadamente $-45 \left[\frac{dBm}{Hz} \right]$. Resultados negativos en cuanto a la BER pues demuestra que esta modulación BPPM similar a una codificación Manchester, es muy dependiente de la potencia, por otro lado aunque se han perdido 5 dB distanciando 3 metros más entre Tx y Rx, esto es algo esperado e inclusive es poca la potencia pérdida según se puede verificar en el modelo con el que se verificaron las pérdidas en los casos de estudio [3.2.1](#).

3.2.4. Caso 3: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 9 metros.



Figura. 3.8. Ubicación de Transmisor y Receptor a 9 mts. de distancia en ambiente indoor con LOS.

En la figura [3.8](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 9 metros entre sí, con línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

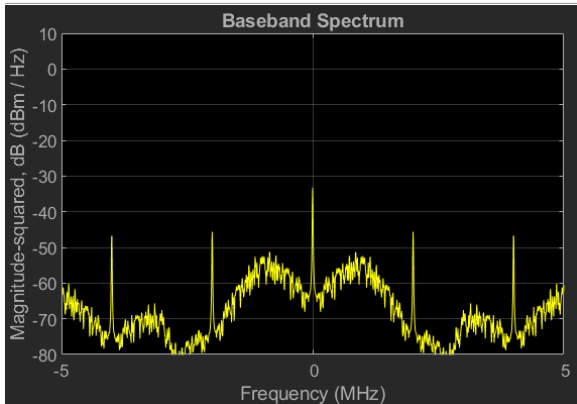


Figura. 3.9. Espectro de la señal recibida.

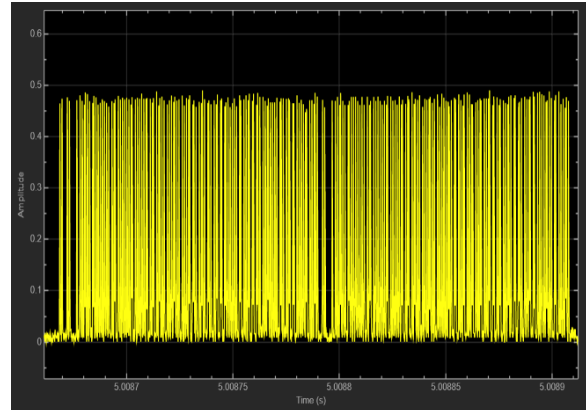


Figura. 3.10. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

Tanto en la gráfica espectral como en la gráfica temporal es posible evidenciar que hay una pérdida en la potencia de la señal, en este caso la potencia percibida para el lóbulo principal es aproximadamente $-53 \frac{dBm}{Hz}$, es decir 13 dB con respecto al caso 1, lo cual también ha contribuido a que el valor de la BER aumente en comparación a la de los anteriores casos de estudio. El valor de la BER para este caso de estudio es de $5,041 \times 10^{-3}$. Es decir que la BER aumentó en comparación al caso 2, confirmando la dependencia de la potencia de la modulación usada para generar las señales ADS-B

Este aumento de la BER dependiente de la potencia, tiene sentido desde el proceso de recepción, dado que la demodulación y detección de los bits se hace mediante un umbral posterior a la sincronización, entre más pequeña sea la distancia entre el valor que representa un uno y el cero, mayor será la probabilidad de error.

3.2.5. Caso 4: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 6 metros.

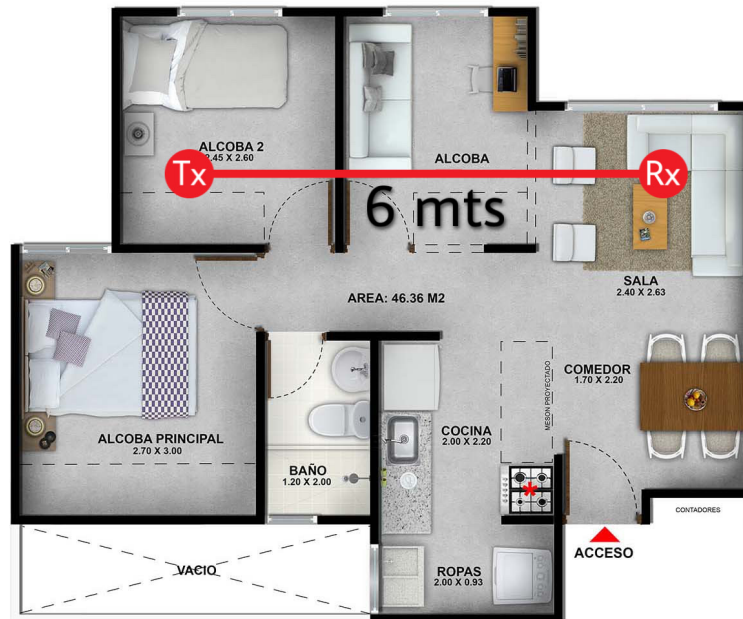


Figura. 3.11. Ubicación de Transmisor y Receptor a 6 mts. de distancia en ambiente indoor sin LOS.

En la figura [3.11](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 6 metros entre sí, sin línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

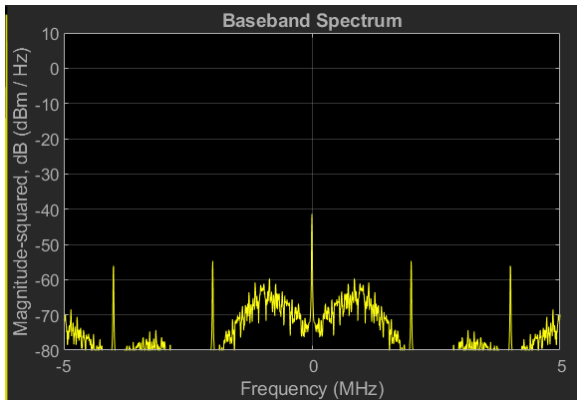


Figura. 3.12. Espectro de la señal recibida.

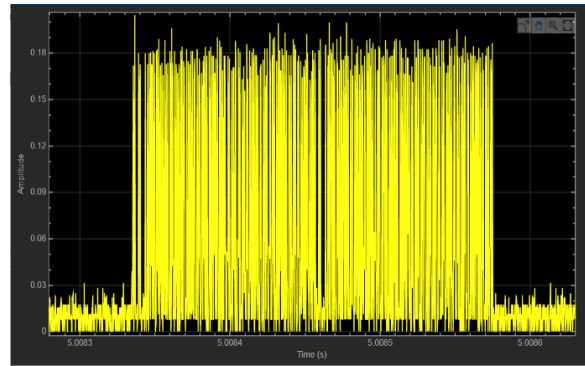


Figura. 3.13. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

En este caso se puede apreciar que aunque la distancia de separación es menor en comparación a la distancia de separación utilizada en el caso número 3, se obtiene una potencia de recepción mucho menor que es fácilmente apreciable tanto en la gráfica espectral como en la gráfica de tiempo siendo una potencia de recepción para el lóbulo principal de aproximadamente $-60 \frac{dBm}{Hz}$. Esto se debe a que, al no haber una línea de vista directa, la señal pierde más energía en los procesos de refracción, reflexión y absorción por atravesamiento de obstáculos.

Para este caso de estudio se obtuvo una BER de $1,62317 \times 10^{-2}$. Es posible notar un aumento en la BER a raíz de la ausencia de línea de vista que degrada la señal. Inclusive en la gráfica temporal se puede ver una mayor variabilidad en su amplitud.

3.2.6. Caso 5: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 9 metros.

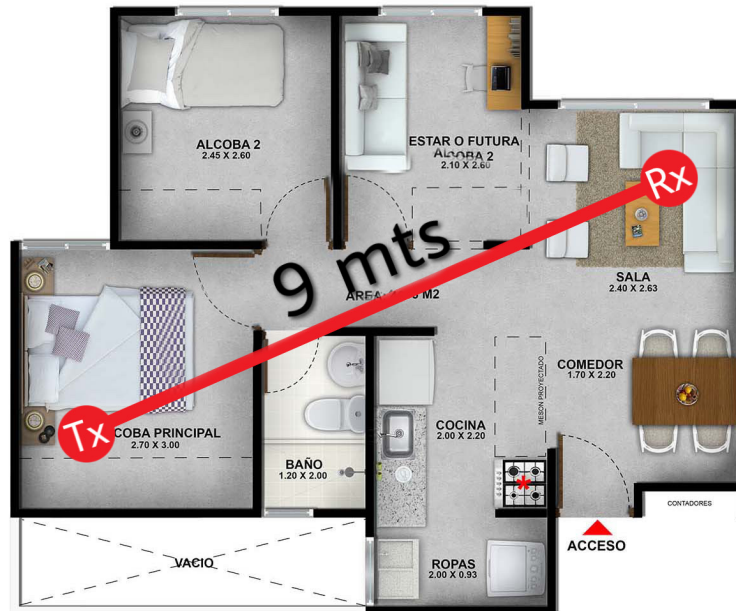


Figura. 3.14. Ubicación de Transmisor y Receptor a 9 mts. de distancia en ambiente indoor sin LOS.

En la figura [3.14](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 9 metros entre sí, sin línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

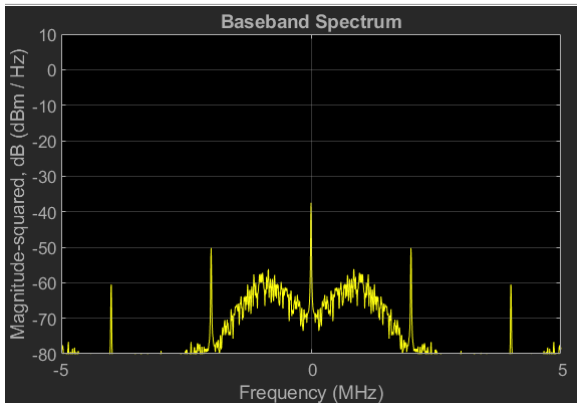


Figura. 3.15. Espectro de la señal recibida.

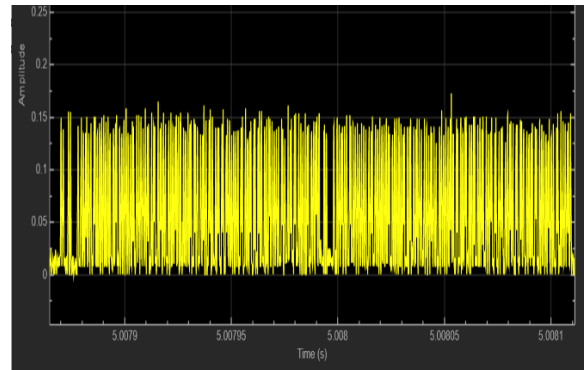


Figura. 3.16. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

En este caso podemos apreciar que hay una mejor potencia de recepción en comparación del caso anterior con respecto al lóbulo principal la cual se ubica en alrededor de $-58 \frac{dBm}{Hz}$ y se puede apreciar, a diferencia de todos los demás, casos que los lóbulos secundarios se han suprimido o atenuado tanto que no son visibles, de hecho, la amplitud que se alcanza a apreciar en la gráfica temporal es menor que la del anterior caso pero es más estable, es decir, con menor variabilidad. Aunque los límites de la gráfica no se han extendido, la caída de los lóbulos laterales en este caso de estudio con respecto a los demás fue más abrupta.

La BER para este caso fue de $4,89196 \times 10^{-5}$ que es mucho menor y por lo tanto mejor que el caso anterior en donde había menor distancia de separación.

3.2.7. Caso 6: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente indoor a una distancia de 11 metros.

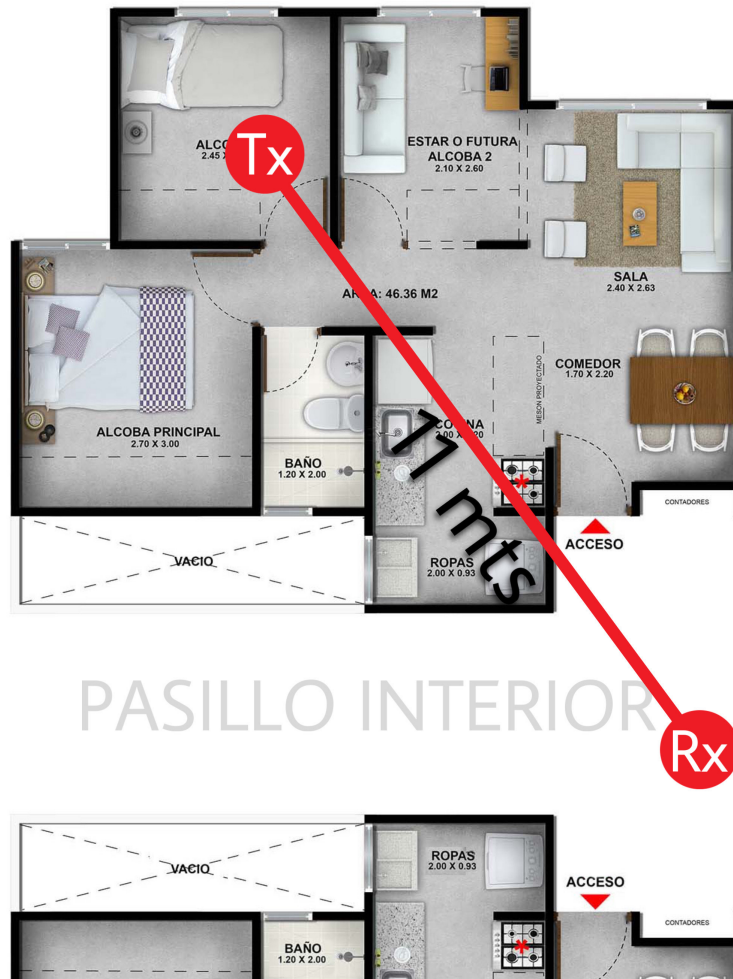


Figura. 3.17. Ubicación de Transmisor y Receptor a 11 mts. de distancia en ambiente indoor sin LOS.

En la figura [3.17](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 11 metros entre sí, sin línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

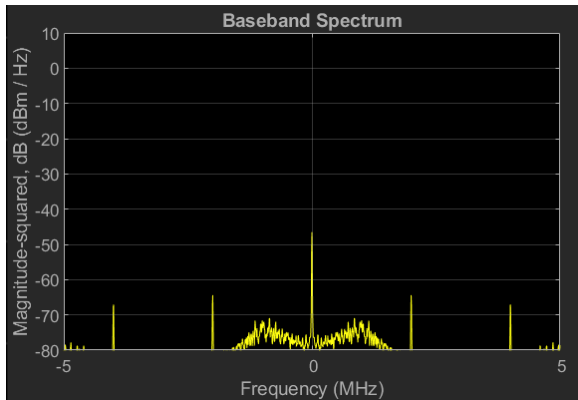


Figura. 3.18. Espectro de la señal recibida.

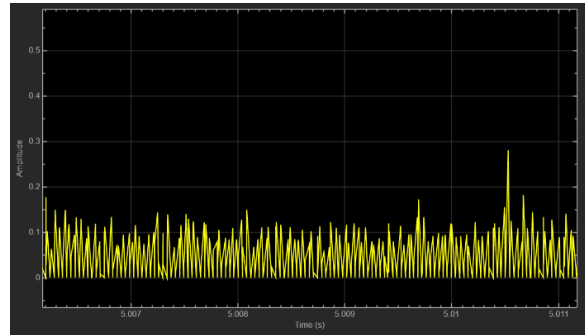


Figura. 3.19. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

Tanto desde el espectro de la señal, como de la gráfica en tiempo, se nota una señal muy atenuada como es de esperarse, con una potencia de recepción para el lóbulo principal que es de aproximadamente $-72 \frac{dBm}{Hz}$, es decir 22 dB de pérdidas, consistente con la diferencia que hay entre pérdidas para 6 metros y 11 según el modelo 1SM.

Por otro lado, de la gráfica temporal ni siquiera fue posible sacar la ampliación de una trama por lo que se pueden apreciar los últimos 5 ms capturados con la herramienta en donde se aprecia, prácticamente, puro ruido; esto lo podemos confirmar con el resultado de la BER el cual fue de $8,75558 \times 10^{-2}$; es decir aproximadamente 9 bits erróneos de cada 100 enviados. Cabe aclarar que cuando se hace referencia a la ampliación de la trama, lo que sucede es que las imágenes presentadas para cada caso de estudio corresponden a una de todas las tramas ADS-B enviadas y capturadas durante los últimos 5 ms de transmisión, pero en este caso ni siquiera fue posible lograr una ampliación de una de estas tramas, puesto que al hacerlo solo se veía ruido sin diferenciarse de la perspectiva general de los últimos 5 ms capturados.

3.2.8. Caso 7: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 10 metros.

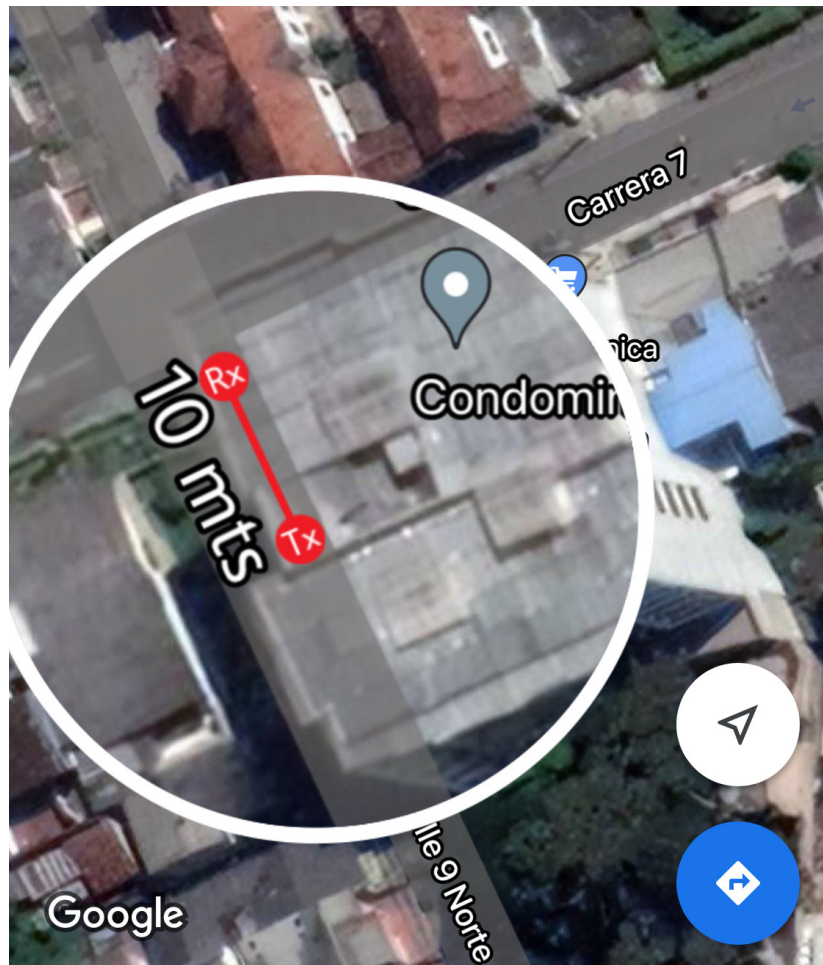


Figura. 3.20. Ubicación de Transmisor y Receptor a 10 mts. de distancia en ambiente outdoor con LOS.

En la figura [3.20](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 10 metros entre sí, con línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

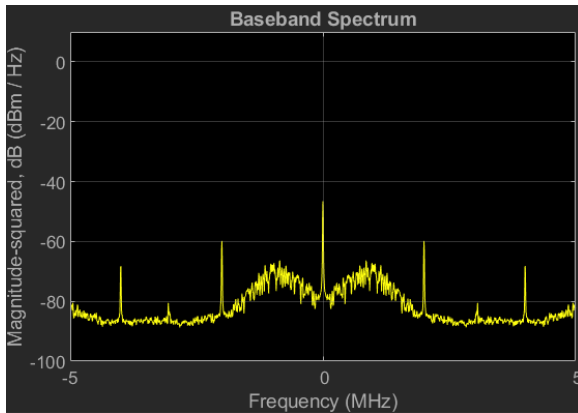


Figura. 3.21. Espectro de la señal recibida.

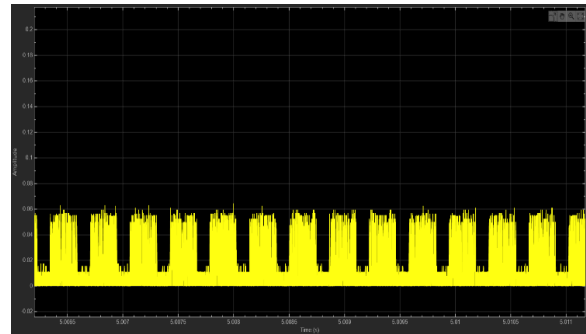


Figura. 3.22. Últimos 5 ms de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

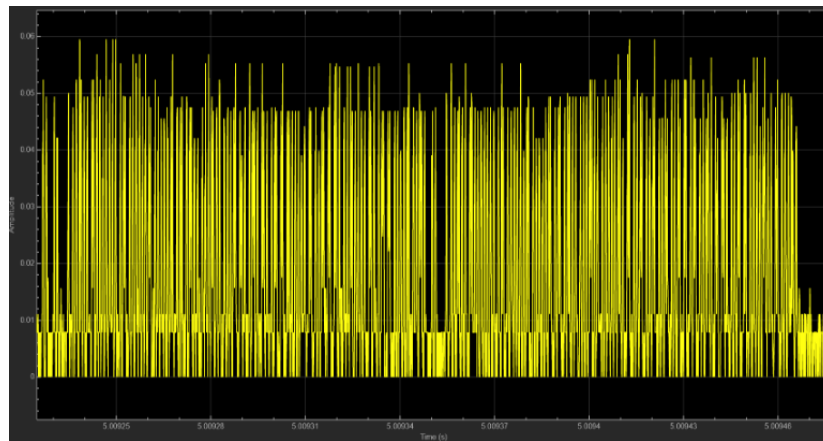


Figura. 3.23. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

La potencia recibida se encuentra disminuida frente a los casos de estudio en entornos Indoor con línea de vista, donde la menor potencia registrada fue de $-53 \frac{dBm}{Hz}$ y para este caso Outdoor con línea de vista fue de $-68 \frac{dBm}{Hz}$ aproximadamente, con una diferencia de 15 dB, obteniendo por consecuencia una tasa de error de bit aumentada, es decir, peor. Esta pérdida de potencia también es apreciable en la gráfica temporal de la señal en donde es más cercana al piso de ruido, lo que explica el aumento de la BER cuyo valor fue de $5,585113 \times 10^{-3}$. Sin embargo la pérdida de potencia en este caso es una pérdida de potencia esperada si se calcula la diferencia entre el modelo de pérdidas por propagación para entornos Indoor con respecto al modelo para entornos Outdoor.

3.2.9. Caso 8: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 20 metros.

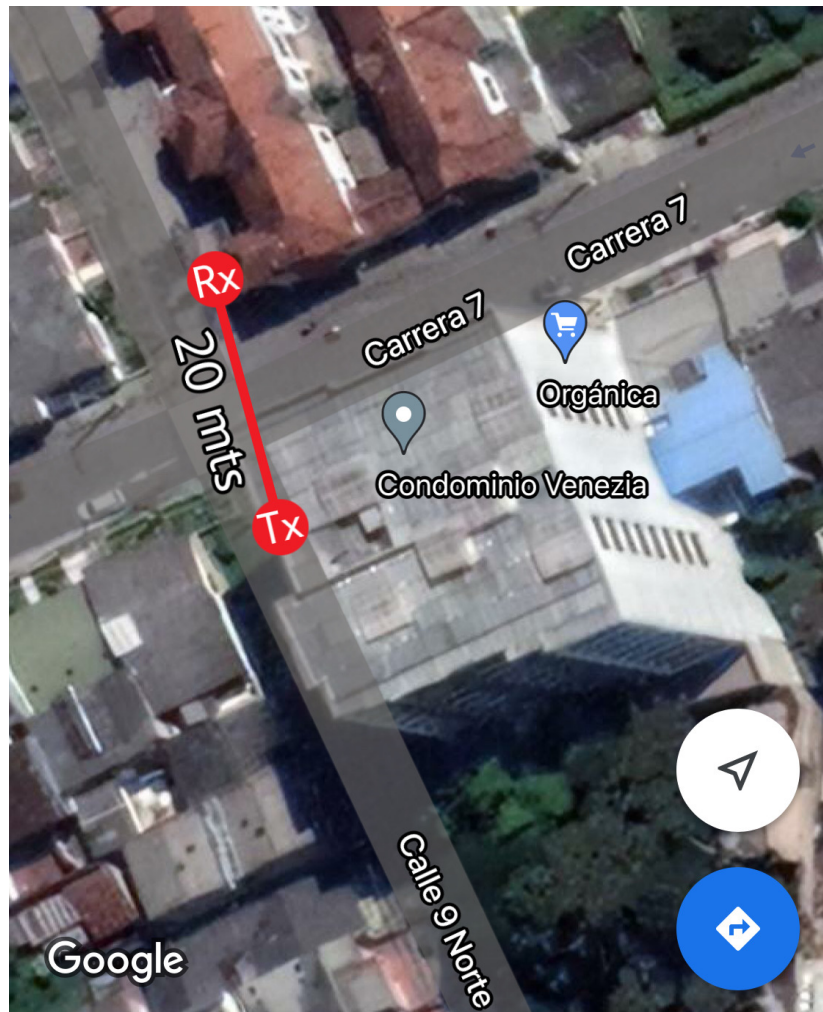


Figura. 3.24. Ubicación de Transmisor y Receptor a 20 mts. de distancia en ambiente outdoor con LOS.

En la figura [3.24](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 20 metros entre sí, con línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

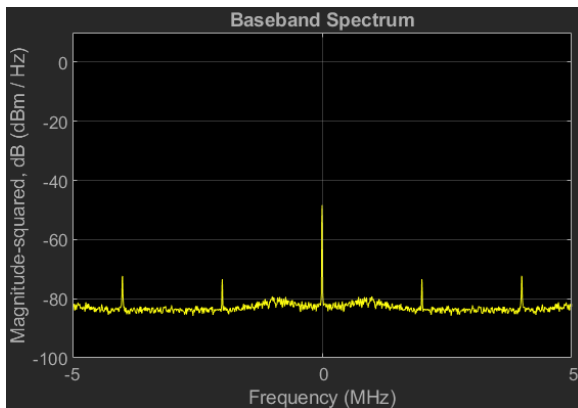


Figura. 3.25. Espectro de la señal recibida.

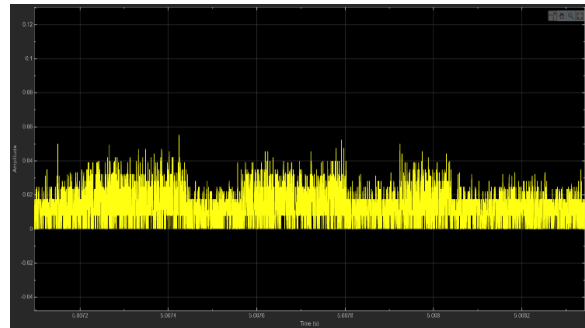


Figura. 3.26. Últimos 5 ms de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

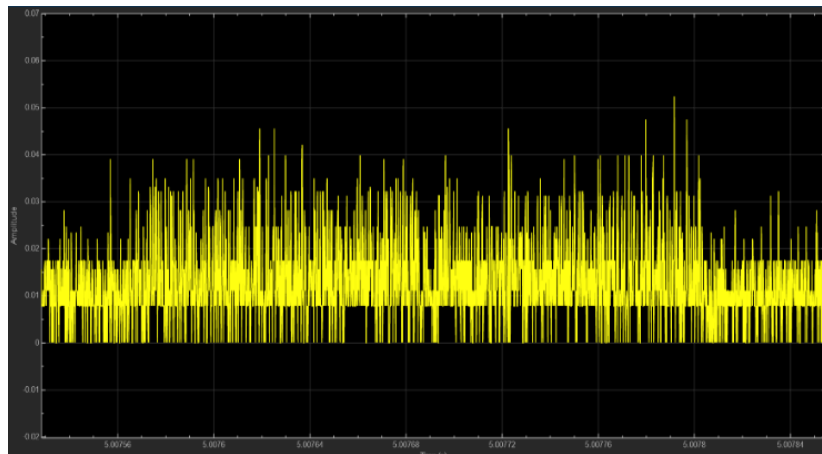


Figura. 3.27. Trama ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

Dado que la distancia de separación para estos casos Outdoor es mucho mayor frente a las utilizadas en el ambiente Indoor, así mismo se espera y es notoria la caída significativa en la potencia de recepción, lo cual es apreciable en la imagen temporal de la señal ADS-B en donde ni siquiera se logra apreciar con facilidad las tramas enviadas. El valor de la potencia de recepción para este caso es de $-80 \frac{dBm}{Hz}$ lo cual a su vez justifica una subida en el valor de la tasa de error de bit, resultando en este caso un valor de $5,668133 \times 10^{-2}$, es decir un desempeño menor frente a los demás casos de estudio. En este caso la diferencia de potencia con respecto al caso anterior fue de 12 dB, lo que supera el delta de pérdidas para 10 y 20 metros según el modelo de propagación para entornos Outdoor de corto alcance usado, según el cual este delta debería ser de 6.382 dB aproximadamente.

3.2.10. Caso 9: Evaluación del desempeño del enlace con línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 40 metros.

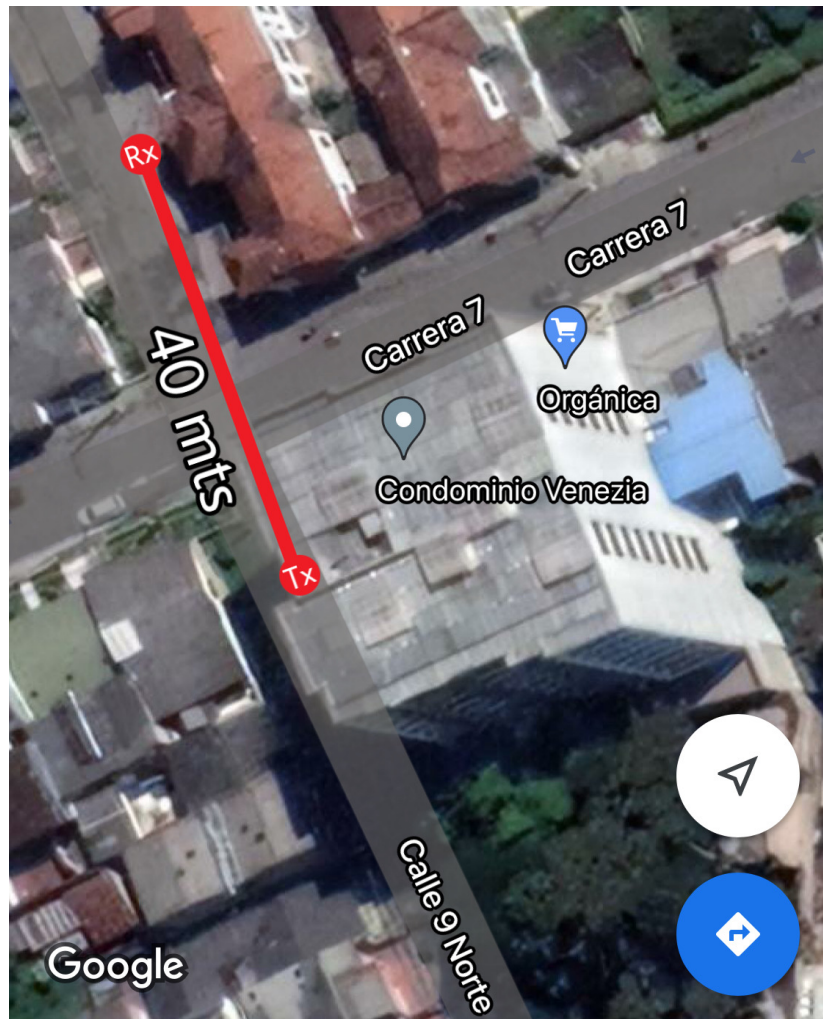


Figura. 3.28. Ubicación de Transmisor y Receptor a 40 mts. de distancia en ambiente outdoor con LOS.

En la figura [3.28](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 40 metros entre sí, con línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

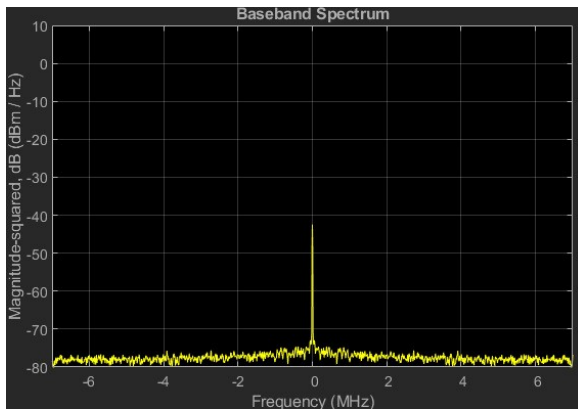


Figura. 3.29. Espectro de la señal recibida.

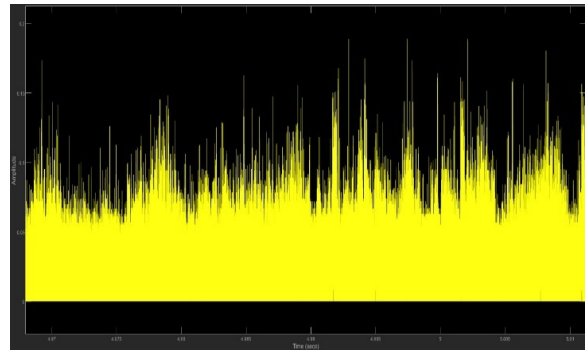


Figura. 3.30. Últimos 5 *ms* de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

En este caso al doblar la distancia ni siquiera se aprecia el espectro de la señal más allá del nivel DC como tampoco es posible diferenciar, dentro de la imagen temporal, la señal ADS-B del ruido. Esto nos permite experimentar que los dispositivos USRP utilizados no cuentan con grandes potencias de transmisión haciéndolos, quizás, inviables para transmitir señales a largas distancias. De esta manera, para este caso de estudio no es posible hallar la potencia de recepción. En cuanto a la tasa de error de bit, el valor que arrojó el sistema fue de $1,1339 \times 10^{-1}$ siendo esta BER justificada por la pérdida sustancial de potencia.

3.2.11. Caso 10: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 10 metros.

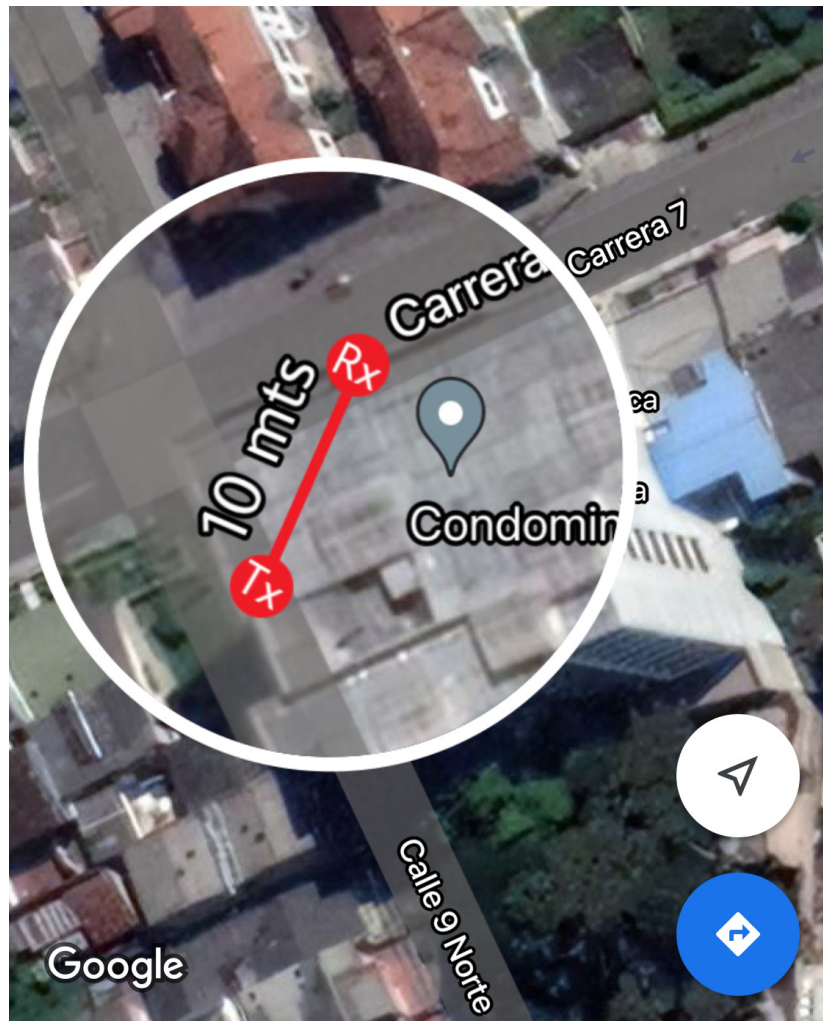


Figura. 3.31. Ubicación de Transmisor y Receptor a 10 mts. de distancia en ambiente outdoor sin LOS.

En la figura [3.31](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 10 metros entre sí, sin línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

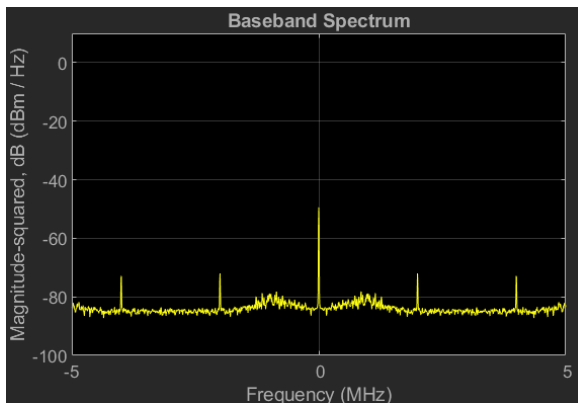


Figura. 3.32. Espectro de la señal recibida.

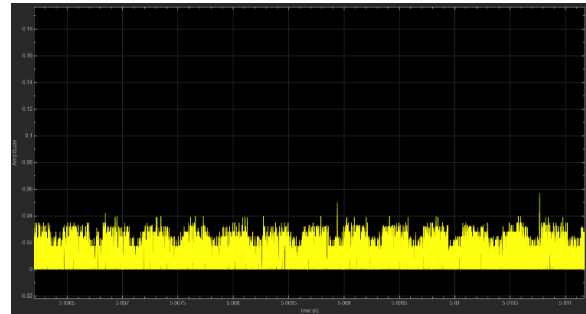


Figura. 3.33. Últimos 5 ms de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

Tanto en la gráfica espectral, como en la temporal, la señal apreciada es mínima tanto así que se puede observar que esta potencia de recepción es cercana a $-80 \frac{dBm}{Hz}$ y que cualquiera de las tramas ADS-B enviadas es difícil de distinguir del ruido a simple vista. La potencia se ve reducida de tal manera debido a que no existe una trayectoria directa entre transmisor y receptor y las posibles trayectorias indirectas son atenuadas en exceso por la absorción de los diferentes elementos u objetos presentes en el ambiente y por los cuales la señal se refleja o se refracta. Todo esto conlleva a la obtención de una BER demasiado alta cuyo valor promedio es de $1,3036 \times 10^{-1}$, es decir son aproximadamente 13 bits errados de cada 100 que se envían, un desempeño bastante deficiente.

3.2.12. Caso 11: Evaluación del desempeño del enlace sin línea de vista en ambiente outdoor a una distancia de 20 metros.

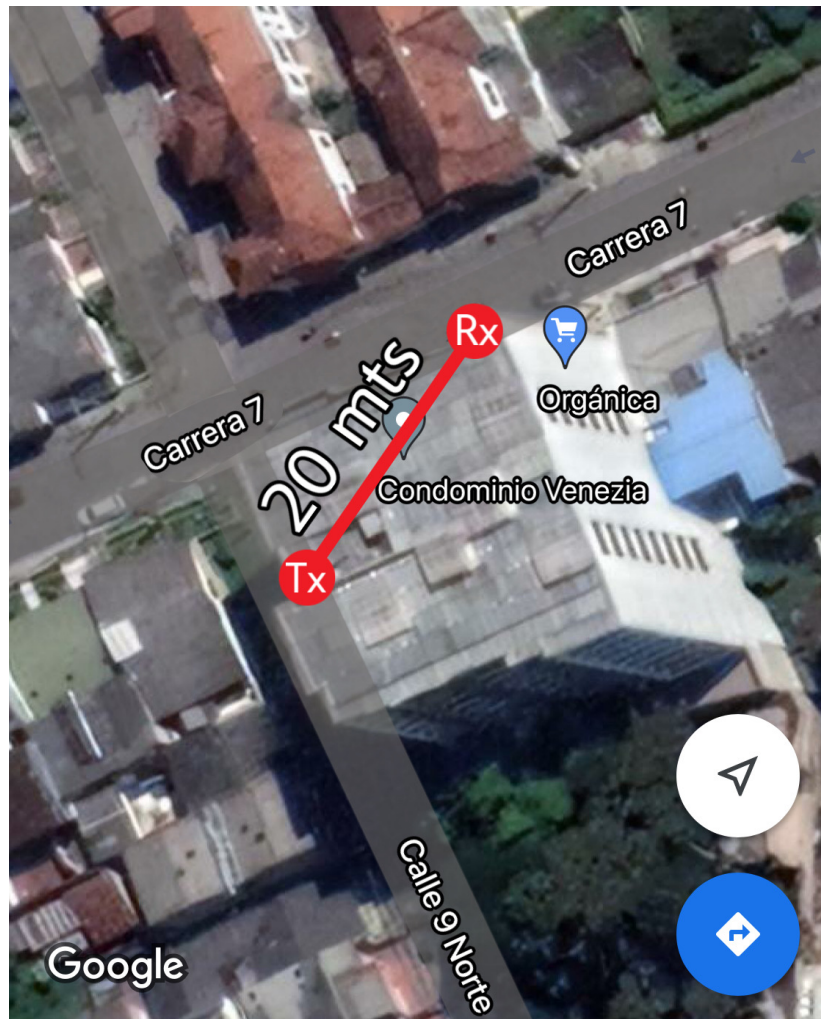


Figura. 3.34. Ubicación de Transmisor y Receptor a 20 mts. de distancia en ambiente outdoor sin LOS.

En la figura [3.34](#) se puede apreciar los dispositivos de transmisión y recepción con una distancia de 20 metros entre sí, sin línea de vista directa. A continuación, se puede apreciar el espectro de la señal recibida en banda base y una de las tramas ADS-B recibida.

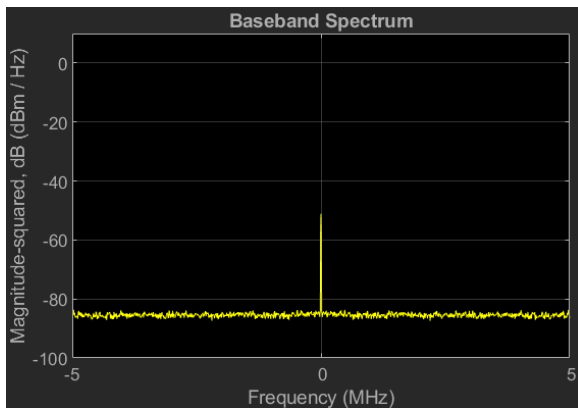


Figura. 3.35. Espectro de la señal recibida.

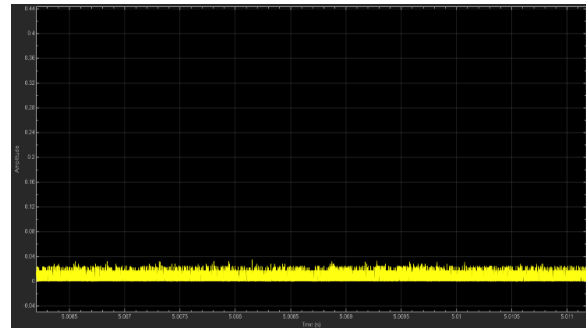


Figura. 3.36. Últimos 5 ms de señal ADS-B recibida en el dominio del tiempo.

En este caso no es posible apreciar la presencia de la señal tanto a nivel espectral como a nivel temporal por lo cual, no es posible hacer una medición ni una estimación de la potencia de la señal recibida ya que lo que se alcanza a apreciar es ruido. La tasa de error de bit promedio obtenida para este caso de estudio es de $4,8004 \times 10^{-1}$, es decir, aproximadamente 0.5 lo que significa que de cada 100 bits enviados, 50 son errados. Esto sucede dado que al trabajar con valores binarios se tiene 50% de probabilidades de que a pesar de que todo lo captado por el receptor sea ruido, éste sea interpretado como un bit de los que se tenían esperados.

Ya desde los casos de estudio anteriores, la BER seguía creciendo, lo cual, indica mayor cantidad de bits perdidos. Esto quiere decir que no es viable un sistema ADS-B simulando un reporte de avión falso desde una USRP, como es el caso del transmisor ADS-B implementado, debido principalmente a las potencias que manejan estos dispositivos, que no permitieron trabajar a grandes distancias. Por otro lado, sería interesante poder contar con antenas adecuadas (1090 MHz) para recibir información real de aviones en la zona con el receptor implementado, el cual, alcanza a percibir la señal ADS-B generada desde el otro dispositivo, a pesar de que viniese con una potencia mínima, por lo que este, sería capaz de captar dichas señales pues las potencias usadas por los equipos de transmisión en las aeronaves es mucho mayor. Por el momento con la limitación planteada, no es posible la ejecución de dicha actividad.

3.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTRICAS OBTENIDAS.

Caso de Estudio	Tipo de Transmisión	Distancia[mts]	BER	P_{Rx} [$\frac{dBm}{Hz}$]
Caso 1	Indoor-LOS	1	$6,7224 \times 10^{-4}$	-40
Caso 2	Indoor-LOS	4	$1,3468 \times 10^{-3}$	-45
Caso 3	Indoor-LOS	9	$5,041 \times 10^{-3}$	-53
Caso 4	Indoor-NLOS	6	$1,6232 \times 10^{-2}$	-60
Caso 5	Indoor-NLOS	9	$4,8920 \times 10^{-5}$	-58
Caso 6	Indoor-NLOS	11	$8,7556 \times 10^{-2}$	-72
Caso 7	Outdoor-LOS	10	$5,5851 \times 10^{-3}$	-68
Caso 8	Outdoor-LOS	20	$5,6681 \times 10^{-2}$	-80
Caso 9	Outdoor-LOS	40	$1,1340 \times 10^{-1}$	<-80
Caso 10	Outdoor-NLOS	10	$1,3040 \times 10^{-1}$	-80
Caso 11	Outdoor-NLOS	20	$4,8004 \times 10^{-1}$	$\ll -80$

Tabla. 3.4. Tabla comparativa de resultados, donde P_{Rx} : Potencia de Recepción.

De la tabla comparativa [3.4](#) se puede evidenciar que, en los casos con línea de vista, a medida que se aumenta la distancia, se obtiene una menor potencia de recepción como es esperado debido a las pérdidas por espacio libre; ahora dado que la modulación usada es BPPM, ésta representa la información como cambios de amplitud de ‘0’ a ‘1’ para representar un ‘0’ o de ‘1’ a ‘0’ para representar el ‘1’, todo esto dentro de un mismo periodo de símbolo, entonces, al verse disminuida la potencia de recepción, la amplitud con la que es representada el ‘1’ lógico es menor y por lo tanto más cercana a la amplitud del ‘0’ lógico que en este caso corresponde a 0 Voltios, generando una mayor probabilidad de error, es decir, que se aumente la BER, algo que es claramente evidenciable en estos casos con línea de vista.

Por otro lado, al contrastar la totalidad de los casos con línea de vista frente a los casos sin línea de vista, se evidencia un menor desempeño para los casos sin línea de vista, esto en base a los diferentes resultados obtenidos de la BER. En general es previsible que cuando hay un componente de visión directa entre transmisor y receptor se obtiene una mejor BER frente a cuando no lo hay. Sin embargo, en uno de los casos sin línea de vista se obtuvo un mejor desempeño atribuido inicialmente a que en este caso se presentó un efecto multitrayecto de carácter constructivo.

Además, comparando los casos de estudio 3, 5, 6 y 7, que son los que cuentan con distancias de separación cercanas, es evidenciable que en el entorno outdoor, se percibe una mayor caída en la potencia de recepción frente al entorno indoor, lo cual en principio se podría atribuir a que en el entorno outdoor la señal queda expuesta a una mayor cantidad de interferencia. Adicionalmente, al no contar con una potencia muy alta de

transmisión, la energía de la señal se dispersa en mayor medida, pues las componentes secundarias no alcanzan a reforzar la componente principal. Es posible, de igual forma, que al momento de llegar las componentes secundarias, éstas generen una interferencia destructiva.

Al final no fue posible realizar simulaciones para distancias mayores a 40 mts, esto debido que el nivel de potencia de salida entregado por el dispositivo es mayor o igual a 10 dBm y máximo 20 dBm, según las especificaciones de las tarjetas tanto B2XX y las NXXX. Mientras que la potencia real necesaria o requerida por las aeronaves, dependiendo de su tamaño, varía desde una mínima potencia de 75 W hasta 500 W; esto en términos de unidades en dBm corresponde desde 48.75 dBm, hasta aproximadamente 57 dBm [19].

Cabe mencionar que los dispositivos USRP dependen en gran medida del computador al que se encuentren conectados puesto que, al programar estos dispositivos desde cualquier plataforma o herramienta, el PC debe contar con la suficiente potencia de procesamiento y la conexión USB adecuada que permita una mayor capacidad de transmisión de datos a través del puerto del mismo. Esto se logró evidenciar al momento de trabajar con diferentes tipos de computadores, algunos con procesadores de última generación y puertos USB 3.0 y otros con procesadores de generaciones anteriores y puertos USB 2.0, puesto que cuando se trabajó con los más antiguos, se obtenían resultados de BER bastante deficientes y las gráficas de monitoreo como la del espectro de la señal y la de la señal temporal mostraban tramas ADS-B cortadas a la mitad y espectros con formas confusas o no definidas.

Capítulo 4

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. CONCLUSIONES

- Trabajar con dispositivos de Radio Definido por Software está más cercano a la realidad de las telecomunicaciones de hoy en día, lo cual, lo diferencia de realizar simulaciones únicamente desde el lado software. Entre estas diferencias se pueden destacar el hecho de contar con características físicas y específicas de los dispositivos hardware como lo son potencia de procesamiento, potencia de transmisión, figuras de ruido intrínsecas a los dispositivos, capacidades de transmisión de los puertos USB de comunicación con los PCs y temas de concurrencia y sincronización entre transmisor y receptor.
- La sincronización de la trama ADS-B es el componente principal a la hora de detectar cualquiera de las tramas enviadas, por lo que es necesario llevar a cabo este proceso de una manera concurrente, siendo muy acertado en los tiempos de procesamiento.
- A simple vista se puede considerar que la comunicación entre avión y avión o avión y estación terrestre cuenta con línea de vista, pero puede presentar efectos de multitrayecto o Doppler, por lo que la decisión de simular en entornos indoor y sin línea de vista se toma con el objetivo de simular efectos multitrayecto a pequeña escala, los cuales, en uno de los casos, parecía haber estado presente. Faltaría revisar el patrón de radiación de la antena y la trayectoria de los rayos para ser confirmado.
- Aunque los dispositivos SDR no alcancen niveles elevados de potencia de transmisión, es posible trabajar a escala y poner a prueba múltiples sistemas radio, permitiendo evaluar desde un enlace completo hasta cualquier etapa dentro del mismo, característica que lo hace una herramienta muy flexible que debería primar dentro del contexto académico.

4.2. RECOMENDACIONES

- Es recomendable para todo aquel que trabaje con dispositivos de Radio Definido por Software verificar las limitantes de los dispositivos, revisar sus características, rangos de frecuencia de las antenas con las que opera el dispositivo y el rango de potencias con las que pueden trabajar los dispositivos.

- Al trabajar con dispositivos SDR es esencial tener en cuenta las características de procesamiento y de capacidad de los puertos USB de los computadores que serán usados para programar estos dispositivos radio.
- La previa investigación sobre las diferentes herramientas software disponibles con las que se cuenta para realizar la programación de los dispositivos, es muy útil pues permite corroborar las ventajas y desventajas de cada una, lo que al final permite tomar una mejor decisión sobre con cual herramienta trabajar.
- Se recomienda buscar directamente la documentación oficial de los dispositivos SDR y la herramienta software para programarlos, dado que no existe gran cantidad de recursos que ayuden a manipular de mejor manera la herramienta software y el dispositivo de radio, lo cual evitará inconvenientes a largo plazo.
- Durante la fase de definición de objetivos que determinan el alcance del proyecto es recomendable acotarlos de mejor manera enfocándolos en puntos específicos sobre el tema a tratar para que el resultado de la investigación que se haga ya sea para mejorar un trabajo previo o generar uno nuevo sea sustancial.

4.3. TRABAJOS FUTUROS

Con el desarrollo del presente trabajo de grado, se identificaron nuevas propuestas de investigación, tales como:

- La creación de una Interfaz de visualización interactiva que permite ver la ubicación de los aviones a través de un mapa en tiempo real.
- Desarrollar este trabajo utilizando antenas idóneas para realizar la detección o recepción de señales ADS-B enviadas por aeronaves reales.
- Buscar diferentes técnicas o algoritmos de sincronización para señales ADS-B que permitan optimizar el proceso creado dentro de este trabajo.
- Investigar y analizar más a fondo sobre los procesos de transmisión y recepción de este tipo de señales con el fin de optimizar el proceso creado dentro de este trabajo.
- Realizar una Interfaz amigable e interactiva de configuración de parámetros tanto para el proceso de transmisión como el proceso de recepción que permita al usuario evaluar el desempeño del radio-enlace de acuerdo a los diferentes parámetros variables.

Bibliografía

- [1] O. d. A. C. I. (OACI), *Guía de la Vigilancia Global*.
- [2] D. I. Pancorbo Gutierrez, “Sistema ADS-B,” p. 25, 2017.
- [3] J. F. Alonso Alarcon, *Análisis de algoritmos para posicionamiento de aeronaves mediante respuestas SSR utilizando recepción omnidireccional*. PhD thesis, Universidad olitecnica de Madrid, 2015.
- [4] B. S. Ali, W. Ochieng, A. Majumdar, W. Schuster, and T. Kian Chiew, “ADS-B System Failure Modes and Models,” *Journal of Navigation*, vol. 67, no. 6, pp. 995–1017, 2014.
- [5] I. Alexander, G. Quintero, I. Graduate, S. Member, C. A. C. Betancour, and L. D. S. Gil, “SDR : La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico,” pp. 60–67, 2006.
- [6] E. Research), “USRP B200 - B210 DATA SHEET,” 2005.
- [7] J. Zapata, “Modelos de propagación interiores.” Available on: https://es.slideshare.net/blog_fralbe/modelos-de-propagacin-interiores.
- [8] *Recommendation ITU-R P.1411-9: Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*. 06 2017.
- [9] I. N. d. A. C. (INAC), “Gestión del Tráfico Aéreo,” 2014.
- [10] D. U. C. d. C. Esteban, A. U. C. d. C. Fernández, J. U. C. d. C. Luis, and R. U. C. d. C. Lozano, *Monitor de Tráfico Aéreo basado en Radio Definido por Software (SDR)*. PhD thesis, Universidad Católica de Colombia, 2018.
- [11] G. I. B. U. N. d. C. Chiesa Pastor, *Desarrollo de un Sistema de Recepción para Señales ADS-B*. PhD thesis, Universidad Nacional de Cuyo, 2017.
- [12] R. A. U. S. B. Vega Navarro and J. U. S. B. Jimenez Jaimes, *Análisis de Cobertura y Desempeño de las estaciones de Vigilancia Aeronáutica ADS-B, como soporte a la Implementación de dicho Sistema en Colombia*. PhD thesis, San Buenaventura, 2018.
- [13] A. S. Lakehal, “La Radio Definida por Software: Diseño de un receptor de banda aeronáutica VHF,” pp. 1–10.
- [14] The Mathworks, Inc, “Descripción del producto matlab.” Available on: https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html. Accessed: 2021-09-03.

- [15] G. R. project, “About gnu radio.” Available on: <https://www.gnuradio.org/about/>. Accessed: 2021-09-03.
- [16] B. E. Dunne, “The what, how and why of complex sampling for sdr transceivers,” p. 9, 2019.
- [17] I. notes) Poole, “What is Bit Error Rate - BER Tutorial.”
- [18] S. Ajala, E. Adetiba, M. B. Akanle, O. O. Obiyemi, S. Thakur, and J. Abolarinwa, “Experimentations on the transmit power of a universal software radio peripheral using GNU radio framework and a handheld RF explorer,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 655, p. 012006, feb 2021.
- [19] R. Francis, R. Vincent, J. M. Noël, P. Tremblay, D. Desjardins, A. Cushley, and M. Wallace, “The flying laboratory for the observation of ADS-B signals,” *International Journal of Navigation and Observation*, vol. 2011, 2011.