

Fundamentos de las comunicaciones

Laboratorio 1: Demodulación digital de señal real de FM

Fecha de Entrega: 04/12/2025



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA**

Alumno: Ramirez Tolentino, Fernando (01964/8)

Índice

1. Introducción.....	3
2. Ejercicios.....	3
2.1. Primera vuelta: Reconocimiento del SDR.....	3
2.1.1. Inciso 2: Barrido Espectral y Selección de Emisoras.....	3
2.1.2. Inciso 3: Verificación del Ancho de Banda.....	5
2.1.3. Inciso 4: Efecto de la Ganancia y Control Automático (AGC)....	10
2.2. Procesamiento Digital de Señales (SDR + Matlab).....	14
2.2.1. Captura y Análisis Espectral (Incisos 1, 2 y 3).....	15
2.2.2. Filtrado de Selección de Canal (Inciso 4).....	15
2.2.3. Demodulación y Recuperación del Mensaje (Inciso 5).....	16
2.2.4. Reproducción de Audio Final.....	18
3. Estructura de Archivos y Guía de Ejecución.....	18
3.1 Inventario de Archivos.....	19
3.2 Instrucciones de ejecución.....	19

1. Introducción

La evolución de los sistemas de comunicaciones modernos ha impulsado un cambio de paradigma desde implementaciones puramente analógicas hacia arquitecturas flexibles basadas en software. Este concepto, conocido como **Radio Definida por Software (SDR)**, permite que componentes tradicionalmente implementados en hardware (como mezcladores, filtros y moduladores/demoduladores) sean ejecutados mediante algoritmos de procesamiento digital de señales en procesadores de propósito general o FPGAs.

El presente laboratorio tiene como objetivo analizar e implementar la cadena de recepción de una señal de Frecuencia Modulada (FM) comercial utilizando un dispositivo SDR de bajo costo (Dongle USB RTL-SDR basado en el chipset RTL2832U y sintonizador R820T2).

La experiencia se divide en dos etapas. En una primera instancia, se realizará una exploración del espectro radioeléctrico utilizando el software SDR# para comprender fenómenos como la relación señal-a-ruido (SNR), el ancho de banda y la ganancia de RF. Posteriormente, se utilizará el entorno MATLAB para capturar muestras complejas (I/Q) y diseñar íntegramente el receptor digital, implementando etapas de filtrado, diezmado y discriminación de frecuencia, validando los resultados mediante el análisis espectral y la reproducción del audio recuperado.

2. Ejercicios

2.1. Primera vuelta: Reconocimiento del SDR

Se procedió a la instalación de los drivers y librerías necesarias siguiendo las guías de la cátedra . Se verificó el correcto funcionamiento del dispositivo Dongle USB mediante el software SDR#, logrando visualizar el espectro de radiofrecuencia en tiempo real.

2.1.1. Inciso 2: Barrido Espectral y Selección de Emisoras

Siguiendo las especificaciones de la guía de trabajos prácticos , se configuró el receptor en modo WFM y se realizó un barrido manual de la banda de FM comercial (88 MHz – 108 MHz) con saltos de sintonía de 100 kHz. El objetivo fue identificar las estaciones con mayor potencia de recepción y evaluar cualitativamente la relación señal-a-ruido (SNR).

Se detectó una variación significativa en la calidad de recepción a lo largo del espectro. En los extremos de la banda (88.0 MHz y 108.0 MHz) se observó un predominio absoluto del ruido térmico. Hacia el centro, se identificaron múltiples emisoras operativas.

A continuación, la Tabla 1 detalla las frecuencias detectadas durante el barrido en la localidad de Gonnet:

Tabla 1. Resultados del barrido

Frecuencia (fc)	Calidad de Recepción	Observaciones
88.0 MHz	Solo Ruido	Ausencia de señal. Piso de ruido dominante.
88.7, 89.6, 90.9 MHz	Buena	Audio inteligible, SNR moderada.
92.1, 93.1, 95.3, 96.1, 96.5, 99.7 MHz	Muy Buena	Señal estable con bajo ruido de fondo.
101.9, 102.9, MHz	Excelente	Potencia de recepción alta.

103.3 MHz	Con Interferencia	Anomalía detectada: Recepción simultánea de dos emisoras.
103.5 MHz (Radio Cielo)	Excelente	Máxima potencia detectada en el barrido.
108.0 MHz	Solo Ruido	Fin de banda. Sin señal.

Se destaca un fenómeno particular en la frecuencia 103.3 MHz, donde se escuchaba el audio de la estación propia mezclado con la transmisión de la frecuencia adyacente 103.5 MHz.

Conforme a la consigna de elegir la estación de mayor potencia , se seleccionó la portadora de 103.5 MHz (Radio Cielo) para realizar las pruebas de ancho de banda y ganancia subsiguientes, debido a su superioridad en SNR respecto al resto de las emisoras.

2.1.2. Inciso 3: Verificación del Ancho de Banda

Partiendo de una configuración inicial de 250 kHz en la estación de prueba (103.5 MHz), se redujo progresivamente el ancho de banda del filtro de FI (Frecuencia Intermedia) en el software SDR#. Se registraron los siguientes comportamientos auditivos y espectrales (ver Figuras adjuntas):

- 250 kHz a 80 kHz: La demodulación se mantuvo estable. La calidad de audio fue percibida como óptima, sin intrusión notable de ruido, preservando la fidelidad de la música.
- 80 kHz (Punto de inflexión): Se comenzó a percibir levemente el piso de ruido térmico, aunque la inteligibilidad de la música y la voz se mantuvo clara.
- 50 kHz: La presencia de ruido se tornó evidente, comenzando a degradar la experiencia auditiva.
- 30 kHz: Distorsión severa. Resultó difícil distinguir el contenido musical del ruido; la señal sufrió cortes abruptos y pérdida de continuidad.

- 20 kHz a 10 kHz (Pérdida total): La señal se volvió ininteligible. En 10 kHz, el audio resultante fue exclusivamente ruido, perdiéndose toda información del mensaje original.

Tomando como referencia la teoría brindada por la cátedra, el ancho de banda necesario para una transmisión de FM se rige por la Regla de Carson:

$$BWc \cong 2(\Delta f + f_m)$$

Donde, para el estándar de FM comercial:

- $\Delta f = 75$ kHz (Desviación máxima de frecuencia permitida).
- $f_m = 15$ kHz (Ancho de banda del mensaje de audio).

Sustituyendo estos valores:

$$BWc \cong 2(75 \text{ kHz} + 15 \text{ kHz}) = 180 \text{ kHz}$$

La discrepancia entre el ancho de banda teórico de Carson (180 kHz) y el límite experimental de inteligibilidad (80 kHz) puede explicarse mediante dos fenómenos de la modulación exponencial estudiados durante el transcurso de la materia:

- Distribución de Potencia y Funciones de Bessel

La teoría de FM establece que el espectro de una señal modulada por un tono puro no es continuo, sino discreto, compuesto por la portadora y pares de bandas laterales ubicadas en $f_p \pm n \cdot f_m$. La amplitud de cada componente espectral está determinada por los coeficientes de las Funciones de Bessel de primera especie, $J_n(\beta)$, donde β es el índice de modulación.

Tal como se observa en las curvas de Bessel, para índices de modulación típicos, la energía se concentra en los órdenes bajos ($n = 0, 1, 2$). A medida que el orden n aumenta (alejándose de la frecuencia central), la amplitud de $J_n(\beta)$ decrece rápidamente.

Al reducir el filtro a 80 kHz, estamos eliminando las bandas laterales de orden superior ($n > 3$). Sin embargo, dado que estas bandas contienen una fracción minoritaria de la potencia total ($Px = A^2/2$), su eliminación reduce la fidelidad pero no compromete la energía principal necesaria para demodular el mensaje de audio base. Esto permite observar que el criterio de Carson (98% de potencia) es una especificación de calidad, no de funcionalidad mínima.

- Límite Físico de la Desviación de Frecuencia (Δf)

La degradación crítica observada por debajo de los 30 kHz responde a un principio diferente: el recorte de la excursión de frecuencia instantánea.

Según la definición de FM, la frecuencia instantánea de la señal varía en función de la amplitud del mensaje:

$$f(t) = f_p + k_f \cdot M(t)$$

Para la radiodifusión comercial, la cátedra especifica una desviación de frecuencia máxima de $\Delta f = 75 \text{ kHz}$. Esto implica que, en los picos de volumen de la transmisión, la señal se desplaza físicamente hasta 75 kHz a cada lado de la portadora.

- Análisis: Cuando configuramos el filtro SDR en 30 kHz (lo que equivale a $\pm 15 \text{ kHz}$ desde el centro), el ancho de banda del filtro es significativamente menor que la desviación de la señal ($\Delta f = 75 \text{ kHz}$).
- Consecuencia: En los momentos donde la música tiene gran amplitud (bajos fuertes o volumen alto), la señal "se sale" del rango de captura del filtro. El demodulador pierde la señal portadora momentáneamente, lo que genera discontinuidades abruptas que se perciben auditivamente como ruido de gran amplitud y distorsión severa, tal como se registró en la experiencia a 30 kHz y 10 kHz.

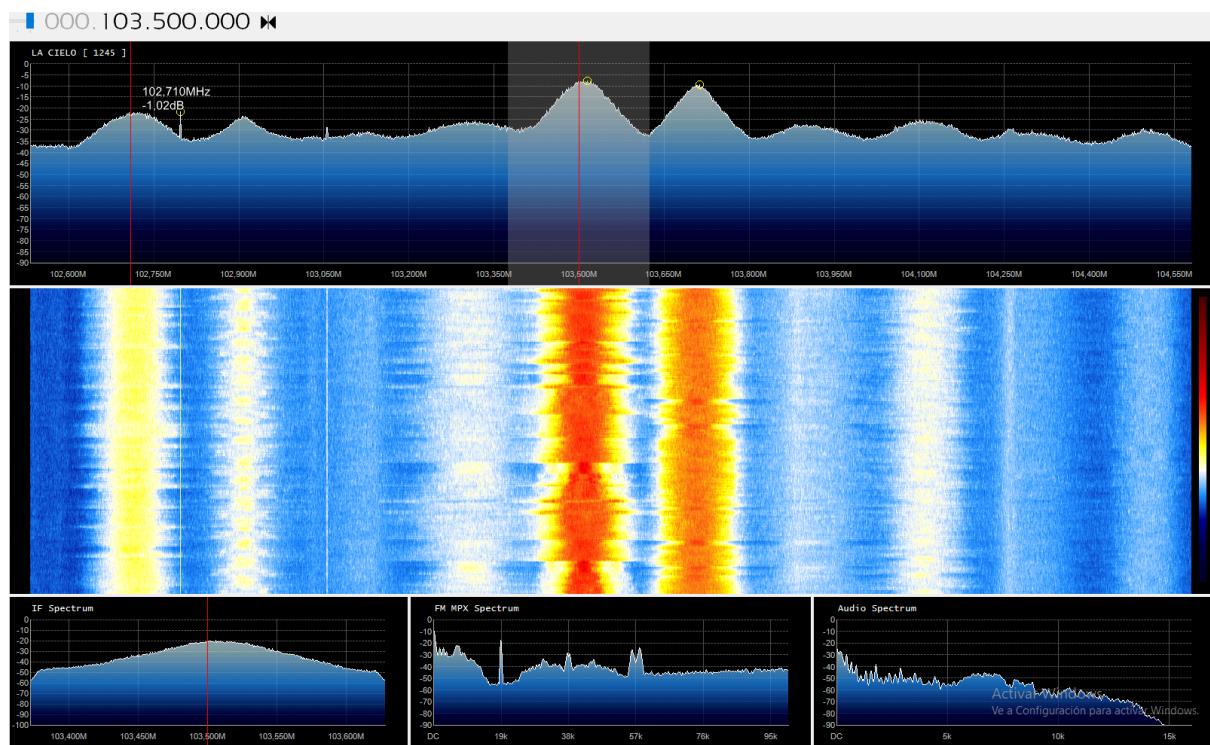


Figura 1. Ancho de banda 250 kHz

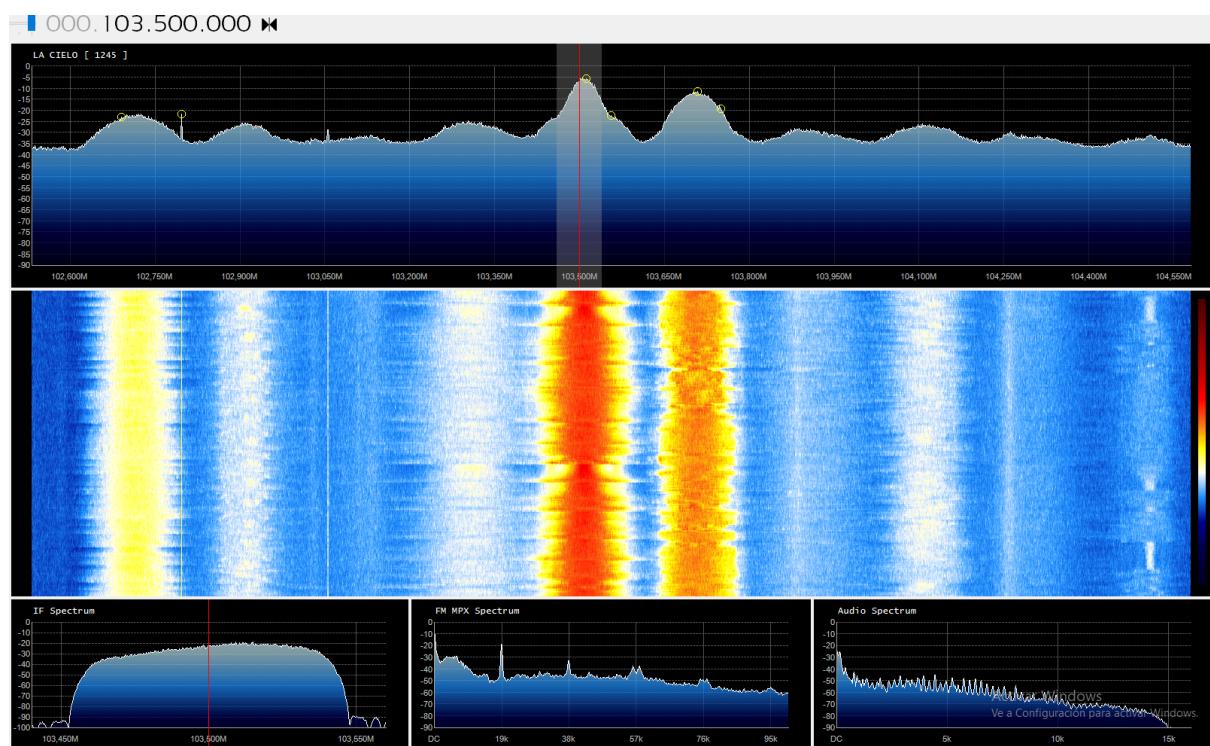


Figura 2. Ancho de banda 80 kHz

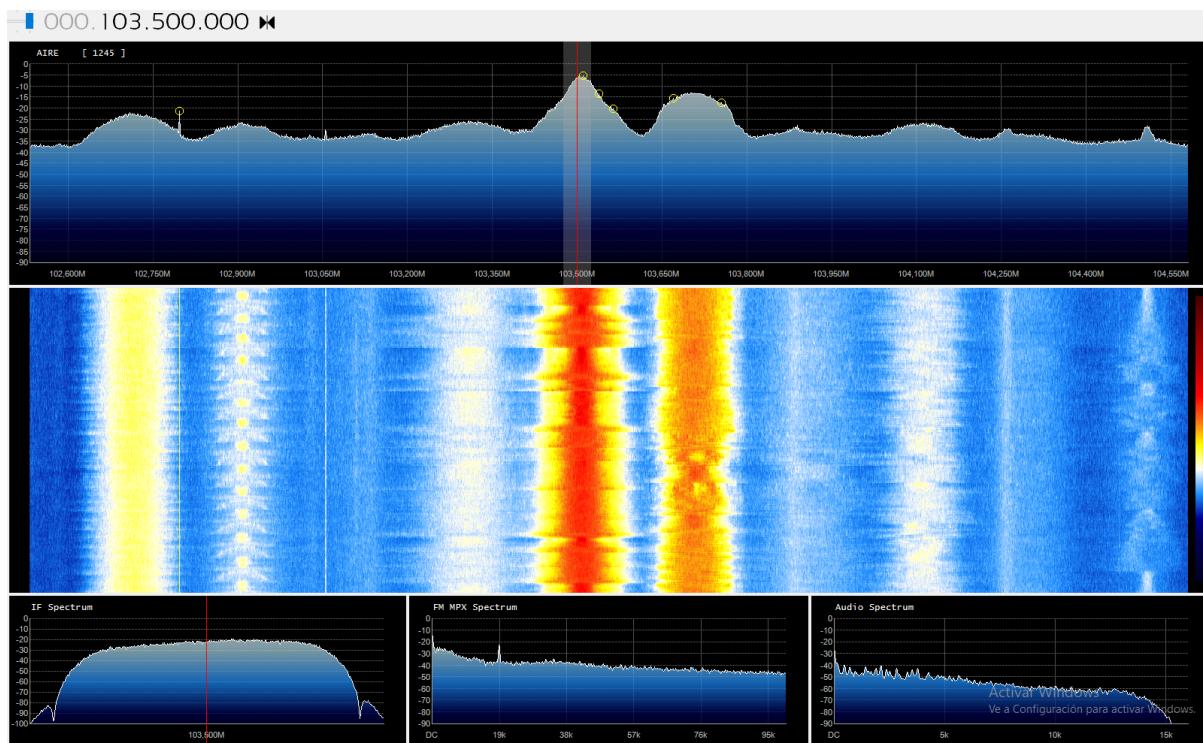


Figura 3. Ancho de banda 50 kHz

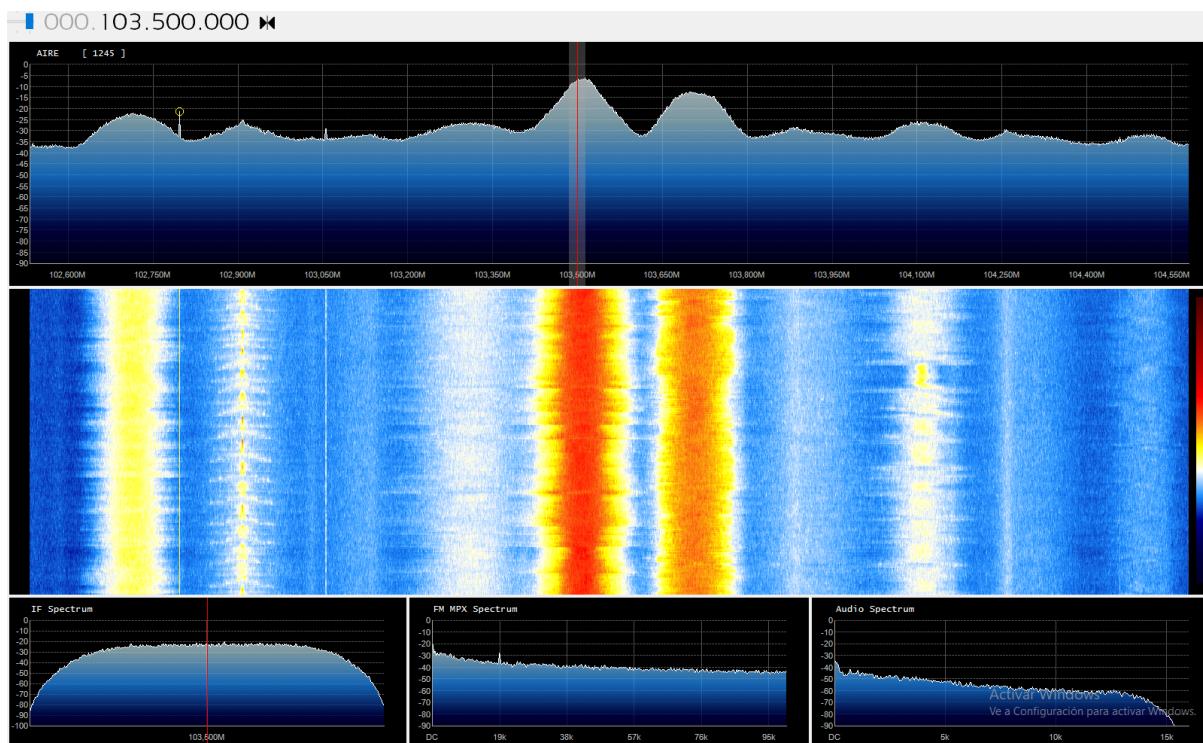


Figura 4. Ancho de banda 30 kHz

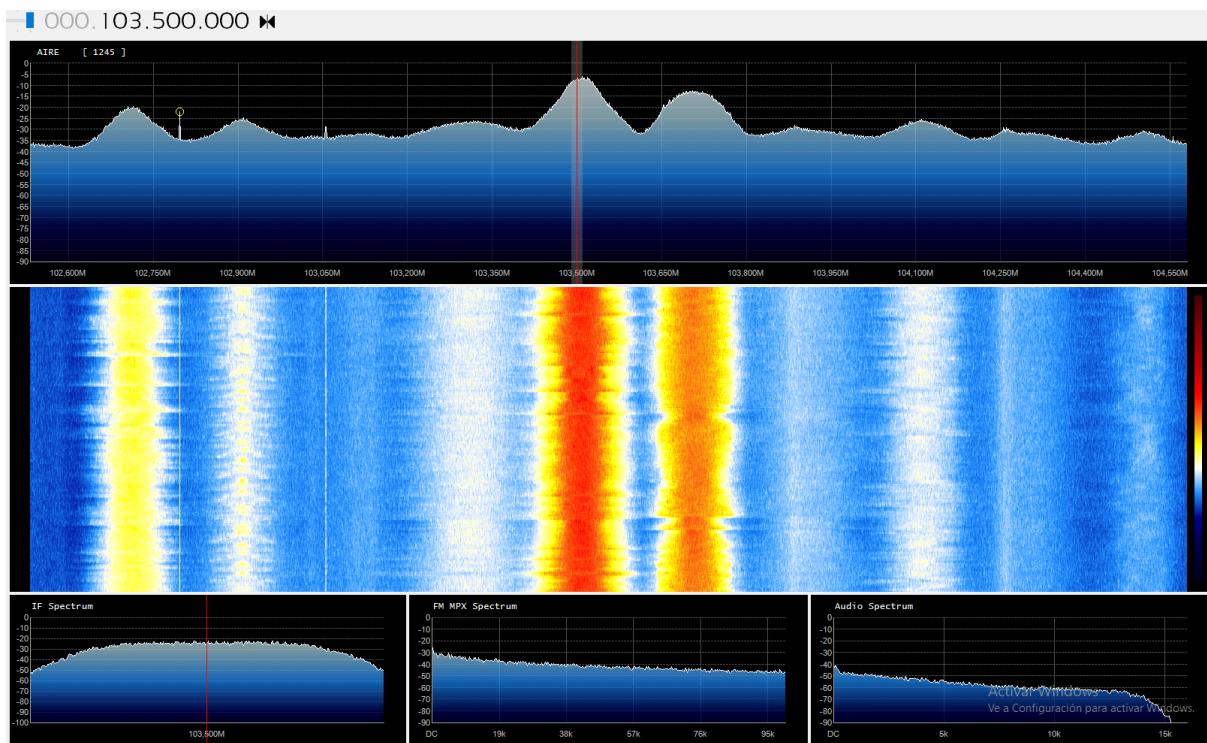


Figura 5. Ancho de banda 20 kHz

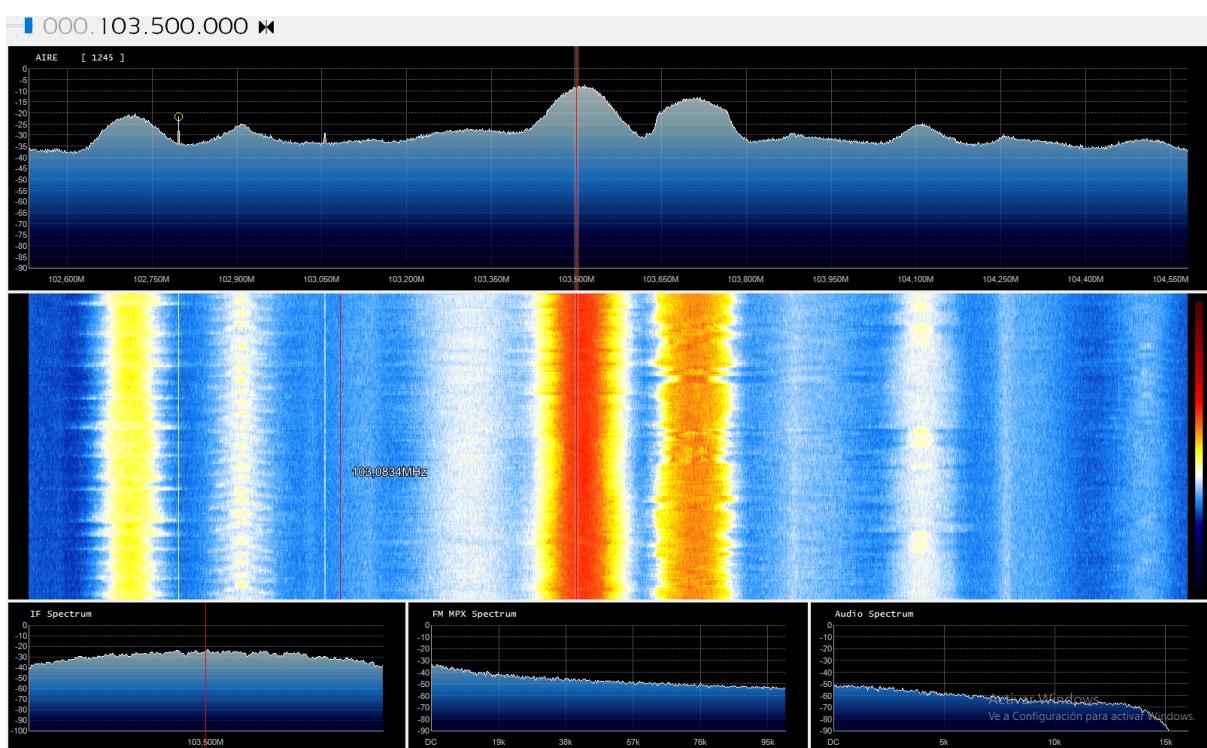


Figura 6. Ancho de banda 10 kHz

2.1.3. Inciso 4: Efecto de la Ganancia y Control Automático (AGC)

Se desactivó el Control Automático de Ganancia (AGC) del sintonizador para manipular manualmente la etapa de amplificación de RF. Se analizaron tres estados de ganancia: Máxima (49.6 dB), Media (25.4 dB) y Mínima (0 dB). Este procedimiento se aplicó comparativamente sobre dos emisoras con niveles de potencia dispares:

- Señal Fuerte: 103.5 MHz (Radio Cielo).
- Señal Débil/Media: 99.1 MHz.

Las capturas adjuntas (Figuras 7 a 12) evidencian el comportamiento crítico de la relación señal-a-ruido (SNR) frente a la ganancia:

- Caso 1: Señal Fuerte (103.5 MHz)
 - Ganancia 0 dB: A pesar de la atenuación máxima, la señal permaneció audible e inteligible. Se observó un incremento leve del siseo de fondo, indicando una caída en la SNR, pero la potencia de la señal recibida en antena fue suficiente para superar el umbral de detección del demodulador.
 - Ganancia 49.6 dB: Se elevó considerablemente el piso de ruido visual. No se percibieron mejoras auditivas significativas respecto al AGC, dado que la señal ya era robusta.
- Caso 2: Señal Débil (99.1 MHz)
 - Ganancia 49.6 dB: Recepción clara con buena fidelidad. La amplificación permitió distanciar la señal útil del ruido interno de las etapas posteriores.
 - Ganancia 25.4 dB: Degradación notable. La señal de audio comenzó a mezclarse con ruido estático.
 - Ganancia 0 dB (Punto de Falla): La estación desapareció por completo. El espectro mostró únicamente ruido blanco, haciendo imposible la demodulación.

El comportamiento dispar entre ambas estaciones se explica mediante los conceptos de Ruido Térmico y Potencia Disponible desarrollados en la teoría.

Todo receptor posee un piso de ruido interno, modelado fundamentalmente como ruido térmico de Johnson-Nyquist, cuya potencia en un ancho de banda B es

$P_N = kTB$. Para que una señal sea demodulable, su potencia de entrada (P_S) debe superar este piso de ruido por un margen mínimo (umbral de FM).

Al configurar la ganancia en 0 dB, estamos reduciendo drásticamente la amplitud de la señal que ingresa al ADC:

- En la 103.5 MHz, la potencia de campo es tan alta que $P_S > P_N$ incluso sin amplificación.
- En la 99.1 MHz, al quitar la ganancia, la potencia de la señal cae por debajo de la Sensibilidad del Receptor (el nivel mínimo de señal detectable). La señal queda "sepultada" bajo el piso de ruido térmico del propio sistema electrónico, lo que explica su desaparición total.

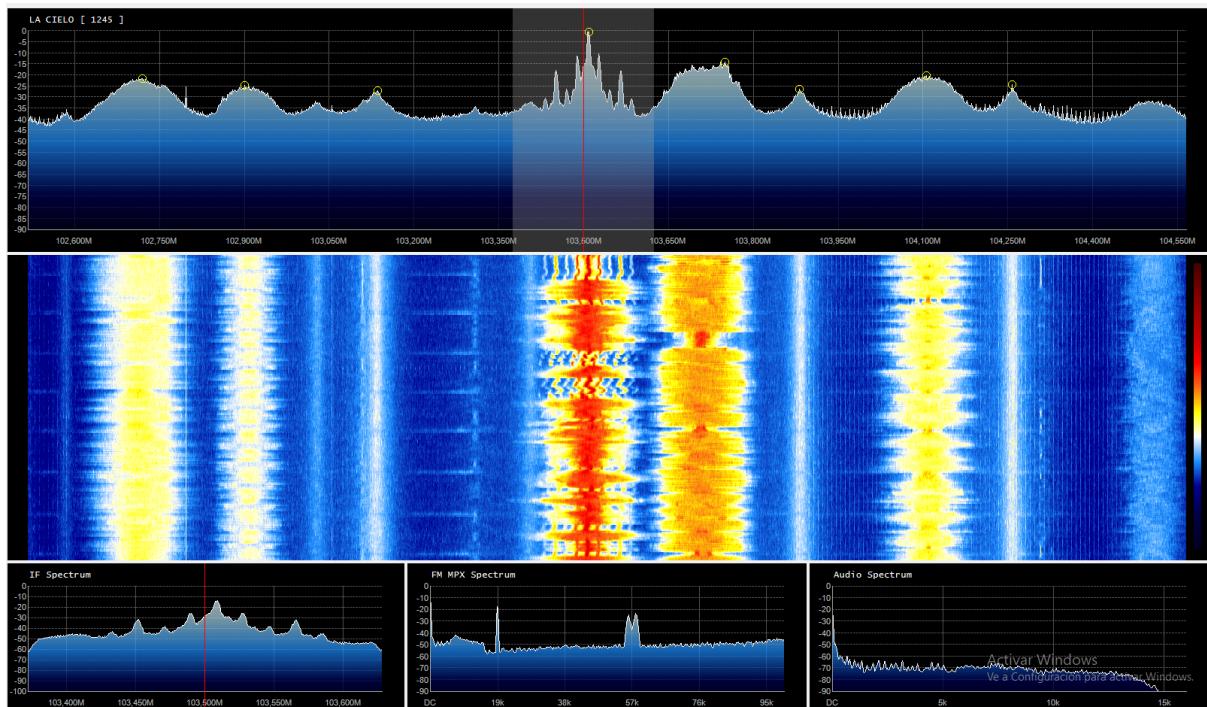


Figura 7. FM 103.5 con ganancia de 49.6 dB

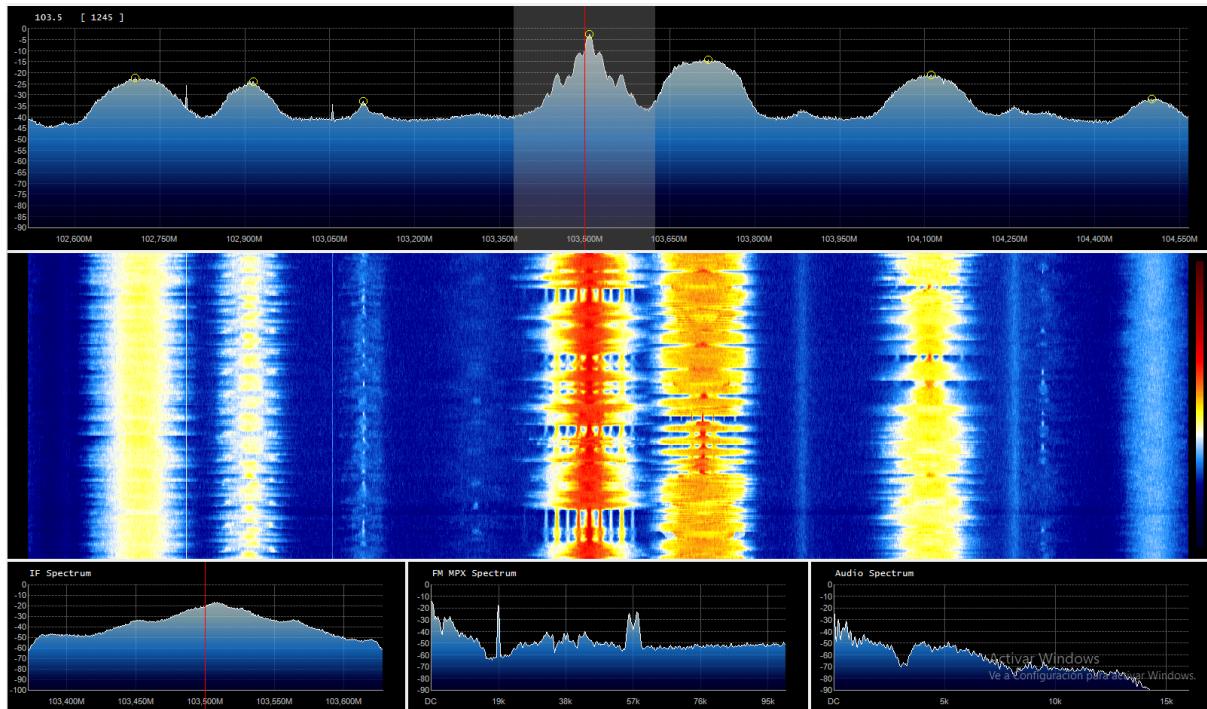


Figura 8. FM 103.5 con ganancia de 25.4 dB

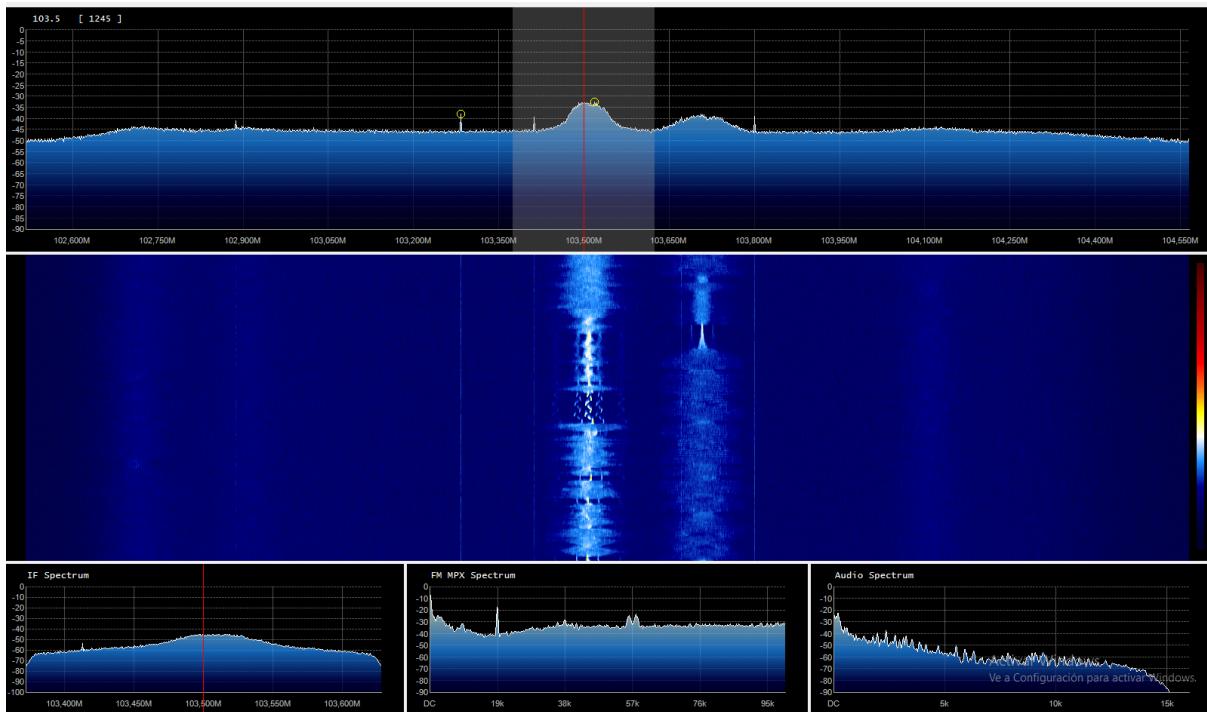


Figura 9. FM 103.5 con ganancia de 0 dB

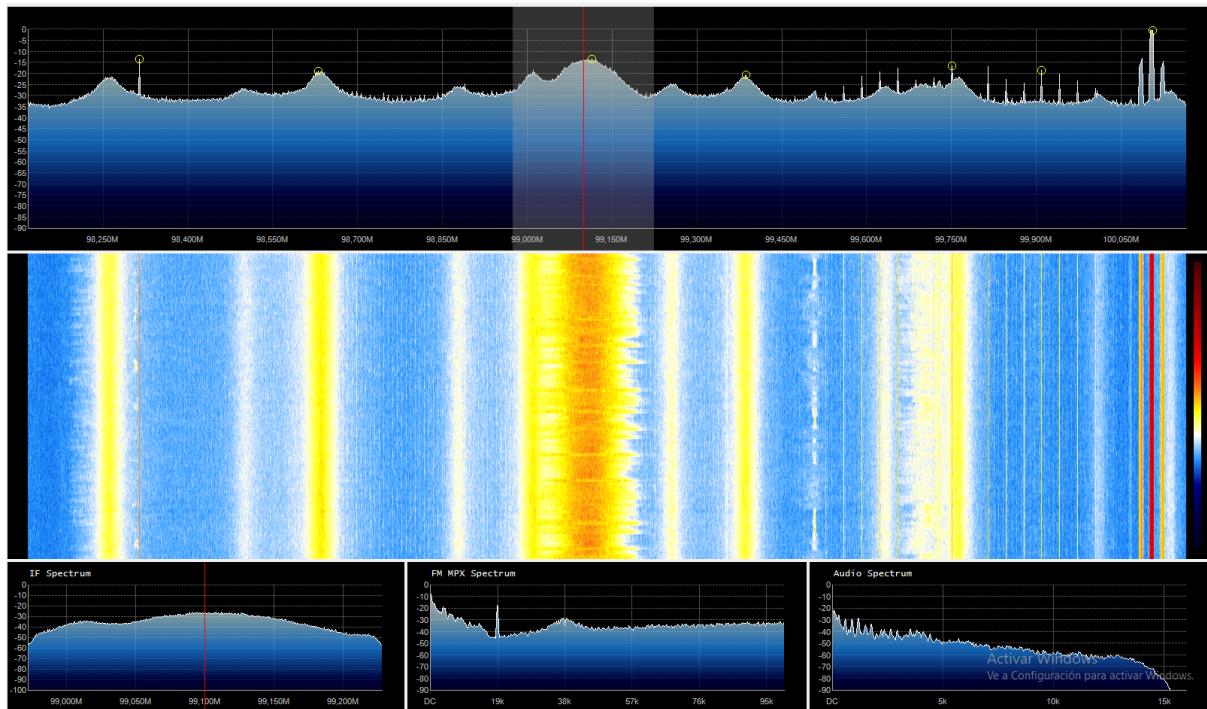


Figura 10. FM 99.1 con ganancia de 49.6 dB

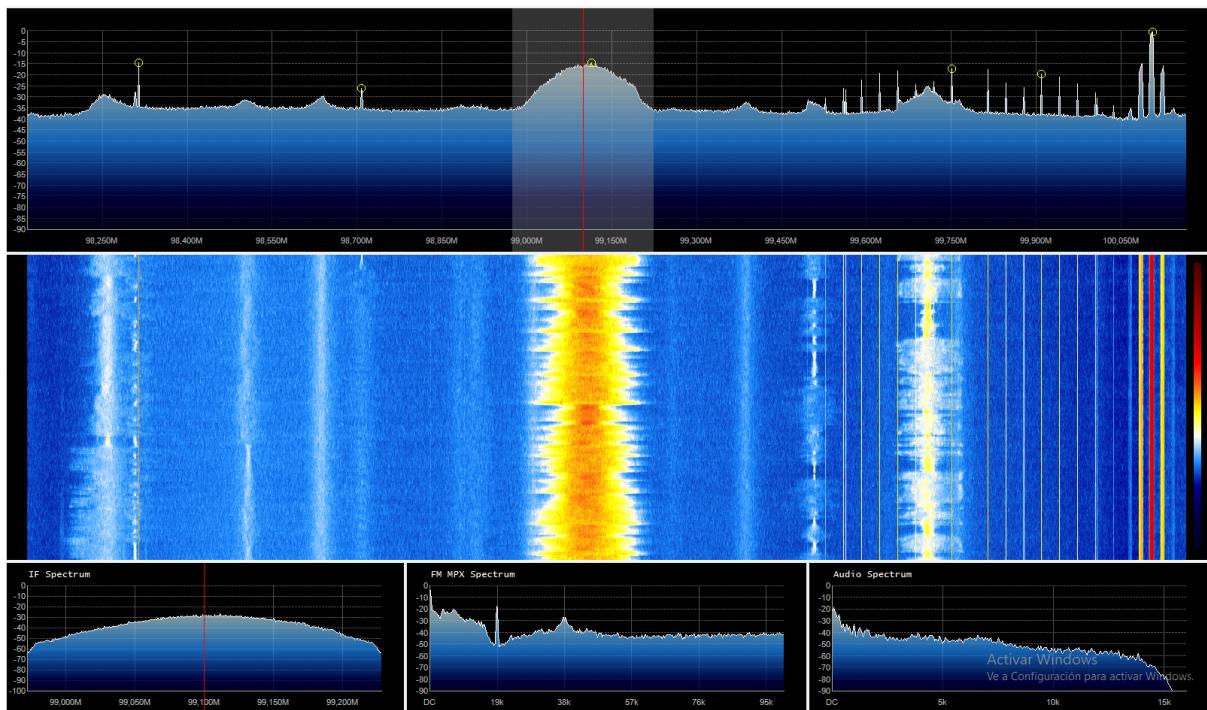


Figura 11. FM 99.1 con ganancia de 25.4 dB

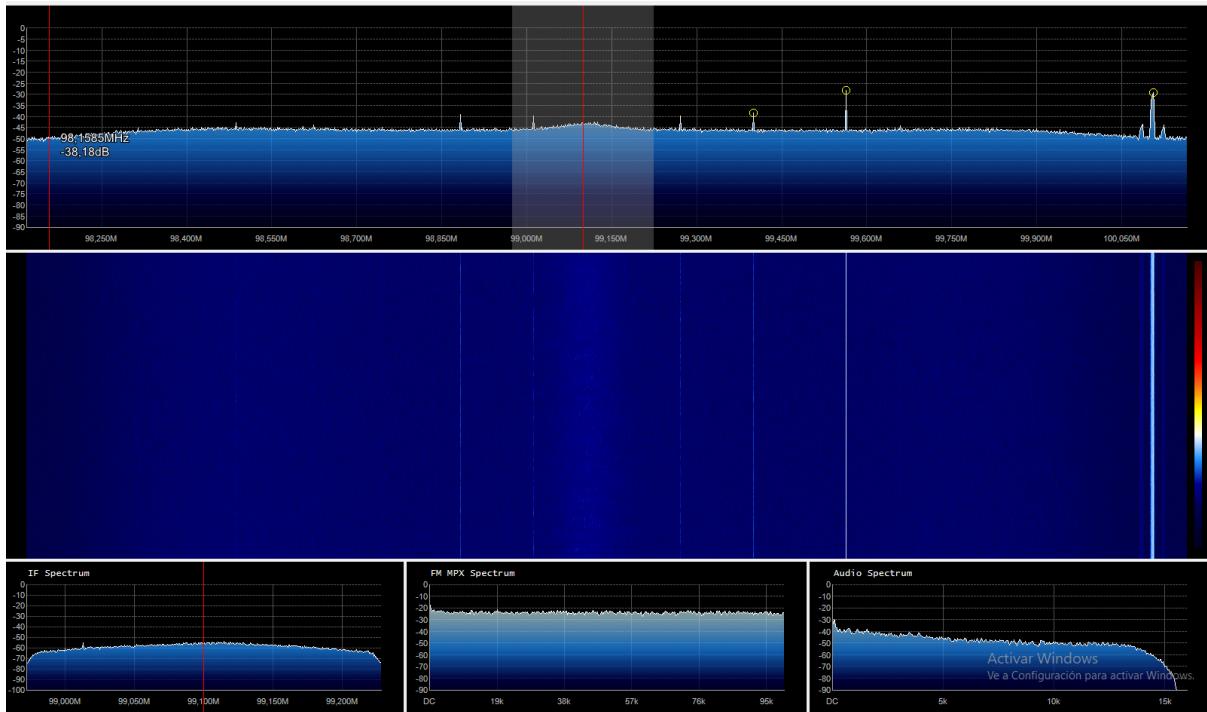


Figura 12. FM 99.1 con ganancia de 0 dB

2.2. Procesamiento Digital de Señales (SDR + Matlab)

El objetivo de esta sección es implementar un receptor de FM completo mediante software, capturando muestras I/Q crudas y realizando el filtrado, diezmado y demodulación en el dominio digital.

2.2.1. Captura y Análisis Espectral (Incisos 1, 2 y 3)

Utilizando el **Communications Toolbox** de Matlab, se configuró el receptor RTL-SDR con una frecuencia de muestreo de $f_s = 2048 \text{ MHz}$ y se sintonizó la frecuencia central en $f_c = 103.5 \text{ MHz}$. Se capturó un registro de 15 segundos de muestras complejas en banda base. Para el análisis espectral, se implementó la función **estimar_DEP** basada en el periodograma promediado, aplicando la definición teórica:

$$S_{xx}(f) \approx \frac{T}{N} |TDF(X[n])|^2$$

La Figura 13 muestra la Densidad Espectral de Potencia (DEP) de la señal capturada. Se observa el espectro de la estación de interés centrado en 0 Hz (banda base), rodeado por el piso de ruido y señales adyacentes.

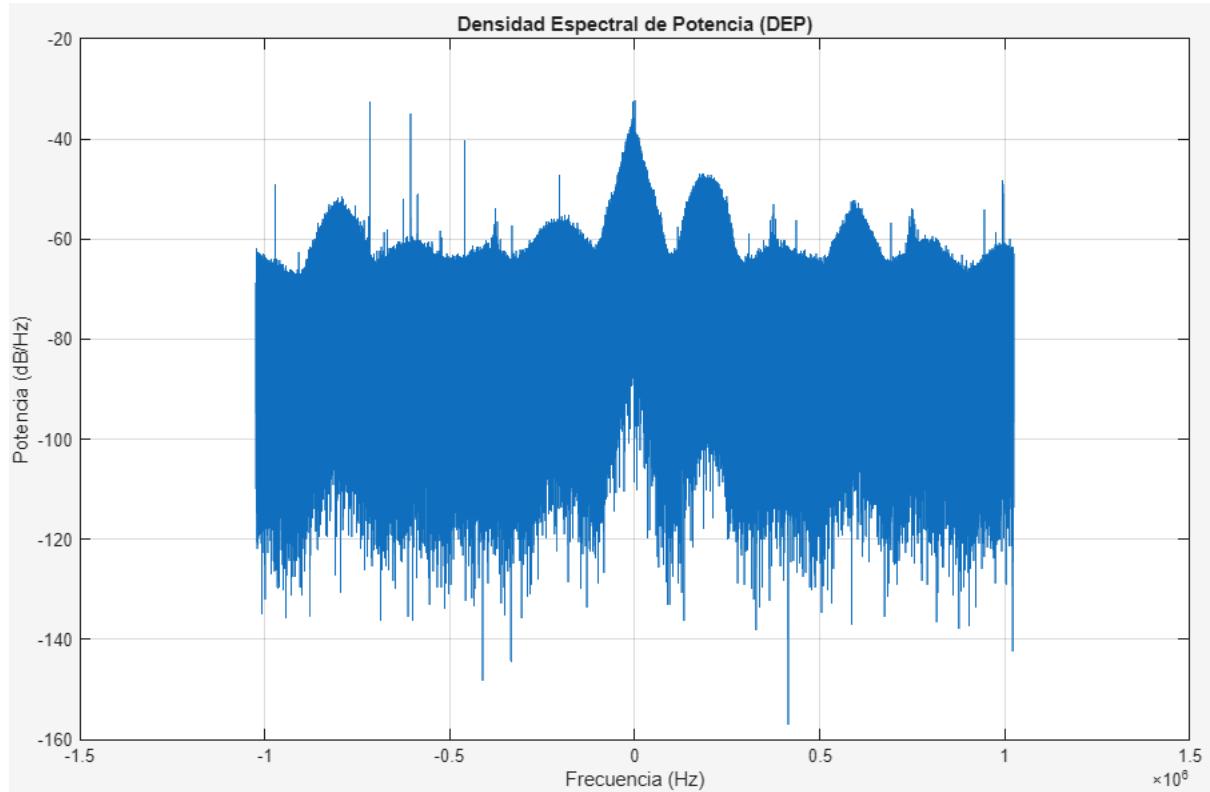


Figura 13. Espectro de la señal capturada

2.2.2. Filtrado de Selección de Canal (Inciso 4)

Para aislar la estación deseada, se diseñó un filtro digital Pasa-Bajos.

- Tipo: Butterworth (para obtener una respuesta máximamente plana en la banda de paso y no distorsionar la amplitud de la modulación).
- Orden: 5 (provee una pendiente de atenuación suficiente para rechazar canales adyacentes sin costo computacional excesivo).
- Frecuencia de Corte: Se seleccionó $f_c = 90 \text{ kHz}$. Esto resulta en un ancho de banda total de 180 kHz, coincidiendo con el ancho de banda de Carson calculado teóricamente para FM comercial.

La Figura 14 compara el espectro original con el filtrado. Se verifica la eliminación de las estaciones vecinas y la reducción significativa de la potencia de ruido fuera de la banda de interés.

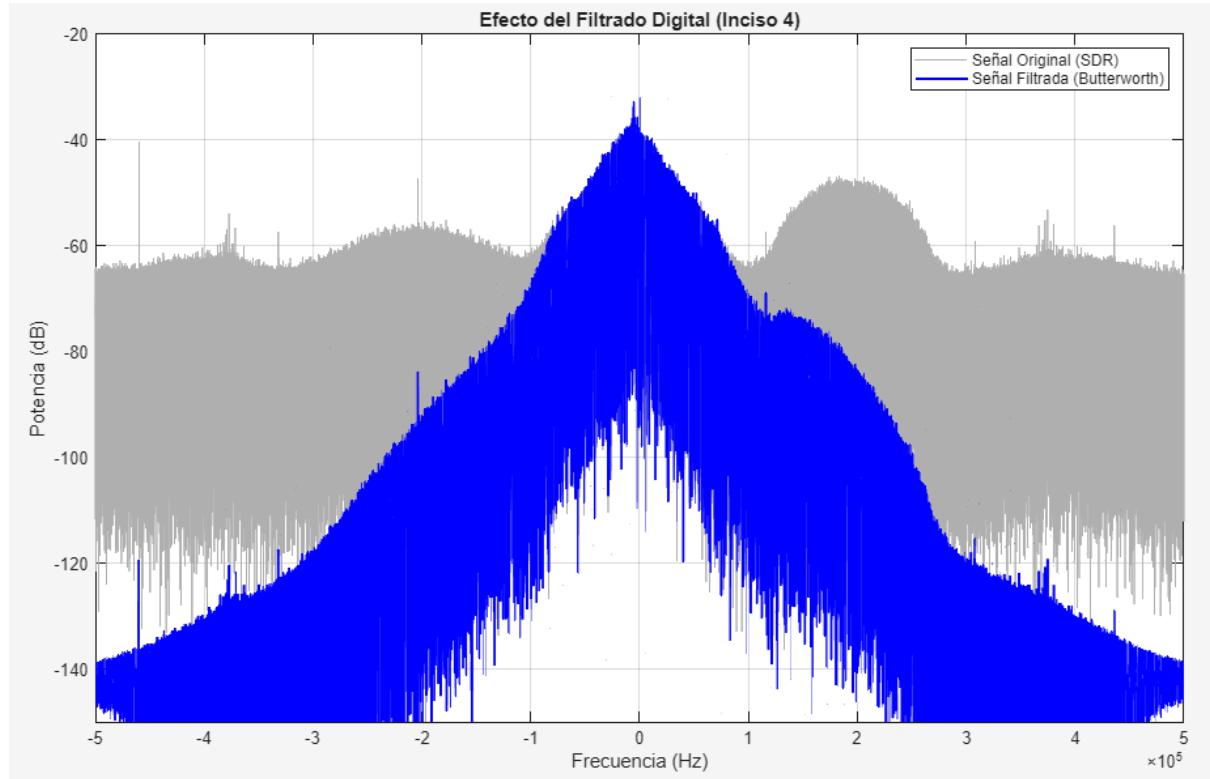


Figura 14. Espectro original con el filtrado

2.2.3. Demodulación y Recuperación del Mensaje (Inciso 5)

Se implementó la función **FM_DEMOD_RamirezTolentino** siguiendo el diagrama de bloques propuesto en la guía. El proceso consta de las siguientes etapas:

1. **Diezmado (N_1)**: Dado que la señal de interés ocupa solo $\approx 180 \text{ kHz}$, la tasa de muestreo original de 2.048 MHz es excesiva. Se aplicó un diezmado por un factor $N_1 = 8$, reduciendo la tasa a $f_{s1} = 256 \text{ kHz}$. Esto reduce la carga computacional manteniendo la información intacta (sin *aliasing*), ya que $f_{s1} > BW_{señal}$.
2. **Discriminador de Frecuencia**: Para recuperar el mensaje, se implementó un discriminador digital basado en la derivada de la fase instantánea:

$$m[n] \approx \frac{1}{2\pi} \frac{\phi[n] - \phi[n-1]}{T_s}$$

Se utilizaron las funciones **angle** para obtener la fase y **unwrap** para corregir las discontinuidades de 2π .

Al graficar el espectro de la señal a la salida del discriminador (señal MPX), se obtuvo la Figura 15, donde es posible observar la presencia de un tono en 19 kHz. Este componente es el **Tono piloto Estéreo**.

- ¿A qué se debe? Es una señal de referencia de fase y frecuencia transmitida intencionalmente por la emisora.
- ¿Para qué se utiliza? El receptor utiliza este tono para regenerar la subportadora de 38 kHz necesaria para demodular la información estéreo (señal diferencia L - R) que se encuentra desplazada en frecuencia. Sin este piloto, el receptor no podría decodificar el estéreo y sólo reproduciría el audio mono.

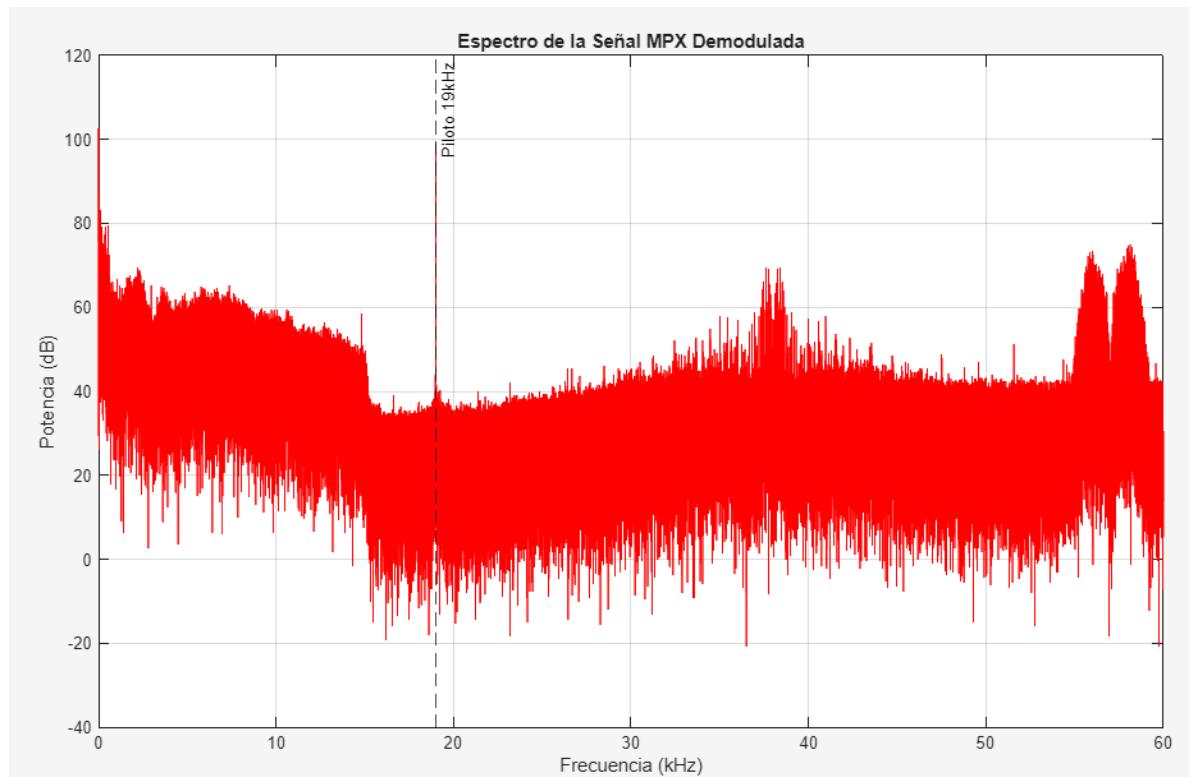


Figura 15. Espectro demodulado y pico en 19 kHz

2.2.4. Reproducción de Audio Final

Para la reproducción final, se realizó un segundo filtrado pasa-bajos con corte en 15 kHz (para eliminar el piloto y el ruido ultrasónico) y un segundo diezmado por factor $N_2 = 5$. La frecuencia final resultante es:

$$f_{audio} = \frac{256 \text{ kHz}}{5} = 51.2 \text{ kHz}$$

Esta tasa es compatible con la tarjeta de sonido de la PC estándar (típicamente 48 kHz). La señal se normalizó en amplitud para evitar saturación (clipping) y se reprodujo exitosamente mediante la función **sound**.

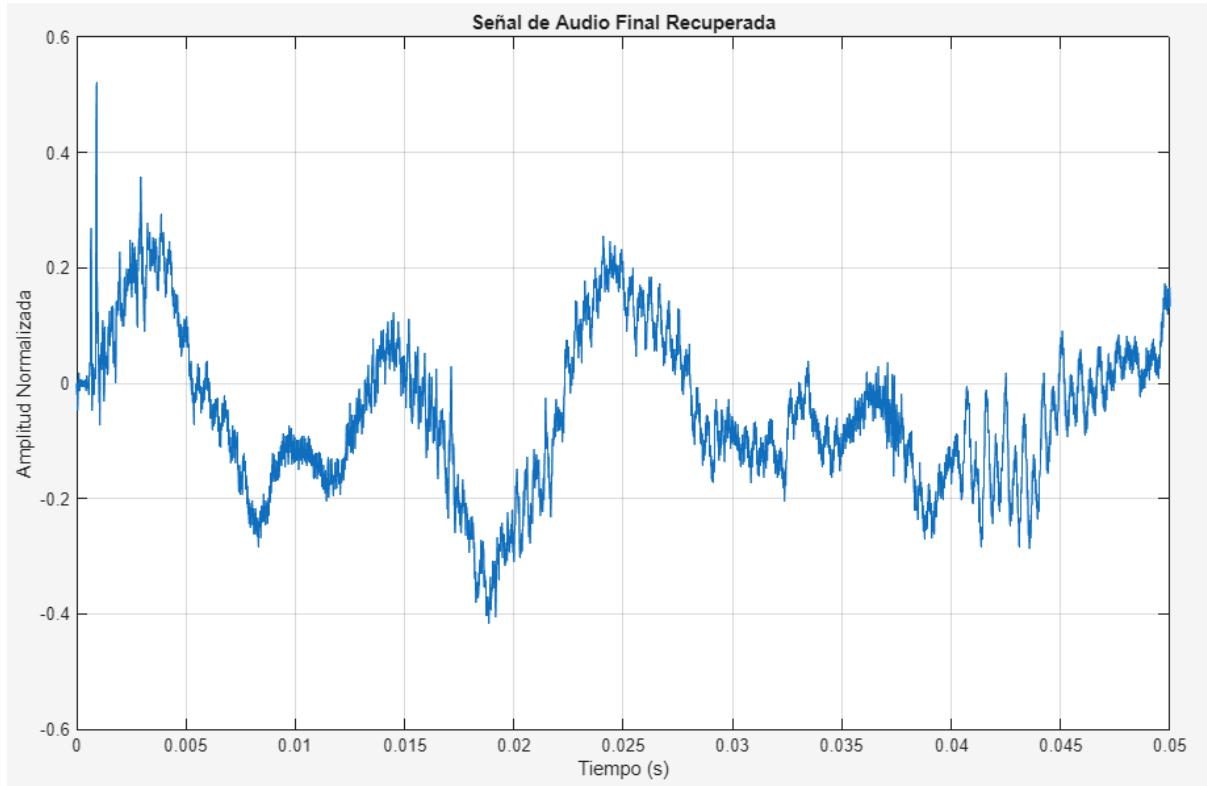


Figura 16. Señal de audio final recuperada

3. Estructura de Archivos y Guía de Ejecución

El trabajo práctico se entrega en un archivo comprimido (.zip) que contiene el informe en formato PDF y el código fuente desarrollado en MATLAB. A continuación, se detalla la función de cada archivo y el procedimiento para reproducir los resultados.

3.1 Inventario de Archivos

1. FM_DEMOD_RamirezTolentino.m

- Descripción: Función principal ("Core") del receptor. Implementa el diagrama de bloques del demodulador digital (filtrado, diezmado, discriminación y acondicionamiento de audio).
- Dependencias: Requiere el Signal Processing Toolbox (para butter, filter, decimate).

2. script_principal.m

- Descripción: Script ejecutable ("Main"). Carga los datos, define los parámetros de diseño (Criterio de Carson, tasas de muestreo), invoca a la función de demodulación y genera las gráficas y el audio final.
- Uso: Este es el archivo que debe ejecutarse para verificar los resultados.

3. estimar_DEP.m

- Descripción: Función auxiliar para el cálculo de la Densidad Espectral de Potencia (DEP) basada en el periodograma promediado, según la ecuación teórica (5) del apunte de cátedra.

4. captura_de_datos.m

- Descripción: Script utilizado para la adquisición de muestras I/Q mediante el hardware RTL-SDR. Se incluye como evidencia del procedimiento de captura.
- Nota: No es necesario ejecutarlo si ya se cuenta con el archivo de **datos_lab.mat**.

5. datos_lab.mat

- Descripción: Archivo de datos con 15 segundos de registro de la señal de RF (Radio Cielo, 103.5 MHz). Permite ejecutar el procesamiento sin necesidad de conectar el hardware.
- Nota: el archivo ya cuenta con datos cargados.

3.2 Instrucciones de ejecución

Para reproducir los resultados presentados en este informe:

1. Descomprimir la carpeta del proyecto y asegurarse de que todos los archivos **.m** y el archivo **.mat** se encuentren en el mismo directorio.
2. Abrir MATLAB y establecer dicho directorio como la carpeta de trabajo (Current Folder).
3. Abrir y ejecutar el archivo **script_principal.m**.
4. El script cargará automáticamente los datos, procesará la señal y desplegará tres figuras correspondientes al espectro de RF, espectro MPX y señal de audio en tiempo, finalizando con la reproducción del audio demodulado por los altavoces del sistema.

