

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DE POTENCIA DE UN CANAL FM PARA
EVALUAR LA PRESENCIA DE FAST O SLOW FADING**

EXAMEN COMPLEXIVO

Previo la obtención del Título de:

MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

Presentado por:

Walter David Jaramillo Vaca

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo Walter David Jaramillo Vaca acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 28 de enero del 2025.

Walter David Jaramillo Vaca

EVALUADORES

Ph.D. Francisco Novillo

PROFESOR EVALUADOR

Dr. Washington Medina

PROFESOR EVALUADOR

RESUMEN

La radio FM, está ampliamente difundido en nuestro territorio, es una alternativa con cobertura y acceso importante para la población, el uso del espectro es considerable y las radiodifusoras tienen sus limitantes a la hora de transmitir, debido a esto y diversos problemas tales como: condiciones climáticas, distancias y obstáculos entre transmisor y receptor, propagación multitrayecto, efecto Doppler, inciden en la señal original transmitida por la radiobase a medida que se acerca al receptor haciendo que esta sufra fast o slow fading que afecta el desempeño dentro de un rango de cobertura. Este trabajo analiza la presencia de fading en un canal FM, lo que nos permite brindar información a las distintas radiodifusoras para poder mitigar este efecto.

Para analizar la presencia de fast o slow fading se tomaron muestras de potencia en la ESPOL con el analizador de espectro ANRITSU modelo MS2713E, en la frecuencia de 93.7MHz, estos datos obtenidos pasaron por un código de programación en lenguaje Python que nos mostraron los resultados obtenidos de densidad de potencia, tiempo de muestreo, tiempo de coherencia y varianza para el análisis.

Se encontró que la señal tenía presencia de fast fading porque la varianza era muy alta y su tiempo de coherencia muy bajo con relación al tiempo de muestreo. Se lo puede modelar con el modelo Rayleigh.

Gracias a dichos resultados, se conoce que la señal FM es muy variante y que la presencia de fast fading es considerable, lo que nos plantea la necesidad de mitigar este efecto.

Palabras Clave: FM, Fast Fading, Densidad de Potencia, Tiempo de Muestreo, Tiempo de coherencia.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	3
RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL	II
ABREVIATURAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
CAPÍTULO 1	6
1. Introducción	6
1.1 Descripción del problema	6
1.2 Justificación del problema	7
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo General	7
1.3.2 Objetivos Específicos:	7
1.4 Marco teórico	7
1.4.1 Modulación de Frecuencia (FM)	8
1.4.2 Densidad de Potencia en Radio FM	10
1.4.3 Fading Concepto General	11
1.4.4 Fast Fading y Slow Fading en Radio FM	14
CAPÍTULO 2	16
2. Metodología	16
2.1 Cálculos matemáticos	16
CAPÍTULO 3	18
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	18
3.1 Resultados	18
3.2 Detección de Fading	20

CAPÍTULO 4	23
4. Conclusiones Y Recomendaciones	23
4.1 Conclusiones	23
4.2 Recomendaciones	23
BIBLIOGRAFÍA	24
ANEXOS	26

ABREVIATURAS

FM	Frecuencia Modulada
AM	Amplitud Modulada
Tx	Transmisor
Rx	Receptor
PSD	Power Spectral Density
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non-Line Of Sight
PDF	Probability Density Function
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Señal FM modulada	9
Figura 2.1 Formulas aplicadas	16
Figura 3.1 Potencia de la señal en función de la frecuencia.....	18
Figura 3.2 Potencia suavizada, distribución de la densidad de potencia	19
Figura 3.3 Función densidad de probabilidad de la potencia de la señal FM.....	21
Figura 3.4 Distribución Rayleigh de la potencia de la señal	22

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La radio FM, es un medio de comunicación ampliamente difundido en nuestro territorio, muchas veces por la zona geográfica y la facilidad para adquirir un dispositivo receptor o radio, es una alternativa con cobertura y acceso importante para la población. En nuestro país el 54.51% de los medios de comunicación son de radio de los cuales el 89% se escuchan en FM.[1]

Por ser una modulación analógica (FM) el uso del espectro es considerable y las radiodifusoras sonoras tienen sus limitantes a la hora de transmitir ya que prácticamente el receptor con el transmisor deben tener línea de vista; problemas comunes del medio como: condiciones climáticas, distancias y obstáculos entre transmisor y receptor, propagación multirrayecto, movimiento del receptor en relación a la estación base (Efecto Doppler), afectan la densidad de potencia en el lugar donde se puede encontrar un dispositivo provocando fast o slow fading siendo un desafío para las radiodifusoras asegurar una buena calidad de servicio con una buena optimización del ancho de banda.[2]

Es importante detectar la presencia del fast o slow fading para su análisis, debido a que nos va a dar una idea de las condiciones antes mencionadas en el medio elegido (zona urbano-rural), lo cual nos puede permitir corregir las variables que podemos controlar, y anticiparnos a diversos fenómenos meteorológicos dependiendo de las mediciones obtenidas.

La nueva tecnología de radiodifusión sonora digital que aún no está ampliamente difundida nos permitirá reducir el ancho de banda para transmitir, lo cual nos brindará un reuso más eficiente del canal de frecuencia ya que cada uno mejorará su calidad y permitirá transmitir más información en una menor porción del espectro; esta situación nos hace proyectar en cómo aprovechar la porción disponible luego de una posible actualización hacia la era digital.

1.2 Justificación del problema

Debido a su naturaleza analógica, un canal FM requiere un mayor ancho de banda para transmitir [2]; a esto hay que sumarle la naturaleza multitrayecto propia del canal de propagación. Estos factores combinados inciden en la señal original transmitida por la estación base a medida que se acerca al receptor haciendo que esta sufra fast o slow fading lo que afecta el desempeño dentro de un rango de cobertura.

Las radiodifusoras transmiten contenido como música, el cual debe ser fiel en su receptor para poder apreciar el contenido, debido a esto se debe asegurar una calidad de servicio mínima para que la experiencia del usuario en su dispositivo receptor sea óptima. Este estudio busca analizar el efecto Fading de la señal recibida y qué factores afectan más para que esto ocurra, lo cual puede servir para que las radiodifusoras mejoren su infraestructura y puedan asegurar mejor cobertura o también que esta información les permita el despliegue óptimo de nuevas redes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Medir y analizar la densidad de potencia de un canal FM en un entorno urbano-rural dentro de la ESPOL para evaluar la presencia de fast o slow fading

1.3.2 Objetivos Específicos:

1. Medir el canal FM, y calcular el tiempo de muestreo y tiempo de coherencia
2. Determinar el comportamiento estadístico de la densidad de potencia y graficarla usando la media y varianza de las señales medidas
3. Evaluar el tipo de fading presente (fast o slow fading) en el canal FM, analizando las variaciones en la señal a lo largo del tiempo y su impacto en la calidad del servicio.

1.4 Marco teórico

Para este análisis se abarcarán conceptos sobre la propagación de señales, fading, modelos de propagación, y cómo la densidad de potencia se utiliza para identificar y analizar estos fenómenos en un canal FM, también se incluirá concepto básico de FM.

1.4.1 Modulación de Frecuencia (FM)

La modulación de frecuencia (FM) es una técnica de modulación angular ampliamente utilizada en sistemas de telecomunicaciones debido a su capacidad para transmitir señales de alta calidad y resistencia al ruido. En FM, la información se codifica variando la frecuencia instantánea de una portadora sinusoidal en función de la señal moduladora [3].

En la modulación FM, la señal modulada $s(t)$ está definida por:

$$s(t) = A_c \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right) \quad (1.1)$$

donde:

- A_c es la amplitud de la portadora.
- f_c es la frecuencia de la portadora.
- k_f es la sensibilidad de frecuencia.
- $m(\tau)$ es la señal moduladora [4].

El índice de modulación (β) en FM se define como:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} \quad (1.2)$$

donde Δf es la desviación máxima de la frecuencia y f_m es la frecuencia máxima de la señal moduladora. Según el criterio de Carson, el ancho de banda de una señal FM está estimado por:

$$BW \approx 2(\Delta f + f_m) \quad (1.3)$$

lo que proporciona una estimación práctica del espectro ocupado por la señal [5].

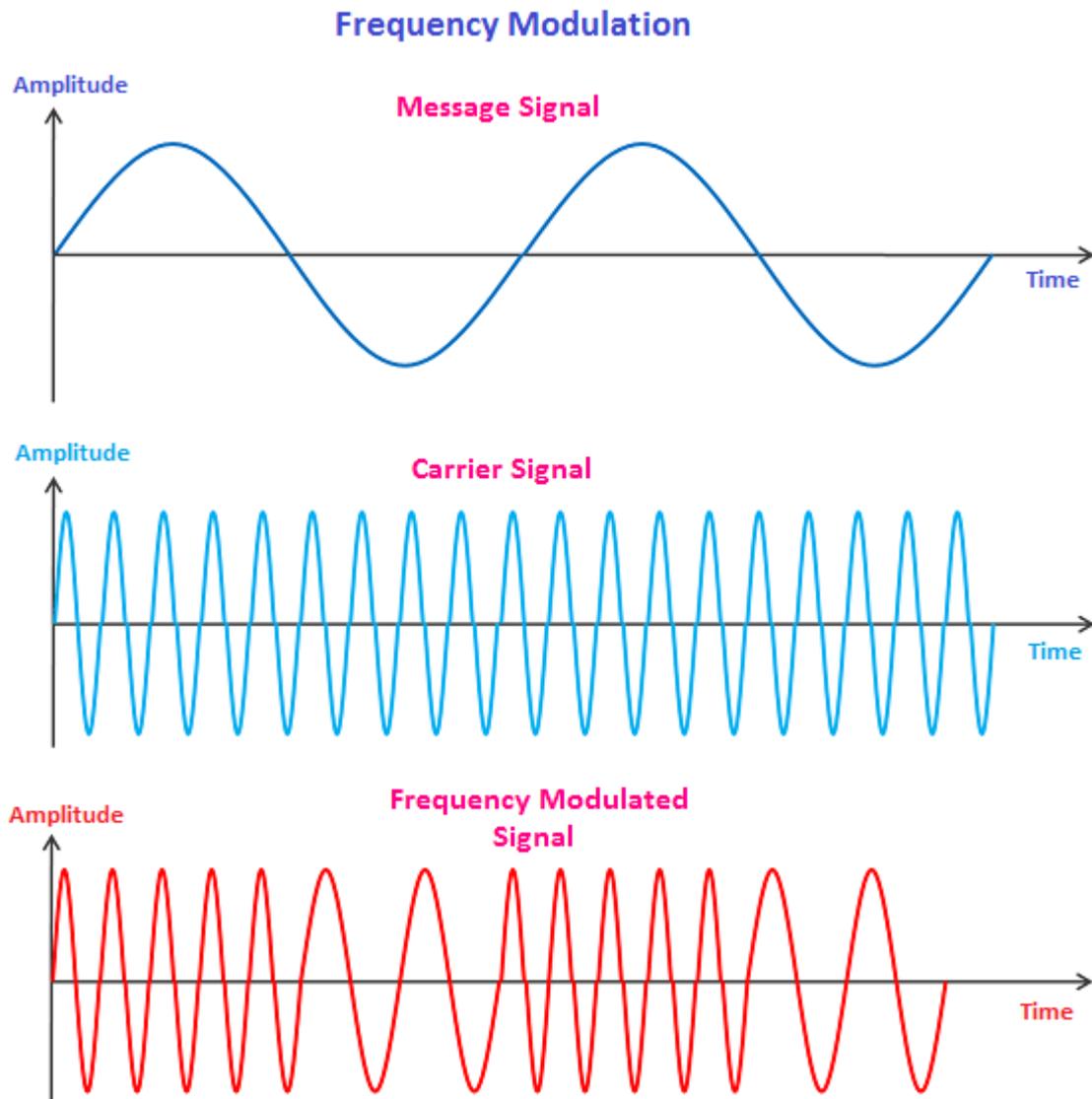


Figura 1.1 Señal FM modulada [6]

En la figura 1.1 podemos apreciar la señal a modular, la señal de la portadora y la señal modulada en frecuencia.

- **Ventajas de FM**

1. Mayor inmunidad al ruido: En comparación con la modulación de amplitud (AM), la FM es menos sensible al ruido, ya que este afecta principalmente la amplitud de la señal y no su frecuencia [7], en la figura 1.1 se puede ver como la frecuencia en la portadora cambia a razón de la señal mensaje.

2. Calidad de audio mejorada: FM se utiliza ampliamente en radiodifusión por su capacidad de transmitir señales con una mejor relación señal/ruido.
3. Resistencia a la distorsión: La no linealidad de los sistemas de transmisión afecta menos a las señales FM en comparación con AM [8].

- **Aplicaciones de FM**

- Radiodifusión FM: En sistemas de radio, en Ecuador se utilizan bandas de frecuencia entre 88 MHz y 108 MHz con un ancho de banda máximo de 220kHz [9].
- Comunicaciones móviles: La modulación FM se emplea en sistemas de radio móvil analógico, como en walkie-talkies y redes de radio de dos vías.
- Telemetría: En sistemas de telemetría, la FM se utiliza para transmitir datos desde sensores remotos [10].

- **Desventajas de FM**

- Mayor ancho de banda requerido: En comparación con AM, la FM requiere un espectro más amplio, lo que puede ser un desafío en canales congestionados [11].
- Complejidad del diseño del transmisor y receptor: Los circuitos de FM son más complicados y requieren osciladores y detectores específicos.

1.4.2 Densidad de Potencia en Radio FM

La densidad de potencia se define como la cantidad de potencia distribuida a lo largo de un espectro de frecuencia específico. En el contexto de la radio FM, se refiere a la distribución espectral de potencia de una señal modulada en frecuencia. La comprensión de la densidad de potencia es esencial para el análisis del desvanecimiento en los sistemas de comunicación [3]

La densidad de potencia espectral (PSD, por sus siglas en inglés) de la señal FM no tiene una expresión cerrada simple, pero puede aproximarse analizando los armónicos producidos en la modulación. La PSD se concentra alrededor de la frecuencia portadora

y sus bandas laterales, con una distribución influenciada por el índice de modulación y el ancho de banda [5].

La potencia de la señal se distribuye en estas bandas laterales, y su densidad varía según el contenido de la señal moduladora [7]. En sistemas de radiodifusión FM, el índice de modulación suele ser alto $\beta > 1$, lo que resulta en una mayor densidad espectral cerca de la portadora y una disminución gradual hacia las bandas laterales más alejadas.

La densidad de potencia es una herramienta clave para evaluar el impacto de fading, ya que describe cómo se distribuye la potencia de la señal en el espectro de frecuencia y espacio. En un sistema afectado por fading:

- El fast fading genera fluctuaciones rápidas en la densidad de potencia a frecuencias específicas.
- El slow fading afecta la densidad de potencia en un rango más amplio, reduciendo la potencia promedio en el tiempo y el espacio [8].

1.4.3 Fading Concepto General

El fading se refiere a las fluctuaciones en la amplitud, fase o potencia de una señal recibida debido a la interferencia constructiva y destructiva entre múltiples trayectorias (propagación multitrayecto) o la variación de las condiciones ambientales [12].

Las dos principales categorías de fading son:

1. Fast Fading: Variaciones rápidas de la señal en escalas temporales o espaciales pequeñas.
2. Slow Fading: Variaciones lentas causadas por cambios graduales en el entorno o la topología del canal [13].

Fast Fading

El fast fading es un fenómeno que ocurre debido a la interferencia multitrayecto, donde múltiples copias de la señal llegan al receptor a través de diferentes trayectorias, con retrasos y fases distintas. Esto produce fluctuaciones rápidas en la amplitud y fase de la señal recibida [5].

Características Principales de Fast Fading:

1. **Escalas Temporales:** Ocurre en escalas pequeñas, típicamente menores que el período de coherencia del canal.
2. **Efecto Doppler:** Está influenciado por el movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, generando un ensanchamiento espectral Doppler, definido por:

$$f_D = \frac{v}{c} f_c \quad (1.4)$$

donde v es la velocidad relativa entre transmisor y receptor, c es la velocidad de la luz y f_c es la frecuencia de la portadora [14].

3. **Ancho de Banda de Coherencia (β_c):** Determina la extensión frecuencial en la que las variaciones del canal son altamente correlacionadas. Si el ancho de banda de la señal es mayor que β_c , la señal experimenta fading selectivo en frecuencia [15].

Modelos de Fast Fading

Los modelos matemáticos utilizados para describir el fast fading se basan en distribuciones estadísticas que representan las características de la señal recibida en presencia de propagación multitrayecto. Los modelos más utilizados son:

Modelo de Rayleigh

El modelo de Rayleigh describe la distribución estadística de la amplitud de la señal recibida en un canal de fast fading en ausencia de una línea de vista directa entre el transmisor y el receptor.

Suposiciones Clave del Modelo de Rayleigh:

- Multitrayecto NLOS: No existe una trayectoria dominante (línea de vista).
- Suma de Componentes Aleatorios: La señal recibida es la suma de múltiples componentes reflejados, cada uno con amplitudes independientes y distribuciones Gaussianas en cuadratura.

En sistemas de radio FM, el modelo de Rayleigh es adecuado para evaluar el comportamiento de las señales en entornos urbanos y suburbanos, donde las

obstrucciones (edificios, árboles, etc.) hacen que la propagación ocurra principalmente por multitrayecto.

Modelo de Rician

El modelo de Rician describe la amplitud de la señal recibida en un canal de comunicación en el que coexisten un componente directo o dominante (LOS) y múltiples componentes dispersos (NLOS). Este modelo es adecuado para entornos como áreas semiurbanas, zonas rurales o escenarios donde hay una trayectoria directa parcialmente obstruida, como transmisiones de radio FM en presencia de colinas o edificios [12].

Características Principales:

1. Presencia de LOS: A diferencia del modelo de Rayleigh, el modelo de Rician asume que existe un componente directo significativo.
2. Componentes Multitrayecto: Además de la trayectoria directa, la señal también se refleja y refracta en el entorno, generando múltiples componentes con diferentes retardos y desplazamientos de fase.
4. Factor K: El parámetro K cuantifica la relación entre la potencia del componente LOS y la potencia promedio de los componentes dispersos:

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \tag{1.5}$$

Donde A es la amplitud del componente LOS y σ^2 la varianza de los componentes dispersos; un valor alto de K indica un componente LOS dominante, mientras que un valor bajo de K se aproxima al modelo de Rayleigh [15].

En la modulación en frecuencia (FM), el modelo de Rician es aplicable en escenarios donde las transmisiones se realizan en entornos con obstáculos moderados o donde el receptor está en movimiento.

Slow Fading

El slow fading, también conocido como desvanecimiento por sombra (shadow fading), ocurre debido a obstrucciones físicas grandes, como edificios, colinas o árboles, que atenúan la señal de manera gradual [14].

Características Principales:

1. Escalas Temporales: Las variaciones ocurren en escalas largas, típicamente mayores que el tiempo de coherencia del canal.
2. Pérdida por Trayectoria: Se rige por la fórmula de pérdida en espacio libre:

$$P_r = \frac{1}{d^n} \quad (1.6)$$

donde d es la distancia entre el transmisor y el receptor, y n es el factor de pérdida (típicamente entre 2 y 4 en ambientes urbanos) [7].

Modelo de Slow Fading

El desvanecimiento lento se modela comúnmente mediante una distribución log-normal, que describe las variaciones en la potencia de la señal recibida en función de la atenuación promedio causada por los obstáculos:

$$P_r(d) = P_0 - 10n \log(d) + X_\sigma \quad (1.7)$$

donde:

- $P_r(d)$: Potencia recibida a una distancia d .
- P_0 : Potencia recibida de referencia a una distancia d_0 .
- n : Exponente de pérdida de trayectoria.
- X_σ : Variable aleatoria log-normal que representa la atenuación por sombra, con desviación estándar σ [4].

1.4.4 Fast Fading y Slow Fading en Radio FM

El análisis de fast fading y slow fading en sistemas de radio FM es crucial para garantizar la calidad de transmisión en entornos variables. Estos fenómenos están asociados con la propagación de señales en entornos con obstáculos y reflejos, lo que afecta la densidad de potencia recibida en diferentes puntos del espacio. La densidad de potencia proporciona una base matemática y experimental para evaluar las variaciones rápidas o lentas de la señal en un canal de comunicación [4].

En frecuencias FM (88-108 MHz), donde la longitud de onda es relativamente grande, el fenómeno de multitrayecto es significativo, especialmente en áreas urbanas y suburbanas, donde predominan las obstrucciones físicas [13].

En sistemas de radio FM, el análisis de fading se lleva a cabo mediante:

1. Medición de la densidad de potencia recibida:
 - En fast fading, la potencia presenta fluctuaciones rápidas alrededor de un valor promedio, con variaciones que dependen del ancho de banda de coherencia B_c y la velocidad del receptor.
 - En slow fading, las mediciones muestran atenuaciones sostenidas a lo largo de períodos de tiempo más largos debido a la pérdida de trayectoria y obstrucciones [15].

2. Caracterización del espectro de potencia Doppler: El efecto Doppler, especialmente en fast fading, provoca un ensanchamiento espectral caracterizado por el desplazamiento Doppler máximo dado por la fórmula (1-4).

3. Relación señal/ruido (SNR) en entornos con fading: La SNR disminuye significativamente en presencia de fading, afectando la calidad de transmisión. Los sistemas de radio FM se benefician de la inmunidad intrínseca al ruido, pero el fading puede reducir la efectividad de esta ventaja [10].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se aplica metodología de enfoque cuantitativo y experimental, que permite evaluar las variables de densidad de potencia en la frecuencia de 93.7MHz (Radio Disney) durante un lapso de 4 horas, estas mediciones fueron obtenidas de manera detallada utilizando el analizador de espectro ANRITSU modelo MS2713E (ver anexo a) dentro de la ESPOL, un escenario urbano-rural.

La captura de estos datos fue realizada siguiendo los lineamientos establecidos por la ARCOTEL que regula el uso de bandas de frecuencia donde se incluye la frecuencia evaluada de 93.7MHz, asegurando que las mediciones se ajusten a los estándares técnicos y normativos requeridos.

2.1 Cálculos matemáticos

Los datos obtenidos son analizados mediante cálculos matemáticos para obtener densidad de frecuencia y la varianza de las diferentes muestras para analizar la estabilidad de la señal a lo largo del tiempo. Dichos cálculos están basados en las siguientes fórmulas de máxima frecuencia Doppler y tiempo de coherencia:

$$f_m = \max v_1 = v_0/\lambda \quad (5.41)$$

$$T_c = \frac{1}{f_m} \quad \text{or} \quad T_c = \frac{9}{16\pi f_m} \quad \text{or} \quad T_c = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m}} = \frac{0.423}{f_m} \quad (5.43)$$

Figura 2.1 Fórmulas aplicadas [16]

Donde f_m es la máxima frecuencia Doppler, v_0 es la velocidad del móvil y λ es la longitud de onda en la frecuencia evaluada.

Para medir a tasa de cambio del canal inalámbrico es a través del tiempo de coherencia obtenido de las fórmulas 5.43 en la figura 2.1, con estos resultados se evalúa si el canal es fast fading ($T_c \ll T_s$) o slow fading ($T_c \gg T_s$).

Se utilizó Python, para facilitar los cálculos matemáticos y visualización de las mediciones obtenidas, donde podemos destacar las siguientes funciones:

- a)** Carga de Datos: La función *load_data* se encarga de leer un archivo CSV y extraer las columnas de frecuencia y potencia. Devuelve estos datos como arrays de NumPy. En este caso, se espera que el archivo contenga columnas tituladas "Frecuencia" y "Potencia".
- b)** Obtención de Parámetros de Frecuencia: La función *get_frequency_parameters* devuelve la frecuencia y el nombre de la señal según el tipo de señal especificado (FM, TV o GSM). Si se proporciona un tipo de señal no válido, se lanza una excepción *ValueError*.
- c)** Cálculo del Tiempo de Coherencia: La función *calculate_coherence_time* calcula el tiempo de coherencia utilizando tres métodos diferentes basados en la frecuencia Doppler máxima (f_m), que se calcula en la función *main*.
- d)** Análisis del Tipo de Desvanecimiento: La función *analyze_fading* determina si el canal presenta un desvanecimiento rápido o lento comparando el tiempo de coherencia (T_c) con el tiempo de muestreo (T_s).
- e)** Cálculo de Estadísticas de Potencia: La función *calculate_power_density* calcula la potencia media y la varianza de las muestras de potencia
- f)** Visualización de Resultados: La función *plot_results* genera un gráfico que muestra la potencia de la señal en función de la frecuencia, incluyendo una línea que indica la potencia media. Este gráfico se guarda como una imagen PNG.
- g)** Ejecución del Análisis: La función *main* orquesta todo el proceso: carga los datos, calcula el tiempo de muestreo, obtiene los parámetros de frecuencia según el tipo de señal, calcula la frecuencia Doppler máxima, calcula el tiempo de coherencia, analiza el tipo de desvanecimiento, calcula las estadísticas de potencia y finalmente grafica los resultados

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados

Señal FM en 93.70MHz

- Tiempo de coherencia (Método 1): 0.192102 s
- Tiempo de coherencia (Método 2): 0.034396 s
- Tiempo de coherencia (Método 3): 0.081259 s

Se determinó que es de tipo Fast Fading

$T_c=0.081259s$, $T_s=3030.303030s$

Análisis de Potencia:

Potencia Promedio: -69.89dBm

Varianza: 183.17

Al tener una varianza alta, se traduce a que la señal tiene altas fluctuaciones que se pueden apreciar en la siguiente figura:

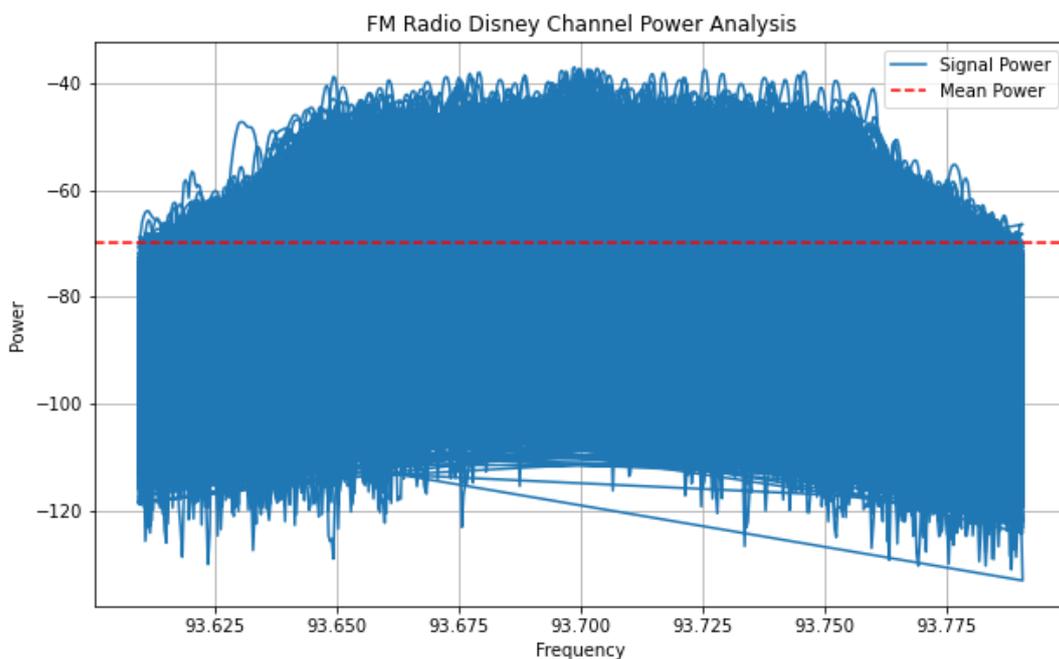


Figura 3.1 Potencia de la señal en dBm en función de la frecuencia en MHz

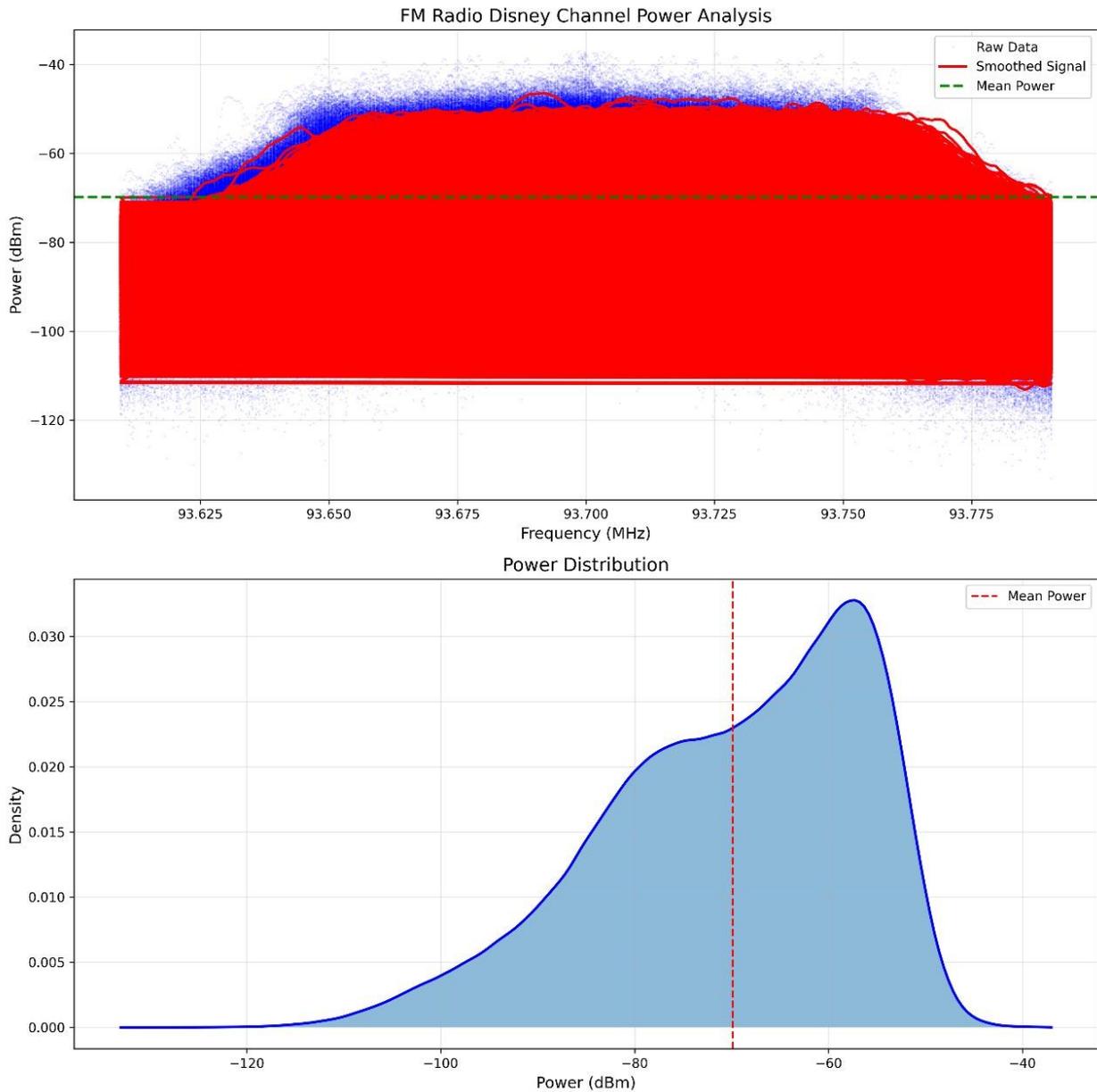


Figura 3.2 Potencia suavizada, distribución de la densidad de potencia

En la figura 3.1 podemos observar que la señal fluctúa mucho en todas sus frecuencias, esto se debe a que la varianza es muy elevada 183.17. También se aprecia que la potencia es más alta en su frecuencia portadora, y que a medida que esta frecuencia se aleja pierde bastante amplitud haciendo que la potencia promedio sea de aproximadamente -70dBm, esto se esperaba ya que la señal es FM; también podemos apreciar que la potencia varía bastante dentro de la misma frecuencia durante el tiempo destinado a la obtención de datos lo que nos indica la presencia de fading. Se puede

visualizar que en la figura 3.2 arriba la mayor parte de la potencia se concentra en su frecuencia portadora donde está el mensaje transmitido y en sus extremos la señal es menor, esto se debe a que, dentro del ancho de banda destinado para la transmisión de dicha radiodifusora, se debe dejar un margen en sus extremos con menor potencia transmitida o nula, para evitar las interferencias con la otra radiodifusora, dicha pérdida de potencia hace que la potencia promedio disminuya.

En la figura 3.2 abajo observamos que la potencia tiene más densidad cuando esta es recibida comuna potencia -65dBm aproximadamente, que es donde el mensaje se encuentra en la frecuencia portadora 93.7MHz .

3.2 Detección de Fading

Debido a que se encontró variaciones de la potencia y su densidad de potencia, podemos detectar la presencia de fading; como la señal FM es analógica su tiempo de muestreo es muy elevado $T_s=3030.303030\text{s}$, ya que es una señal continua, en comparación al tiempo de coherencia $T_c=0.081259\text{s}$, tenemos un $T_c \ll T_s$, lo que nos indica que estas variaciones de potencia se presentaron muy rápido en cuestión de milisegundos. Esto nos indica que el tipo de fading para este caso es fast fading.

Al evaluar la función densidad de probabilidad en la potencia de la señal FM, podemos obtener la siguiente figura:

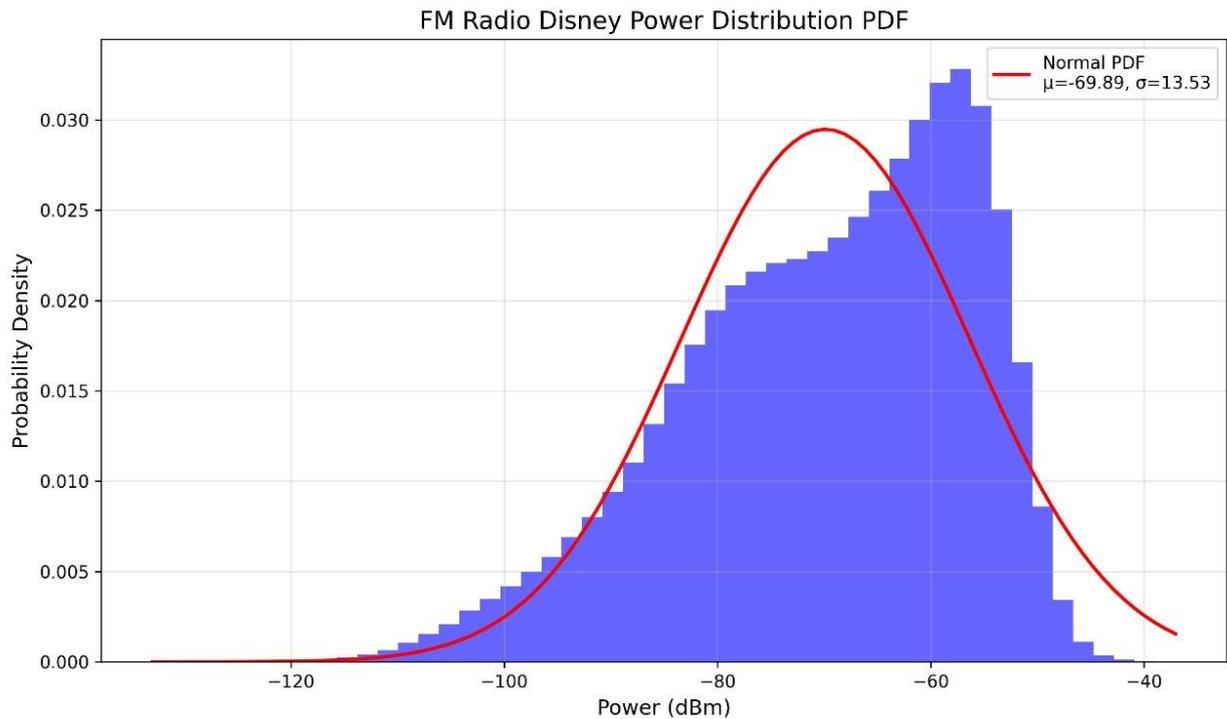


Figura 3.3 Función densidad de probabilidad de la potencia de la señal FM

Se puede apreciar que la forma de distribución de la probabilidad de potencia sigue una subida un poco brusca cuando llega a los -70dBm que es la potencia media de la señal, esta tiene un máximo alrededor de -60dBm y se extingue por los -40dBm, dibujando una forma parecida al modelo de distribución de potencia Rayleigh, por lo que podemos asumir que la señal tiene fast fading que sigue el modelo Rayleigh que se muestra en la siguiente figura.

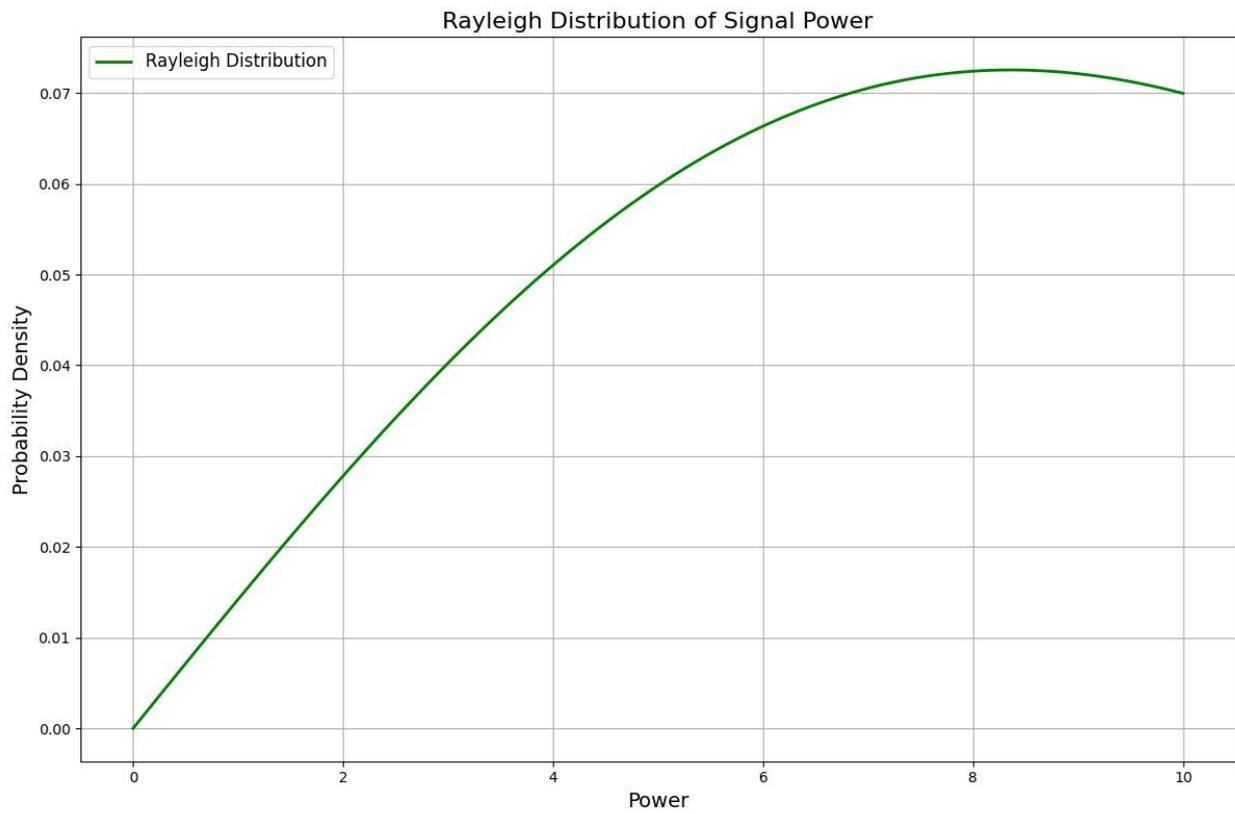


Figura 3.4 Distribución Rayleigh de la potencia de la señal

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La potencia recibida es alta -69.89dBm cerca de la frecuencia portadora FM y se debilita a medida que se acerca a los extremos de su ancho de banda. Esto se debe a que el mensaje se encuentra distribuido a lo largo del ancho de banda considerando una porción en sus extremos donde no se transmite, para evitar la interferencia cocanal.
- Al tener una varianza elevada de 183.17 nos encontramos con una alta fluctuación en los valores de potencia en la señal, lo que nos indica la presencia de Fading, esto pudo deberse a la calidad del instrumento de medición y a que la frecuencia analizada es muy baja.
- Se obtuvo un tiempo de muestreo muy alto 3030.303030s, esto se debe a la naturaleza propia de la señal analógica ya que es continua.
- Su tiempo de coherencia es de 0.081259s lo que significa que las variaciones de la amplitud de la señal son muy rápidas en relación con el tiempo de muestreo, gracias a esto podemos intuir que la señal presenta fast fading
- La forma de la distribución de la probabilidad de potencia se asemeja mucho a la del modelo de Rayleigh, por lo que, para este caso, aplica este modelo de fast fading.

4.2 Recomendaciones

- Al tener una varianza muy alta se debe considerar técnicas de diversidad para poder mitigar este efecto.
- Para un futuro análisis se recomienda tomar las mediciones con otro equipo capaz de receptar mejor estando en movimiento, ya que la radio FM se escucha muchas veces en vehículos en movimiento.
- Realizar más mediciones en otras frecuencias, para poder comparar los diferentes comportamientos con frecuencias más altas y bajas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Las radios del Ecuador en la era digital – Diario La Hora”. Consultado: el 19 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.lahora.com.ec/tungurahua/las-radios-del-ecuador-en-la-era-digital/>
- [2] K. A. Norton, “Propagation in the FM Broadcast Band”, *Advances in Electronics and Electron Physics*, vol. 1, núm. C, pp. 381–423, ene. 1948, doi: 10.1016/S0065-2539(08)61108-7.
- [3] J. R. Barry, E. A. Lee, y D. G. Messerschmitt, “Digital Communication: Third Edition”, 2003, Consultado: el 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.amazon.com/exec/obidos/redirect?tag=citeulike07-20&path=ASIN/0792375483>
- [4] S. S. . Haykin y Michael. Moher, “Communication systems”, p. 422, 2009, Consultado: el 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-au/Communication+Systems%2C+5th+Edition-p-9780471697909>
- [5] J. G. . Proakis y Masoud. Salehi, “Fundamentals of communication systems”, p. 923, 2014.
- [6] “¿Qué significa la modulación de frecuencia (FM)? -News-FMUSER FM / TV Broadcast One-Stop Supplier”. Consultado: el 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.fmuser.net/content/?2119.html>
- [7] Herbert. Taub y D. L. . Schilling, “Principles of communication systems”, p. 759, 1986, Consultado: el 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com/books/about/Principles_of_Communication_Systems.html?hl=es&id=leFSAAAAMAAJ
- [8] B. Lathi Zhi Ding, “Modern Digital and Analog Communication Systems”, 1983, Consultado: el 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: www.oup.com
- [9] “NORMA TÉCNICA PARA EL SERVICIO DE RADIODIFUSIÓN SONORA EN FRECUENCIA MODULADA ANALÓGICA”.
- [10] Wayne. Tomasi, “Advanced electronic communications systems”, p. 654, 2004.
- [11] R. E. . Ziemer y W. H. . Tranter, “Principles of communication : systems, modulation, and noise”, p. 734, 2015, Consultado: el 20 de enero de 2025. [En

- línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-br/Principles+of+Communications%2C+7th+Edition-p-9781118078914>
- [12] T. S. Rappaport, *Wireless communications: Principles and practice*. Prentice Hall, 2002. Consultado: el 23 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://nyuscholars.nyu.edu/en/publications/wireless-communications-principles-and-practice-3>
- [13] A. Goldsmith, “Wireless Communications”, *Wireless Communications*, vol. 9780521837163, pp. 1–644, ene. 2005, doi: 10.1017/CBO9780511841224.
- [14] S. ; Saunders y A. Zavala, “Antenna and Propagation for Wireless Communication Systems”, 2007.
- [15] D. Tse y P. Viswanath, “Fundamentals of Wireless Communication 1”, 2004.
- [16] K. Daniel. Wong, “Fundamentals of wireless communications engineering technologies”, p. 540, 2012.

ANEXOS

ANEXO A

Manual del analizador de espectro

<https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Manuals/Users-Guide/10580-00251AD.pdf>

ANEXO B

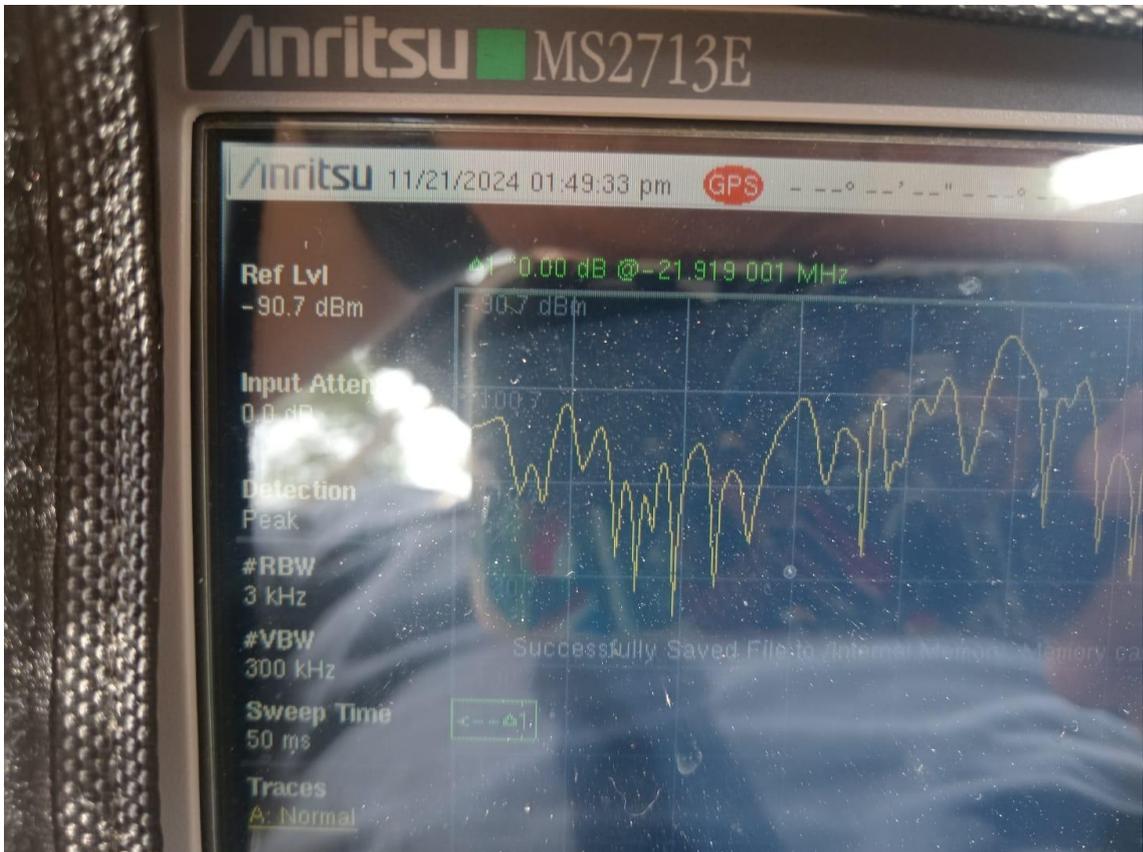
Lineamientos de ARCOTEL

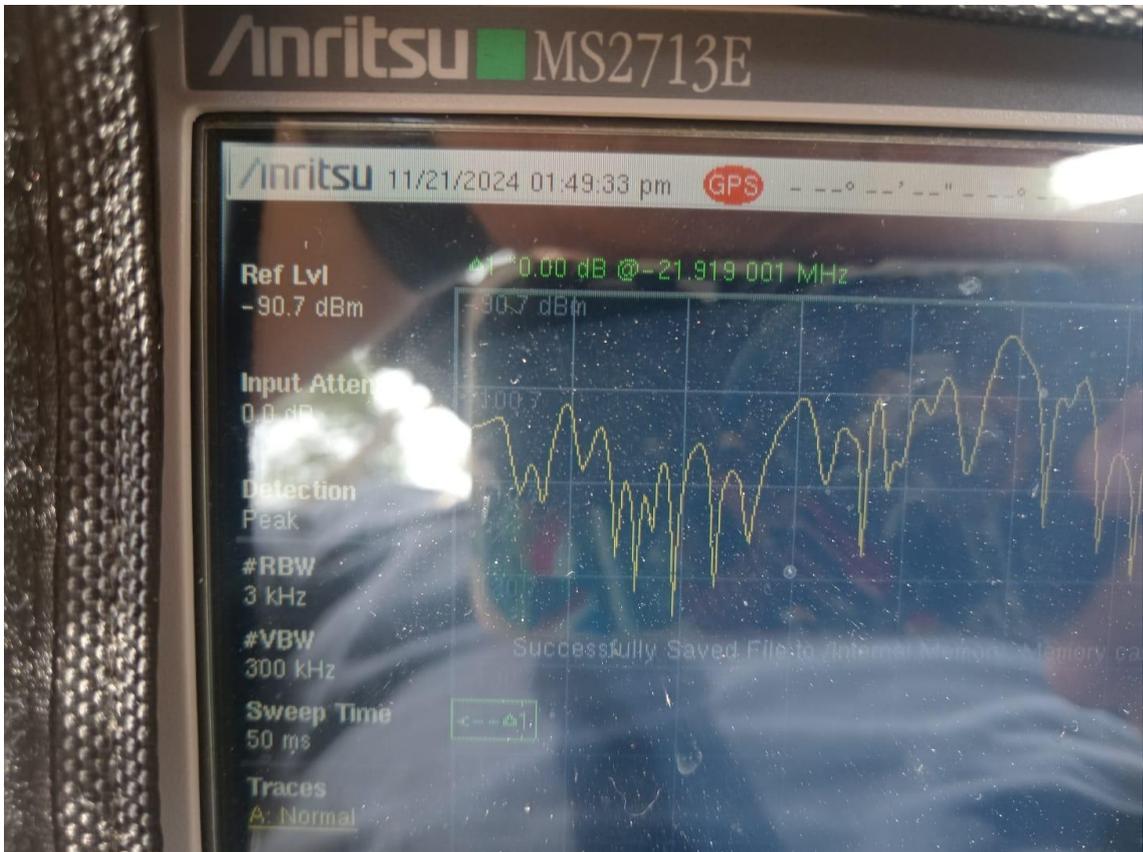
<https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/NORMA-TECNICA.pdf>

ANEXO C

FOTOS MEDICIONES







ANEXO D

Código en Python para los cálculos y muestra de resultados

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import rayleigh
from scipy import stats
from scipy.stats import gaussian_kde

# Read CSV data
def load_data(filename):
    df = pd.read_csv(filename)
    return df['Frecuencia'].values, df['Potencia'].values

def get_frequency_parameters(signal_type):
    """Return frequency based on signal type"""
    if signal_type.upper() == 'FM':
        return 93.7e6, "FM Radio Disney" # 93.7 MHz
    else:
        raise ValueError("Signal type must be 'FM'")

def calculate_coherence_time(fm):
    """Calculate coherence time using three different methods"""
    Tc1 = 1/fm
    Tc2 = 9/(16*np.pi*fm)
    Tc3 = 0.423/fm
    return Tc1, Tc2, Tc3

def analyze_fading(Tc, Ts):
    """Determine if channel exhibits fast or slow fading"""
    if Tc < Ts:
        return "Fast Fading"
```

```

else:
    return "Slow Fading"

def calculate_power_density(power_samples):
    """Calculate power density statistics"""
    mean_power = np.mean(power_samples)
    variance = np.var(power_samples)
    return mean_power, variance
"""

def plot_results(freq, power, mean_power, signal_type):
    # Increase the chunksize limit
    plt.rcParams['agg.path.chunksize'] = 1000000

    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(freq, power, label='Signal Power')
    plt.axhline(y=mean_power, color='r', linestyle='--', label='Mean Power')
    plt.xlabel('Frequency')
    plt.ylabel('Power')
    plt.title(f'{signal_type} Channel Power Analysis')
    plt.legend()
    plt.grid(True)
    plt.savefig(f'{signal_type.lower()}_analysis.png')
    plt.close()
"""

def plot_results(freq, power, mean_power, signal_type, window_size=50):

    # Increase the chunksize limit
    plt.rcParams['agg.path.chunksize'] = 1000000

    # Apply moving average smoothing
    smoothed_power = np.convolve(power, np.ones(window_size)/window_size,
mode='valid')

```

```

smoothed_freq = freq[window_size-1:]

# Create figure with two subplots
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 12))

# Original data with transparency
ax1.plot(freq, power, 'b.', alpha=0.1, label='Raw Data', markersize=1)
# Smoothed data
ax1.plot(smoothed_freq, smoothed_power, 'r-', label='Smoothed Signal', linewidth=2)
ax1.axhline(y=mean_power, color='green', linestyle='--', label='Mean Power',
linewidth=2)

ax1.set_xlabel('Frequency (MHz)', fontsize=12)
ax1.set_ylabel('Power (dBm)', fontsize=12)
ax1.set_title(f'{signal_type} Channel Power Analysis', fontsize=14)
ax1.legend(fontsize=10)
ax1.grid(True, alpha=0.3)

# Add density plot
density = gaussian_kde(power)
power_range = np.linspace(min(power), max(power), 200)
ax2.plot(power_range, density(power_range), 'b-', linewidth=2)
ax2.fill_between(power_range, density(power_range), alpha=0.5)
ax2.axvline(x=mean_power, color='red', linestyle='--', label='Mean Power')

ax2.set_xlabel('Power (dBm)', fontsize=12)
ax2.set_ylabel('Density', fontsize=12)
ax2.set_title('Power Distribution', fontsize=14)
ax2.legend(fontsize=10)
ax2.grid(True, alpha=0.3)

plt.tight_layout()

```

```

plt.savefig(f'{signal_type.lower()}_analysis.png', dpi=300)
plt.close()

def plot_pdf(power, signal_type):

    plt.figure(figsize=(10, 6))

    # Calculate PDF using histogram
    counts, bins, _ = plt.hist(power, bins=50, density=True, alpha=0.6, color='b')

    # Fit a normal distribution to the data
    mu, sigma = stats.norm.fit(power)

    # Plot the PDF
    x = np.linspace(min(bins), max(bins), 100)
    pdf = stats.norm.pdf(x, mu, sigma)
    plt.plot(x, pdf, 'r-', lw=2, label=f'Normal PDF\n $\mu$ ={mu:.2f},  $\sigma$ ={sigma:.2f}')

    plt.xlabel('Power (dBm)', fontsize=12)
    plt.ylabel('Probability Density', fontsize=12)
    plt.title(f'{signal_type} Power Distribution PDF', fontsize=14)
    plt.legend(fontsize=10)
    plt.grid(True, alpha=0.3)

    plt.tight_layout()
    plt.savefig(f'{signal_type.lower()}_pdf.png', dpi=300)
    plt.close()

def plot_rayleigh_distribution(mean_power):
    """Plot Rayleigh distribution based on mean power"""
    x = np.linspace(0, 10, 100)
    pdf = rayleigh.pdf(x, scale=np.sqrt(-mean_power))

```

```

plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.plot(x, pdf, label='Rayleigh Distribution', color='green', linewidth=2)
plt.title('Rayleigh Distribution of Signal Power', fontsize=16)
plt.xlabel('Power', fontsize=14)
plt.ylabel('Probability Density', fontsize=14)
plt.legend(fontsize=12)
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig('rayleigh_distribution.png')
plt.close()

```

```

def main(signal_type):
    # Load data
    freq, power = load_data('datos_FM.csv')

    # Calculate sampling time (assuming uniform sampling)
    Ts = 1 / (freq[1] - freq[0]) if len(freq) > 1 else 0

    # Get frequency parameters based on signal type
    f, signal_name = get_frequency_parameters(signal_type)

    # Calculate maximum Doppler frequency (fm)
    c = 3e8 # speed of light
    v = 60 * 1000/3600 # speed in m/s (keeping 60km/h as default speed)
    fm = v * f / c

    print(f"\nAnalyzing {signal_name} signal at {f/1e6:.2f} MHz")

    # Calculate coherence time using all three methods
    Tc1, Tc2, Tc3 = calculate_coherence_time(fm)
    print(f"Coherence Time (Method 1): {Tc1:.6f} s")

```

```
print(f"Coherence Time (Method 2): {Tc2:.6f} s")
print(f"Coherence Time (Method 3): {Tc3:.6f} s")

# Analyze fading type using Method 3 (most commonly used)
fading_type = analyze_fading(Tc3, Ts)
print(f"\nFading Type: {fading_type}")
print(f"Tc = {Tc3:.6f} s, Ts = {Ts:.6f} s")

# Calculate power density statistics
mean_power, variance = calculate_power_density(power)
print(f"\nPower Analysis:")
print(f"Mean Power: {mean_power:.2f} dBm")
print(f"Variance: {variance:.2f}")

# Plot results
plot_results(freq, power, mean_power, signal_name)
plot_rayleigh_distribution(mean_power)
plot_pdf(power, signal_name)
```