

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Análisis de la densidad de potencia de un canal downlink del sistema  
GSM-850 para evaluar la presencia del fast o slow fading

**EXAMEN COMPLEXIVO**

Previo la obtención del Título de:

**MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

Fernanda Gabriela Martínez Coca

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo dedico a Dios, a mis padres por su apoyo y amor incondicional

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis agradecimientos a Dios, a mi novio, a mis padres, mi hermana, mi cuñado que han sido un gran apoyo.

Un agradecimiento a los docentes de curso de actualización por compartir sus conocimientos, y su valiosa aportación

.

## DECLARACIÓN EXPRESA

Yo Fernanda Gabriela Martínez Coca acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos 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/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es 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.

---

Fernanda Gabriela Martínez Coca

Guayaquil, 30 de enero del 2025.

## **EVALUADORES**

.....  
**PhD. Francisco Novillo**

PROFESOR EVALUADOR

.....  
**PhD. Washington Medina**

PROFESOR EVALUADOR

## RESUMEN

Actualmente las comunicaciones móviles son de gran importancia en el día a día. Por lo que en este trabajo se analiza la densidad de potencia de un canal downlink en el sistema GSM-850 centrándose en la evaluación de la presencia del fast fading (desvanecimiento rápido) y slow fading (desvanecimiento lento) en la transmisión de señal GSM; a través de este estudio se busca identificar las características del canal, con el objetivo de comprobar el tipo de fading y proporcionar información útil para optimizar el diseño y la planificación de redes móviles en investigaciones futuras.

Para este estudio se utilizó un analizador de espectro, usando la frecuencia otorgada para OTECEL; donde se tomó información de la potencia recibida, frecuencia; en un entorno abierto dentro de la ESPOL durante un lapso de cuatro horas aproximadamente.

Finalmente, a través de un código se genera los cálculos respectivos tomando de referencia ecuaciones específicas, determinando la existencia de fast fading en el canal GSM.

**Palabras Clave:** GSM, desvanecimiento, potencia, canal downlink

# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS .....	VI
CAPÍTULO 1 .....	7
1.    Introducción.....	7
1.1    Descripción del problema .....	7
1.2    Justificación del problema.....	8
1.3    Objetivos.....	8
1.3.1    Objetivo General .....	8
1.3.2    Objetivos Específicos: .....	8
1.4    Marco teórico .....	9
1.4.1    Propagación de señales.....	9
1.4.2    Tecnología GSM .....	12
1.4.3    Banda de frecuencias en Ecuador .....	14
1.4.4    Canal Downlink .....	15
1.4.3.    Densidad de potencia.....	16
1.4.4.    Fenómenos del Fading en el canal .....	16
1.4.3.1.    Fast Fading (Desvanecimiento Rápido) .....	17
1.4.3.1.1. Modelos de desvanecimiento.....	18
1.4.3.2.    Slow Fading (Desvanecimiento Lento):.....	19
1.4.3.2.1. Modelo de desvanecimiento lento.....	19

1.4.4.	Modelo de Propagación en el Canal GSM .....	19
1.4.5.	Impacto del Fading en la Calidad del Canal.....	20
CAPÍTULO 2.....		21
2.	Metodología .....	21
2.1	Cálculos matemáticos.....	21
2.2	Herramienta de medición.....	22
2.3	Análisis estadístico .....	22
2.4	Generación de código.....	22
2.4.1	Principales funciones del código.....	23
CAPÍTULO 3.....		24
3.	Resultados Y ANÁLISIS.....	24
3.1	Resultados.....	24
3.2	Evaluación de la Densidad de Potencia y la Presencia de Fading .....	27
3.2.1	Análisis de la Densidad de Potencia .....	27
3.2.2	Detección de Fast Fading: .....	27
CAPÍTULO 4.....		28
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	28
	Conclusiones .....	28
	Recomendaciones.....	28
BIBLIOGRAFÍA.....		29
APÉNDICES .....		31

## ABREVIATURAS

GSM	Global System for Mobile Communications
TDMA	Acceso por multiplexación de división de tiempo
PCS	Personal Communication Systems
DSC	Digital Cordless Standard
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
MS	Mobile Station
BTS	Base Station
BSC	Base Station Controller
MSC	Mobile Station Controller
BSS	Base Station System
ARCOTEL	Agencia Nacional de control de las telecomunicaciones
ETSI	Instituto Europeo de Normalización de Telecomunicaciones
TX	Transmisión de la señal
RX	Recepción de la señal
LOS	Línea de vista
PDF	Probability Density Function

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de un efecto multitrayecto. (Alcedo Ascencios & Baudouin Núñez, 2015).....	11
Figura 1.2 Descripción de los elementos de un sistema GSM (Estupiñán-Cuesta et al., 2024).....	14
Figura 1.3 Plan Nacional de Frecuencia(BOLETÍN ESTADÍSTICO, 2018).....	15
Figura 2.1 Formulas aplicadas (Daniel Wong, 2012).....	21
Figura 2.2 Zona de medición .....	22
Figura 3.1 Potencia de la señal en función de la frecuencia.....	24
Figura 3.2 Distribución de potencia.....	25
Figura 3.3 Distribución Rayleigh .....	26
Figura 3.4 Distribución de potencia PDF .....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Estándar sistema móvil (Rappaport, 2024) .....	13
Tabla 2.2 Banda 850 Mhz Ecuador - CONECEL. (ARCOTEL, 2018) .....	15
Tabla 3.3 Banda 850 Mhz Ecuador - OTECEL. (ARCOTEL, 2018) .....	15
Tabla 4.4 Comparación entre los dos modelos (Garg & Nain, 2021).....	18

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

El auge de las comunicaciones inalámbricas en las últimas décadas ha posicionado a la telefonía móvil como una herramienta indispensable en nuestro día a día, evolucionando a un ritmo vertiginoso; creciendo exponencialmente el número de usuarios. Esto ha obligado a realizar grandes avances en las técnicas de codificación, y en el procesamiento de las señales para maximizar la eficiencia espectral.

Este crecimiento ha generado una mayor preocupación por entender de manera más precisa los efectos de propagación en las señales inalámbricas, tanto en espacios abiertos como cerrados. Dado que la naturaleza multitrayecto del canal de propagación modifica la señal transmitida, causando fading; es relevante caracterizar completamente la señal en el receptor, permitiendo que el sistema sea diseñado de tal manera que el receptor pueda hacer frente a tales efectos, eliminando los errores de transmisión y la distorsión. (Yacoub, 2019)

Adicional al ruido aditivo introducido por los propios equipos de transmisión y recepción, los efectos atmosféricos y la interferencia; está la señal en el receptor caracterizada por la combinación de diferentes efectos: pérdida de trayectoria, fast y slow fading. Ya que estos efectos dependen de la posición relativa de la estación base, del terminal móvil, y cualquier objeto que contribuya a la cantidad total de potencia reflejada/difractada que llega al receptor. (Ahmed & Christin Nabonita Halder, 2014).

Y la pérdida de trayectoria corresponde a la variación de potencia con la distancia; cuando se promedia sobre varias décimas de longitudes de onda, la señal recibida varía alrededor del valor promedio de pérdida de trayectoria debido a la naturaleza variable de las obstrucciones entre la estación base y el tren de frecuencia, lo que suele denominarse desvanecimiento a largo plazo; el desvanecimiento a corto plazo, debido a la interferencia entre múltiples ondas que llegan desde trayectorias distintas. (Saunders & Aragón-Zavala, 2024)

## **1.2 Justificación del problema**

El desempeño de un radioenlace en comunicaciones móviles, depende del ruido, el desvanecimiento producido por la propagación multitrayecto; y la interferencia causada por otros usuarios que comparten el mismo espectro radioeléctrico. La combinación de estos efectos es responsable de la variación de señal en el receptor, lo que afecta significativamente produciéndose una degradación de la señal. Debido a que en la propagación de ondas existe afectación por fenómenos físicos como la difracción, dispersión, y reflexión; por consiguiente, cambios en la frecuencia, amplitud; afectando la calidad de la señal móvil; llegando con retraso, y disminuyendo notablemente el desempeño y operatividad del servicio.

Por lo que en este estudio se pretende mostrar el tipo de fading sobre la señal móvil recibida, y como puede reducir la calidad y fiabilidad del canal; que pueda ser de utilidad para mejorar en las operadoras y puedan incorporar dicha falencia al análisis de despliegue de red, o en ampliación de cobertura

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar la densidad de potencia de un canal downlink GSM – 850 en un entorno dentro de la ESPOL para evaluar la presencia de fast o slow fading

### **1.3.2 Objetivos Específicos:**

1. Medir el canal downlink GSM-850, y calcular el tiempo de coherencia
2. Determinar el comportamiento estadístico de la densidad de potencia y graficarla usando la media y varianza de las señales medidas en el entorno controlado
3. Evaluar el tipo de fading presente (fast fading o slow fading) en el canal downlink GSM – 850, analizando las variaciones en la señal a lo largo del tiempo

## 1.4 Marco teórico

Para este análisis abarca conceptos claves 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 downlink GSM

### 1.4.1 Propagación de señales

La propagación de señales es el fenómeno físico que describe cómo las ondas electromagnéticas se propagan a través de un medio; las ondas se expanden desde el punto de impacto. Sin embargo, en el caso de las señales, estas ondas transportan información.

Las señales pueden ser de diferentes tipos:

- **Señales electromagnéticas:** Incluyen ondas de radio, microondas, luz visible, etc.
- **Señales eléctricas:** Viajan a través de cables conductores o circuitos.

La propagación de la onda está influenciada por las características del trayecto, lo que implica que la señal sufra interferencias debido a edificios, colinas, vegetación, y también por las condiciones físicas del entorno, como las precipitaciones. Además, factores como la frecuencia y la polarización de la onda también tienen un impacto en su propagación. (Cuevas Arzate et al., 2018)

#### 1.4.1.1 Modos de propagación

Las ondas electromagnéticas pueden propagarse de distintas formas según el entorno y las características del medio. Los principales modos son:

- **Propagación por ondas guiadas:** En medios como cables coaxiales o guías de ondas, las señales se propagan a lo largo de los conductores, donde las ondas están confinadas dentro de la estructura del cable o guía.

- **Propagación en línea recta (onda directa):** Este es el tipo de propagación más común en el vacío o en el aire libre, donde la señal viaja directamente desde el transmisor al receptor.
- **Reflexión, refracción y difracción:** Las señales pueden alterar su trayectoria al encontrarse con obstáculos o superficies, lo que influye en la calidad de la señal recibida. Estos fenómenos dependen de las propiedades del medio
- **Difracción:** Cuando las ondas encuentran un obstáculo, pueden rodearlo y continuar propagándose. Por ejemplo, cuando las señales viajan alrededor de edificios o montañas. La presencia de un obstáculo con bordes definidos entre el transmisor y el receptor provoca la difracción de las ondas electromagnéticas, generando nuevos frentes de onda que se desplazan en múltiples direcciones. (López et al., 2012)

#### 1.4.1.2 Efectos de propagación en sistemas de comunicación

Estos efectos afectan de manera considerable el desempeño y la confiabilidad de los sistemas de comunicación, particularmente en entornos inalámbricos, incidiendo tanto en la intensidad de la señal recibida como en la tasa de error de bit

##### 1.4.1.2.1 Desvanecimiento

En sistemas de comunicación inalámbrica, las señales pueden experimentar fluctuaciones, que consiste en la variación de amplitud de la señal a medida que se transmite a través de un canal de comunicación. Este fenómeno puede causar fluctuaciones en la intensidad de la señal, lo que afecta la calidad de la comunicación. Este fenómeno puede ser mitigado mediante técnicas como la diversidad o la modulación adaptativa. (Cuevas Arzate et al., 2018)

##### 1.4.1.2.2 Efecto Multitrayecto

La baja altura de las antenas móviles dificulta la línea de visión directa con la estación base. Sin embargo, los fenómenos de reflexión y difracción, junto con las altas

frecuencias utilizadas, permiten que las ondas electromagnéticas se propaguen a través de obstáculos, facilitando así la comunicación. El fenómeno de multitrayecto ocurre cuando una señal se transmite por diferentes rutas debido a reflexiones, refracciones o difracciones causadas por obstáculos en el entorno, como edificios o montañas como se observa en la imagen 1.1. Como efecto, la señal puede llegar al receptor en múltiples versiones, con diferentes retrasos y atenuaciones. (Alcedo Ascencios & Baudouin Núñez, 2015)

Las señales que viajan por diferentes caminos pueden interferir entre sí, causando:

- **Interferencia constructiva:** Cuando las señales llegan en fase y se suman, lo que puede aumentar la intensidad de la señal.
- **Interferencia destructiva:** Cuando las señales llegan desfasadas y se cancelan parcialmente o completamente, lo que disminuye la intensidad de la señal.

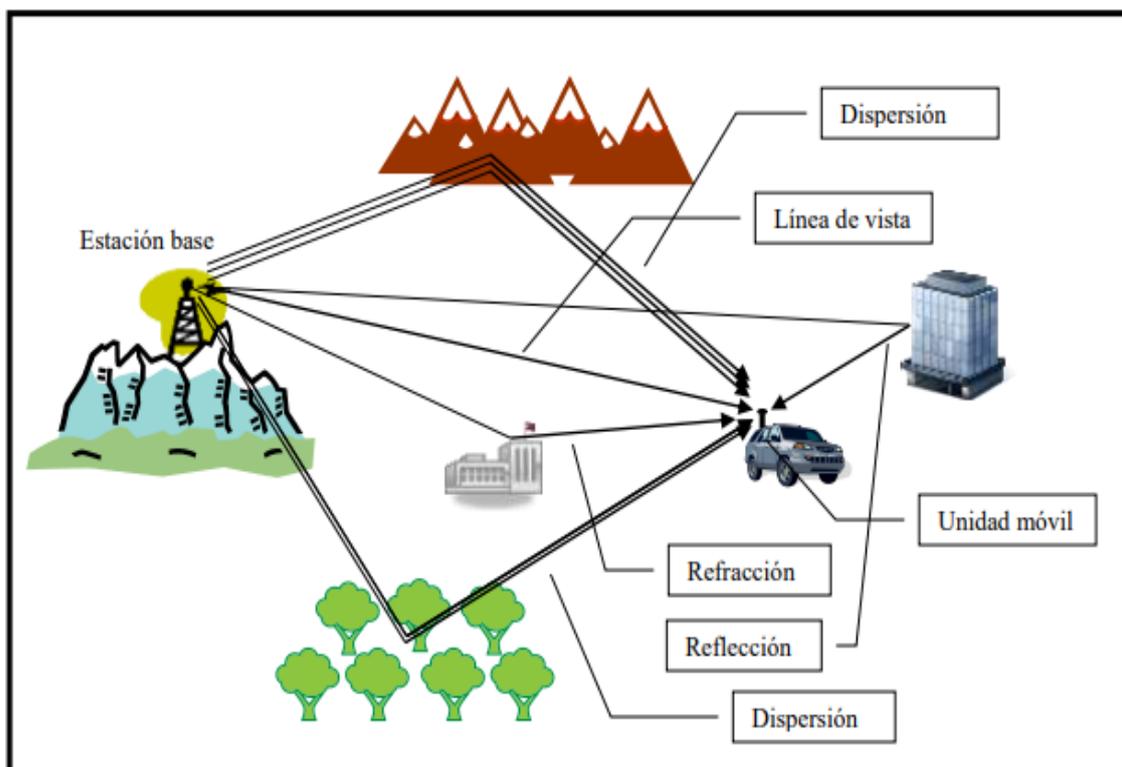


Figura 1.1 Esquema de un efecto multitrayecto. (Alcedo Ascencios & Baudouin Núñez, 2015)

Los objetos presentes en el medio, da lugar a un canal de propagación multitrayecto, donde diversos componentes de la señal alcanzan la antena receptora con distintos

retrasos y fases. Esta diversidad temporal y espacial de las señales recibidas dificulta la estimación del canal y degrada el rendimiento del sistema.

El fenómeno de propagación multitrayecto, causado por las reflexiones y difracciones de las ondas en el entorno, induce desvanecimientos profundos y selectivos en frecuencia, lo que impacta negativamente en la calidad de la señal recibida. (Orbes Rosero, 2023)

El multitrayecto es especialmente relevante en áreas urbanas, donde los edificios y otras estructuras provocan múltiples reflejos.

#### **1.4.1.2.3 Ensanchamiento Doppler**

La variabilidad temporal del canal de transmisión, conocida como dispersión Doppler, es una característica adicional del efecto de multitrayecto; este fenómeno que ocurre durante la comunicación debido al desplazamiento del terminal móvil. Este motivo provoca un desplazamiento en la frecuencia de las señales transmitidas, lo que resulta una dispersión en el tiempo y deterioro de la señal recibida. Por otra parte, la dispersión Doppler provoca un ensanchamiento o estrechamiento del ancho de banda de la señal.

#### **1.4.2 Tecnología GSM**

Es un conjunto de estándares y protocolos de comunicaciones, desarrolladas e implementadas por primera vez en Europa.

El GSM fue creado por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) en 1982 con el propósito de desarrollar una infraestructura de comunicación móvil digital que reemplazara las redes analógicas que eran comunes en ese momento. A finales de la década de 1980, se comenzaron a definir las primeras especificaciones del sistema, y en 1992, se inició su implementación en Europa.

GSM surgió como respuesta a la demanda de una tecnología móvil que ofreciera una calidad de voz superior; con una mayor capacidad de transmisión de datos y aumentar la capacidad de las redes, aprovechando la tecnología digital para superar las limitaciones de las redes analógicas anteriores. (Vaigandla et al., 2021)

GSM es una tecnología de telefonía móvil que opera mediante una arquitectura celular, en la que los dispositivos se conectan a la antena base más próxima. Siendo un precursor en la evolución de las redes móviles, facilitando la migración hacia sistemas digitales, y allanando el camino para futuras generaciones de redes móviles. Un sistema GSM administra las comunicaciones entre terminales móviles, estaciones base y sistemas centrales de red, operando en diversas bandas de frecuencias (850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz) adaptadas según la región. La banda de 850 MHz se emplea principalmente en América, mientras que las de 900 MHz y 1800 MHz son más frecuentes en Europa y Asia. (Rappaport, 2024)

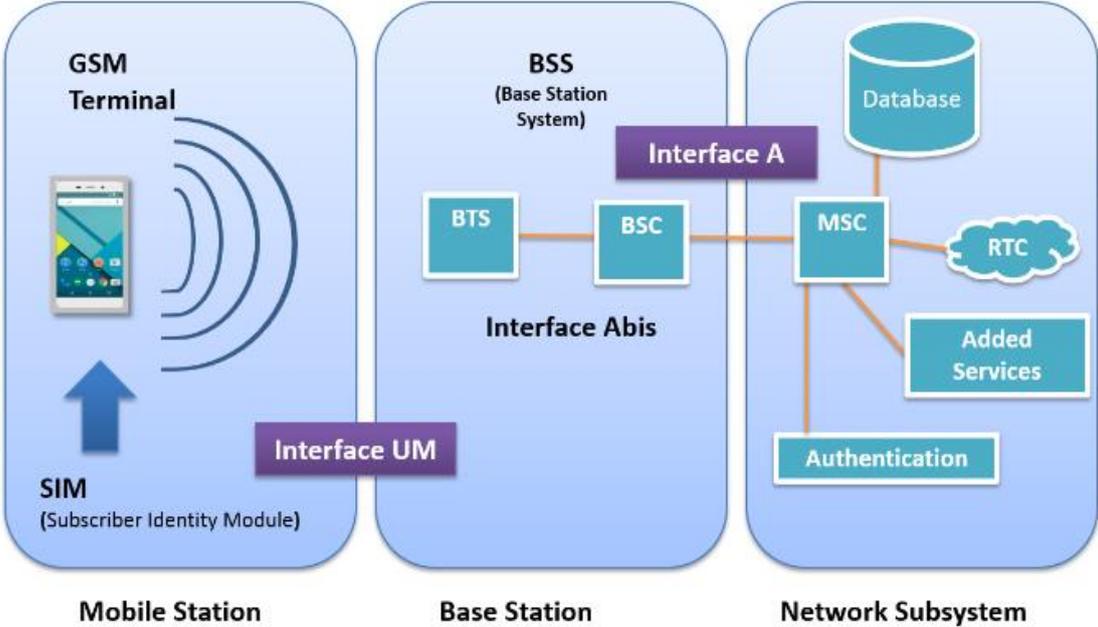
**Tabla 1.1 Estándar sistema móvil** (Rappaport, 2024)

Standard	Tipo	Año de introducción	Acceso Múltiple	Banda de frecuencia	Modulación	Ancho de banda del canal	Región
GSM	Celular/PCS	1990	TDMA	890 - 960 MHz	GMSK	200 KHz	Europa
DSC-1900 (GSM)	PCS	1994	TDMA	1850 - 1990 MHz	GMSK	200 KHz	Norteamérica

GSM utiliza para Europa principalmente las bandas de 900 MHz y 1.800 MHz, mientras que en Estados Unidos predomina la banda PCS de 1,900 MHz. Cada canal de radio GSM ocupa un ancho de banda 200 kHz, y su estructura está dividida en tramas de 8 intervalos de tiempo. La modulación GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), utilizada en GSM, permite optimizar el uso del espectro radioeléctrico y minimizar la interferencia con otras señales

Un sistema GSM está compuesto de tres elementos principales: estaciones móviles (MS) que corresponden a los teléfonos móviles, estaciones base (BTS) que son las antenas que transmiten y reciben la señal; y un controlador de estación base (BSC), que coordina y gestiona todas las estaciones base de una zona determinada. La interfaz UM permite conectar al móvil hacia la BSS. Los BSC son responsables de las transferencias entre una celda a otra; y del control de potencia, entre otras tareas. El enlace de comunicación entre la BTS, y el BSC se realiza mediante la interfaz ABIS. Los diferentes controladores de estación base (BSC) se interconectan a través de un nodo central denominado centro de conmutación móvil (MSC); mediante la interfaz A, el MSC controla los procesos de

gestión de llamadas, como: la configuración, el enrutamiento, el control y la terminación de llamadas. En la Figura 1.2 muestra la arquitectura de los componentes que forman parte de un sistema GSM. (Estupiñán-Cuesta et al., 2024)



**Figura 1.2 Descripción de los elementos de un sistema GSM** (Estupiñán-Cuesta et al., 2024)

En este análisis, se centra en la propagación de señales en la banda de 850 MHz, donde las características de la señal, como la potencia recibida; están sujetas a variaciones debido a fenómenos de propagación y fading.

**1.4.3 Banda de frecuencias en Ecuador**

La ARCOTEL con base en la ley orgánica establece el plan nacional de frecuencias; con base en las resoluciones aprobadas desde el 2012; en la figura 1.2. muestra las frecuencias en la banda 850 MHz, el color rojo hace referencia a CONECEL, el gris a OTECEL, y el azul a CNT. (BOLETÍN ESTADÍSTICO,2018)

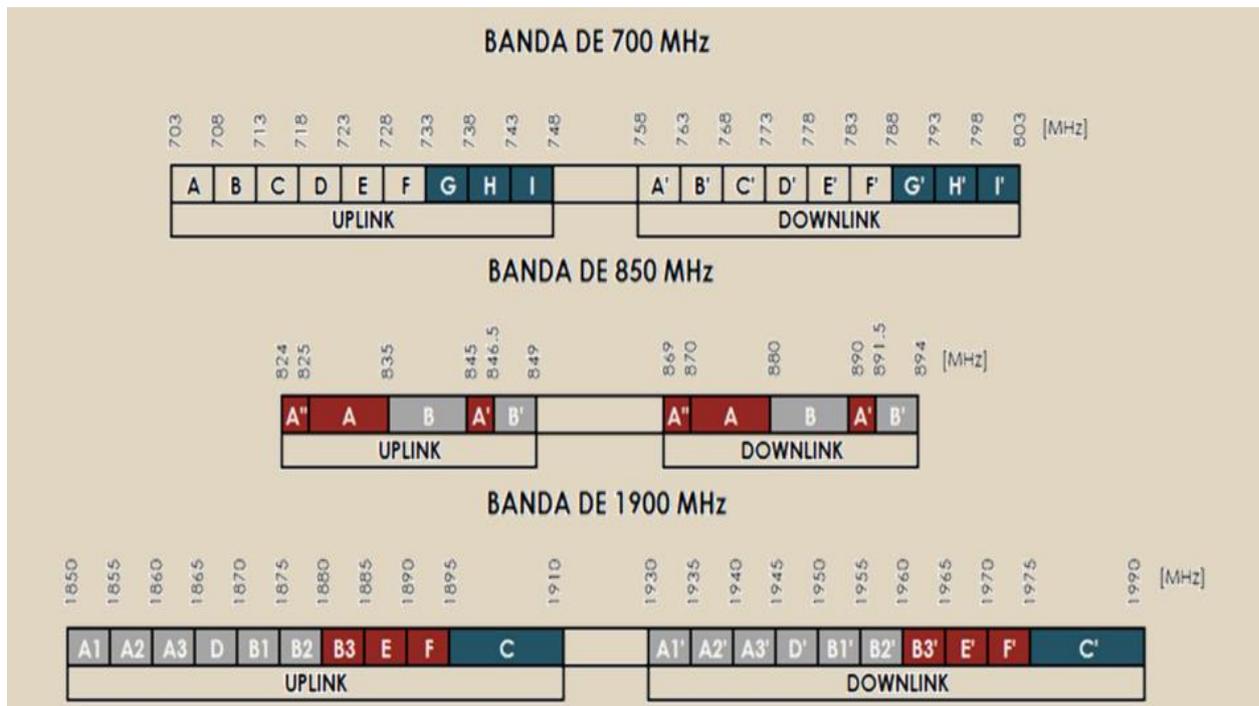


Figura 1.3 Plan Nacional de Frecuencia(BOLETÍN ESTADÍSTICO, 2018).

#### 1.4.3.1 Banda de frecuencias (CONECEL)

Las bandas de frecuencias asignadas son las mostradas en la tabla 1.2 que corresponden a las frecuencias A.

Tabla 2.2 Banda 850 Mhz Ecuador - CONECEL. (ARCOTEL, 2018)

Uplink	Downlink
824 - 835	869-880
845 – 845,5	890-891,5

#### 1.4.3.2 Banda de frecuencias (OTECEL)

Las frecuencias asignadas son las mostradas en la tabla 1.3 que son denominadas B.

Tabla 3.3 Banda 850 Mhz Ecuador - OTECEL. (ARCOTEL, 2018)

Uplink	Downlink
835 - 845	880 - 890
846,5 - 849	891.5 - 894

#### 1.4.4 Canal Downlink

En particular, la banda 850 MHz es una de las frecuencias empleadas para redes GSM, principalmente en América. Al operar en la banda de 850 MHz, se tiene la ventaja de una

mayor longitud de onda, lo que permite a las señales radioeléctricas difractar y penetrar con mayor facilidad a través de obstáculos físicos, como edificios, terrenos irregulares; asegurando una cobertura más amplia y robusta, especialmente en áreas remotas. Resultando crucial para garantizar un servicio de red óptimo en regiones donde la cobertura de telecomunicaciones es más limitada.

El canal descendente o downlink es fundamental para la transmisión de señales desde la estación base hasta el terminal móvil; permitiendo la recepción de señales de voz y datos al usuario final. La estación base, que se encuentra ubicada en una torre de comunicación, envía señales al terminal móvil en el canal downlink; el cual utiliza las frecuencias asignadas para transmitir datos; y mantener la calidad de las llamadas, y otros servicios. Las características del canal downlink dependen de varios factores, como la calidad de la señal, la pérdida de trayecto (path loss), la interferencia, y los efectos de fading (desvanecimiento). (Sanchez, 2021)

#### **1.4.3. Densidad de potencia**

Es una medida de la concentración de energía que transporta una señal en un área específica a lo largo del tiempo o frecuencia. En redes móviles, son consecuencia directa entre la potencia transmitida por la estación base y las condiciones del canal: como la distancia, la presencia de obstáculos y las interferencias. En redes GSM que operan en la banda 850 MHz, la densidad de potencia se ve influenciada por varios factores. A medida que el móvil se desplaza en la celda, las fluctuaciones en la densidad de potencia reflejan las variaciones de la señal. La densidad de potencia es una medida fundamental que nos permite caracterizar la intensidad y calidad de una señal electromagnética en un punto específico del espacio. Su comprensión es esencial para el diseño, implementación y optimización de sistemas de comunicaciones. (Póvaz & Rios, 2019)

#### **1.4.4. Fenómenos del Fading en el canal**

Comprender los diferentes tipos de desvanecimiento es crucial para optimizar los sistemas inalámbricos. El fading es un fenómeno que ocurre en las comunicaciones

inalámbricas y se manifiesta por oscilaciones rápidas en las propiedades de la señal, como la amplitud, fase y frecuencia; causada principalmente por interferencias, la dispersión de la señal y obstáculos en el trayecto de la señal; ya sea debido a obstáculos físicos, propagación por multitrayectos o condiciones ambientales, cada tipo de desvanecimiento trae su propio conjunto de problemas. Se clasifica en dos tipos principales:

#### **1.4.3.1. Fast Fading (Desvanecimiento Rápido)**

El fast fading ocurre cuando la señal experimenta cambios rápidos, estas trayectorias pueden incluir una línea de visión directa y trayectorias reflejadas debido a obstáculos en el entorno, como edificios u otros objetos.

Cuando el tiempo de coherencia del canal es menor que el retraso requerido, se produce un desvanecimiento rápido. El canal impone cambios de amplitud y fase que varían significativamente a lo largo del uso. En este caso, las ondas de radio transmitidas por la estación base llegan al receptor a través de múltiples trayectorias con diferentes retardos, lo que puede causar interferencia.

En GSM, las señales de radiofrecuencia se transmiten en un canal de comunicaciones donde la señal de un solo transmisor puede viajar por varias rutas antes de llegar al receptor. Estas trayectorias incluyen la línea de vista directa; y las trayectorias reflejadas debido a los obstáculos en el entorno, como edificios y otros objetos. Las señales que viajan por diferentes rutas pueden llegar al receptor con diferentes retardos y fases, lo que resulta en interferencias, y en variaciones rápidas en la intensidad de la señal recibida. Fenómeno conocido como propagación en multitrayecto, y es una causa fundamental del fast fading.

Este tipo de fading se produce en escalas de tiempo muy cortas, desde microsegundos a milisegundos. (Aleksandrovna et al., 2023)

### 1.4.3.1.1. Modelos de desvanecimiento

**Rayleigh Fading:** Este modelo es aplicable en entornos con obstáculos, y la señal llega al receptor a través de múltiples trayectorias dispersas; es adecuado para escenarios donde la señal se refleja principalmente en objetos grandes y dispersos, como en entornos urbanos. En este escenario, la amplitud de la señal es característica de canales con desvanecimiento multitrayecto, donde la superposición de ondas reflejadas causa las variaciones aleatorias de la señal. En este caso, la amplitud de la señal es descrita por distribución de probabilidad exponencial.

Esto se expresa en términos de ganancia del canal, que depende de la frecuencia de desvanecimiento; y de la velocidad relativa entre el receptor y el transmisor

**Rician Fading:** Este modelo se utiliza en escenarios donde, además de la propagación multitrayecto, existe una línea de vista dominante que llegan al receptor. En este caso, el desvanecimiento sigue una distribución Rician, que combina tanto la componente de línea de vista como las trayectorias reflejadas. En este caso, la señal experimenta tanto desvanecimiento como una componente dominante de la línea de vista, y la distribución sigue una ley de Rician. (Garg & Nain, 2021)

**Tabla 4.4 Comparación entre los dos modelos (Garg & Nain, 2021)**

Característica	Desvanecimiento Rayleigh	Desvanecimiento Rician
Componente LOS	Ausente	Presente
Distribución de probabilidad	Rayleigh	Rician
Valor medio de la señal	Cero	No nulo
Dispersión de la señal	Alta	Menor
Pérdida de profundidad de desvanecimiento	Alta	Menor

### **1.4.3.2. Slow Fading (Desvanecimiento Lento):**

El slow fading se refiere a variaciones más lentas en la potencia de la señal, causadas por factores a gran escala, como la topografía del área (obstrucciones como edificios o colinas) y la longitud del enlace. Estas variaciones son más grandes y más lentas que el fast fading y pueden durar desde segundos hasta minutos.

Cuando el tiempo de coherencia del canal excede el requisito de retardo relativo, se produce un desvanecimiento lento; que puede ser causado por eventos como el desvanecimiento de sombra; y se produce cuando un gran obstáculo, como una colina o un gran edificio; atenuando la componente de LOS, y modificando la potencia de la señal recibida. Con una desviación estándar según el modelo de pérdida de ruta de larga distancia, se modela a menudo utilizando una distribución logarítmica normal.

#### **1.4.3.2.1. Modelo de desvanecimiento lento**

El modelo log-normal es el más común para describir slow fading, donde las fluctuaciones en la señal se representan mediante una distribución log-normal, lo que refleja las variaciones de la señal debidas a cambios en el entorno de propagación. (Garg & Nain, 2021)

### **1.4.4. Modelo de Propagación en el Canal GSM**

El comportamiento del canal downlink en GSM 850 MHz se describe utilizando modelos de pérdida de trayecto (path loss) que se modelan en función de la distancia entre la BS y el móvil. Los modelos más utilizados son:

- **Modelo de propagación libre de espacio** (para distancias pequeñas y sin obstáculos): Describe la propagación ideal sin obstrucciones.
- **Modelo de pérdida en espacio libre o modelo de Hata** (para entornos urbanos y rurales): Considera obstrucciones como edificios y árboles que afectan la propagación de la señal.

- **Modelo de Okumura-Hata:** Considerado un modelo de propagación versátil que se puede aplicar tanto en áreas urbanas como rurales, proporcionando estimaciones más precisas de la atenuación de la señal y la densidad de potencia.(Martinez Ariza, 2020)

Estos modelos se combinan con los efectos de fading para predecir la variabilidad en la densidad de potencia que experimenta el receptor.

#### **1.4.5. Impacto del Fading en la Calidad del Canal**

El fading degrada la calidad de la señal disminuyendo la potencia recibida y elevando la tasa de error de bits, lo que impacta negativamente en la capacidad del sistema.

El fast fading puede causar fluctuaciones rápidas en la calidad de la señal, lo que da lugar a caídas momentáneas en la tasa de transferencia de datos.

El slow fading puede disminuir la cobertura de la red o generar zonas con mala calidad de señal, lo que puede afectar en la satisfacción del usuario.

##### **1.4.5.1. Mitigación de Fading**

Las técnicas para mitigar los efectos de fading incluyen:

- **Diversidad de antenas:** Uso de múltiples antenas para mejorar la recepción y reducir los efectos de fast fading.
- **Control de potencia adaptativa:** Ajustar la potencia de transmisión para compensar las variaciones causadas por fading.
- **Ecuación de canal:** Utilizar algoritmos de ecualización para compensar la distorsión causada por el multitrayecto y el fast fading. (Durán Chávez, 2023)

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

Se aplicó una metodología cuantitativa experimental que combina mediciones de variables como la potencia de la señal, frecuencia, con cálculos matemáticos

Implica la utilización de un analizador de espectro marca Anritsu modelo MS2713E para la captura de la señal en un entorno específico dentro de la ESPOL, obteniendo los datos sobre la potencia recibida.

Con base en el reglamento de la ARCOTEL sobre la banda 850 MHz. (ARCOTEL, 2018); se utiliza la banda de frecuencias asignadas para OTECEL.

### 2.1 Cálculos matemáticos

Nos basamos en las fórmulas de libro de Fundamentos de comunicación inalámbricas (Daniel Wong, 2012). Las fórmulas específicas utilizadas son las ecuaciones 5.41 Para medir la tasa de cambio del canal inalámbrico es a través del concepto de tiempo de coherencia, se calcula mediante la ecuación 5.43.

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

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

**Figura 2.1 Formulas aplicadas** (Daniel Wong, 2012)

donde

$\lambda$ : es  $C/f$

$C$ : La constante de la velocidad de la luz,

$f$ : la frecuencia portadora,

$v_0$ : la velocidad del móvil

$f_m$ : es la máxima frecuencia Doppler

$T_c$ : Tiempo de coherencia

$T_s$ : Tiempo de muestreo

A partir de ahí se determinó si un canal es fast fading ( $T_c \ll T_s$ ); o slow fading ( $T_c \gg T_s$ )

## 2.2 Herramienta de medición

- Equipos de Medición: Utilización de un analizador de espectro marca Anritsu modelo MS2713E
- Zona geográfica: Entorno controlado dentro del campus de la ESPOL (En el perímetro de Century Link)
- Escenario: Canal downlink GSM-850, durante un lapso de tiempo de cuatro horas transcurso de la mañana



Figura 2.2 Zona de medición

## 2.3 Análisis estadístico

Se calculó media y la varianza de las muestras de potencia, proporcionando información sobre la estabilidad de la señal, y posteriormente se lo muestra en gráfica.

## 2.4 Generación de código

Para el análisis de la potencia de una canal GSM se lo realizó a través del código en Python a partir de los datos resultantes de frecuencia, y potencia; obtenidos del analizador de espectro

### 2.4.1 Principales funciones del código

- 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. La envolvente de la señal receptada se representa estadísticamente mediante una función de densidad de probabilidad Rayleigh (pdf)
  
- f) **Visualización de Resultados:** La función **plot\_results** genera varios gráficos uno que muestra la potencia de la señal en el dominio de la frecuencia, incluyendo una línea que indica la potencia media. Una distribución Rayleigh basada en la potencia media.
  
- 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 GSM en 850.00 MHz

- Tiempo de coherencia (Método 1): 0.021176 s
- Tiempo de coherencia (Método 2): 0.003792 s
- Tiempo de coherencia (Método 3): 0.008958 s

Se determinó que el tipo de fading es Fast Fading

$T_c = 0.008958$  s,  $T_s = 110.011001$  s

Análisis de Potencia

Mean Power: -74.94 dBm

Varianza: 8.1

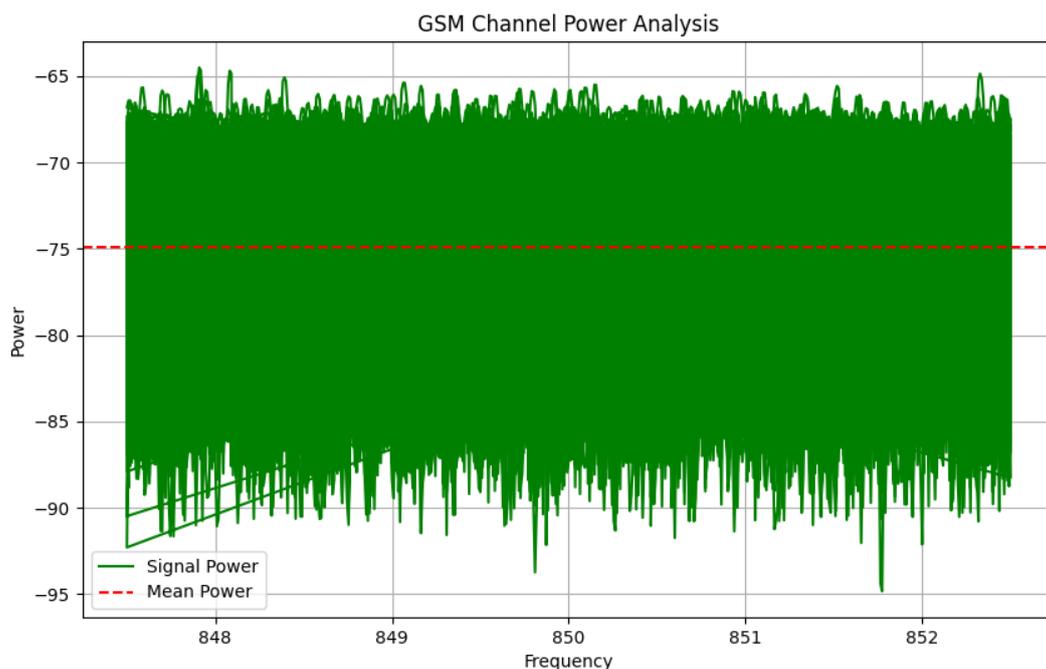
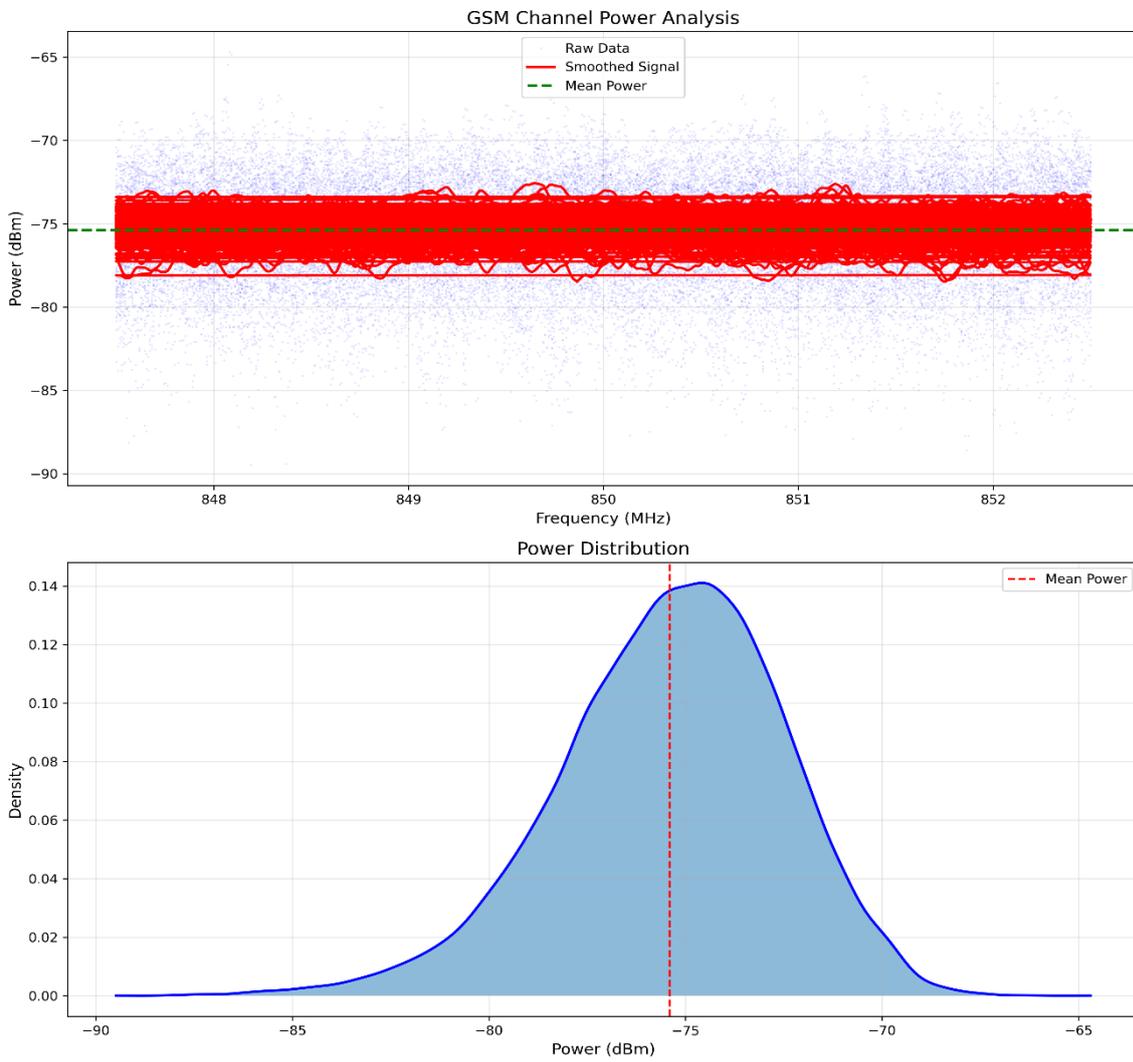
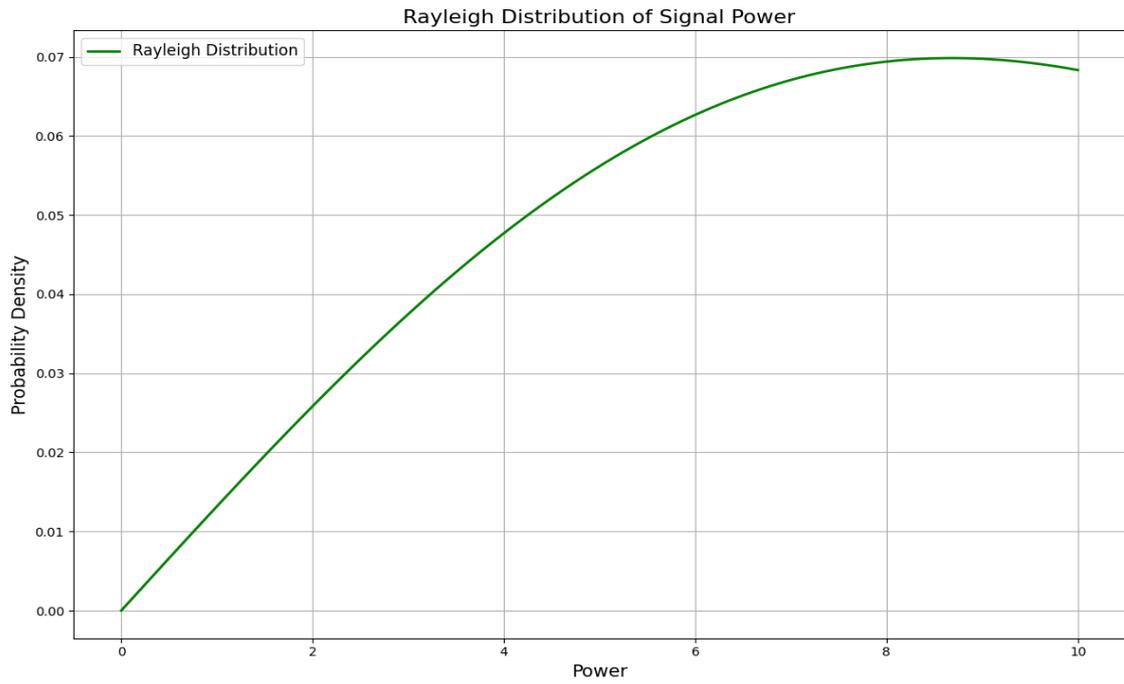


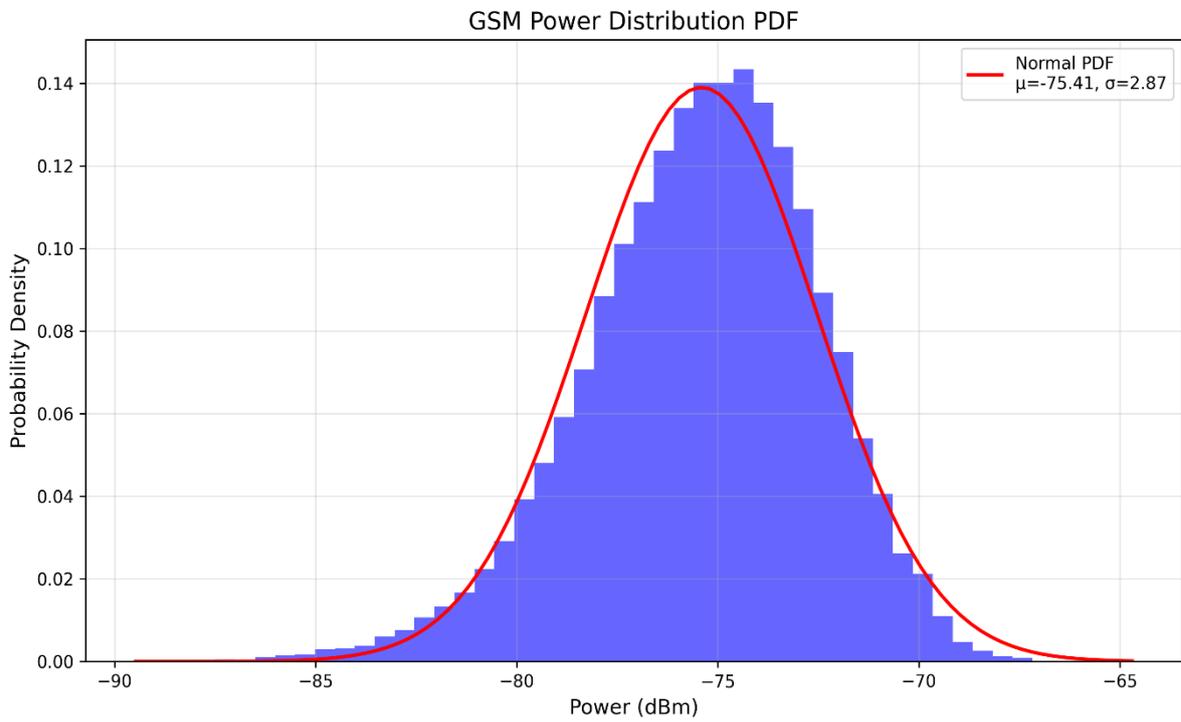
Figura 3.1 Potencia de la señal en función de la frecuencia



**Figura 3.2 Distribución de potencia**



**Figura 3.3 Distribución Rayleigh**



**Figura 3.4 Distribución de potencia PDF**

## **3.2 Evaluación de la Densidad de Potencia y la Presencia de Fading**

### **3.2.1 Análisis de la Densidad de Potencia**

La densidad de potencia en el canal downlink se analiza observando cómo varía la potencia de la señal recibida por un dispositivo móvil en movimiento, dentro de la celda. Un cambio significativo en la densidad de potencia puede ser indicativo de la presencia de fast o slow fading. En este caso las fluctuaciones son rápidas, es más probable que se trate de fast fading. Y con base en los resultados se observa que se tiene una potencia media moderada (-74.94 dBm).

### **3.2.2 Detección de Fast Fading:**

Para evaluar el fast fading, se observa la variación rápida de la potencia de la señal en escalas de tiempo muy cortas (microsegundos a milisegundos). Este tipo de fading se determina mediante mediciones de frecuencia Doppler y las variaciones rápidas de la señal. Obteniendo un tiempo de coherencia más corto (0.008958s); y menor varianza (8.18) indicando una señal más estable.

Se verificó que todas las señales presentan fast fading ( $T_c < T_s$ ); que la varianza disminuye, con el incremento de la frecuencia. Y las gráficas muestran diferentes patrones de distribución de potencia presentando en GSM una distribución más uniforme

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

El estudio de la densidad de potencia resalta la importancia del tiempo de coherencia, ya que un tiempo de coherencia más corto indica una mayor probabilidad de presencia de fast fading. Esto sugiere que es necesario implementar técnicas de compensación, como la diversidad espacial o la igualación de la señal. Se observa que todos los canales experimentan desvanecimiento rápido, que las señales de mayor frecuencia muestran mayor estabilidad (menor varianza); y que la potencia media varía significativamente entre servicios.

Los resultados obtenidos repercuten en la magnitud de considerar el fast fading al diseñar sistemas de comunicaciones móviles, ya que su presencia puede afectar considerablemente el desempeño de la red. Siendo esencial adoptar estrategias de planificación y optimización que minimicen estos efectos y mejoren la estabilidad de la señal.

### Recomendaciones

Mantener la configuración actual dado su comportamiento estable. Igualmente se recomienda continuar con estudios más detallados sobre la caracterización de la propagación del canal en diversos entornos rurales y urbanos, en distintos lapsos de tiempo

# BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, K. F., & Christin Nabonita Halder, J. (2014). *Performance Analysis of GSM System Using SUI Channel*.
- Alcedo Ascencios, G. J., & Baudouin Núñez, R. A. (2015). *Simulador de un sistema de comunicaciones inalámbrico basado en la modulación OFDM y en canales de transmisión gaussianos con efecto de desvanecimiento*.
- Aleksandrovna, K. L., Karimovich, K. S., Botirkul, Z. A., & Norboy, R. Z. (2023). FEATURES OF SIGNAL FORMATION IN THE GSM STANDARD. *Intent Research Scientific Journal*, 2(9), 39–47.
- ARCOTEL. (2018). *BOLETÍN ESTADÍSTICO*.
- Cuevas Arzate, C. A., Flores Pérez, D. C., & Hernández Bahena, S. (2018). *Propuesta de radio enlace para un sistema de comunicación GSM entre los poblados: La Mantequilla y Villa Hidalgo en el Estado de San Luis Potosí*.
- Daniel Wong, K. (2012). *FUNDAMENTALS OF WIRELESS COMMUNICATION ENGINEERING TECHNOLOGIES*.
- Durán Chávez, S. C. (2023). *Simulación de redes celulares para la parroquia Calderón del DMQ: simulación de una red GSM a 885 MHz para la parroquia Calderón del DMQ*.
- Estupiñán-Cuesta, E. P., Martínez-Quintero, J. C., de Jesús Rugeles, J., & others. (2024). Comparison of GSM Link Quality Performance: OpenBTS versus Test Equipment. *Visión Electrónica*, 18(1).
- Garg, D., & Nain, A. (2021). Next generation optical wireless communication: A comprehensive review. *Journal of Optical Communications*, 44. <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0254>
- López, R. B., Quintana, R. A., & Sánchez, S. M. (2012). Evaluación de modelos de propagación de canal inalámbrico. *Revista Cubana de Ingeniería*, 3(1), 53–62.
- Martínez Ariza, I. D. (2020). *Análisis, diseño e implementación de una red de comunicaciones móviles GSM-R en un tramo ferroviario de red convencional*. Telecomunicación.

- Orbes Rosero, F. L. (2023). *Generación del mapeo electromagnético en la banda GSM 1900 utilizando un modelo matemático para determinar el campo eléctrico máximo en una zona de la ESPOCH.*
- Póvaz, F. A., & Rios, J. I. (2019). Análisis de los niveles de las densidades de potencia de la banda de GSM y LTE en el corregimiento de Bethania, provincia de Panamá. *Revista Saberes APUDEP*, 2(1), 29–46.
- Rappaport, T. S. (2024). *Wireless communications: principles and practice.* Cambridge University Press.
- Sanchez, J. M. (2021). Mobile revolution: From 2G to 5G. *2021 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 1–6.
- Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. A. (2024). *Antennas and propagation for wireless communication systems.* John Wiley & Sons.
- Vaigandla, K. K., Azmi, N., Podila, R., & Karne, R. K. (2021). A survey on wireless communications: 6g and 7g. *International Journal Of Science, Technology & Management*, 2(6), 2018–2025.
- Yacoub, M. D. (2019). *Foundations of mobile radio engineering.* Routledge.

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## Manual del analizador de espectro



Spectrum Master  
MS271xE User Guide

## APÉNDICE B

### Código para los cálculos matemáticos, y generación de gráficas

```
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
    elif signal_type.upper() == 'TV':
        return 197.75e6, "TV Análoga" # 197.75 MHz
    elif signal_type.upper() == 'GSM':
        return 850e6, "GSM" # 850 MHz
    else:
        raise ValueError("Signal type must be 'FM', 'TV', or 'GSM'")

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, 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  $\mu={mu:.2f}$ ,  $\sigma={sigma:.2f}$ ')
```

```
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_TV.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)
```