



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Transmisor de señal FM y RDS sobre la plataforma
ADALM2000

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e
Imagen

AUTOR/A: Muñoz Núñez, Francisco España

Tutor/a: Almenar Terré, Vicenç

Cotutor/a: Salvador Llàcer, Pau

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Transmisor de señal FM y RDS sobre plataforma ADALM2000”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Francisco Muñoz Nuñez

Tutor/a:

Vicenç Almenar Terré

Pau Salvador Llàcer

GANDIA, 2024

*“Todo tiene su tiempo, tiempo de esparcir piedras, tiempo de juntar piedras”
Eclesiastés 3:1-13*

A mi compañera Lolita, gracias por estar siempre...

Abstract

The following work aims to implement a commercial FM radio station, which includes data transmission using the Radio Data System (RDS). To achieve this, Digital Signal Processing and Software Defined Radio techniques have been used for content adaptation (audio and data) and subsequent transmission on the assigned frequency using the ADALM2000 platform, with Matlab as the software-hardware interface. As the goal is to create a real radio station that can be captured by any radio receiver, the instructions of the ITU-R BS.450-3 recommendation for multiplex formation and the EN50067 standard for RDS data generation have been followed. In addition to the transmitter, a receiver has been developed as a validation and testing tool. Although not the primary objective of this project, it is included as an annex in this report. ADALM2000 is a platform from Analog Devices; while it is not initially intended for real-time transmissions, it has all the necessary elements for this purpose, such as the DAC converter, input and output buffers, etc., along with a library that facilitates hardware-software connection through Matlab.

Keywords DAC, Signal Processing, Multirate, Transmitter, Receiver, Software Define Radio.

Resumen

El siguiente trabajo tiene como objetivo la implementación de una emisora de radio comercial utilizando modulación FM, en la cual se han incluido datos digitales mediante el sistema Radio Data System (RDS).

Para lograrlo, se han utilizado técnicas de Tratamiento Digital de la Señal y *Software Defined Radio*, para la adaptación del contenido (audio y datos) y la posterior transmisión a la frecuencia asignada mediante la plataforma ADALM2000, utilizando Matlab como interfaz *software-hardware*.

Dado que se pretende que sea una emisora real, capturable por cualquier receptor de radio, se han seguido las instrucciones de la recomendación UIT-R BS.450-3 para la formación del múltiplex y el estándar EN50067 para la generación de datos mediante RDS.

Como complemento al transmisor, se ha desarrollado un receptor como elemento de validación y pruebas, aunque, no es el objetivo principal de este proyecto, se incluye como anexo a esta memoria.

ADALM2000 es una plataforma de Analog Devices, que inicialmente no está destinada a realizar transmisiones en tiempo real, dispone de todos los elementos necesarios para ello como: el conversor DAC, buffers de entrada y salida, mezcladores, etc. Además, dispone de una biblioteca que facilita la conexión *hardware-software* mediante Matlab.

Palabras clave DAC, Tratamiento digital de la señal, Procesado tasa múltiple, Transmisor, Receptor, *Software Defined Radio*.

Índice

1	Introducción	1
2	Objetivos	2
3	Contexto en el desarrollo de una emisora de radio comercial	3
3.1	Transmisiones en FM	3
3.2	Múltiplex FM	3
3.3	Radio Data System	4
3.3.1	Capa física	4
3.3.2	Capa de enlace de datos	6
3.3.3	Capa de presentación	7
3.4	Software Defined Radio (SDR)	9
3.5	Plataforma Adalm2000	11
4	Diseño de un sistema de transmisión	13
4.1	Diseño Transmisor	13
4.1.1	Procesado de audio	13
4.1.2	Procesado de datos	15
4.1.3	Traslación a la frecuencia de transmisión	17
4.1.4	Esquema de transmisión completo	18
4.2	Diseño Receptor	20
4.2.1	Recepción señal FM	20
4.2.2	Recuperación de L+R	21
4.2.3	Recuperación de tono piloto 19 kHz	22
4.2.4	Recuperación de L-R	23
4.2.5	Recepción de datos	25
5	Evaluación del sistema de transmisión y recepción	27
5.1	Evaluación del trasmisor FM	27
5.2	Evaluación del receptor FM	28
5.3	Evaluación del dispositivo ADALM2000	29
5.4	Evaluación del sistema en una radio comercial FM	30
6	Conclusiones	31
7	Referencias Bibliográficas	32

Índice de figuras

1	Espectro múltiplex FM Fuente: www.prismsound.com	4
2	Esquema analógico de generación RDS Fuente: Estandar EN560067	6
3	Trama RDS Fuente: Estandar EN560067	7
4	Palabras <i>Offset</i> Fuente: Estandar EN560067	7
5	Trama de ejemplo grupo 2A Fuente: Estandar EN560067 .	8
6	Esquema utilizando SDR Fuente: Transparencias asignatura Tratamiento de la señal en comunicaciones	9
7	Plataforma ADALM2000 Fuente: https://www.analog.com	11
8	Interfaz de conexión BNC Fuente: https://www.analog.com	12
9	Esquema de formación del múltiplex Fuente: Libro SDR página 364	13
10	Respuesta en frecuencia de filtro de reconstrucción de interpolación por 19 Fuente: elaboración propia.	14
11	Esquema procesado de audio Fuente: elaboración propia. .	15
12	Esquema procesado de datos Fuente: elaboración propia .	15
13	Respuesta en frecuencia filtro de reconstrucción de interpolación por 16 Fuente: elaboración propia	17
14	Esquema de modulación a frecuencia de transmisión Fuente: elaboración propia	17
15	Respuesta en frecuencia filtro de reconstrucción de cambio fs por factor $Q = 625/76$ Fuente: elaboración propia	18
16	Esquema completo del transmisor FM Fuente: elaboración propia	19
17	Esquema del receptor implementado Fuente: elaboración propia	20
18	FM mediante línea de retardo temporal Fuente: Libro SDR página 355	21
19	Esquema de recuperación señal L+R Fuente: elaboración propia	21
20	Respuesta en frecuencia filtro antialiasing Fuente: elaboración propia	22
21	Respuesta en frecuencia de un filtro resonador con resonancia a 19 kHz Fuente: elaboración propia	23
22	Esquema de recuperación señal L-R Fuente: elaboración propia	23

23	Respuesta en frecuencia filtro antialiasing Fuente: elaboración propia	24
24	Recuperación señal RDS Fuente: elaboración propia	25
25	Respuesta en frecuencia filtro antialiasing para el diezmado por un factor 16 Fuente: elaboración propia	26
26	Espectro de la señal MPX generada Fuente: elaboración propia	27
27	Espectro señal modulada a 3 MHz Fuente: elaboración propia	28
28	Espectro MPX recibido Fuente: elaboración propia	28
29	Señal FM recibida Fuente: elaboración propia	29
30	Señal transmitida por ADALM2000 Fuente: elaboración propia	30
31	Trama recibida en receptor FM comercial Fuente: elaboración propia	30

1 Introducción

Este proyecto se centra en el desarrollo de una estación de radio FM comercial, accesible a través de cualquier receptor estándar diseñado para este propósito. Adicionalmente, se incorpora la transmisión de datos digitales por medio del sistema Radio Data System (RDS)

La tecnología de Frecuencia Modulada (FM) surgió como una evolución de las transmisiones en Amplitud Modulada (AM), ofreciendo soluciones a problemas de interferencia y mejorando significativamente la calidad del contenido transmitido. A pesar de que han pasado 80 años desde su implementación inicial, la FM continúa siendo relevante y resistiéndose a ser reemplazada, incluso cuando la radio digital DAB aún enfrenta desafíos para su adopción universal.

Aunque en Europa existe un plan para desmantelar la radio FM, en muchas partes del mundo, esta tecnología mantiene su presencia y relevancia. Esto demuestra que, lejos de ser obsoleta, la radio FM está en constante evolución, buscando siempre innovaciones y mejoras.

El proyecto propone una solución basada en radio definida por *software* (*Software Defined Radio, SDR*), donde el diseño puede ser ajustado y reconfigurado a través de *software*. Se utiliza la plataforma ADALM2000 y el *software* Matlab para la interacción entre el *software* y el *hardware*.

Además, se ha desarrollado un receptor como parte del proceso de validación y pruebas, empleando el dispositivo RTL R8020T. Este dispositivo es capaz de recibir señales en las bandas de Muy Alta Frecuencia (VHF) y Ultra Alta Frecuencia (UHF).

Para realizar transmisiones efectivas, se han implementado las capas superiores del sistema RDS, que facilitan la formación de tramas de datos, detalladas en los anexos de este proyecto.

Las soluciones desarrolladas serán utilizadas en el curso Tratamiento de la Señal en Comunicaciones, dentro del Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación, Sonido e Imagen. Este trabajo busca servir como referencia práctica para que los estudiantes puedan implementar sus propios transmisores de FM con capacidades RDS.

2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es lograr una transmisión en tiempo de real de audio y datos que pueda ser captada por cualquier receptor comercial.

Para alcanzar este objetivo, se han establecido y desarrollado una serie de hitos clave:

- Estudiar el sistema de radiodifusión FM, inspeccionando los estándares UIT-R BS.450-3 y EN50067 referente al sistema RDS.
- Inspección minuciosa de la plataforma ADALM2000, implementando ejemplos disponibles.
- Diseñar y validar un sistema que permita la formación del múltiplex en banda base.
- Diseñar y validar un receptor que permita la evaluación por partes del transmisor.
- Desarrollar las capas superiores del sistema RDS que permiten la formación de tramas.
- Desarrollar una etapa que permita la subida en frecuencia del múltiplex a una frecuencia de transmisión.

Quedan excluidos de este proyecto:

- Cálculo de coberturas y normativa con respecto al uso del espacio radioeléctrico.
- Estudio de propagación, cálculo del nivel de ruido u otras interferencias.

3 Contexto en el desarrollo de una emisora de radio comercial

3.1 Transmisiones en FM

La modulación de frecuencia (FM) es un método de codificación de información en el cual la señal que contiene el mensaje varía la frecuencia de la onda portadora, esta variación denominada “desviación en frecuencia”, tiene un límite máximo de 75 kHz.

La formación de la señal FM se describe mediante una ecuación que permite la generación de la señal (ver ecuación 1).

$$s(t) = A \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right) \quad (1)$$

- $s(t)$ es la señal FM.
- A es la amplitud de la onda portadora.
- f_c es la frecuencia de la onda portadora.
- k_f es la sensibilidad de frecuencia de la modulación.
- $m(t)$ es la señal de mensaje (la señal que se modula).
- t representa el tiempo en el dominio continuo.

El argumento de la Ecuación 1 contiene dos partes, una que corresponde con la frecuencia central que es fija y la otra que es la que provoca una desviación con respecto a la frecuencia central, permitiendo codificar el mensaje.

3.2 Múltiplex FM

El múltiplex tiene un ancho de banda total de 100 kHz (ver figura 1) y esta compuesto por diferentes señales centradas a diferente frecuencia en la cual se aloja el contenido.

Las señales que conforman el múltiplex son:

- Señal suma de los canales derecho e izquierdo (L+R), alojada entre 0 y 15 kHz que corresponde con una emisión monofónica.

- Señal piloto a 19 kHz, es utilizada por el receptor para realizar detección coherente.
- Señal diferencia, entre el canal derecho e izquierdo del audio (señal L-R), centrada en 38 kHz, servirá al receptor para separar los canales L y R para lograr un sonido estéreo.
- Señal de datos (RDS) centrada en 57 kHz.

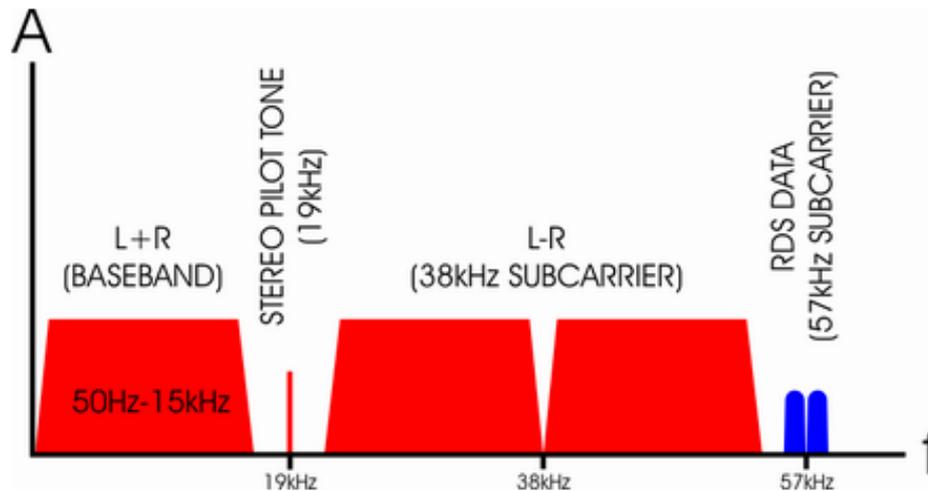


Figura 1: Espectro múltiplex FM
Fuente: www.prismsound.com

3.3 Radio Data System

El sistema Radio Data System (RDS), es un sistema que permite la transmisión de datos digitales integrados en una transmisión de audio analógico.

RDS facilita la transmisión de datos útiles para el usuario como: anuncios de tráfico, alertas de emergencia incluyendo búsqueda de personas e información general relacionada con el contenido emitido, como puede ser: el nombre de la emisora, detalles de la programación actual o información de carácter general.

3.3.1 Capa física

El estandar EN 560067 da una descripción de como se debe proceder en la generación de símbolos RDS, (ver figura 2). Esta descripción incluye puntos de interés en los cuales la señal sufre algún tipo de transformación.

Las principales características en esta etapa de conformación de señal son:

- Entrada de datos a una frecuencia de muestreo de 1187,5 Hz (ver figura 2 punto 1).
- Bits codificados de manera diferencial (ver figura 2 punto 2), este proceso se realiza una operación XOR bit a bit, del bit actual con el anterior, la salida corresponde con el resultado de esta operación.
- Los bits son codificados con una amplitud de 1 para el 1 y de -1 para el cero, (ver figura 2 punto 3) corresponde con una codificación NRZ polar.
- En la generación de pulsos bifásicos (ver figura 2 punto 4) cada pulso conlleva una transición de señal, cuando el bloque recibe un “0” que corresponde a una amplitud de -1 esta amplitud genera una transición de -1 a 1, por el contrario, si el sistema recibe un “1” lo que corresponde a una amplitud de 1, a la salida existirá una transición de 1 a -1. De este modo, cada bit se representa mediante una transición de señal, asegurando una clara distinción entre los estados cero y uno.
- Los símbolos RDS son obtenidos a la salida del filtro de raíz de coseno alzado con un factor de *roll - off* igual a 1. Dos consecuencias directas de esto es obtener una menor interferencia entre símbolos con un ancho de banda mayor (ver figura 2 punto 5).
- Finalmente los datos son procesados para ser modulados a 57 kHz, para ser integrados en el múltiplex.

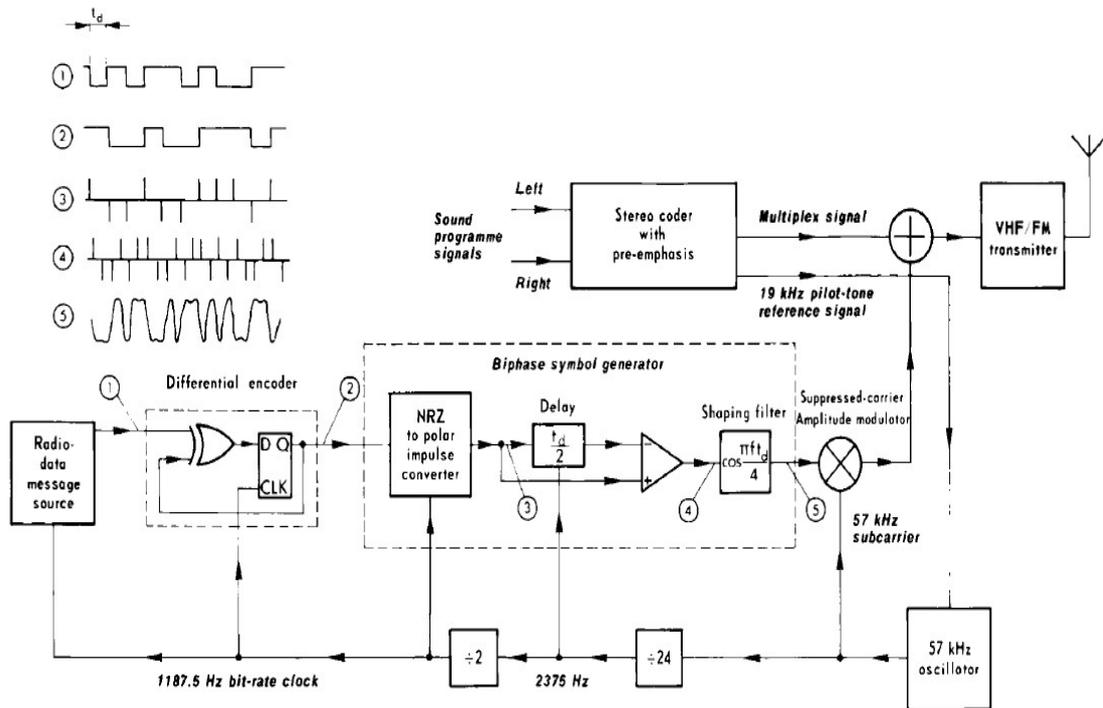


Figura 2: Esquema analógico de generación RDS
Fuente: Estandar EN560067

3.3.2 Capa de enlace de datos

En esta etapa se define el protocolo que deben seguir los Bits para que el receptor pueda recuperar la información.

La trama RDS está compuesta por bloques de 26 bits cada uno, de los cuales 16 bits corresponden a datos y los 10 bits restantes corresponden con la palabra *offset*, que es la encargada de sincronizar la trama (ver figura 3), por ejemplo supongamos que el receptor que a priori conoce las palabras *offset* detecta una de ellas, entonces inmediatamente sabe que 26 bits antes se encuentran los datos.

Las palabras *offset* que deben ser transmitidas dependen del tipo de bloque que se desea transmitir (ver figura 4).

La parte de la trama que contiene los datos es procesada por un código de redundancia cíclica mediante el siguiente polinomio:

$$g(x) = x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^3 + 1$$

Finalmente los bloques forman grupos de 4 que corresponden con una trama RDS (ver figura 3).

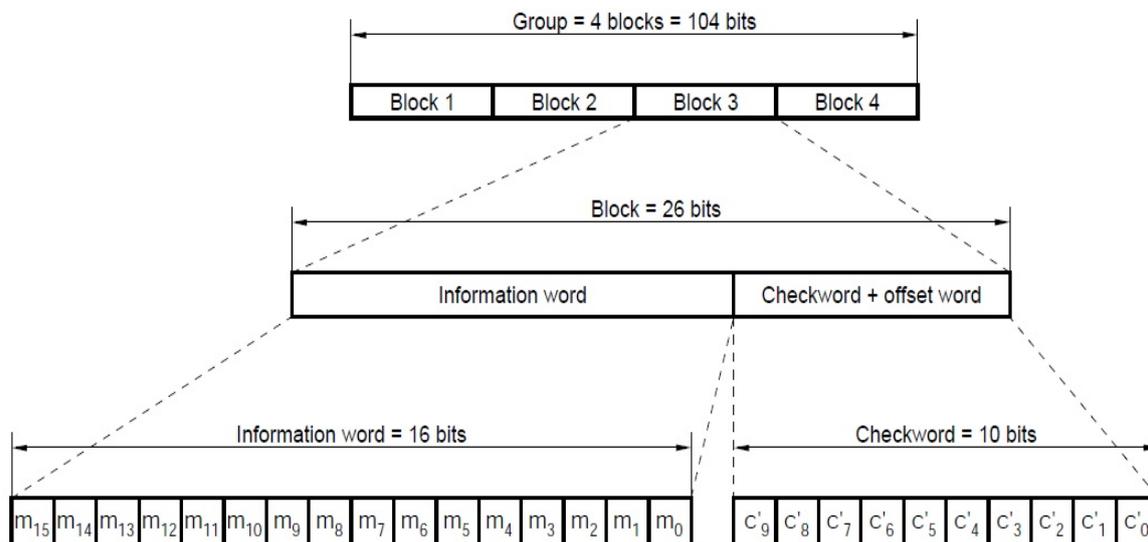


Figura 3: Trama RDS
Fuente: Estandar EN560067

Offset word	Binary value									
	d_9	d_8	d_7	d_6	d_5	d_4	d_3	d_2	d_1	d_0
A	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
B	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
C	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0
C	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
D	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4: Palabras *Offset*
Fuente: Estandar EN560067

3.3.3 Capa de presentación

Como se indicó anteriormente los datos conforman bloques y los bloques grupos, existen 16 tipos de grupos que son utilizados dependiendo del tipo

de información, cada grupo además contiene una versión A y B disponible, (ver estándar EN50067 tabla 3).

El estándar EN50067 da una descripción detallada de la formación de grupos. En este proyecto se desarrollará una trama del tipo “2A” que corresponde con la información del radio texto (ver figura 5).

El bloque que contiene información acerca de la emisora, denominado “PI code” debe ser siempre transmitido, junto con ellos los bits que identifican el grupo y la versión, el tipo de programa “PTY” y si contiene anuncios de trafico “TP.”

Un detalle importante que podemos destacar del grupo generado (grupo 2A), se encuentra en los bits c_0 a c_3 , que corresponden con la posición del texto enviado, es decir el receptor cuando recibe una letra debe ubicarla en una posición específica para conformar una palabra, esta posición la obtiene de este conjunto de 4 bits (ver figura 5).

Los caracteres transmitidos son alojados en los bloques con palabras *offset* C y D, y están codificados con 8 bits según la tabla ASCII.

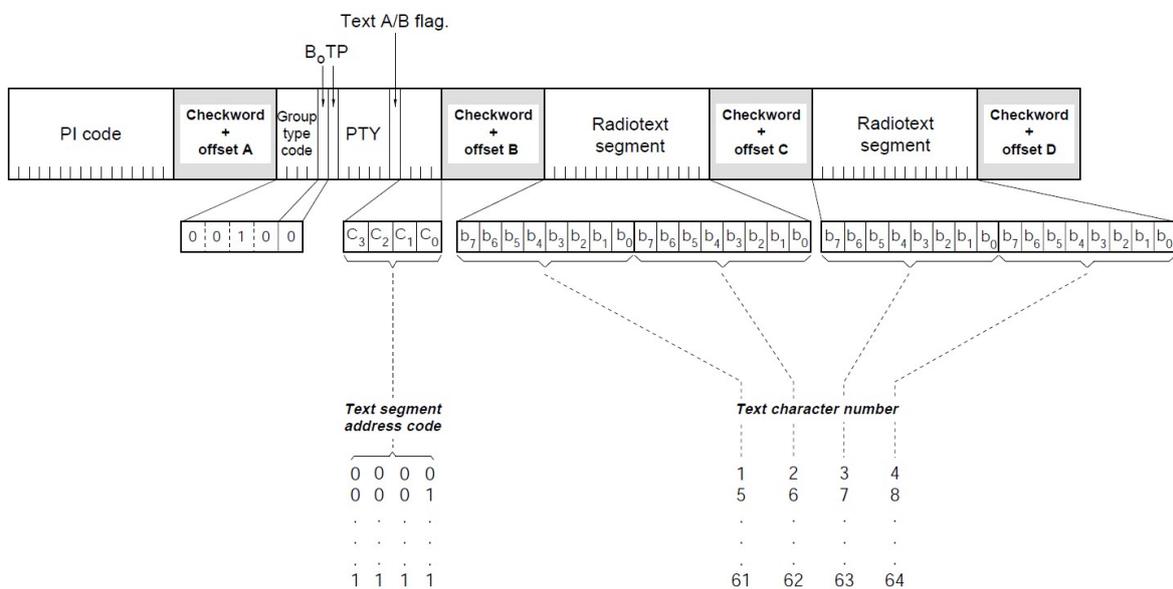


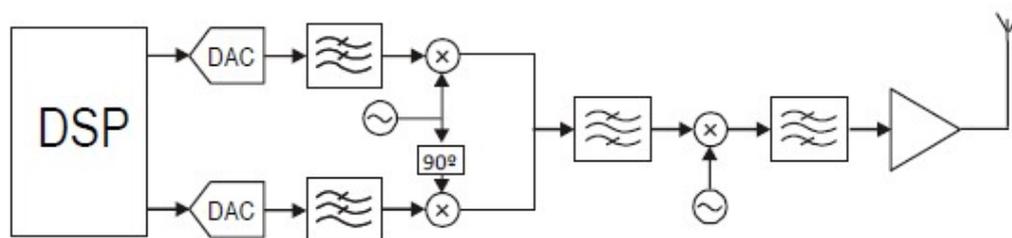
Figura 5: Trama de ejemplo grupo 2A
Fuente: Estandar EN560067

3.4 Software Defined Radio (SDR)

Tradicionalmente un sistema de comunicaciones estaba compuesto por una serie de componentes analógicos, con el aumento de la tecnología gran parte de estos componentes fueron sustituidos por chips que eran capaces de realizar las mismas funciones que su equivalente analógico (ver figura 6).

Los Procesadores Digitales de Señal (DSP) han supuesto una gran revolución para las comunicaciones, ya que tienen la principal ventaja de ser reconfigurables mediante *software*, esto implica que ante un cambio en el diseño no se debe modificar físicamente el *hardware*.

- **Transmisor:**



- **Receptor:**

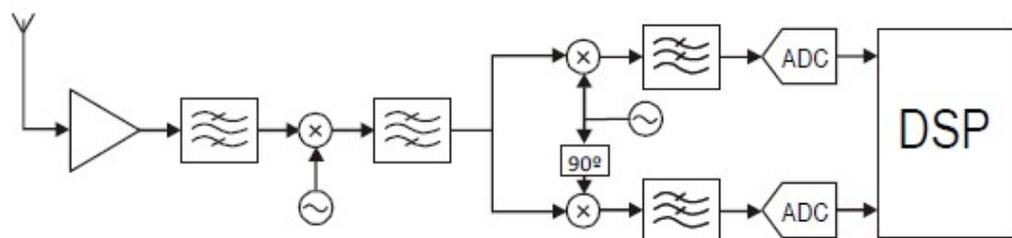


Figura 6: Esquema utilizando SDR

Fuente: Transparencias asignatura Tratamiento de la señal en comunicaciones

Un dispositivo SDR dispone al menos de los siguientes elementos:

- Convertidores analógico-digital y digital-analógico (ADC y DAC). Estos componentes son esenciales en cualquier sistema SDR. El ADC convierte las señales analógicas recibidas en datos digitales que pueden ser procesados por el *software*. El DAC realiza la función inversa para la transmisión.
- Procesador de señales digitales (DSP) es el corazón de un SDR. Realiza todas las funciones de procesamiento de señales: filtrado, mo-

dulación, demodulación, codificación, decodificación y supresión de interferencias.

- El *software* en un SDR puede ser modificado para cambiar la funcionalidad del sistema, permitiendo a los usuarios personalizar y actualizar sus dispositivos para diferentes aplicaciones y estándares de comunicación.

Ventajas del SDR:

- Adaptabilidad, los SDR pueden cambiar fácilmente entre diferentes modos de operación y estándares de comunicación, lo que los hace ideales para entornos de comunicación en rápida evolución.
- Costo y tamaño reducidos. Al reducir la cantidad de *hardware* específico necesario, los SDR pueden ser más pequeños y económicos que los sistemas de radio tradicionales.
- Actualizaciones de *software*. Las mejoras en las capacidades y el rendimiento pueden implementarse a través de actualizaciones de *software*, eliminando la necesidad de reemplazar o modificar el hardware.

Aplicaciones del SDR:

- Comunicaciones móviles y telecomunicaciones. Los SDR son ideales para infraestructuras de telecomunicaciones, ya que pueden adaptarse a diferentes estándares de comunicación y bandas de frecuencia.
- Aplicaciones militares y de seguridad. El SDR se utiliza en aplicaciones militares y de seguridad debido a su capacidad para manejar una amplia gama de frecuencias y tipos de señales, así como su adaptabilidad en el campo.
- La comunidad de radioaficionados ha adoptado ampliamente el SDR por su flexibilidad y la capacidad de experimentar con diferentes modos de comunicación.

Normalmente, los dispositivos SDR disponen de un *software*, en forma de librería que es integrada en el sistema mediante ordenes específicas, para controlar o reconfigurar el *hardware*.

3.5 Plataforma Adalm2000

ADALM2000 es un módulo de aprendizaje comercializado por la empresa Analog Devices (ver figura 7), está diseñado para introducir a los estudiantes de ingeniería eléctrica en los fundamentos de las señales y sistemas.

La plataforma posee una librería para facilita el desarrollo en diferentes entornos de programación como pueden ser: MATLAB, C++ o Python además cuenta con su propio *software* denominado *Scopy*, que permite simular funciones de osciloscopio, multímetro, generador de señal etc.

La principales características de la plataforma que son importantes para este proyecto son:

- DAC configurable en divisores de 10 de la frecuencia de muestreo 75 MHz.
- Dos entradas y dos salidas configurables como analógicas o digitales.
- 512 MB de memoria de acceso directo.
- Conexión USB 2.0
- Interfaz de conexión AD-M2kBNC-EBZ (ver figura 8) permite la conexión mediante conectores BNC.



Figura 7: Plataforma ADALM2000
Fuente: <https://www.analog.com>

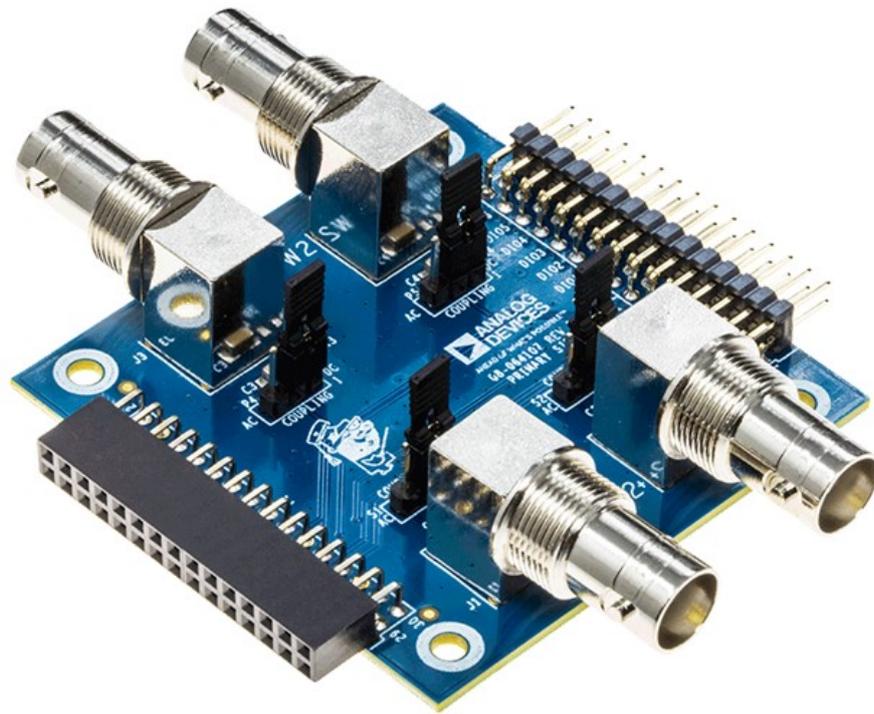


Figura 8: Interfaz de conexión BNC
Fuente: <https://www.analog.com>

4 Diseño de un sistema de transmisión

4.1 Diseño Transmisor

Como se indicó anteriormente, el múltiplex FM esta conformado por una suma de señales moduladas a diferentes frecuencias con un ancho de banda total de 100 kHz.

El contenido que será transmitido tiene en origen una frecuencia de muestreo diferente, por tanto, existe la necesidad de que la frecuencia de muestreo sea igual para todas las señales y así poder conformar el múltiplex.

Con el fin de facilitar la formación del múltiplex, se ha optado por elegir una frecuencia de muestreo global de 912 kHz, por ser el mínimo común múltiplo entre 48 kHz (frecuencia de muestreo del audio) y 57 kHz (frecuencia de muestreo de los datos).

El proceso de formación del múltiplex pasa por realizar un procesado de señal para aumentar la frecuencia de muestreo tanto del audio como de los datos, además de la traslación de señales a diferente frecuencia (ver figura 9).

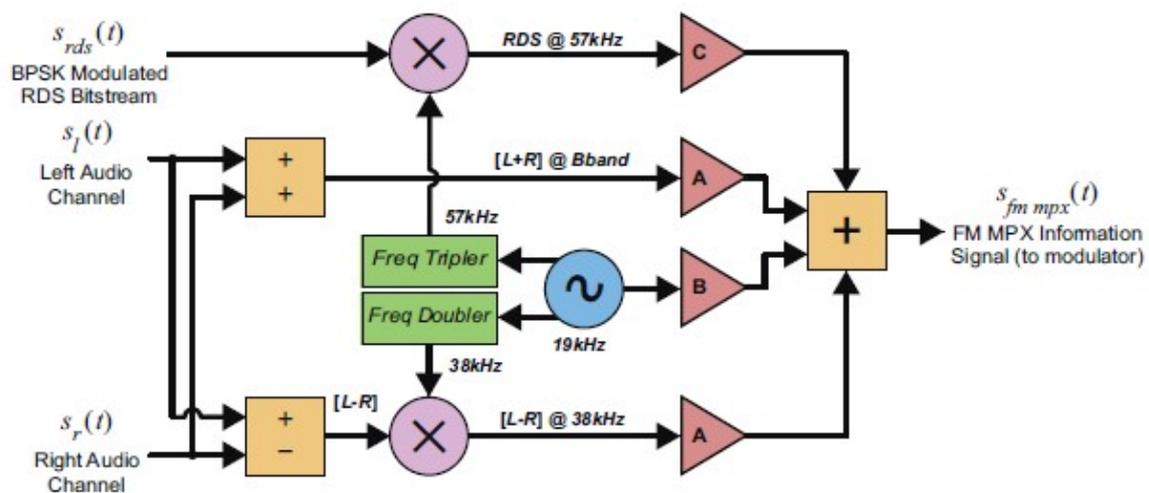


Figura 9: Esquema de formación del múltiplex
Fuente: Libro SDR página 364

4.1.1 Procesado de audio

La fuente de audio esta muestreada a 48 kHz en la cual previamente se han separado en dos canales izquierdo y derecho.

Para integrar el audio en el múltiplex, es necesario aumentar su frecuencia de muestreo de 48 kHz a 912 kHz, esto implica realizar una interpolación por un factor 19.

El filtro paso bajo de reconstrucción, ha sido diseñado utilizando la técnica para filtros FIR Parks–McClellan y posee las siguientes especificaciones:

- Rizado en la banda de paso de 0,5 dB.
- Atenuación en la banda rechazada de 40 dB.
- Frecuencia máxima de paso en 15 kHz.
- Frecuencia eliminada en 33 kHz.
- Ganancia del filtro $G= 19$.

El filtro diseñado cumple especificaciones (ver figura 10).

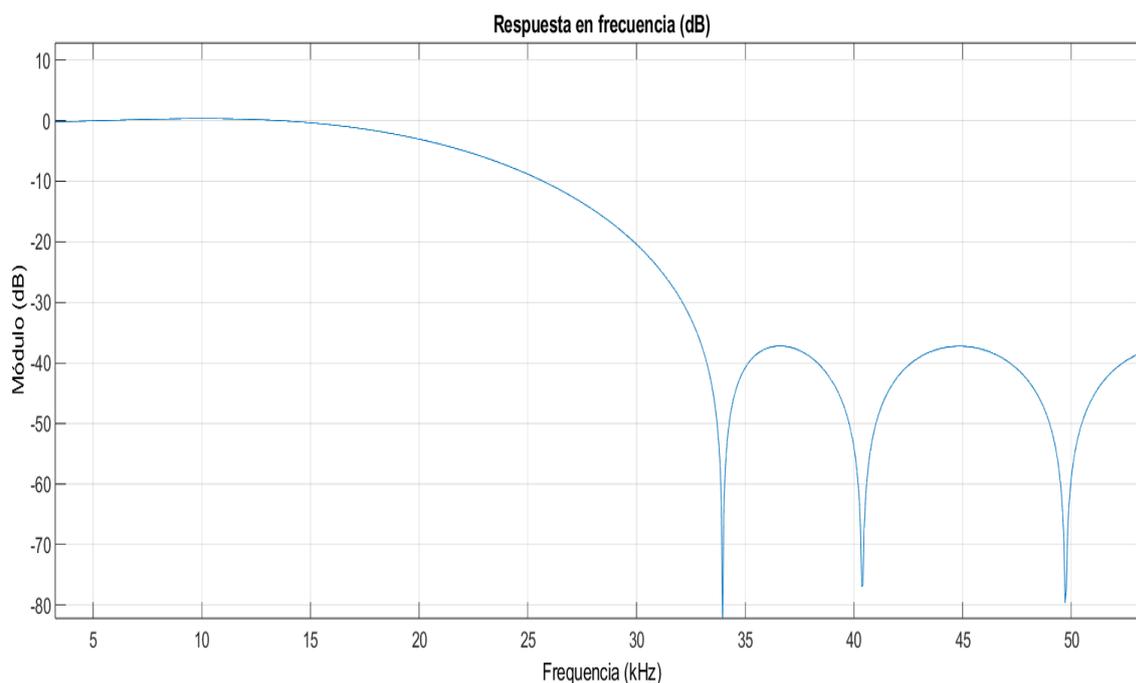


Figura 10: Respuesta en frecuencia de filtro de reconstrucción de interpolación por 19
Fuente: elaboración propia.

La señal suma (L+R) y la señal diferencia (L-R) que es modulada a 38 kHz, están preparadas para integrarse en el múltiplex, (ver figura 11).

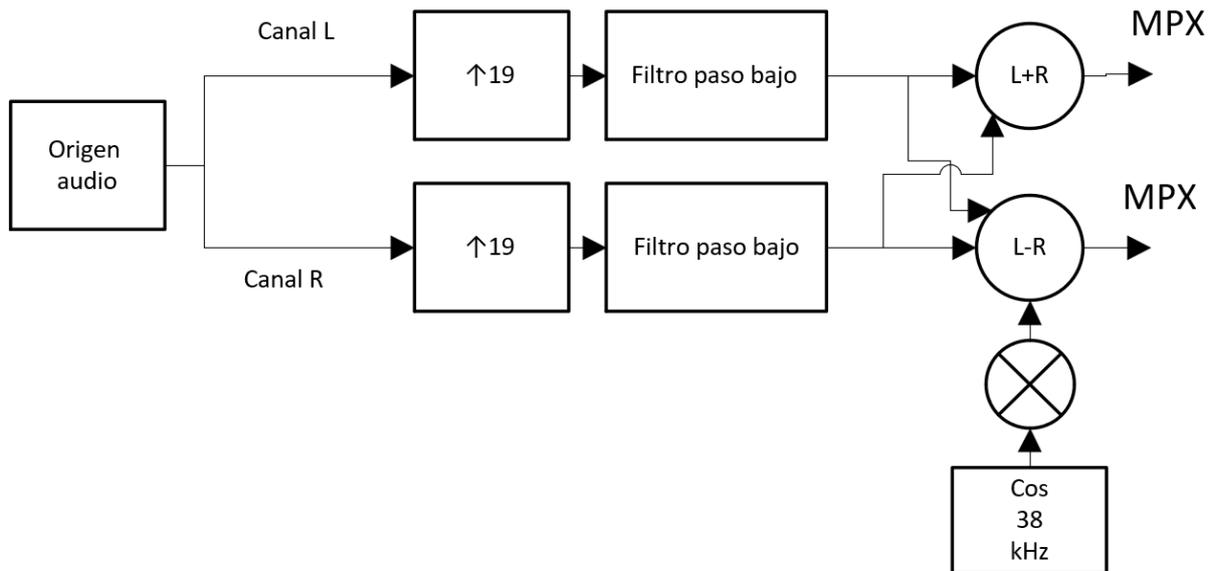


Figura 11: Esquema procesado de audio
Fuente: elaboración propia.

4.1.2 Procesado de datos

En la Figura 12 se describe el proceso que deben seguir los bits para convertirse en símbolos que se integrarán en el múltiplex junto con el audio para ser transmitidos.

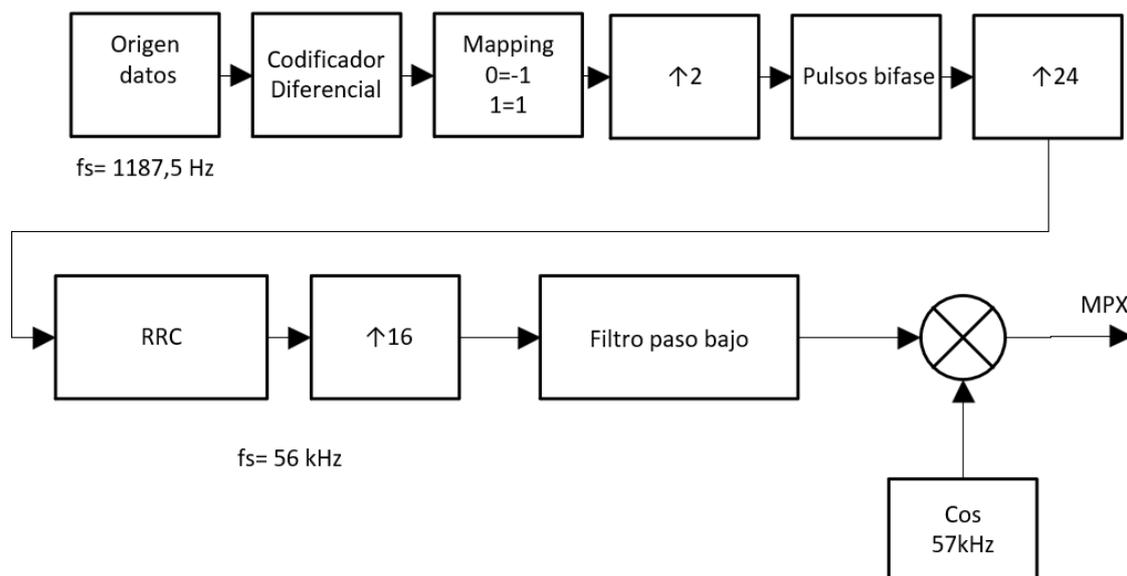


Figura 12: Esquema procesado de datos
Fuente: elaboración propia

El proceso anterior es una versión digital, del esquema proporcionado en el estándar EN50067.

El bloque denominado “Pulsos bifase,” es un filtro con respuesta $H(z) = 1 - z^{-1}$, que por cada pulso de entrada genera una transición, por ejemplo si a la entrada existe un 1 lógico, en la salida existirá un cambio de 1 a -1 y en consecuencia si entra un 0 lógico la transición será de -1 a 1.

El filtro conformador, esta diseñado a 24 muestras por símbolos con una ventana de 10 símbolos, este filtro corresponde a un filtro de raíz de coseno alzado con un factor de *roll-off* igual a 1.

Los datos son interpolados por 16 para lograr aumentar la frecuencia de muestreo de 57 kHz a 912 kHz.

El filtro paso bajo de reconstrucción, ha sido diseñado utilizando la técnica para filtros FIR Parks–McClellan y posee las siguientes especificaciones:

- Rizado en la banda de paso de 0.5 dB.
- Atenuación en la banda rechazada de 40 dB.
- Frecuencia máxima de paso en 2,4 kHz.
- Frecuencia eliminada 54,6 kHz.
- Ganancia del filtro $G=16$.

El diseño del filtro de reconstrucción cumple especificaciones (ver Figura 13).

Los datos son modulados a 57 kHz para ser integrados en el múltiplex, en este punto la frecuencia de muestreo es de 912 kHz.

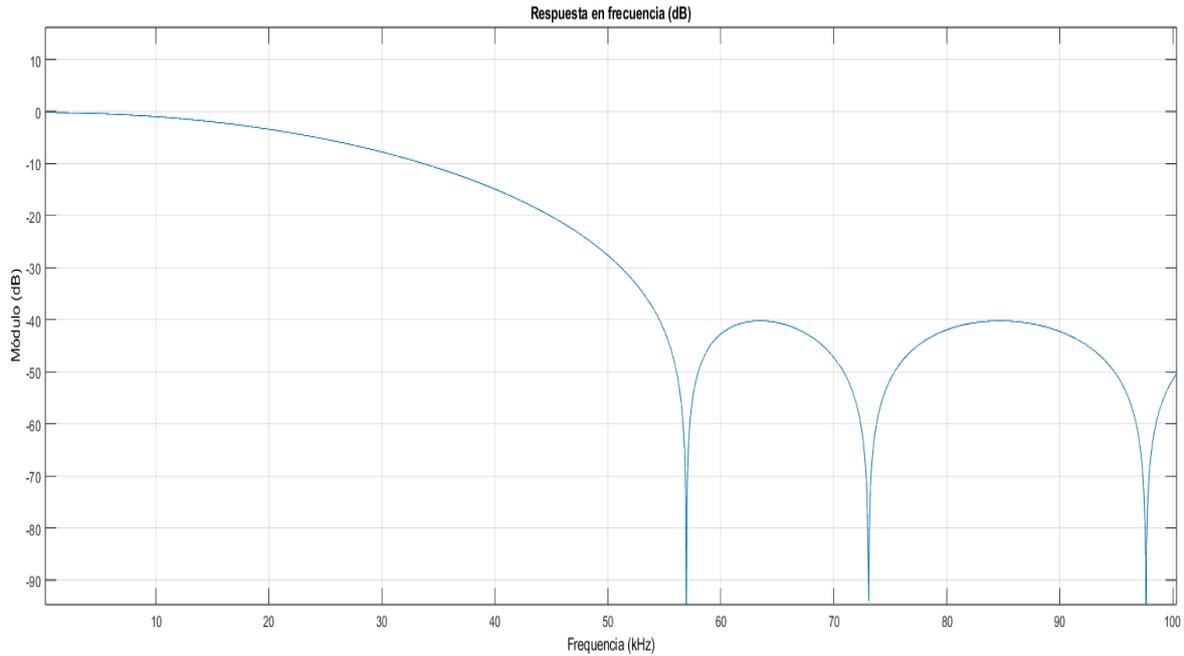


Figura 13: Respuesta en frecuencia filtro de reconstrucción de interpolación por 16
Fuente: elaboración propia

4.1.3 Traslación a la frecuencia de transmisión

Para el proceso de modulación en frecuencia (FM) es necesario aumentar la frecuencia de muestreo de 912 kHz hasta 7,5 MHz y así poder generar una portadora de 3 MHz.

La subida en frecuencia será por un factor racional $Q = 625/76$ (ver figura 14).

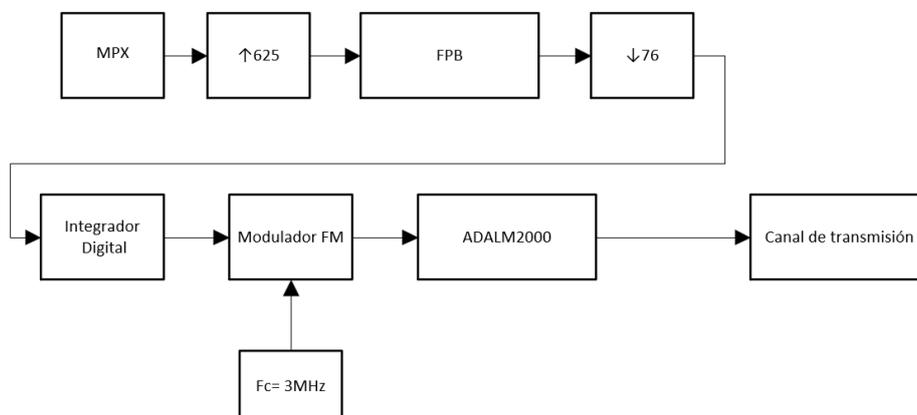


Figura 14: Esquema de modulación a frecuencia de transmisión
Fuente: elaboración propia

El filtro paso bajo de reconstrucción, ha sido diseñado utilizando la técnica para filtros FIR Parks–McClellan y posee las siguientes especificaciones:

- Rizado en la banda de paso de 0.5 dB.
- Atenuación en la banda rechazada de 40 dB.
- Frecuencia máxima de paso en 100 kHz.
- Frecuencia eliminada 812 kHz.
- Ganancia del filtro $G = 625$.

El filtro de reconstrucción diseñado cumple especificaciones (ver figura 15).

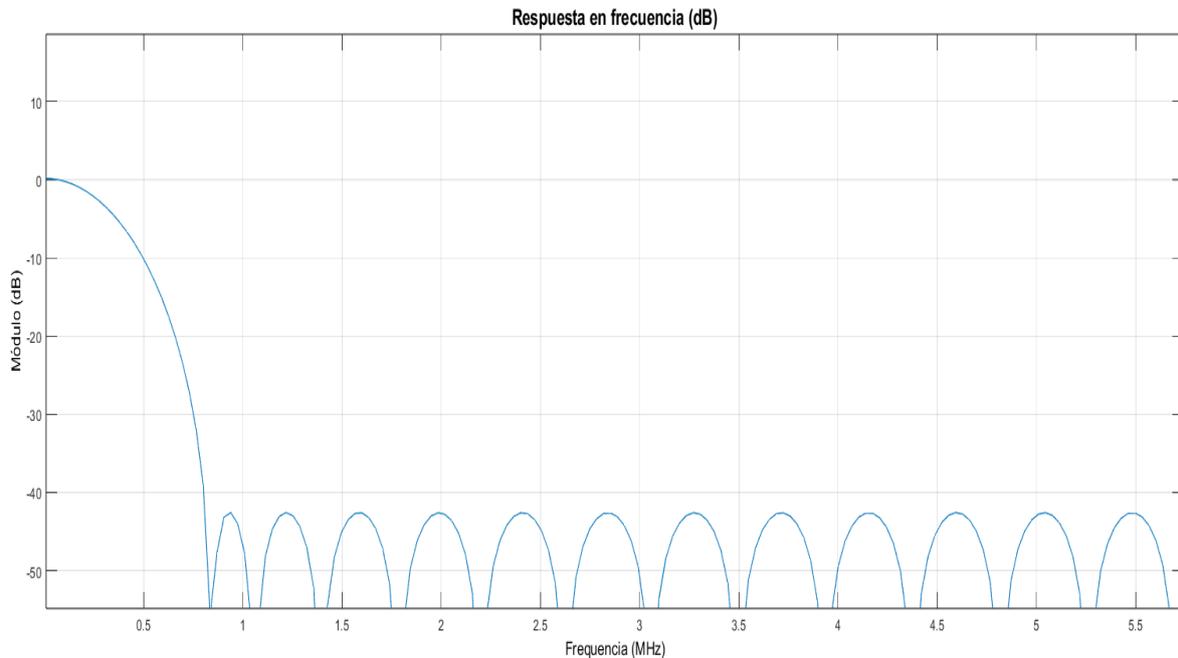


Figura 15: Respuesta en frecuencia filtro de reconstrucción de cambio f_s por factor $Q = 625/76$

Fuente: elaboración propia

4.1.4 Esquema de transmisión completo

En la Figura 16 se aprecia el proceso completo que realiza el transmisor para generar audio y datos para la posterior emisión en frecuencia modulada.

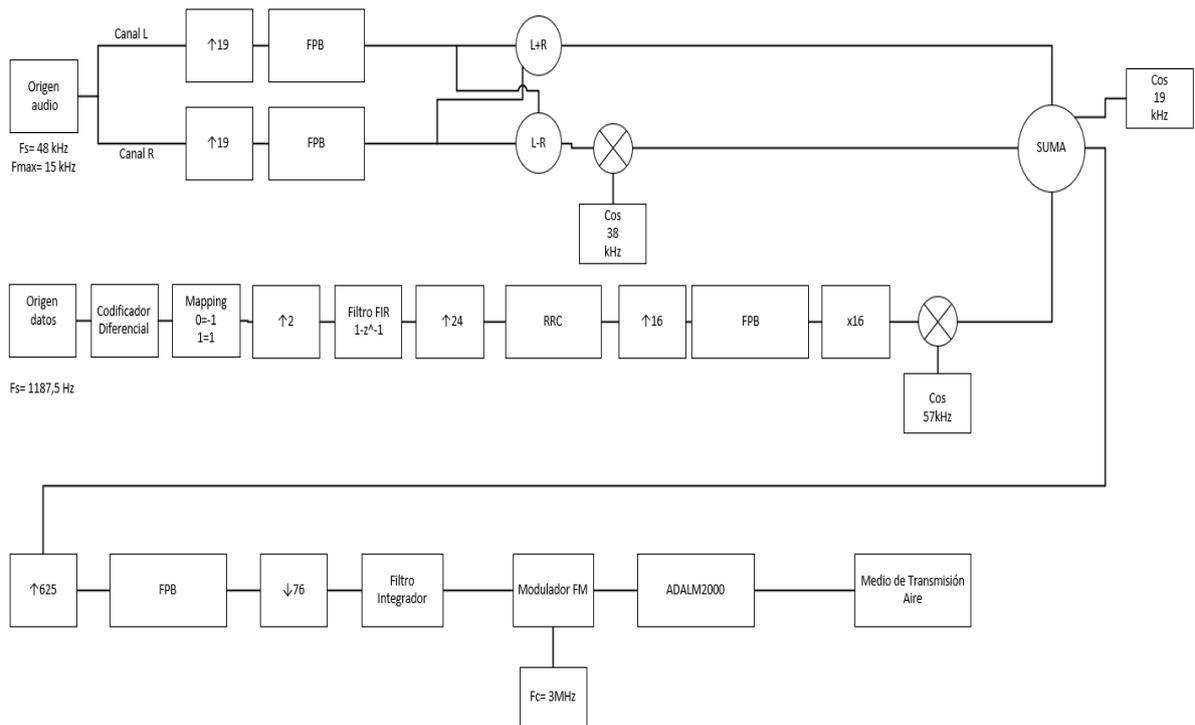


Figura 16: Esquema completo del transmisor FM
Fuente: elaboración propia

4.2 Diseño Receptor

En la Figura 17 podemos observar el diagrama de bloques del receptor, en el se aprecia que el diseño es completamente análogo al del transmisor pero en sentido inverso, es decir, las operaciones realizadas por el transmisor son desechas por el receptor, sin embargo, el dispositivo RTL820T, proporciona una señal directamente en banda base a 912 kHz.

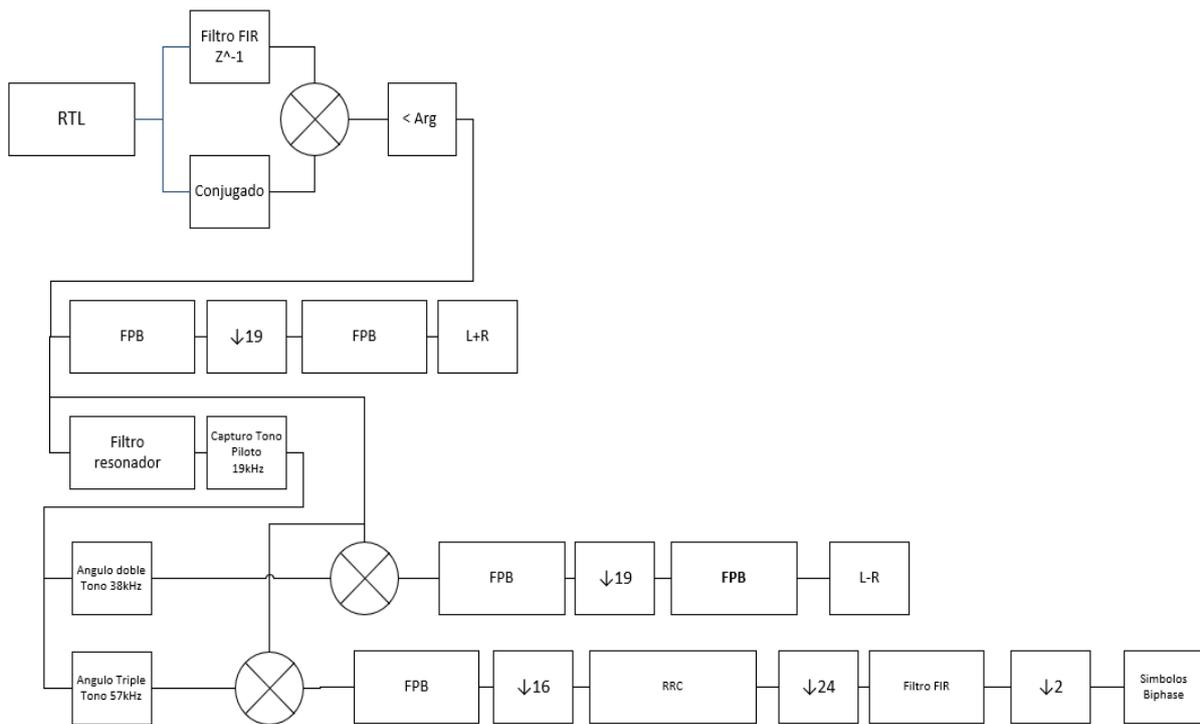


Figura 17: Esquema del receptor implementado
Fuente: elaboración propia

4.2.1 Recepción señal FM

Para decodificar la señal FM utilizamos un receptor basada en una línea de retardo temporal como se muestra en la (ver figura 18).

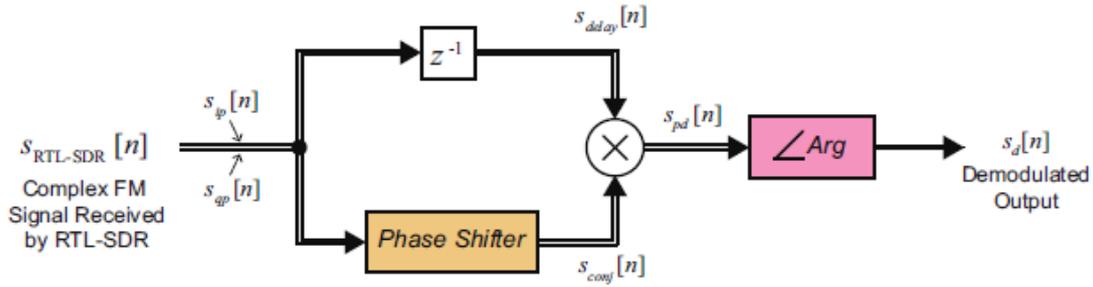


Figura 18: FM mediante línea de retardo temporal
Fuente: Libro SDR página 355

Computacionalmente este diseño es bastante fácil de implementar, ya que debemos retardar la señal, eso se hace fácilmente con un filtro con coeficientes $H(z) = z^{-1}$, además se debe obtener el conjugado de la señal, esto se logra cambiando de signo la parte imaginaria de la señal. Finalmente, se multiplican las dos señales y de ellas se extrae el argumento que corresponde con la señal desmodulada, es decir, nos quedamos con la fase de la Ecuación 1 que corresponde con la información de la señal.

4.2.2 Recuperación de L+R

La recuperación de la señal suma (L+R) es quizás la más sencilla, ya que simplemente se debe aplicar un diezmado al múltiplex para lograr volver a una frecuencia de muestreo que permita escuchar el audio. En la Figura 19 se describe el proceso que se debe seguir para recuperar el audio monofónico (L+R).

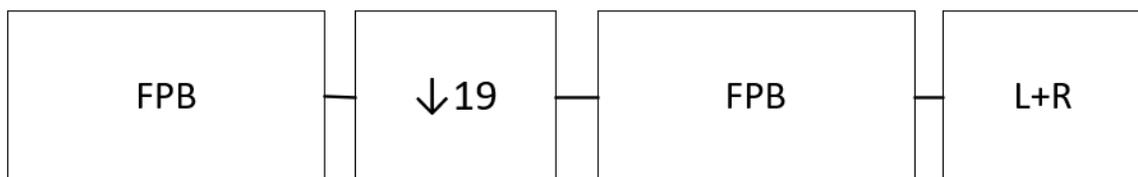


Figura 19: Esquema de recuperación señal L+R
Fuente: elaboración propia

El filtro paso bajo antialiasing, ha sido diseñado utilizando la técnica para filtros FIR Parks–McClellan (ver figura 20) que posee las siguientes especificaciones:

- Rizado en la banda de paso de 0.5 dB.

- Atenuación en la banda rechazada de 40 dB.
- Frecuencia máxima de paso en 15 kHz.
- Frecuencia eliminada 33 kHz.

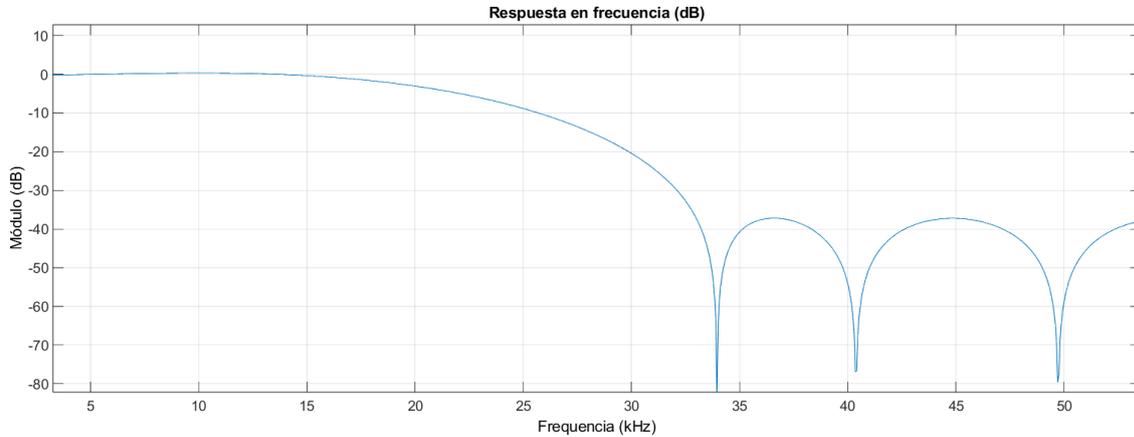


Figura 20: Respuesta en frecuencia filtro antialiasing
Fuente: elaboración propia

4.2.3 Recuperación de tono piloto 19 kHz

El tono piloto nos servirá para recuperar la señal diferencia (L-R) y los datos, ya que una vez capturado este piloto, que se encuentra en fase con el resto de la señal, podemos obtener mediante identidades trigonométricas las señales 38 kHz y 57 kHz mediante el ángulo doble y triple respectivamente.

Existen varias formas de capturar el tono piloto, como por ejemplo el uso de un filtro paso banda, en este proyecto se ha utilizado un filtro resonador, con frecuencia de resonancia de 19 kHz.

Un filtro resonador es un filtro selectivo que atenúa todas las frecuencias diferentes a la frecuencia de resonancia.

Para conseguir un filtro resonador, posee dos polos complejos conjugados próximos a la circunferencia unidad, en este caso el módulo de la respuesta en frecuencia es grande cerca del polo. La posición angular del polo determina la frecuencia de resonancia. Además se ubican dos ceros en $z = -1$ y $z = 1$ esto elimina por completo la respuesta en $w = 0$ $w = \pi$.

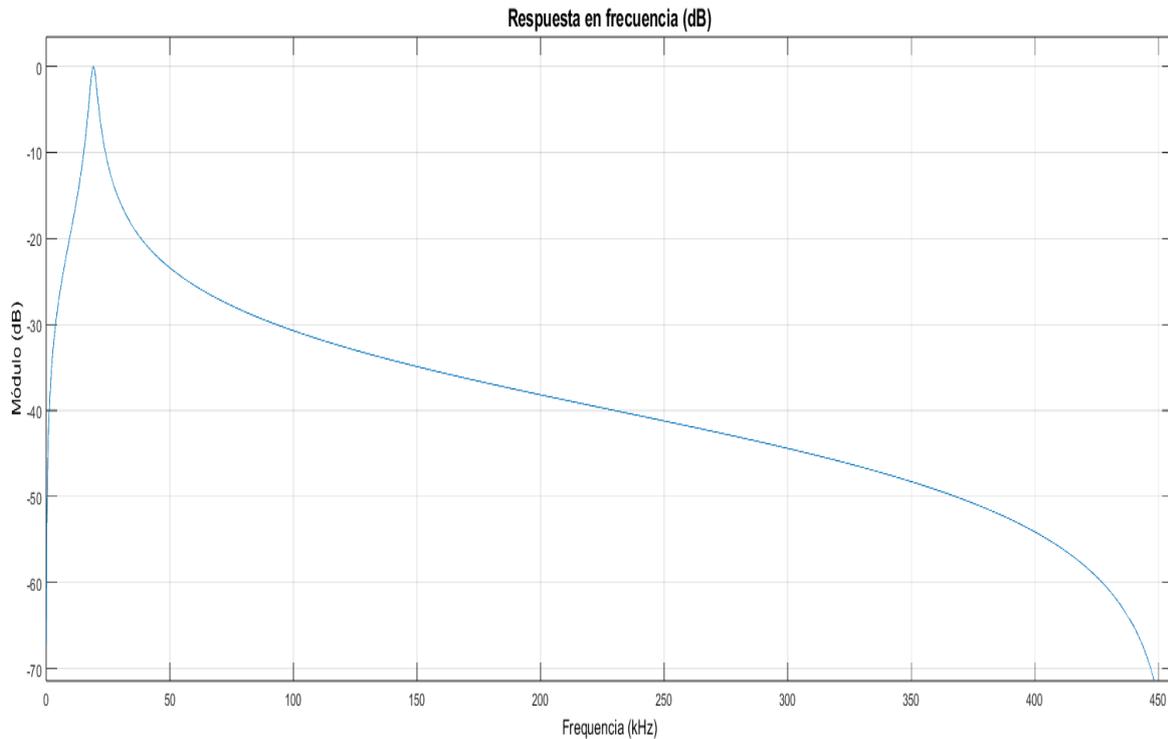


Figura 21: Respuesta en frecuencia de un filtro resonador con resonancia a 19 kHz
Fuente: elaboración propia

4.2.4 Recuperación de L-R

Para recuperar la señal diferencia (L-R) lo primero que se debe hacer es trasladarla a banda base, por tanto, se debe multiplicar por coseno a 38 kHz obtenido mediante el resonador de la sección anterior, una vez en banda base la señal es diezmada y filtrada al igual que la señal suma (L+R).

La señal diferencia (L-R) es utilizada por el receptor para obtener los canales L y R de manera independiente, mediante simples operaciones de suma y resta.

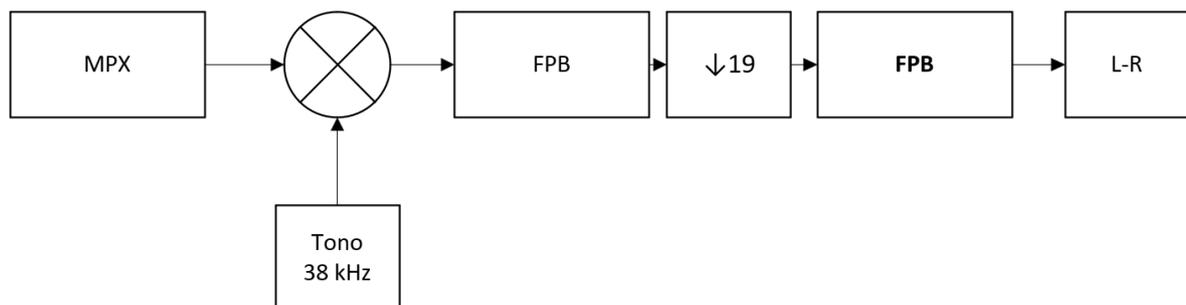


Figura 22: Esquema de recuperación señal L-R
Fuente: elaboración propia

El filtro paso bajo antialiasing, ha sido diseñado utilizando la técnica para filtros FIR Parks–McClellan (ver figura 23) y posee las siguientes especificaciones:

- Rizado en la banda de paso de 0.5 dB.
- Atenuación en la banda rechazada de 40 dB.
- Frecuencia máxima de paso en 15 kHz.
- Frecuencia eliminada 33 kHz.

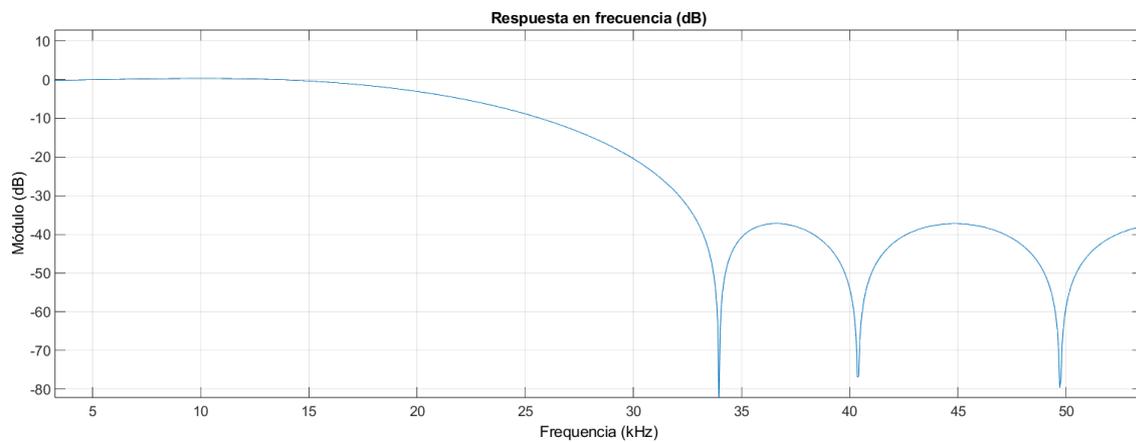


Figura 23: Respuesta en frecuencia filtro antialiasing
Fuente: elaboración propia

4.2.5 Recepción de datos

Para recuperar la señal RDS, se debe trasladar la señal que esta a 57 kHz a banda base para posteriormente diezmar y conseguir que la señal pase de estar muestreada a 912 kHz a 57 kHz como indica el estándar, para ello es necesario realizar un diezmo por un factor de 16.

El receptor realiza las operaciones inversas que realiza el transmisor para recuperar la señal.

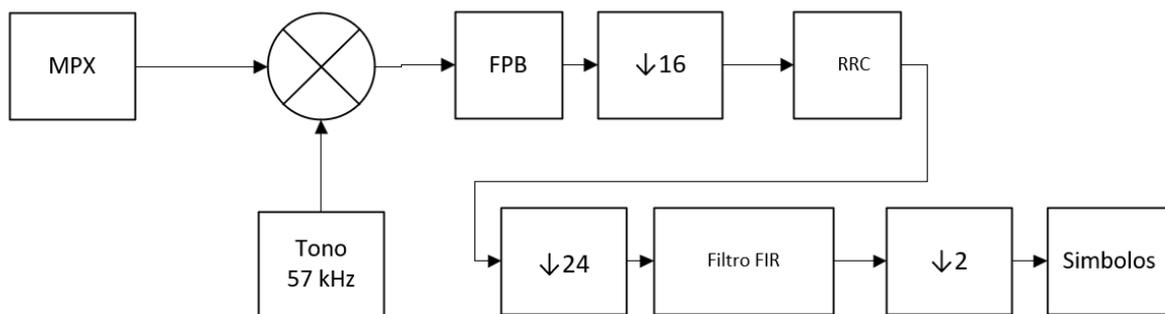


Figura 24: Recuperación señal RDS

Fuente: elaboración propia

El filtro paso bajo antialiasing, ha sido diseñado utilizando la técnica para filtros FIR Parks–McClellan (ver figura 25) que posee las siguientes especificaciones:

- Rizado en la banda de paso de 0,5 dB.
- Atenuación en la banda rechazada de 60 dB.
- Frecuencia máxima de paso en 2,4 kHz.
- Frecuencia eliminada 54,6 kHz.

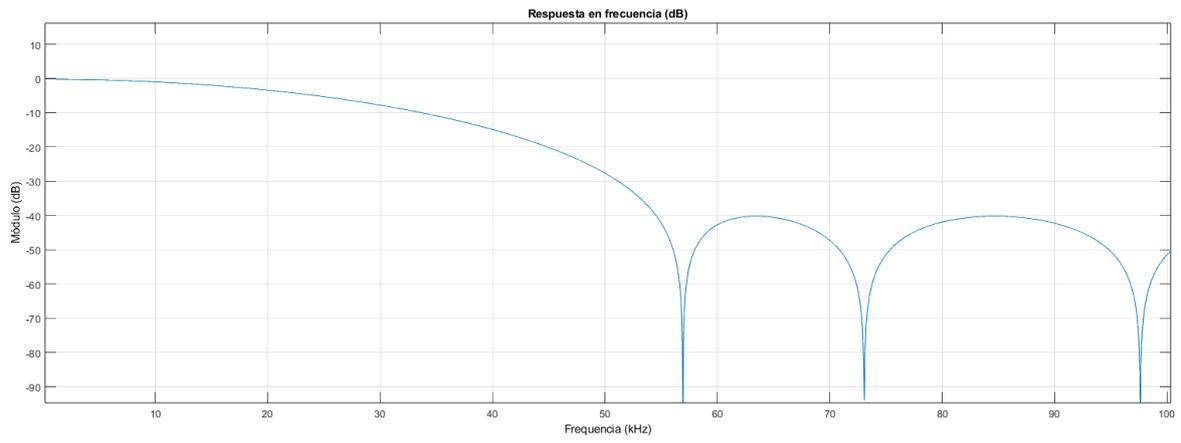


Figura 25: Respuesta en frecuencia filtro antialiasing para el diezmado por un factor 16
Fuente: elaboración propia

5 Evaluación del sistema de transmisión y recepción

Se evaluará el sistema por partes independientes, haciendo énfasis en aquellos puntos en los cuales la señal sufre algún tipo de transformación debido a algún tipo de proceso, como por ejemplo, traslación en frecuencia o la formación del múltiplex. Además, se tratará de forma independiente la evaluación de la plataforma ADALM2000.

5.1 Evaluación del trasmisor FM

En la Figura 26 se observa la señal múltiplex conformada por las señales suma, diferencia, tono a 19 kHz y señal de datos.

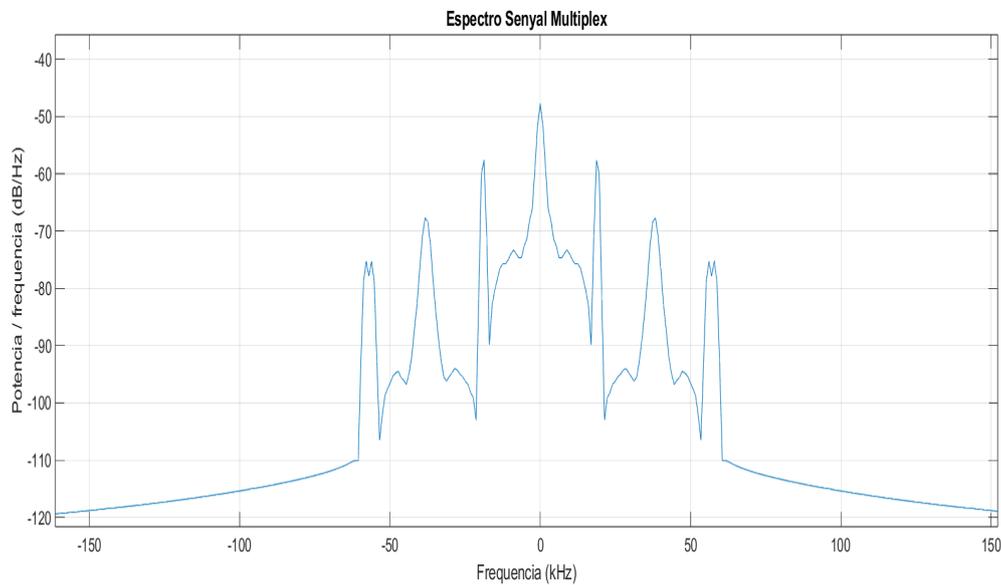


Figura 26: Espectro de la señal MPX generada
Fuente: elaboración propia

En la Figura 27 se observa la señal modulada a 3 MHz.

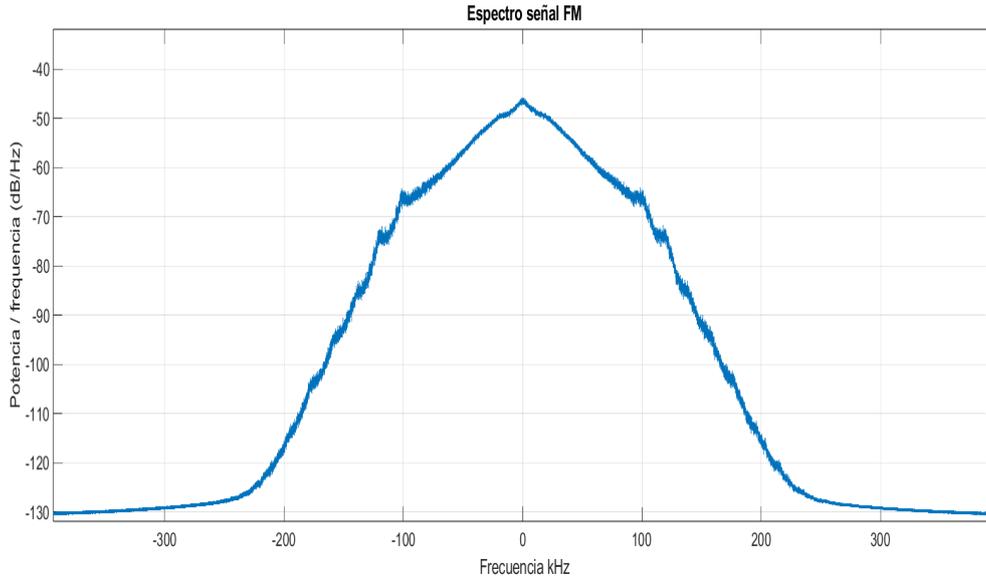


Figura 27: Espectro señal modulada a 3 MHz
Fuente: elaboración propia

5.2 Evaluación del receptor FM

El receptor se evaluará utilizando el dispositivo R820T SDR.

En la Figura 28 se observa el múltiplex obtenido de una emisora de radio de Benidorm, “Cadena 100”, con una frecuencia 93.0 MHz. El receptor SDR, baja la señal a banda base, en este caso configurado a $f_s = 912 \text{ kHz}$.

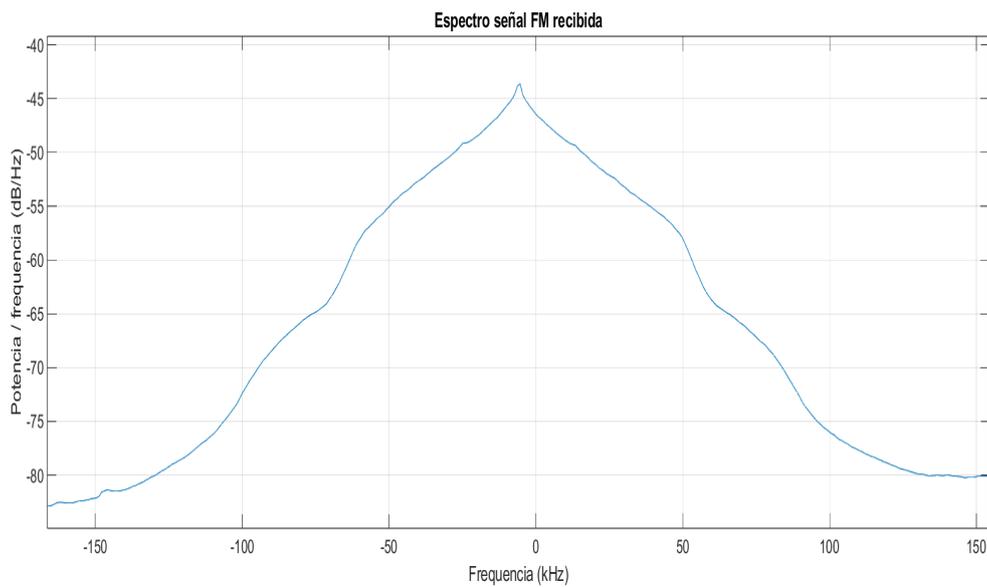


Figura 28: Espectro MPX recibido
Fuente: elaboración propia

En la Figura 29, se observa la señal FM recibida antes de ser demodulada.

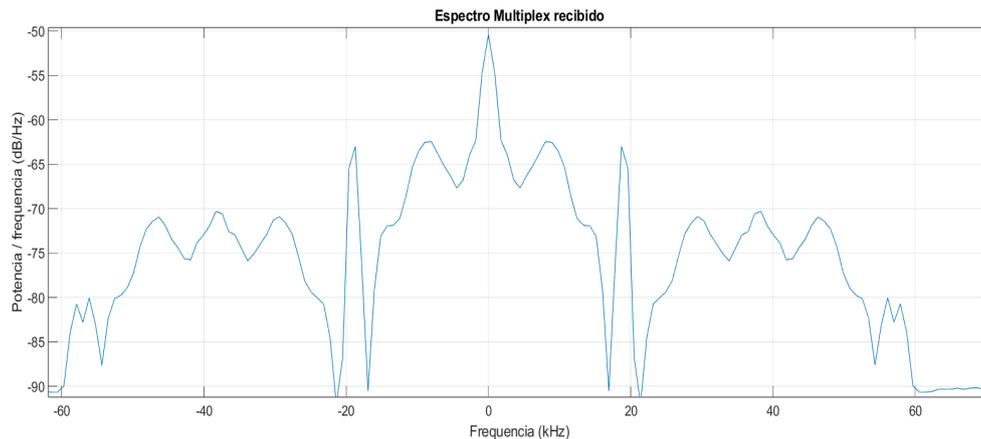


Figura 29: Señal FM recibida
Fuente: elaboración propia

5.3 Evaluación del dispositivo ADALM2000

Para evaluar las prestaciones del dispositivo ADALM2000 se intentará realizar una transmisión continua de un coseno (modo no cíclico).

Los resultados obtenidos no se ajustan a las especificaciones anunciadas, dada la imposibilidad de establecer una transmisión sin cortes esto viene por una destrucción del buffer después de cada envío de datos. En la Figura 30 se observa como existe una discontinuidad de la señal enviada.

Otro aspecto, no menos importante, es la limitación impuesta por la conexión USB 2.0 que limita la generación de señales a una frecuencia muy baja, esto es debido a la creación de un cuello de botella que provoca la conexión entre el dispositivo y el ordenador.



Figura 30: Señal transmitida por ADALM2000
Fuente: elaboración propia

Como alternativa existe un dispositivo denominado “Pluto” también de la empresa Analog Devices específico para desarrollar sistemas de comunicaciones.

5.4 Evaluación del sistema en una radio comercial FM

Con el fin de verificar y validar el sistema se ha transmitido una trama RDS con el mensaje “UPV GANDIA” junto con 30 segundos de audio, en la frecuencia 104.5 MHz, el cual es recibido por una radio comercial FM ubicada a 6 metros del transmisor.

Se comprueba que la recepción es correcta tanto del audio como de los datos (ver figura 31).



Figura 31: Trama recibida en receptor FM comercial
Fuente: elaboración propia

6 Conclusiones

El proyecto cumple los objetivos propuestos. Se ha conseguido capturar una señal de una emisora local y se han obtenido las señales de audio y de datos, recibiendo ambas correctamente.

Se han generado las señales que conforman el múltiplex, seguidamente las señales han sido procesadas para ser transmitidas mediante la plataforma ADALM2000, sin embargo, la transmisión ha presentado múltiples problemas ya que no funciona para una transmisión en tiempo real, debido a las limitaciones que presenta la conexión USB 2.0 y la gestión de la memoria de acceso directo, ambos condicionantes impiden una transmisión en modo continuo.

Como alternativa, se ha utilizado el dispositivo “ADALM Pluto”, logrando la emisión del contenido de audio y datos, objetivo principal de este proyecto. Además, se ha conseguido la recepción de la señal en una radio FM comercial.

7 Referencias Bibliográficas

Referencias

- [1] Bob Stewart. “Software Defined Radio Using Matlab Simulink RTL-SDR” .sdr.com. 2015.
- [2] CENELEC. “Specification of the radio data system (RDS) for VHF/FM sound broadcasting in the frequency range from 87,5 to 108,0 MHz.” *EN50067*, I, 132, 1998.
- [3] Unión Internacional de Telecomunicaciones, “RECOMENDACIÓN UIT-R BS.450-3” III, 9, 2001.
- [4] Carsten Roppel. “FM RDS Receiver with the RTL-SDR”. I . 4 . 2021
- [5] Analog Devices. “LibM2K.” 2019
- [6] Proakis, “Tratamiento digital de señales” 4^a Edicion, 2007
- [7] <https://analogdevicesinc.github.io/libm2k/>. 2019