

**METODOLOGÍA PARA LA MEDIDA DE SEÑALES
DESEADAS E INTERFERENTES EN SISTEMAS DE
COMUNICACIONES MÓVILES OPERANDO EN LA BANDA
DE 30 MHz A 470 MHz**



Universidad
del Cauca

Jose Luis Lopez Lopez

Camilo Alejandro Vivas Campo

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones - FIET

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e Inalámbricas – GRIAL

Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos

Popayán

2023

METODOLOGÍA PARA LA MEDIDA DE SEÑALES DESEADAS E INTERFERENTES EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES OPERANDO EN LA BANDA DE 30 MHZ A 470 MHZ

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Jose Luis Lopez Lopez
Camilo Alejandro Vivas Campo

Directora: MSc. Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones - FIET

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e Inalámbricas – GRIAL

Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricas

Popayán

2023

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarnos en el proceso de formación como ingenieros.

A nuestra directora, la ingeniera Claudia Milena Hernández Bonilla, a los ingenieros, Víctor Manuel Quintero Flórez; Diego Fernando Galvis Calambás; Manuel Sanín Benavidez Piamba, quienes contribuyeron de manera valiosa en conocimientos, tiempo, esfuerzo y dedicación en el proceso de desarrollo del trabajo de grado.

Al Grupo de Radio e Inalámbricas – GRIAL, por todo su apoyo y esfuerzo en la investigación.

A la Universidad del Cauca, por su contribución a la construcción de una sociedad mejor.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	vi
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	3
1.1 SISTEMAS Y SERVICIOS DE COMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES.....	3
1.1.1 Sistema de comunicaciones	3
1.1.2 Sistemas de comunicaciones móviles.....	4
1.1.3 Servicio de comunicaciones móvil terrestre	4
1.2 INTERFERENCIAS EN LOS SISTEMAS Y SERVICIOS DE COMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES	6
1.2.1 Ruido radioeléctrico	7
1.2.2 Interferencia de Radiofrecuencia	8
1.2.3 Interferencia co-canal	9
1.2.4 Interferencia de canal adyacente	9
1.2.5 Desensibilización	10
1.2.6 Intermodulación	10
1.3 PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES.....	11
1.3.1 Bandas de frecuencia de operación.....	11
1.3.2 Ancho de banda de canal	12
1.3.3 Potencia de transmisión.....	12
1.3.4 Ganancia de antena	12
1.3.5 Nivel de ruido.....	13
1.3.6 Sensibilidad	13
1.3.7 Relación portadora a interferencia	14
1.3.8 Relación de Protección.....	15
1.3.9 Máscara espectral	16
1.3.10 Selectividad	16
1.4 TIPOS DE MEDICIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES	17
1.4.1 Organizaciones de estandarización y normalización.....	17
1.4.2 Estándares de mediciones de la Comisión Electrotécnica Internacional	19

1.4.3	Estándares de mediciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones	20
1.4.4	Estándares de mediciones del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares	33
1.4.5	Mediciones del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones	33
1.4.6	Análisis de interferencia de sistemas de radiocomunicaciones basado en la relación de protección de radiofrecuencia.	34
CAPÍTULO 2. DESARROLLO METODOLÓGICO		40
2.1	ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS	40
2.1.1	Requerimientos funcionales	41
2.1.2	Requerimientos no funcionales	41
2.2	DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN	41
2.2.1	Arquitectura	42
2.2.2	Metodología de medición en laboratorio	43
2.2.3	Metodología de medición en campo	54
2.3	APLICACIÓN	64
CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN		64
3.1	PLAN DE PRUEBAS	65
3.1.1	Escenario de laboratorio	65
3.1.2	Escenario de campo	66
3.2	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN LABORATORIO	69
3.2.1	Caracterización del sistema bajo análisis	69
3.2.2	Definición del escenario de medición	71
3.2.3	Medición de referencia	72
3.2.4	Medición del parámetro bajo análisis	73
3.2.5	Análisis de resultados	77
3.3	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN CAMPO	79
3.3.1	Caracterización del sistema bajo análisis	79
3.3.2	Definición de los escenarios de medición	80
3.3.3	Medición del nivel de potencia para una interferencia aceptable	85
3.3.4	Verificación del criterio de interferencia	91
3.3.5	Determinación de una separación mínima en distancia y frecuencia	92
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS		93
4.1	CONCLUSIONES	93
4.2	RECOMENDACIONES	94

4.3 TRABAJOS FUTUROS	95
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXO A: GUÍA DE INSTALACIÓN Y USO DE SDRCONSOLE CON USRP B210	99
REQUISITOS.....	99
PASOS DE INSTALACIÓN	99
Instalación de controladores para la USRP B210.....	99
Descarga e instalación de <i>SDRConsole</i>	102
CONFIGURACIÓN Y USO PARA TOMAR Y EXPORTAR MEDIDAS.....	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Banda de frecuencias de importancia de las fuentes de ruido radioeléctrico.....	8
Tabla 2. Bandas de frecuencia para el servicio de radio móvil.....	11
Tabla 3. Manuales, reportes y recomendaciones ITU sobre mediciones.....	20
Tabla 4. Configuraciones del analizador/receptor para mediciones del piso de ruido.....	30
Tabla 5. Parámetros típicos del servicio móvil terrestre	43
Tabla 6. Condiciones para la medición del nivel de ruido en VHF.....	65
Tabla 7. Condiciones para la medición del nivel de ruido en UHF.....	65
Tabla 8. Condiciones para la medición del nivel de potencia deseado en VHF y UHF.....	66
Tabla 9. Condiciones para la medición del nivel de potencia interferente en VHF y UHF.....	66
Tabla 10. Condiciones para la medición del nivel de potencia captado por el receptor.	67
Tabla 11. Condiciones para la medición del nivel de potencia deseado considerando una separación mínima en distancia.....	67
Tabla 12. Condiciones para la medición del nivel de potencia interferente considerando una separación mínima en distancia.....	68
Tabla 13. Condiciones para la medición del nivel de potencia deseado considerando una separación mínima en frecuencia.	68
Tabla 14. Condiciones para la medición del nivel de potencia interferente considerando una separación mínima en frecuencia.	69
Tabla 15. Especificaciones del generador RF HP 8656B.	69
Tabla 16. Especificaciones USRP B210.....	70
Tabla 17. Especificaciones Baofeng UV-5R+PLUS.....	70
Tabla 18. Especificaciones antena dual.	70
Tabla 19. Frecuencias y ancho de banda de operación del sistema.	71
Tabla 20. Condiciones ambientales para la medición en un escenario de laboratorio.	71
Tabla 21. Configuración del equipo de medición: USRP B210 como analizador de espectro.	72
Tabla 22. Nivel de potencia de ruido en las frecuencias de operación.	73
Tabla 23. Parámetros de transmisión del generador HP 8656B.....	74
Tabla 24. Parámetros del receptor Baofeng UV-5R+PLUS.	74
Tabla 25. Parámetros del equipo de medición USRP B210.	74
Tabla 26. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente en la banda de VHF.	75
Tabla 27. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente en la banda de UHF.	75
Tabla 28. Resultados de la relación C/I para cada variación en distancia en la banda de VHF.	78
Tabla 29. Resultados de la relación C/I para cada variación en distancia en la banda de UHF.	78
Tabla 30. Ubicación del receptor y equipo de medición para estudio de interferencia co- canal.....	80
Tabla 31. Características de los escenarios de medición de interferencia co-canal en VHF.	81
Tabla 32. Características de los escenarios de medición para interferencia co-canal en UHF.....	82
Tabla 33. Ubicaciones del receptor y equipo de medición para estudio de interferencia de canal adyacente.	83
Tabla 34. Características de los escenarios de medición para interferencia de canal adyacente en VHF y UHF.....	84

Tabla 35. Parámetros del Baofeng UV-5R+PLUS.....	86
Tabla 36. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia co-canal en VHF.....	87
Tabla 37. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia co-canal en UHF.....	88
Tabla 38. Configuración del equipo de medición para interferencia de canal adyacente.....	89
Tabla 39. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia de canal adyacente en VHF.....	89
Tabla 40. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia de canal adyacente en UHF.	89
Tabla 41. Pérdidas de espacio libre en la banda de VHF y UHF.....	90
Tabla 42. Balance de potencias para la banda de VHF y UHF.....	90
Tabla 43. Resultados de la relación de protección para análisis de interferencia en VHF y UHF.....	91
Tabla 44. Criterio de interferencia.....	92
Tabla 45. Separación mínima en distancia y frecuencia.....	92

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Sistema de comunicaciones.....	3
Fig. 2. Interferencia en tres dominios.	7
Fig. 3. Valores de factor de ruido en función de la frecuencia.	13
Fig. 4. Modelo de estudio de interferencia.....	14
Fig. 5. Niveles para determinar el nivel de RF.....	22
Fig. 6. Análisis de señal e identificación del transmisor.....	27
Fig. 7. Emisiones no deseadas.	28
Fig. 8. Procedimiento Rec. ITU-R SM.337.	32
Fig. 9. Configuración de prueba utilizada para RFPR.....	35
Fig. 10. Procedimiento de prueba basado en RFPR.	36
Fig. 11. Metodología de análisis de interferencia basado en RFPR.	37
Fig. 12. Desarrollo metodológico del trabajo de grado.	40
Fig. 13. Arquitectura propuesta para la metodología de medición.	42
Fig. 14. Metodología de medición en laboratorio.....	43
Fig. 15. Bosquejo de un OATS.....	45
Fig. 16. Medición de referencia.	47
Fig. 17. Ubicación de los equipos en un escenario de laboratorio.....	48
Fig. 18. Procedimiento de medición del nivel de potencia para la obtención de la relación de protección en un escenario de laboratorio.	50
Fig. 19. Procedimiento de medición de máscara espectral en un escenario de laboratorio.....	52
Fig. 20. Metodología de medición en campo.....	54
Fig. 21. Escenario de medición en campo para un sistema desplegado.	55
Fig. 22. Escenario de medición en campo para un sistema no desplegado.	56
Fig. 23. Ubicación de los equipos en un escenario de campo para un sistema desplegado.....	57
Fig. 24. Ubicación de los equipos en un escenario de campo para un sistema no desplegado.....	58
Fig. 25. Procedimiento de medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente para interferencia co-canal en un escenario de campo.....	60
Fig. 26. Procedimiento de medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente para interferencia de canal adyacente en un escenario de campo.....	62
Fig. 27. Evaluación del criterio de interferencia.	63
Fig. 28. Escenario para medición en laboratorio.	71
Fig. 29. Configuración experimental en un escenario de laboratorio.	72
Fig. 30. Ubicación inicial de los equipos en laboratorio.	74
Fig. 31. Nivel de potencia interferente en la banda de VHF.....	76
Fig. 32. Nivel de potencia interferente en la banda de UHF.	77
Fig. 33. Relación de protección en la banda de VHF y UHF.....	79
Fig. 34. Receptor y equipo de medición en escenario de campo: Cerro del Morro.....	81
Fig. 35. Escenarios de medición para interferencia co-canal en VHF.....	82
Fig. 36. Escenarios de medición para interferencia co-canal en UHF.	83
Fig. 37. Receptor y equipo de medición en escenario de campo: azotea oficina 409.....	84
Fig. 38. Escenarios de medición para interferencia de canal adyacente en VHF y UHF.	85
Fig. 39. Ubicación inicial de los equipos en campo.	86

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ACEC	<i>Advisory Committee on EMC</i> , Comité Asesor en EMC.
AM	<i>Amplitude Modulation</i> , Modulación en Amplitud.
ANE	Agencia Nacional del Espectro.
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> , Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Blanco Aditivo Gaussiano.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BPF	<i>Band Pass Filter</i> , Filtro Pasa Banda.
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalization Électrotechnique</i> , Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.
CIR	<i>Channel Impulsive Response</i> , Respuesta Impulsiva del Canal.
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i> , Comité Especial Internacional sobre Interferencias de Radio.
CNABF	Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias.
CSV	<i>Comma Separated Values</i> , Valores Separados por Coma.
CT	<i>Cordless Telephony</i> , Telefonía Inalámbrica.
DKE	<i>Deutsche Kommission Elektrotechnik</i> , Comisión Electrotécnica Alemana.
DTM	<i>Digital Terrain Model</i> , Modelo Digital del Terreno.
DSP	<i>Digital Signal Processing</i> , Procesamiento Digital de Señales.
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> , Compatibilidad Electromagnética.
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> , Interferencia Electromagnética.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones.
FBO	<i>Frequency Band Occupancy</i> , Ocupación de Banda de Frecuencias.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
FCO	<i>Frequency Channel Occupancy</i> , Ocupación de Canal de Frecuencia.
FD	<i>Frequency Distance</i> , Distancia en Frecuencia.
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier.
FM	<i>Frequency Modulation</i> , Modulación en Frecuencia.
FS	<i>Fixed Station</i> , Estación Fija.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> , Comisión Electrotécnica Internacional.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IFM	<i>Instantaneous Frequency Measurement</i> , Medición de Frecuencia Instantánea.
IN	<i>Impulsive Noise</i> , Ruido Impulsivo.

ISO	<i>International Standardization Organization</i> , Organización de Estandarización Internacional.
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i> , Amplificador de Bajo Ruido.
MS	<i>Mobile Station</i> , Estación Móvil.
OATS	<i>Open Area Test Site</i> , Sitio de Prueba de Área Abierta.
OCR	<i>Off-Channel-Rejection</i> , Rechazo Fuera de Canal.
OOB	<i>Out Of Band</i> , Fuera de Banda.
OTR	<i>On-Tune Rejection</i> , Rechazo Dentro de Banda.
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i> , Red Móvil Terrestre Pública.
PMR	<i>Private Mobile Radio</i> , Radiotelefonía Móvil Privada.
PMT	<i>Public Mobile Telephony</i> , Telefonía Móvil Pública.
RBW	<i>Resolution Bandwidth</i> , Ancho de Banda de Resolución.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radiofrecuencia.
RFI	<i>Radio Frequency Interference</i> , Interferencia de Radiofrecuencia.
RS	<i>Repeater Station</i> , Estación Repetidora.
Rx	Receptor.
RMS	<i>Root Mean Square</i> , Cuadrático Medio.
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , Radio Definido por Software.
SLR	<i>Systematic Literature Review</i> , Revisión Sistemática de la Literatura.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
TDD	<i>Time Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Tiempo.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TETRA	<i>TErrestrial TRunked RAdio</i> , Radio Troncalizado Terrestre.
Tx	Transmisor.
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , Ultra Alta Frecuencia.
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> , Periférico de Radio Definido por Software Universal.
VBW	<i>Video Bandwidth</i> , Ancho de Banda de Video.
VHF	<i>Very High Frequency</i> , Muy Alta Frecuencia.
WGN	<i>White Gaussian Noise</i> , Ruido Blanco Gaussiano.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas y servicios de comunicaciones móviles terrestres desempeñan un papel fundamental en la conectividad y comunicación de la sociedad moderna. Estos sistemas permiten la transmisión de voz, datos y multimedia de manera inalámbrica, con el propósito de ofrecer una amplia gama de servicios y aplicaciones a los usuarios en cualquier lugar y momento. Por lo anterior, existe un alto crecimiento y desarrollo de los sistemas que operan en la banda de 30 MHz a 470 MHz en comparación con otras bandas de frecuencia, debido a las condiciones propicias en que las señales sobre estas frecuencias se propagan, los bajos costos en relación con los sistemas que operan en otras bandas y también por la variedad de los servicios que ahí conviven, tales como: móviles, radiodifusión, radionavegación, entre otros. El auge en el desarrollo de sistemas de comunicaciones móviles, el despliegue e implementación de nuevas redes, y la limitación del espectro radioeléctrico como recurso natural finito, hacen que haya mayor probabilidad de que se presenten distintos tipos de interferencia y señales no deseadas. Por lo tanto, debido al creciente número de dispositivos, usuarios, y el aumento en la demanda de ancho de banda, los sistemas de comunicaciones móviles enfrentan desafíos significativos, de los cuales las señales no deseadas e interferentes se convierten en un aspecto crucial a abordar.

En consecuencia, existe la necesidad de medir y determinar las señales deseadas e interferentes que se presentan en sistemas de comunicaciones móviles que operan en la banda de 30 MHz a 470 MHz, específicamente en el servicio radio móvil terrestre debido a su crecimiento y desarrollo. La medida de los principales parámetros de las señales permite la caracterización y análisis de estas, con la finalidad de sugerir acciones y procedimientos que limiten los efectos adversos que produce la interferencia sobre estos sistemas. Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo realizar medidas de señales deseadas e interferentes en sistemas de radiocomunicaciones móviles terrestres que operan en la banda de 30 MHz a 470 MHz?

El presente documento tiene como objetivo proporcionar un análisis detallado sobre las mediciones de señales deseadas e interferentes en los sistemas y servicios de comunicaciones móviles terrestres. En el capítulo 1, titulado "Generalidades", se abordan los fundamentos de estos sistemas y servicios, y se estudian sus elementos clave. Además, se introducen las teorías relacionadas con la interferencia en estos sistemas, centrándose en aspectos como interferencia de radiofrecuencia, interferencia co-canal, interferencia de canal adyacente y niveles de interferencia. Asimismo, se presentan los parámetros de medición utilizados para el análisis de interferencias en sistemas de comunicaciones móviles terrestres, lo que proporciona una base sólida para el desarrollo de la metodología que se abordará más adelante. Finalmente, se exploran los diferentes tipos de mediciones utilizadas en sistemas de comunicaciones, con el fin de brindar una visión general de las herramientas y técnicas disponibles para la medición, caracterización y posterior análisis de interferencias en estos sistemas.

En el capítulo 2, titulado "Desarrollo Metodológico", se presenta la metodología propuesta para la medición de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles terrestres. Comenzando con el análisis de requerimientos, se identifican y se establecen los requerimientos funcionales y no funcionales que deben cumplirse para llevar a cabo una medición adecuada de señales deseadas e interferentes. Posteriormente, se diseña la

metodología de medición, incluyendo aspectos como la arquitectura general y los escenarios en laboratorio y en campo. Estas metodologías proporcionan un enfoque estructurado y sistemático para realizar mediciones y recopilar datos relevantes en entornos controlados y reales.

En el capítulo 3, titulado "Aplicación de la Metodología ", se presenta un estudio de caso que demuestra la aplicación práctica de la metodología propuesta. A través de este estudio, se documenta cómo se pueden utilizar las herramientas y técnicas descritas anteriormente para realizar mediciones sobre las señales deseadas e interferentes en un sistema de comunicaciones móviles terrestre en específico. Se presentan los resultados obtenidos, así como las deducciones derivadas de la aplicación de la metodología.

Finalmente, en el capítulo 4, titulado "Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros", se resumen las principales conclusiones extraídas del estudio realizado y se plantean posibles líneas de investigación y trabajos futuros. Este capítulo proporciona una visión global de los hallazgos obtenidos y plantea posibles áreas de mejora y desarrollo en el campo de la medición de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles terrestres.

En resumen, este documento de trabajo de grado busca profundizar en el tema de la medición de señales deseadas y de interferencia en los sistemas y servicios de comunicaciones móviles terrestres operando en la banda de 30 MHz a 470 MHz. A través de una estructura claramente definida y una metodología rigurosa, se ofrece un análisis completo y detallado de este desafío crucial en el ámbito de las comunicaciones móviles. Al proporcionar una comprensión de los conceptos, teorías y herramientas involucradas, este documento será una referencia útil para investigadores, profesionales y aquellos interesados en el estudio y la mejora de los sistemas de comunicaciones móviles terrestres.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

En este capítulo se establecen los conceptos fundamentales que conforman una estructura de información en relación con los sistemas y servicios móviles terrestres, con base en esta estructura posteriormente se formula la metodología de medición, lo cual es el objetivo general del trabajo de grado.

1.1 SISTEMAS Y SERVICIOS DE COMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES

1.1.1 Sistema de comunicaciones

Un sistema de comunicaciones es un conjunto de equipos y dispositivos que son utilizados con la finalidad de transmitir, emitir y recibir señales analógicas o digitales que contienen información de todo tipo, como voz, datos, audio, vídeo, imágenes, entre otros. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques más elemental de un sistema de comunicaciones, el cual consta de:

- Fuente o Transmisor (Tx): genera el mensaje que se desea enviar y se adecúa para su correcta recepción.
- Canal o medio de transmisión: medio por el cual viajan las señales para llegar a su destino.
- Destino o Receptor (Rx): recupera el mensaje enviado y se procesa para que su contenido sea lo más parecido al original.

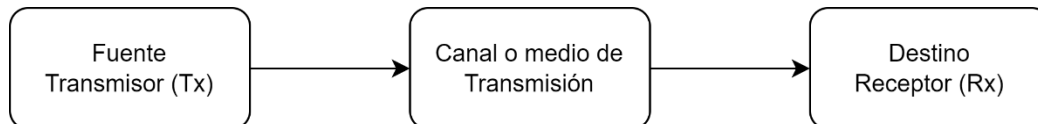


Fig. 1. Sistema de comunicaciones.
Fuente: Elaboración propia.

En el contexto de las comunicaciones, específicamente en la capa física, el canal de transmisión se define como el medio físico a través del cual se lleva a cabo la comunicación. En este sentido, existen dos grupos de canales: aquellos que se basan en propagación guiada, como cables de cobre o fibra óptica, que dirigen y confinan las señales a lo largo de un camino específico; y aquellos que se fundamentan en propagación libre o transmisión inalámbrica, que utilizan el espacio libre como medio de propagación [1].

Por lo tanto, cuando se describe un sistema inalámbrico, se hace referencia a una configuración en la cual el medio físico para la transmisión es el espacio libre, permitiendo que las señales electromagnéticas viajen a través del aire. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la transmisión inalámbrica puede experimentar limitaciones debido a factores como distancia, Interferencia Electromagnética (EMI, *Electromagnetic Interference*), condiciones ambientales, entre otros.

Asimismo, cuando se realiza la transmisión inalámbrica añadiendo la información que se desea transmitir a una onda portadora, el sistema se clasifica como un sistema de radiocomunicaciones [2, 3].

1.1.2 Sistemas de comunicaciones móviles

Los sistemas de comunicaciones móviles se caracterizan por ser inalámbricos, por lo que la señal viaja únicamente por el espacio libre, lo cual facilita la comunicación de múltiples tipos de información de carácter público o privado a través de superficies terrestres, marítimas o aéreas. De acuerdo con estas superficies los servicios se pueden clasificar como:

- Servicio móvil aeronáutico: servicio móvil entre estaciones aeronáuticas¹ y estaciones de aeronave², o entre estaciones de aeronave, en el que también pueden participar las estaciones de embarcación o dispositivo de salvamento, también pueden incluirse las estaciones de radiobaliza de localización de siniestros que operen en las frecuencias de socorro y de urgencia designadas [2].
- Servicio móvil marítimo: servicio móvil entre estaciones costeras y estaciones de barco, entre estaciones de barco, o entre estaciones de comunicaciones a bordo asociadas, incluidas estaciones de embarcación de radiobaliza, de localización de siniestros, o dispositivos de salvamento [2].
- Servicio móvil terrestre: servicio móvil entre estaciones móviles y estaciones terrestres o entre estaciones móviles únicamente, que permite el intercambio de información entre terminales móviles, a bordo de vehículos o transportados por personas y terminales fijos a través de un medio de transmisión radioeléctrico, con unas características de calidad determinadas [2].

1.1.3 Servicio de comunicaciones móvil terrestre

Estos servicios pueden ofrecer diferentes funcionalidades, como telefonía, acceso a internet, mensajería, radiobúsqueda o despacho. Según la tecnología empleada, se pueden clasificar en analógicos o digitales, con características propias de capacidad, velocidad y calidad. El servicio móvil terrestre es el de más amplia utilización tanto en el sector público como el privado [4].

Los sistemas móviles son de cobertura zonal pudiendo estar los terminales en cualquier punto del área de cobertura³. Ello implica una variación continua del trayecto de propagación lo cual tiene una importancia decisiva en el diseño de los sistemas de comunicaciones móviles. De acuerdo con lo anterior, un sistema de comunicaciones móviles se constituye generalmente de los siguientes componentes:

- Estaciones Fijas (FS, *Fixed Station*): estación radioeléctrica no prevista para su utilización en movimiento. Existen diferentes tipos de estaciones fijas para el servicio móvil terrestre:
 - Estación Base (BS, *Base Station*): estación fija cuyo funcionamiento se controla directamente desde una unidad de control (local o remota) situada en un punto específico, su característica primordial es ser fuente y destino de tráfico tanto de información como de señalización, están constituidas por equipos transceptores, sistemas radiantes y elementos de conexión.

¹ Estaciones terrestres destinadas para el servicio móvil aeronáutico.

² Estación móvil del servicio móvil aeronáutico instalada a bordo de una aeronave, sin ser estaciones de embarcación o dispositivos de salvamento destinados a emergencias.

³ Área de cobertura o zona de cobertura es la superficie geográfica dentro de la cual los terminales móviles pueden establecer comunicación con la estación fija o entre sí.

- Estación de control: estación fija constituida por equipos y dispositivos de control necesarios para la gestión de las estaciones de base, la generación y recepción de llamadas, localización e identificación de usuarios, de equipos y vehículos, transferencia de llamadas a red telefónica, señalización de canales, entre otras funciones.
- Estación Repetidora (RS, *Repeater Station*): estaciones fijas que retransmiten las señales recibidas se emplean para conseguir una gran cobertura radioeléctrica.
- Estaciones Móviles (MS, *Mobile Station*): estación radioeléctrica del servicio móvil prevista para su utilización en un vehículo en marcha o que efectúa paradas en puntos indeterminados. El termino también incluye a los equipos portátiles o de mano que son llevados e instalados en el usuario final.

Los sistemas de comunicaciones móviles se clasifican:

- Por la modalidad de funcionamiento:
 - Sistemas de radiotelefonía (*Two-Way radio systems*).
 - Sistemas de radiobúsqueda o radiomensajería (*Paging Systems*).
- Por el sector de aplicación:
 - Sistemas de Radiotelefonía Móvil Privada (PMR, *Private Mobile Radio*).
 - Sistemas de Telefonía Móvil Pública (PMT, *Public Mobile Telephony*).
 - Telefonía Inalámbrica (CT, *Cordless Telephony*).
- Por la banda de frecuencias utilizadas:
 - Banda de Muy Alta Frecuencia (VHF, *Very High Frequency*).
 - Banda III.
 - Banda Ultra Alta Frecuencia (UHF, *Ultra High Frequency*).
- Por la técnica de multiacceso:
 - Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*).
 - Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*).
 - Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*).
 - Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal FDMA*).
- Por el modo de explotación:
 - Simplex (a una o dos frecuencias).
 - Semidúplex.
 - Dúplex.

1.1.3.1 Sistemas de radiotelefonía móvil privada

Las redes móviles privadas (PMR, *Private Mobile Radio*) son sistemas de comunicación inalámbrica para grupos específicos de usuarios en un área determinada. Pueden funcionar sin estaciones base si el área y demanda de usuarios es pequeña, o con estaciones base si el área y demanda de usuarios es media o grande. Las PMR permiten la comunicación directa entre usuarios o entre un usuario y todos los demás. La comunicación con la red de telefonía básica o Red Móvil Terrestre Pública (PLMN, *Public Land Mobile Network*) es posible pero poco común. Las PMR se dividen en células si el número de usuarios es elevado, como en el sistema Radio

Troncalizado Terrestre (TETRA, *TErrestrial Trunked RAdio*)⁴ para servicios de emergencia y seguridad. Las PMR tienen canales de tráfico y de control similares a los de un sistema de telefonía móvil celular.

La diferencia entre PMR y PLMN, es que PMR es un sistema de comunicación móvil privado que opera en bandas de frecuencia asignadas específicamente para ese fin, mientras que PLMN es una red de comunicación móvil pública que ofrece servicios a los usuarios mediante el uso de licencias. Los sistemas PMR se utilizan principalmente para aplicaciones profesionales, como seguridad pública, transporte, industria o servicios de emergencia, que requieren una alta fiabilidad, seguridad y calidad de servicio. Los sistemas PLMN se utilizan principalmente para aplicaciones personales, como telefonía móvil, internet móvil o mensajería, que tienen una mayor demanda de capacidad, cobertura y variedad de servicios.

1.2 INTERFERENCIAS EN LOS SISTEMAS Y SERVICIOS DE COMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES

De acuerdo con el Reglamento de Radiocomunicaciones, la interferencia se define como el efecto de una energía no deseada debida a una o varias emisiones⁵, radiaciones⁶, inducciones⁷ o sus combinaciones, sobre la recepción en un sistema de radiocomunicaciones, la cual degrada la calidad de la información en dicho sistema [2]. Por lo tanto, su análisis y control sobre sistemas desplegados y en funcionamiento es necesario, debido a la gran cantidad de sistemas de radiocomunicaciones que operan en la actualidad y a que es un tema menos estudiado en comparación con el estudio de interferencias en tiempo de diseño, lo que incluye aspectos relacionados con circuitos electrónicos, placas de circuitos impresas, ruido, blindaje, cableado y filtrado [5, 6].

La interferencia se puede ver como un problema en tres dominios: tiempo, frecuencia y espacio. Si se presentan dos o más señales en el mismo tiempo, cercanas o incluso en la misma frecuencia, y la distancia entre las dos señales es próxima lo más factible es que se presente interferencia entre estas. La Fig. 2 representa el fenómeno de interferencia en los tres dominios descritos.

⁴ También es común encontrar que su acrónimo en inglés sea: *Trans European Trunked RAdio*.

⁵ Radiación producida por una estación transmisora radioeléctrica.

⁶ Flujo saliente de energía de una fuente cualquiera en forma de ondas radioeléctricas.

⁷ Transferencia inalámbrica de energía electromagnética entre dispositivos

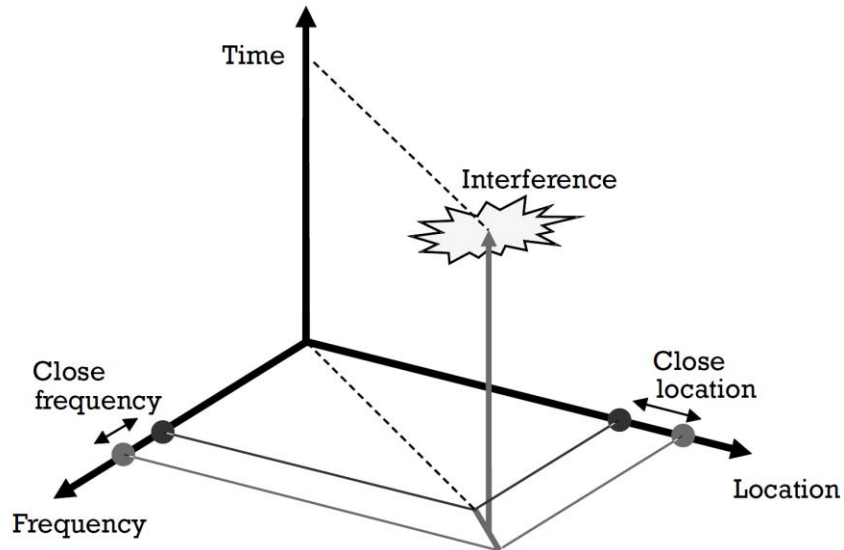


Fig. 2. Interferencia en tres dominios.
Fuente: Tomada de [6].

Desde el punto de vista del sistema de comunicaciones móvil terrestre, se considera que existe interferencia cuando entre el transmisor y receptor hay perturbación provocada generalmente por otro sistema o transmisor interferente, que degrada el desempeño del receptor víctima [6]. Los niveles de interferencia en sistemas de comunicaciones móviles dependen de varios factores, como la potencia de transmisión, la distancia entre las estaciones base y los usuarios, el tipo de modulación, el ancho de banda tanto de la señal como del receptor, el número de canales, el grado de reutilización de frecuencias, el tipo de antenas, el entorno de propagación, el nivel de ruido, entre otros. El Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*) - Sección Radio considera los siguientes niveles de interferencia [2]:

- Interferencia admisible: interferencia observada o prevista que satisface los criterios cuantitativos de interferencia y de compartición que se definen en el Reglamento de Radiocomunicaciones.
- Interferencia aceptable: interferencia de mayor magnitud que la definida como interferencia admisible, que ha sido consensuada entre dos o más administraciones sin causar perjuicio a otras administraciones.
- Interferencia perjudicial: interferencia que degrada gravemente, interrumpe repetidamente o impide el funcionamiento de un servicio de radiocomunicación explotado de acuerdo con el Reglamento de Radiocomunicaciones.

A continuación, se presentan definiciones que permiten delimitar el tema de interferencia estudiado en este trabajo de grado.

1.2.1 Ruido radioeléctrico

También nombrado ruido de RF es definido como la suma de radiación no intencionada procedente de varias fuentes naturales o artificiales, sin considerar las emisiones procedentes

de fuentes identificables, su amplitud y fase son aleatorios y no puede ser eliminado de los sistemas de radiocomunicaciones. Cuando existe interferencia como emisiones co-canal, la relación portadora a interferencia es un parámetro fundamental para la planificación y evaluación de la calidad de funcionamiento de los sistemas de radiocomunicaciones, en ausencia de otra emisión, la interferencia es básicamente ruido de fondo. En ese caso, la relación portadora a interferencia es igual a la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*). En general, el ruido externo debido a emisiones no deseadas de dispositivos eléctricos y electrónicos es superior al ruido de fondo del equipo receptor.

El ruido radioeléctrico se clasifica como natural o artificial; el primero debido a fuentes de radiación producidas por elementos naturales como cuerpos negros (tierra, cielo), lluvia, gases atmosféricos, entre otros; el ruido artificial es debido a actividades industriales como transporte y tracción de vehículos, distribución de energía eléctrica, funcionamiento de equipos electrónicos, entre otras; en general es dominante en comparación al ruido natural (atmosférico y galáctico) y puede cambiar debido al aumento de la densidad de dispositivos eléctricos y electrónicos, por lo cual es la componente de mayor interés cuando se realizan mediciones de ruido radioeléctrico, mientras que el ruido atmosférico y el galáctico tienen una densidad espectral de potencia plana para frecuencias de RF y no cambian significativamente durante largos periodos de tiempo. La Tabla 1 muestra las tres principales fuentes de ruido radioeléctrico (ruido atmosférico, galáctico y artificial) y las bandas de frecuencias donde se recomienda estudiar cada fuente [4, 7].

Tabla 1. Banda de frecuencias de importancia de las fuentes de ruido radioeléctrico

Fuente de ruido	Banda de frecuencias de importancia
Ruido atmosférico	Por debajo de 100 KHz
Ruido galáctico	3 MHz a 100 MHz
Ruido artificial	9 KHz a 1 GHz

1.2.2 Interferencia de Radiofrecuencia

La Interferencia de Radiofrecuencia (RFI, *Radio Frequency Interference*) es parte de un rango más amplio de interferencias denominadas colectivamente como EMI [6] y se define como el conjunto de señales de Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*) no deseadas captadas en la antena de un receptor de radioenlace que degradan su sensibilidad, reducen la inteligibilidad de la señal recibida o provocan respuestas parásitas y por ende pueden afectar a la calidad de funcionamiento del sistema. Las señales de RFI no se pueden suprimir en su totalidad, por lo que estas señales deben mantenerse en niveles limitados que sean tolerables en los sistemas de comunicaciones presentes [5]. Las interferencias de RF pueden clasificarse según diversos criterios [4]:

El primer criterio es de acuerdo con el origen de la señal de interferencia, se divide en dos fuentes:

- Interferencia intrasistema: se origina en el propio sistema de radio como consecuencia de la reutilización de frecuencias, desacoplamiento interno de los equipos, efectos de no linealidad en los circuitos de acoplamiento y a respuestas parásitas de los receptores.

- Interferencia intersistema: producida por uno o más sistemas externos, diferente al sistema de estudio, puede ser terrenal o espacial, e incluso utilizar la misma banda de frecuencias y prestar un servicio distinto al del sistema de estudio.

Es conveniente resaltar que no existe ninguna distinción técnica al realizar cálculos de la posible interferencia entre dos dispositivos, ya sea que su origen sea intrasistema o intersistema, los cálculos se realizan de la misma forma [6].

El segundo criterio de clasificación de interferencia es según la posición en frecuencia relativa de la señal interferente respecto de la deseada, clasificadas en:

- Interferencia co-canal.
- Interferencia de canal adyacente.

1.2.3 Interferencia co-canal

La interferencia co-canal se produce cuando dos o más estaciones transmisoras utilizan la misma frecuencia o canal para transmitir sus señales, y estas se superponen en el espacio, causando distorsión o pérdida de información [8]. El nivel de este tipo de interferencia depende tanto de características de emisión del transmisor interferente como de las características de rechazo co-canal en el receptor víctima de interferencia. En el servicio móvil terrestre en las bandas VHF y UHF, las estaciones co-canal deben estar separadas entre sí, una distancia de hasta 120 km, esta distancia varía según las condiciones del terreno y la frecuencia de operación [9].

1.2.4 Interferencia de canal adyacente

La interferencia de canal adyacente también conocida como interferencia entre canales, sucede cuando se presenta una señal interferente⁸ en un canal contiguo al deseado, en el plan de canalización. Generalmente este tipo de interferencia se presenta cuando no existe una suficiente separación entre las frecuencias asignadas a cada canal o porque el transmisor interferente del canal contiguo está superando los niveles permitidos previamente establecidos para la transmisión de su señal, en ocasiones puede deberse también a estaciones que estén operando sin licencia [4, 8].

Los efectos de este tipo de interferencia son el resultado de la interacción entre las señales deseadas, la interferencia y las características del receptor para varias separaciones de frecuencia. Estos pueden ser expresados en términos de separación frecuencia-distancia, el requerimiento Rechazo Dependiente de la Frecuencia (FDR, *Frequency Dependent Rejection*) o la relación de protección de canal adyacente específica del sistema [8].

El receptor víctima tiene un valor máximo de interferencia aceptable I_M , este factor determina si la interferencia de canal adyacente es aceptable o es perjudicial. Si se cumple la relación de la ecuación (1) el funcionamiento del receptor es aceptable:

⁸ El nivel de la señal interferente percibido en el receptor depende de las características de rechazo (filtrado) del receptor.

$$L_b(d) + FDR(\Delta f) \geq P_t + G_t + G_r - I_M, \quad (1)$$

donde:

$L_b(d)$: Pérdidas debido a la distancia entre el receptor y la interferencia.

P_t : Potencia de transmisión del interferente.

G_t : Ganancia de la antena interferente.

G_r : Ganancia de la antena receptora.

I_M : Interferencia mínima aceptable.

$FDR(\Delta f)$: Factor de rechazo dependiente de la frecuencia.

1.2.5 Desensibilización

La desensibilización también llamada bloqueo, es un caso particular de interferencia de canal adyacente y se presenta cuando el transmisor interferente se encuentra muy cerca del receptor. Si la señal interferente es lo suficientemente fuerte, el receptor puede ser conducido a saturación y permanecer bloqueado. El nivel de desensibilización depende de las características de rechazo del receptor [8]. Para evitar este tipo de interferencia se pueden emplear filtros, reubicar las estaciones, y reducir el exceso de potencia del transmisor interferente.

1.2.6 Intermodulación

La intermodulación es un fenómeno que ocurre en componentes electrónicos no lineales, como amplificadores de potencia, mezcladores y dispositivos similares. Cuando dos o más señales de entrada son amplificadas o procesadas por estos componentes no lineales, se generan nuevas señales en frecuencias que son combinaciones lineales de las frecuencias originales de entrada. Estas nuevas señales se conocen como productos de intermodulación y generalmente aparecen a frecuencias que no son las mismas que las señales de entrada ni armónicos de ellas.

Los productos de intermodulación pueden ser perjudiciales en sistemas de comunicaciones porque pueden causar interferencia en otras frecuencias del espectro radioeléctrico. Esto puede llevar a problemas de calidad de señal, distorsión y dificultades para recibir o transmitir información de manera efectiva.

Los productos de intermodulación a una frecuencia f_{IM} son generados por la mezcla de dos o más señales no deseadas a las frecuencias f_1, f_2, \dots . La relación que existe entre f_{IM} y f_1, f_2, \dots , se puede expresar en la ecuación (2):

$$f_{IM} = |u_1 f_1 + u_2 f_2 + \dots|, \quad ; u_v = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (2)$$

El orden del producto de intermodulación viene dado por $n = |u_1| + |u_2| + \dots$. Esto significa que el producto de intermodulación de segundo orden IM_2 siendo, $n = 2$ con $u_1 = 1$ y, $u_2 = 1$ viene

dado por $f_{IM} = |f_1 + f_2|$ y el producto de intermodulación de tercer orden IM_3 siendo, $n = 3$ con $u_1 = 2$ y, $u_2 = 1$ viene dado por $f_{IM} = |2f_1 + f_2|$. Los productos de intermodulación $2f_1 - f_2$, $2f_2 - f_1$ y $f_1 + f_2 - f_3$ son de mayor interés para mitigar, esto debido a que se encuentran cerca del espectro de frecuencias de las señales deseadas [10].

Para mitigar los efectos de la intermodulación, se utilizan técnicas de diseño de componentes electrónicos lineales, filtros y técnicas de gestión de potencia para garantizar que las señales de entrada no provoquen una intermodulación significativa en el sistema. Esto es especialmente importante en sistemas de comunicaciones de alta potencia y frecuencia, como las redes de telefonía móvil y las transmisiones de radio y televisión.

1.3 PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES

La evaluación de la interferencia en sistemas de comunicaciones móviles terrestres es fundamental para garantizar un desempeño óptimo y una calidad de servicio confiable. Para llevar a cabo un análisis efectivo de la interferencia, es esencial considerar una serie de parámetros que permiten comprender y cuantificar las condiciones del sistema [5].

1.3.1 Bandas de frecuencia de operación

El Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) [11] establece las condiciones de uso del espectro radioeléctrico en Colombia, de acuerdo con las disposiciones internacionales y nacionales vigentes, como el Reglamento de Radiocomunicaciones de la ITU, que define la atribución, notas y observaciones del espectro a nivel mundial. El CNABF contiene las tablas de atribución de bandas de frecuencia hasta el valor de 275 GHz, las notas colombianas, internacionales y las tablas anexas con información complementaria, se actualizan periódicamente para incorporar los avances tecnológicos, los cambios regulatorios y las demandas de los usuarios del espectro. El CNABF es elaborado y publicado por la Agencia Nacional del Espectro (ANE), entidad encargada de la gestión y administración del espectro radioeléctrico en Colombia.

De acuerdo con el CNABF, en la banda de 30 MHz a 470 MHz existen las siguientes asignaciones para sistemas del servicio móvil terrestre contempladas en la Tabla 2.

Tabla 2. Bandas de frecuencia para el servicio de radio móvil

Banda de frecuencia (MHz)	Tipo de servicio
(30-50)	Servicio de radiocomunicaciones móviles y fijos.
(50-54)	Radioaficionados.
(54-108)	Radiodifusión.
(138-174)	Servicio de radiocomunicaciones móviles y fijos.
(380-398)	Frecuencias asignadas para servicios de comunicaciones móviles de banda ancha para ser brindados por medio de redes locales privadas

	(no prestación de servicios a terceros) en configuración de Duplexación por División de Tiempo (TDD, <i>Time Division Duplexing</i>).
(412-420)	Frecuencias para servicios fijos y móviles de radio troncalizado.
(422-430)	Frecuencias para servicios fijos y móviles de radio troncalizado.
(440-470)	Servicios de radiocomunicaciones móviles y fijos.

1.3.2 Ancho de banda de canal

En los sistemas de radio móvil terrestre que operan en la banda de frecuencia de 30 MHz a 470 MHz, existen 6 valores de ancho de banda, los cuales son: 6,25 KHz, 12,5 KHz, 25 KHz, 3 MHz, 5 MHz y 10 MHz [9]. Los primeros anchos de banda son los relacionados con servicios de radio móvil profesional o denominados sistemas de comunicación de misión crítica, y los anchos de banda de 3 MHz, 5 MHz y 10 MHz son considerados en servicios fijos y móviles en redes locales privadas de banda ancha.

1.3.3 Potencia de transmisión

Es la potencia media suministrada a la línea de alimentación de la antena por un transmisor durante un ciclo de radiofrecuencia sin presencia de modulación [12]. Esta potencia se mide generalmente en vatios (W) o decibelios-miliwatt (dBm) y es un factor crucial en la determinación de la cobertura, alcance y calidad de una red de comunicación. La potencia de transmisión para sistemas de radio móvil, puede tomar valores de 1 W y 50 W [13].

1.3.4 Ganancia de antena

Es una medida que representa la capacidad de una antena para dirigir o concentrar la energía entregada por el transmisor en una dirección específica del espacio en comparación con una antena de referencia, como un radiador isotrópico. Se expresa en decibeles (dBi) y refleja cuanto más concentra la antena observada con relación al radiador isotrópico. En situaciones ideales sin pérdidas, la ganancia sería igual a la directividad [14]. En el manual de comprobación técnica del espectro se define la ganancia para antenas directivas trabajando en ondas métricas y decimétricas [15], en donde un valor máximo de ganancia para las antenas de estación base o repetidora es de 7 dBd (9,2 dBi), y un valor máximo de ganancia para las antenas móviles de 0 dBd (2,2 dBi).

1.3.5 Nivel de ruido

Los niveles de ruido o ruido de fondo en la banda de frecuencias entre 0,1 Hz y 100 GHz están dados en la de la Rec. ITU-R P.372 [16]. El nivel de potencia de ruido disponible suministrada por una antena sin pérdidas equivalente P_n se indica en la ecuación (3) y depende del factor de ruido externo F_a proporcionado por la misma recomendación y presentado en la Fig. 3, donde la curva A representa el factor de ruido artificial mediano en una zona urbana, las curvas B, C, D y E corresponden a fuentes de ruido galáctico.

$$P_n = F_a + B - 204 \text{ (dBW)}, \quad (3)$$

donde:

F_a : Factor de ruido externo.

b : Ancho de banda de la potencia de ruido del sistema receptor (Hz).

$$B = 10 \log b.$$

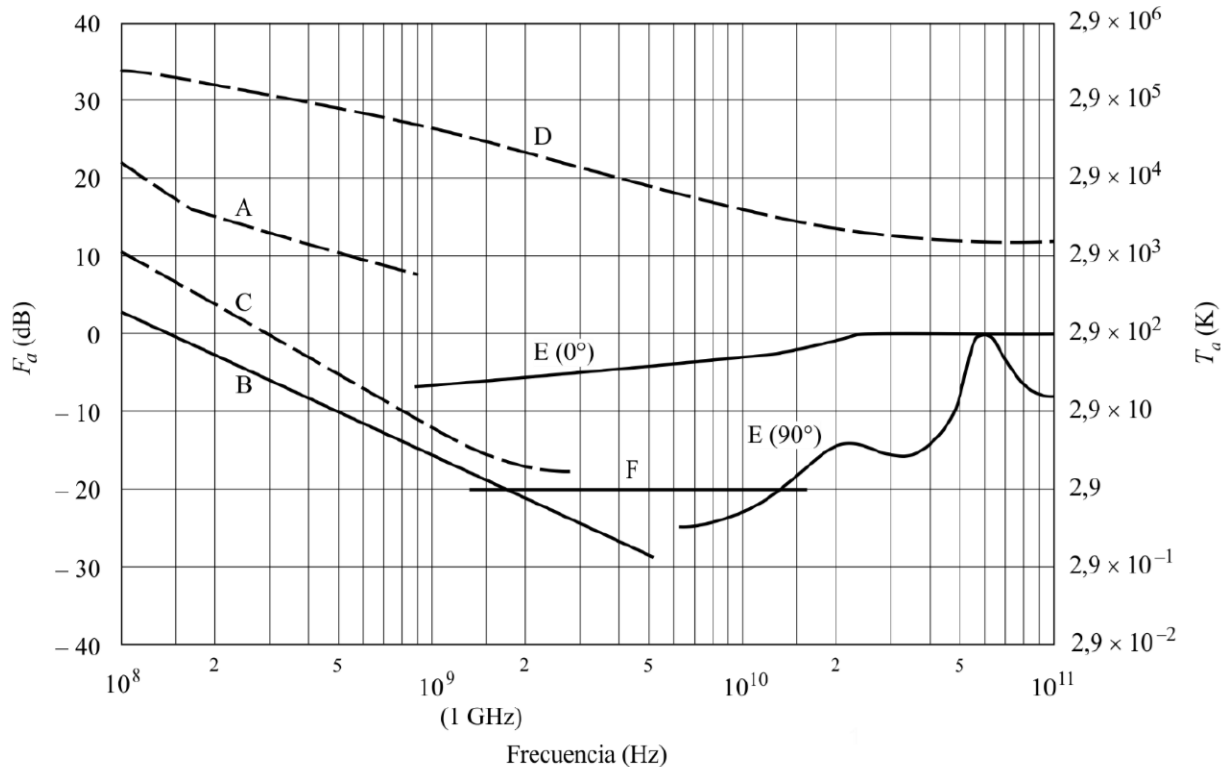


Fig. 3. Valores de factor de ruido en función de la frecuencia.
Fuente: Tomada de [16].

1.3.6 Sensibilidad

También conocida como umbral del receptor, se refiere al nivel de potencia mínimo (en μV , $\text{dB}\mu\text{V}$ o dBm) que un receptor es capaz de detectar, asegurando una demodulación precisa y la obtención de información a un nivel apropiado. Este nivel de señal recibido es suficiente para

cumplir con los requisitos de calidad de servicio, lo que garantiza un funcionamiento óptimo de un enlace de radiocomunicación [5]. Para sistemas de radio móvil, el valor de sensibilidad de un receptor se define de tal manera que la señal a la salida del receptor tenga un valor de Relación Señal a Ruido y Distorsión (SINAD, *Signal to Noise and Distortion Ratio*) de aproximadamente 12 dB [17].

La sensibilidad se puede dividir en dos categorías: sensibilidad estática y sensibilidad dinámica. La sensibilidad estática se refiere a la especificación proporcionada por el fabricante y se mide en entornos de laboratorio controlados. Por otro lado, la sensibilidad dinámica se obtiene bajo condiciones de operación real, teniendo en cuenta factores como la degradación causada por el ruido, efectos de multitrayectoria y variaciones estadísticas. En este contexto, los valores de sensibilidad estática oscilan entre $0,25 \mu\text{V}$ (-12,04 dB μV) y $0,275 \mu\text{V}$ (-11,21 dB μV) para una SINAD de 12 dB, los cuales corresponden a un nivel de potencia medido sobre una impedancia de 50 Ohms de -119,04 dBm y -118,21 dBm, respectivamente [9].

1.3.7 Relación portadora a interferencia

Es necesario evaluar la relación entre las potencias de señal deseada y señal interferente a la entrada del receptor víctima o interferido, esta relación se denomina relación portadora a interferencia y es utilizada principalmente en enlaces punto a punto, para enlaces zonales se define el parámetro Relación de Protección [4]. Utilizando el modelo de la Fig. 4, en el que se muestra el enlace deseado y el interferente, se realizan los siguientes cálculos:

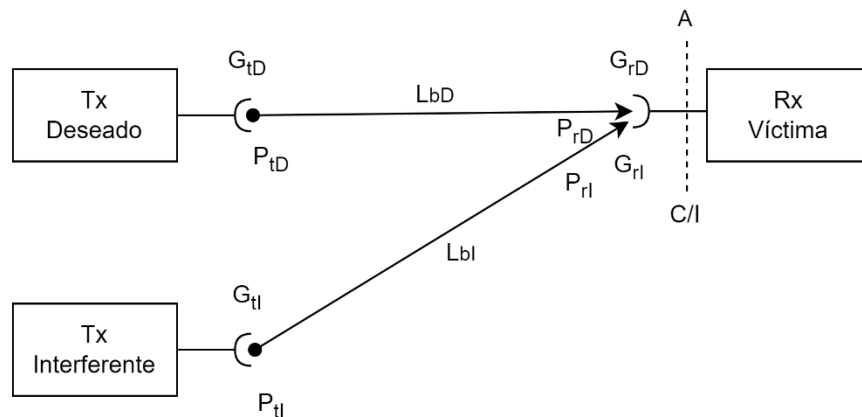


Fig. 4. Modelo de estudio de interferencia.
Fuente: Adaptado de [4].

- Potencia recibida de señal deseada:

$$C = P_{rD}(\text{dBm}) = P_{tD} + G_{tD} - L_{bD} + G_{rD}, \quad (4)$$

- Potencia recibida de señal interferente:

$$I = P_{rI}(dBm) = P_{tI} + G_{tI} - L_{bI} + G_{rI}, \quad (5)$$

- Relación portadora a interferencia:

$$\frac{C}{I}(dB) = P_{rD} - P_{rI} = P_{tD} - P_{tI} + (G_{tD} + G_{rD}) - (G_{tI} + G_{rI}) + L_{bI} - L_{bD}, \quad (6)$$

donde:

P_{tD} : Potencia del transmisor deseado.

P_{tI} : Potencia del transmisor interferente.

G_{tD} : Ganancia de la antena del transmisor deseado.

G_{tI} : Ganancia de la antena del transmisor interferente.

G_{rD} : Ganancia de la antena receptora en el enlace deseado.

G_{rI} : Ganancia de la antena receptora en el enlace interferente.

L_{bD} : Pérdidas de propagación del enlace deseado.

L_{bI} : Pérdidas de propagación del enlace interferente.

En el caso que existan múltiples interferencias, la relación se calcula mediante la ecuación (7).

$$C/I = P_{rD} - 10 \log \left(\sum_{i=1}^n P_{rIi} \right) (dB), \quad (7)$$

donde:

P_{rD} : Potencia recibida de señal deseada.

P_{rIi} : Potencia recibida de cada señal interferente.

Determinados valores de relación portadora-interferencia son usados como relación de protección en diferentes servicios inalámbricos; éstos sirven de referencia para los sistemas de radiocomunicaciones dependiendo del tipo de servicio prestado en las bandas de interés. En Colombia, para los servicios de radio móvil terrestre, con ancho de banda de 12,5 KHz, se recomienda valores de relación de protección de 8 dB como mínimo [8]. En caso de que un sistema de radio difusión sonora opere en la misma frecuencia de un sistema de radio móvil terrestre se debe proteger con un mínimo de 10 dB de relación de protección [18].

1.3.8 Relación de Protección

Es el valor mínimo, generalmente expresado en dB, de la relación entre la señal deseada y la señal interferente a la entrada del receptor, determinado en condiciones específicas, suficiente para obtener una calidad de servicio requerida de la señal deseada a la salida del receptor [5]. En el punto de ubicación de la antena receptora se tiene que la relación de protección está dada por la ecuación (8):

$$R_p(dB) = P_{tD} - P_{tI} + (G_{tD} - G_{tI}) + L_{bI} - L_{bD}, \quad (8)$$

El incumplimiento de la relación de protección puede tener implicaciones, como la desensibilización del receptor. También pueden surgir fenómenos, como el efecto de captura en sistemas que emplean Modulación en Frecuencia (FM, *Frequency Modulation*). A menudo, las relaciones de protección necesarias para proteger a un determinado servicio de radiocomunicación se establecen a través de medidas experimentales, sin embargo, se encuentra que para señales analógicas y digitales de banda estrecha se puede utilizar una relación de protección de alrededor de 7 dB [19].

1.3.9 Máscara espectral

La máscara espectral es un conjunto de líneas definidas matemáticamente que limitan los niveles de transmisión de las señales radio o sus componentes en frecuencia, en función de la separación en frecuencia de cada componente con respecto a la frecuencia central del canal. La máscara espectral busca limitar la interferencia de canal adyacente por limitación de la radiación excesiva fuera del ancho de banda de canal. La atenuación de emisiones Fuera de Banda (OOB, *Out of Band*) y emisiones parásitas, es generalmente realizada por medio de un Filtro Pasa Banda (BPF, *Band Pass Filter*) sintonizado a la frecuencia central del canal. La máscara espectral se define en términos del ancho de banda de los canales, o de la separación entre canales, y establece el límite de potencia para las emisiones dentro y fuera de banda que son admisibles [20].

En los sistemas de radio móvil existen máscaras espectrales para cada uno de los anchos de banda de canal, siendo la máscara de emisión tipo B para los sistemas con canales de ancho de banda igual a 25 KHz, la máscara de emisión tipo D para los sistemas con canales de ancho de banda igual a 12,5 KHz; y una máscara de emisión tipo E para los sistemas con canales de ancho de banda igual a 6,25 KHz [9, 21].

1.3.10 Selectividad

La selectividad en frecuencia se define como la capacidad de un dispositivo o equipo para resolver señales, es decir, la selectividad indica la medida en la que un equipo, generalmente el receptor, puede seleccionar la señal deseada y a la vez, discriminar señales interferentes de canales adyacentes [5].

1.4 TIPOS DE MEDICIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES TERRESTRES

El proceso de medición consiste en asignar un valor a un atributo, parámetro, métrica o fenómeno, el resultado debe ser independiente del procedimiento utilizado, pero es importante la precisión del procedimiento para obtener un valor fiable⁹ en la medición, esta precisión puede ser una medida que se determina por el número de dígitos significativos que contiene e indica la cualidad de estar definida o expresada exacta o claramente [14, 15]. El proceso de medición debe tener en cuenta las siguientes consideraciones [23]:

- Atributo, parámetro, métrica o fenómeno a medir.
- Condiciones de las operaciones.
- Sistema de medición, equipos y configuración a utilizar.
- Secuencia de operaciones técnicas a aplicar.
- Resultado de la estimación

En esta sección se presentan los tipos de mediciones y metodologías de medición existentes relacionadas al análisis de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles en diferentes bandas de frecuencia. Esta información se clasifica como:

- Mediciones encontradas en organizaciones de estandarización y normalización.
- Mediciones encontradas en fuentes académicas.

1.4.1 Organizaciones de estandarización y normalización

Cada país tiene sus propias leyes y organizaciones de estandarización y en la mayor parte de organizaciones toma relevancia el concepto de Compatibilidad Electromagnética (EMC, *Electromagnetic Compatibility*), entendida como la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente sin introducir perturbaciones electromagnéticas no tolerables [24], desde el diseño hasta el mercado de productos están regidos por organizaciones e instituciones que trabajan para promover la cooperación en materia de estandarización, mediante la publicación de varias normas o estándares.

Una norma o estándar es desarrollada por comités técnicos y es un documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido que contiene una descripción técnica de las reglas, directrices o características que debe cumplir un producto, servicio u objeto, para uso común y repetido. Hay varias partes interesadas como: productores, usuarios, laboratorios¹⁰, autoridades y consumidores. Las normas se basan en la experiencia real y conducen a resultados materiales en la práctica (productos, tanto bienes como servicios, métodos de prueba, entre otros).

⁹ La fiabilidad indica el grado de certidumbre (o seguridad) con el que se ejecuta una medición con independencia de la velocidad o de la precisión, pero dentro de un intervalo de observación determinado, bajo condiciones similares [22] *Vocabulario de términos de las telecomunicaciones móviles internacionales*, Rec. ITU-R M.1224-1, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012.

¹⁰ Los laboratorios de pruebas acreditados emiten certificaciones para los productos.

Las normas son documentos reconocidos como válidos a nivel nacional, regional o internacional; se revisan periódicamente y evolucionan con el progreso tecnológico y social. Generalmente, las normas no son obligatorias, sino voluntarias. En ciertos casos su implementación puede ser obligatoria (por ejemplo, requisitos de seguridad, instalaciones eléctricas, contratos públicos, entre otros). Hay cuatro tipos principales de normas [14]:

- Normas fundamentales en materia de terminología, metrología, convenciones, signos y símbolos.
- Métodos de prueba y estándares de análisis, que miden características.
- Estándares que definen las características del producto (estándar del producto), estándares de especificación (estándar de actividades de servicio) y estándares para los umbrales de desempeño que deben alcanzarse.
- Normas de organización que tratan de la descripción de funciones de una empresa y sus relaciones mutuas, del modelado de actividades (mantenimiento, logística, análisis de valor, gestión y aseguramiento de la calidad, de proyectos, sistemas, o de la producción).

La organización líder mundial que prepara y publica estándares internacionales para todas las tecnologías eléctricas y electrónicas es la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, *International Electrotechnical Commission*) [25]. La IEC, la ITU, la Organización Internacional de Normalización (ISO, *International Standardization Organization*) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) son cuatro organizaciones homólogas globales que desarrollan estándares internacionales [26].

- La ISO es una federación mundial fundada en 1947, con más de 125 miembros, más de 2.800 órganos de trabajo técnico y ha publicado más de 16.000 normas internacionales. que promueve la estandarización abarcando todos los campos excepto la ingeniería eléctrica y electrónica, que son responsabilidad de la IEC.
- La IEC es una organización fundada en 1906, con más de 50 miembros o comités nacionales por cada país, más de 10.000 normas publicadas, que se encarga de la estandarización internacional en los campos de la electricidad, la electrónica y las tecnologías y disciplinas relacionadas, tiene su sede en Ginebra, Suiza, al igual que la ISO. La incorporación de normas ISO y/o IEC a las colecciones nacionales es voluntaria.
- La ITU es una organización internacional fundada en 1865 para regular las telecomunicaciones y las radiocomunicaciones. Es parte de las Naciones Unidas desde 1947 y cuenta con unos 180 países y más de 400 entidades asociadas. La UIT elabora normas internacionales en los dos ámbitos nombrados y tiene su sede en Ginebra, Suiza.
- La IEEE, fundada en 1884, es la sociedad profesional técnica más grande del mundo con más de 380.000 miembros en más de 150 países y alrededor de 2.000 estándares. La Asociación de Estandarización de IEEE es la organización fundada bajo la cual se llevan a cabo todas las actividades y programas de estándares IEEE.

Los dispositivos, equipos y sistemas eléctricos y electrónicos en los mercados comerciales de todo el mundo deben cumplir con los requisitos de EMC. Los estándares EMC tienen ligeras diferencias de una región a otra y de un país a otro, pero en general son los mismos. Entre las organizaciones nacionales cabe mencionar el Instituto de Estandarización Británico (BSI, *British Standards Institute*) y la Comisión Alemana de Tecnologías Electrotécnicas, Electrónicas y de la Información (DKE, *Deutsche Kommission Elektrotechnik*).

También, en Estados Unidos existen:

- El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI, *American National Standards Institute*) fundado en 1918, es el representante oficial de EE. UU. ante la ISO y, a través del Comité Nacional de los Estados Unidos, ante la IEC.
- La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*), la cual es una agencia gubernamental de EE. UU., establecida por la Ley de Comunicaciones de 1934 y su jurisdicción cubre los 50 estados de EE. UU. y está a cargo de regular las comunicaciones interestatales e internacionales a través de radio, televisión, cable y satélite.

En la Unión Europea existen varias organizaciones de normalización:

- El Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC, *Comité Européen de Normalisation Électrotechnique*) fue fundado en 1959 y está ubicado en Bruselas, Bélgica. CENELEC cumple las mismas funciones que CEN dentro del sector electrotécnico.
- El Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*), desarrolla estándares europeos en el campo de las telecomunicaciones (ETS, *European Telecom Standard*). Su sede está en Sophia Antipolis, Francia. ETSI tiene 400 miembros (administraciones, operadores, organismos de investigación, industriales, usuarios) que representan a más de 30 países (UE, Europa del Este).

En Sudamérica y el resto del mundo por lo general las organizaciones nacionales de estandarización optan por adecuar las normas y estándares desarrollados por organizaciones internacionales, y consecuentemente las posibles diferencias entre países suelen ser inapreciables.

1.4.2 Estándares de mediciones de la Comisión Electrotécnica Internacional

Todos los equipos, dispositivos y sistemas que contienen componentes electrónicos y utilizan o producen electricidad se basan en las normas internacionales IEC y los sistemas de evaluación de la conformidad para funcionar, adaptarse y trabajar juntos de forma segura. La IEC proporciona una plataforma a empresas, industrias y gobiernos para reunirse, discutir y desarrollar estándares internacionales. Las dos organizaciones relacionadas con EMC bajo la IEC son el Comité Técnico TC77 sobre EMC y el Comité Especial Internacional sobre Interferencias de Radio (CISPR, *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*).

Hay cuatro estándares diferentes mencionados en la directiva EMC de la Unión Europea (UE, *European Union*):

- Estándares básicos: definen y describen el problema EMC, los métodos de medición y prueba, los principales equipos de medición y la configuración de prueba. No contienen límites y no establecen criterios de interferencia. Los estándares básicos de inmunidad y emisión EMC están especificados por IEC y CISPR, respectivamente (por ejemplo, CISPR 16 e IEC 61000).

- Estándares genéricos: son estándares que tienen que ver con un entorno EM particular. Especifican una serie adecuada de requisitos y pruebas que se utilizan para todos los productos y sistemas en este entorno. Hay dos entornos principales:
 - Industria residencial, comercial y ligera.
 - Industria.
- Estándares de familias de productos: estos estándares contienen límites especiales de emisión e inmunidad para una categoría específica de dispositivos (por ejemplo, CISPR 22, tecnologías de la información).
- Estándares específicos de producto: destinados para productos específicos.

1.4.3 Estándares de mediciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones

Las recomendaciones y reportes de la ITU relacionados a mediciones se clasifican de acuerdo con su categoría en la Tabla 3. En esta sección se presenta una síntesis de los métodos de medición del manual de comprobación técnica del espectro de la ITU-R [15], y otras recomendaciones, principalmente relacionados a las mediciones de señales deseadas e interferentes, donde se pueden encontrar procedimientos, métodos, equipos recomendados, entre otros aspectos.

Tabla 3. Manuales, reportes y recomendaciones ITU sobre mediciones.
Fuente: Adaptada de [23].

Categoría	Detalle del manual, reporte o recomendación
General	Rec. ITU-R SM.1050 Rec. ITU-R SM.1723 Rec. ITU-R SM.1794 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Cáp. 1
Radiogoniometría y localización	Rec. ITU-R SM.854 Rec. ITU-R SM.1598 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.7
Mediciones de ocupación de espectro y canal	Rec. ITU-R SM.1880 Reporte ITU-R SM.2256 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.10
Emisiones no deseadas	Rec. ITU-R SM.328 Rec. ITU-R SM.329 Rec. ITU-R SM.1752 Rec. ITU-R SM.1792 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.12
Medición en sistemas de radiodifusión digital	Rec. ITU-R SM.1682 Rec. ITU-R SM.1792 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.11 y 5.2

Monitoreo móvil	Rec. ITU-R SM.1708 Rec. ITU-R SM.1723 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 2.4.2
Formato de intercambio de datos estándar en estaciones de monitoreo	Rec. ITU-R SM.1809
Frecuencia	Rec. ITU-R SM.377 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.2
Intensidad de campo	Rec. ITU-R P.845 Rec. ITU-R SM.378 Rec. ITU-R SM.1447 Rec. ITU-R SM.1708 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.10
Modulación	Rec. ITU-R SM.1268 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.6 y 4.8
Ancho de banda	Rec. ITU-R SM.443 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.5
Análisis e identificación de señal	Rec. ITU-R SM.1052 Rec. ITU-R SM.1600 Manual de Comprobación Técnica del Espectro, 2011, Sección 4.8
Mediciones relacionadas a la inspección de instalaciones de radio	Reporte ITU-R SM.2130
Selectividad de receptores de monitoreo	Rec. ITU-R SM.1836 Reporte ITU-R SM.2125
IP3 de receptores de monitoreo	Rec. ITU-R SM.1837 Reporte ITU-R SM.2125
Figura de ruido de receptores de monitoreo	Rec. ITU-R SM.1838 Reporte ITU-R SM.2125
Velocidad de escaneo de receptores de monitoreo	Rec. ITU-R SM.1839 Reporte ITU-R SM.2125
Sensibilidad de receptores de monitoreo	Rec. ITU-R SM.1840 Reporte ITU-R SM.2125
Ruido radioeléctrico	Rec. ITU-R P.372 Rec. ITU-R SM.1753
Otros parámetros	Rec. ITU-R SM.337 Reporte ITU-R SM.2125

1.4.3.1 Medición del nivel de radiofrecuencia

El nivel de RF puede medirse ya sea en términos de tensión a la entrada del receptor o como potencia de entrada, para realizar la medición del nivel de RF de emisiones continuas se puede utilizar un receptor de medida o un analizador de espectro, cuando la señal está modulada se deben tener en cuenta ciertas consideraciones para realizar una buena medición, ya que se modifica la amplitud y espectro de la señal, por tanto, es importante conocer el tipo de nivel a medir y caracterizar el sistema bajo estudio, por ejemplo haciendo uso de la máscara espectral como parámetro de medición con el fin de detectar interferencias y evaluar si el sistema está operando en condiciones adecuadas. Los receptores de medida y los analizadores de espectro por lo general miden el nivel de RF utilizando distintos detectores de medida. Cada tipo de nivel tiene su respectivo detector de medida, estos se presentan a continuación:

- Nivel de cresta: es el máximo nivel emitido, es importante cuando se trata de una señal interferente, ya que determina la importancia de la interferencia en el sistema. El nivel de cresta se mide con un detector de cresta que disponga de la función de máximos, que selecciona el valor más alto de todas las amplitudes de RF instantáneas que se detectan en el tiempo de medición, eliminando los valores restantes, si se realiza la medida con un analizador de espectro esta función también es conocida como *MaxHold*.
- Nivel de RMS: es la potencia media emitida, valor eficaz o Cuadrático Medio (RMS, *Root Mean Square*), es el nivel más importante para señales continuas ya que especifica la energía contenida en la señal, se mide con un detector de RMS que calcula de entre todos los niveles de RF instantáneos, la potencia media en un tiempo de integración largo.
- Nivel medio de ráfaga: el nivel medio de ráfaga es la potencia media (RMS) durante una ráfaga cuando se trata de impulsos y se mide exclusivamente durante la ráfaga, sin tener en cuenta las pausas, con un detector de RMS.

En la Fig. 5 se presentan los niveles más relevantes que deben medirse para determinar el nivel de RF.

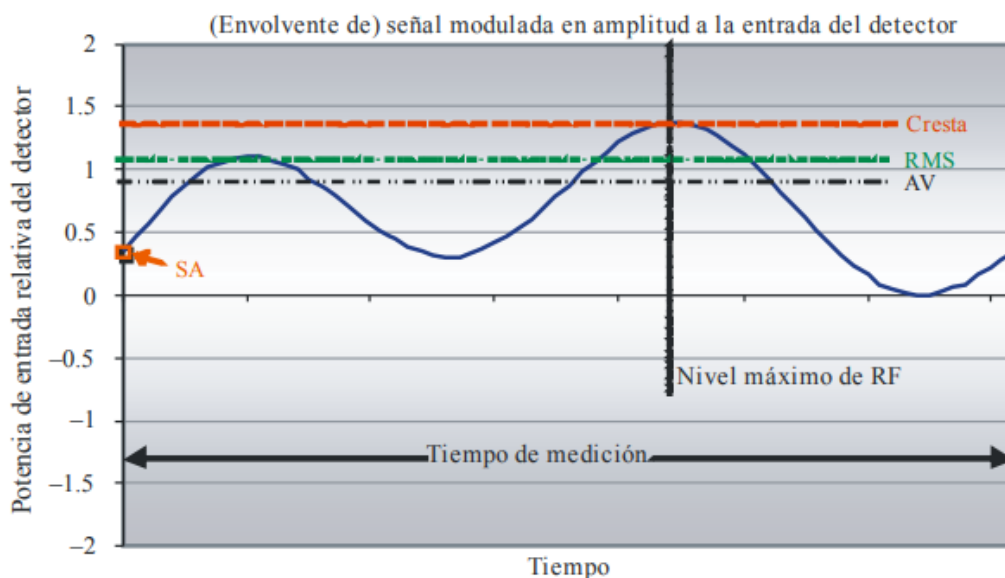


Fig. 5. Niveles para determinar el nivel de RF.

Fuente: Tomada de [15].

1.4.3.2 Medición de intensidad de campo

Los procedimientos para determinar la intensidad de campo o la densidad de flujo de potencia se basan en los procedimientos y resultados de la medición del nivel de RF, descritos anteriormente. Las mediciones de estos parámetros se pueden hacer con equipos móviles, portátiles, o incluso en estaciones fijas. También pueden ser de corta o larga duración y pueden implicar almacenamiento, para análisis estadístico y procesamiento. Este tipo de mediciones puede tener uno o más objetos o finalidades, las cuales se listan a continuación:

- Evaluar si la intensidad de una señal radioeléctrica y la eficacia de una fuente de emisión son suficientes para proporcionar un servicio determinado.
- Determinar los efectos de la interferencia intencionada, relacionada con EMC.
- Determinar la intensidad y efecto de una señal de interferencia no intencionada proveniente de cualquier equipo radiante de energía electromagnética.
- Medir los fenómenos de propagación para desarrollar y comprobar los modelos de propagación.
- Recopilar datos sobre ruido radioeléctrico.
- Asegurar el cumplimiento de las disposiciones pertinentes del Reglamento de Radiocomunicaciones.
- Evaluar la exposición humana a campos electromagnéticos.

Por lo general, las mediciones de intensidad de campo o de densidad de flujo de potencia se complementan con otras mediciones de la calidad de la señal, tales como la conversión de FM a AM, la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) y la respuesta impulsiva del canal en los sistemas de comunicaciones móviles digitales debido a la transmisión multitrayecto.

Para realizar las mediciones de intensidad de campo o de densidad de flujo de potencia, se definen tres regiones alrededor de la antena de transmisión:

- Región reactiva de campo cercano.
- Región radiante de campo cercano (Fresnel).
- Región de campo lejano (Fraunhofer).

El procedimiento para definir estas regiones se ejecuta a partir de las características de la antena, como también las unidades de medida del campo eléctrico (V/m, dB(μ V/m)), factores de antena (dB/m), campo magnético (A/m) y densidad de flujo de potencia (W/m^2). En cuanto a las técnicas de medición, se realiza una división por bandas de frecuencias, esta división es útil porque la técnica más adecuada a aplicar es distinta según la banda de frecuencias, ya que las características de las antenas son influenciadas por la relación entre sus dimensiones reales y las longitudes de onda de las señales a medir, así como por los efectos del terreno cercano. Las técnicas se dividen en las siguientes bandas:

- Frecuencias por debajo de 30 MHz.
- Frecuencias comprendidas entre aproximadamente 30 MHz y 1000 MHz.
- Frecuencias por encima de 1 GHz.

En el rango de frecuencias de 30 MHz a 1000 MHz, se usan antenas cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda. El dipolo resonante de media onda es la antena más común para medir la intensidad del campo, debido a su elevada eficiencia. Se deben tener precauciones al usar antenas dipolo para evitar el acoplamiento mutuo con el entorno y el cable de antena.

En frecuencias más altas, se utilizan antenas de banda ancha o antenas directivas como las log-periódicas y cónicas-log-espinales. La directividad de estas antenas reduce el acoplamiento mutuo con el entorno.

Los métodos de medida de intensidad de campo dependen del tipo de información datos que se desee obtener, algunos de ellos son:

- Registro continuo durante largos periodos (se han recopilado durante cerca de 30 años datos sobre la influencia de las variaciones estacionales y de las variaciones cíclicas del número de manchas solares sobre la propagación, en ciertos trayectos en la banda de radiodifusión en ondas hectométricas).
- Registro continuo durante periodos más breves, a fin de estudiar variaciones diurnas y nocturnas y otras variaciones a corto plazo del nivel de una señal.
- Muestreo a intervalos próximos (por ejemplo, durante 5 s cada 2 min).
- Muestreo más espaciado (por ejemplo, durante 10 min cada 90 min).

La Recomendación ITU-R SM.378 sugiere las siguientes condiciones para las mediciones de intensidad de campo:

- Para frecuencias entre 30 MHz y 1 GHz la precisión debe ser de ± 3 dB.
- La antena receptora debe tener la misma polarización de la transmisora, por lo que puede ser de tipo monopolo, dipolo de media onda, con alta ganancia.
- La altura recomendable es de 10 m sobre el suelo, y si es menor tener cuidado de evitar acoplamiento mutuo con la superficie más próxima a la antena (suelo o techo de un vehículo de medición).
- Para evitar factores que disminuyen la precisión como obstáculos, conviene en lo posible realizar mediciones en varios puntos adyacentes (observaciones agrupadas) y tomar el valor medio resultante, o efectuar registros continuos, con ayuda de un registrador móvil.

En los puntos de medida fijos o en estaciones se pueden efectuar mediciones:

- Instantáneas, si se busca la máxima intensidad de campo se puede variar la altura y orientación de la antena.
- De corta duración y larga duración, es decir, se varía el tiempo de medición (corto o largo) e intervalo de tiempo entre mediciones. Tiempos de medición largos implican calibración de los equipos y mediciones a largo plazo implican registro, almacenamiento y procesamiento de los datos.
- De la distribución espacial de la intensidad de campo, que busca obtener una estimación fiable de la intensidad de campo en un punto determinado, para ello es necesario medir en varios puntos dentro de un área delimitada.

En los puntos de medida móviles o a lo largo de una ruta se pueden efectuar mediciones:

- Estas mediciones se realizan en distintos puntos de la zona de cobertura los cuales deben ser registrados con sus respectivas coordenadas y nivel de intensidad de campo, lo cual permite generar una caracterización mucho más precisa de la intensidad de campo en la zona. Para sistemas digitales conviene realizar medición del nivel de señal, además de evaluar la calidad del sistema mediante la medición de la BER o Respuesta Impulsiva del Canal (CIR, *Channel Impulsive Response*). Para mediciones a lo largo de una ruta la transmisión debe ser continua.

- Para que las mediciones sean reproducibles es clave realizar un gran número de mediciones para procesarlas estadísticamente, ya que por factores externos¹¹ la medición se puede ver afectada.
- Para que pueda aplicarse el método estadístico se requiere que el número de puntos de prueba sea suficiente, para que los resultados muestren tanto el cambio lento en la intensidad de campo debido al desvanecimiento a largo plazo, como la variación debida al desvanecimiento a corto plazo. Se recomienda que la variación de los puntos de medición sea cada 0.8λ .

Los datos obtenidos de la comprobación técnica pueden utilizarse para:

- Estimar la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE), utilizada para calcular la cobertura de la estación.
- Evaluar y verificar el modelo de propagación y el Modelo Digital del Terreno (DTM, *Digital Terrain Model*).

1.4.3.3 Análisis de la señal e identificación del transmisor

El análisis de la señal¹² permite extraer información de una señal transmitida, lo que permite caracterizar tanto la señal (potencia, frecuencia, ancho de banda, modulación, entre otros parámetros) como el transmisor (ubicación). Además, el Reglamento de Radiocomunicaciones, establece en el artículo 19 la obligación de que todas las transmisiones sean identificadas mediante señales de identificación u otros medios [2]. Para identificar la señal se llevan a cabo varias tareas, incluida la determinación de los parámetros de la señal, características temporales como la duración de la emisión, espectrales como el ancho de banda y modulación.

El primer paso es verificar si la señal se puede detectar, en caso de que no, se utilizan dispositivos de acondicionamiento de señal de RF como conectores, cables, amplificadores de bajo ruido y filtros para lograr una calidad de recepción óptima.

Luego, se evalúa si la señal se puede demodular, en caso afirmativo se determina el tipo de modulación y se demodula la señal; posteriormente, se evalúa si la señal está codificada, si no está codificada se extrae información del flujo de datos y el proceso finaliza. Si está codificada debe evaluarse si contiene un identificador de llamada o código identificador legible, si no es legible deben aplicarse técnicas de decodificación hasta lograr identificar la señal.

Finalmente, se identifica la señal mediante sus parámetros intrínsecos¹³, que por lo general se obtienen a partir de mediciones de señal básica, mediante localización (radiogoniometría) o

¹¹ Valor mínimo o máximo de reflexión, altura de la antena receptora, estación del año, climatología, vegetación, humedad del entorno, entre otros.

¹² El análisis de la señal consiste en la detección, análisis espectral, identificación de la modulación, demodulación analógica y/o digital, identificación de código y decodificación del canal [15] *Manual de Comprobación Técnica del Espectro*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2011. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf

¹³ Parámetros intrínsecos hace referencia a los parámetros asociados a características temporales (forma de onda, duración), características espectrales (banda estrecha/ancho, ancho de banda, frecuencia, portadora única/múltiple), características de modulación (velocidad de símbolos, desplazamiento en frecuencia, lineal/no lineal, analógica/digital, en fase/frecuencia/amplitud, número de estados, constelación).

caracterización de la señal recibida (con receptor o analizador de espectro), lo cual implica medir cada parámetro como potencia, frecuencia, modulación y demás parámetros que puedan utilizarse para formar la onda de la señal. A nivel mundial, la ITU-R recopila este tipo de mediciones en bases de datos que pueden ser consultadas y útiles para la identificación de interferencias.

Se recomienda que los sistemas para el análisis de la señal tengan capacidades:

- En tiempo real mediante sistemas de Procesamiento Digital de Señales (DSP, *Digital Signal Processing*).
- De almacenamiento, por razones de portabilidad, o limitaciones en la capacidad de procesamiento en tiempo real.

La Fig. 6 resume el proceso de análisis de señal e identificación de un transmisor:

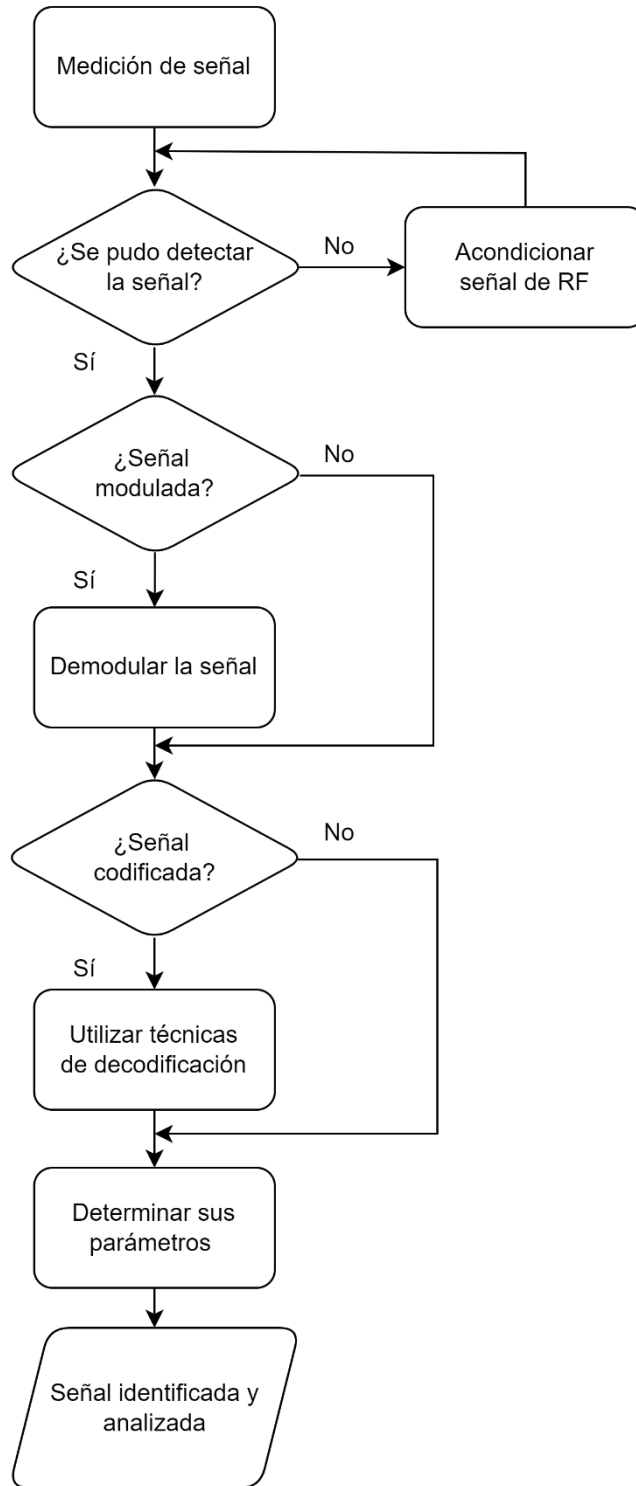


Fig. 6. Análisis de señal e identificación del transmisor.
Fuente: Adaptada de [15].

1.4.3.4 Medición de emisiones no deseadas

Es una tarea común de los servicios de comprobación técnica que tiene dos objetivos: verificar la conformidad de una emisión con una máscara de emisión incluida en una norma o una recomendación y/o determinar interferencias causadas por una emisión no deseada.

Las emisiones no deseadas son emisiones fuera del ancho de banda necesaria de una señal, y están conformadas por:

- Emisiones fuera de banda (resultantes de un proceso de modulación), en una o varias frecuencias situadas inmediatamente fuera del ancho de banda necesaria.
- Emisiones no esenciales (resultantes de una emisión armónica, parásita, de productos de intermodulación o de conversión de frecuencia), en una o varias frecuencias situadas fuera del ancho de banda necesaria, cuyo nivel puede reducirse sin influir en la transmisión de la información correspondiente.

En la Fig. 7 se muestran las emisiones no deseadas presentes en una transmisión, también se definen los dominios fuera de banda y no esencial junto con el ancho de banda necesario:

- **Dominio fuera de banda:** Rango de frecuencias externas y adyacentes al ancho de banda necesario, pero excluyendo el dominio no esencial, en la que generalmente predominan las emisiones fuera de banda.
- **Dominio no esencial:** Rango de frecuencias más allá del dominio fuera de banda en la que generalmente predominan las emisiones no esenciales.
- **Ancho de banda necesario:** Para una clase de emisión dada, ancho de banda de frecuencias suficiente para asegurar la transmisión de la información a la velocidad y con la calidad requeridas en condiciones específicas.

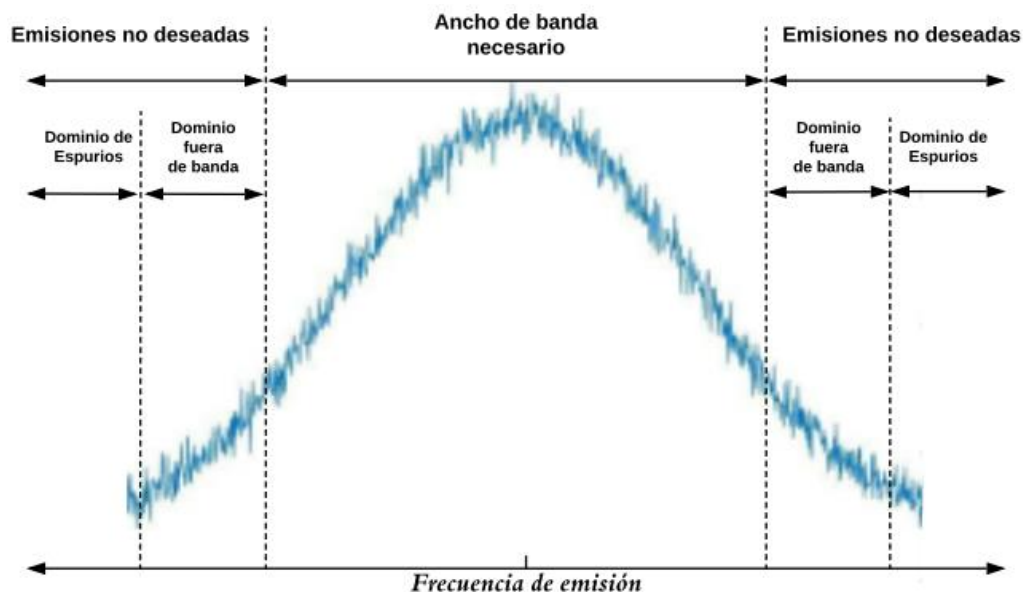


Fig. 7. Emisiones no deseadas.
Fuente: Tomada de [9].

1.4.3.5 Métodos de medición de ruido de la Rec. ITU-R SM.1753

La medición del ruido radioeléctrico puede ser una tarea complicada y su nivel puede no ser el único parámetro necesario para caracterizarlo completamente, en la Recomendación UIT-R SM.1753 se describe en detalle la configuración, el equipo requerido, el procedimiento de medición, la presentación y evaluación de los resultados en ambientes exteriores [27].

Determinar el nivel y las características verdaderas del ruido artificial, incluido el ruido impulsivo, para todas las bandas de frecuencia puede llevar mucho tiempo. Sin embargo, cuando sólo interesa la componente del Ruido Blanco Gaussiano (WGN, *White Gaussian Noise*), las mediciones pueden simplificarse notablemente sin perder información importante o disminuir la precisión. Por esta razón, al realizar las mediciones de ruido radioeléctrico se recomienda utilizar una de las siguientes metodologías:

- Tipo A: proporciona únicamente los niveles de WGN, ignorando el Ruido Impulsivo (IN, *Impulsive Noise*). Requiere realizar mediciones en una frecuencia libre. Para simplificar la medición y evaluación se considera que la componente de ruido gaussiano blanco está suficientemente caracterizada mediante el valor eficaz (RMS), por lo que en la mayoría de los casos se puede utilizar un equipo de comprobación técnica estándar.
- Tipo B: se obtienen los niveles de WGN y las características de los parámetros de IN importantes del ruido radioeléctrico. Requiere equipos de medición que puedan muestrear el nivel de la señal instantánea a una velocidad muy alta. La evaluación de los datos es más compleja y requiere una gran cantidad de procesamiento posterior, generalmente realizado por sistemas de cómputo.
- Tipo C: WGN, IN y separación del ruido artificial. Además del nivel de WGN y las características del IN, este tipo de medición separa el IN atmosférico del ruido artificial, lo cual reviste importancia en la banda de frecuencias de ondas decamétricas. El proceso de medición es igual a la medición de Tipo B, pero debe llevarse a cabo en dos emplazamientos distintos y los equipos en estos emplazamientos deben estar sincronizados en el tiempo.

El proceso de medición descrito consiste en:

- Seleccionar las ubicaciones de medición: se definen y clasifican distintos tipos de ubicaciones exteriores de acuerdo con la Rec. ITU-R P.372: rural remoto, rural, residencial, urbano, ciudad, área industrial, ferrocarril y carretera. Se recomienda realizar las mediciones en al menos 10 lugares por categoría. En ambientes interiores los resultados suelen variar y ser menores debido a la atenuación por la edificación, o mayores si existen fuentes de ruido dentro de la edificación [16].
- Seleccionar la frecuencia: para frecuencias superiores a 30 MHz suelen ser conocidas las asignaciones de frecuencias, en el caso de Colombia, se encuentran en el CNABF [11]. Se recomienda utilizar una frecuencia fija sin asignaciones activas. Esto se verifica primero en el CNABF y luego en la práctica realizando mediciones de ocupación durante un periodo de tiempo definido más adelante, utilizando la característica de *MaxHold* de un analizador, el resultado supone un espectro libre de emisiones, con niveles de ruido comparables al nivel calculado en la ecuación (3) y lo suficientemente alejada de los canales utilizados.
- Configuraciones del analizador/receptor: las recomendaciones para la configuración del equipo de medición (analizador de espectro o receptor) se presentan en la Tabla 4. El Ancho de Banda de Resolución (RBW, *Resolution Bandwidth*) y el Ancho de Banda de Video (VBW,

Video Bandwidth) son aspectos importantes para la visualización correcta de los niveles de ruido.

Tabla 4. Configuraciones del analizador/receptor para mediciones del piso de ruido.

Configuración	Recomendación
Tiempo de medición	Para el muestreo de datos sin procesar, es práctico ejecutar un escaneo de al menos 0.5 s de duración cada 10 a 30 s. Para mediciones WGN con un detector RMS, se recomienda un tiempo de barrido/escaneo de 10 a 20 s.
Rango de frecuencias de observación	Depende totalmente del uso de la banda de frecuencias elegida, es decir, del servicio; esta banda incluso se puede dividir en sub-bandas.
RBW	El valor recomendado para la banda de frecuencia de 30 MHz – 450 MHz es de 100 KHz para mediciones tipo B y C. Para tipo A es de 1 KHz.
VBW	Debe estar apagado si es posible, si es un analizador entonces debe ser al menos 10 veces el valor del RBW, si no, se deben aplicar calibraciones y correcciones sobre las medidas.
Detector	Para mediciones WGN el detector adecuado es el de nivel RMS.
Atenuador	usar 3 dB si no hay adaptación de impedancia entre la antena y el Amplificador de Bajo Ruido (LNA, <i>Low Noise Amplifier</i>) del receptor, para garantizar baja incertidumbre en la medición.
Preselector	Encendido si es posible.

- Periodo de medición: para frecuencias superiores a 30 MHz, se recomienda un período mínimo de estudio de 10 h durante el día laboral.
- Recopilación y procesamiento de datos posterior a la medición: en esta fase se realizan técnicas de corrección de ruido de equipo para separar el ruido externo del interno del equipo, se determina y valida el nivel de ruido haciendo uso del método del 20% [27] y otras técnicas que permiten presentar y estimar con un alto grado de exactitud el valor de piso de ruido.

1.4.3.6 Método de la Rec. ITU-R SM.337

En la recomendación ITU-R SM.337 se describe una metodología para calcular las separaciones en frecuencia y en distancia a fin de lograr un nivel de interferencia aceptable aplicable a los sistemas radioeléctricos [28]. Para ello, la metodología considera que los principales factores que determinan los criterios de separación en frecuencia o en distancia son:

- Desde el punto de vista del receptor: potencia de señal recibida, selectividad del receptor, potencia y distribución espectral del ruido, nivel de las señales interferentes captadas por el receptor, características del receptor, entre otros.
- Desde el punto de vista del transmisor: potencia de señal transmitida, radiaciones fuera del ancho de banda ocupado por la emisión y características del transmisor.
- Desde el punto de vista del canal: propiedades del medio de transmisión (las cuales son variables) y las pérdidas de propagación de las señales radio en función de la frecuencia y la distancia.

El cálculo de interferencia se realiza por medio de dos factores, factor espectral y factor espacial. De igual manera, se debe realizar la definición de un criterio de interferencia aceptable entre un sistema interferente y un sistema víctima de interferencia. El procedimiento general para determinar dichos factores y criterios se presenta a continuación:

- Factor espectral: depende de las características espectrales del transmisor interferente y de la respuesta en frecuencia del receptor interferido o víctima de interferencia. En el transmisor se tiene en cuenta la densidad espectral de potencia, la cual depende de la modulación y el ancho de banda de la señal de información. En el receptor es necesario identificar las características de respuesta en Frecuencia Intermedia (FI, *Intermediate Frequency*) del receptor, para lo cual pueden considerarse especificaciones del fabricante, por ejemplo, el ancho de banda en FI a 6 dB y 40 dB. El factor espectral se representa mediante el factor de Rechazo Fuera de canal (OCR, *Off-Channel-Rejection*) también conocido como FDR.
 - El factor OCR puede ser dividido en dos términos: un término de rechazo por la selectividad del receptor a la señal transmitida por un transmisor interferente que opera en la misma frecuencia y dentro de banda, denominado Rechazo Dentro de Banda (OTR, *On-Tune Rejection*); y un término de rechazo por la selectividad del receptor a la señal transmitida por un transmisor interferente que opera en la misma frecuencia y fuera de banda, denominado como Rechazo Fuera de Banda (OFR, *Off-Frequency Rejection*). OFR y OTR se relacionan con OCR por medio de la ecuación (9).

$$OCR(\Delta f) = OTR(\Delta f) + OFR(\Delta f). \quad (9)$$

- Factor espacial: conocido como factor Distancia en Frecuencia (FD, *Frequency Distance*) es una medida de la mínima separación en distancia requerida entre un transmisor interferente y un receptor víctima de interferencia como función de la diferencia entre sus frecuencias de operación y del modelo de propagación bajo consideración. Tanto la característica FD como el factor OCR constituyen medidas para la evaluación de numerosos casos de interferencia relacionados con compartición de frecuencias co-canal, frecuencias de canales adyacentes, permitiendo estimar la separación mínima en frecuencia y en distancia que garanticen el funcionamiento de los sistemas de comunicación inalámbricos bajo unos determinados parámetros de calidad.

El criterio de interferencia es una relación sencilla basada en el concepto de que la interferencia es perjudicial o aceptable, el cual se expresa mediante la relación de protección, por lo tanto, la interferencia se considera aceptable si se satisface la desigualdad de la ecuación (10):

$$P_d - P_i \geq \alpha, \quad (10)$$

donde:

- P_d (dBW): Nivel de la señal deseada.
- P_i (dBW): Nivel de la señal interferente.
- α (dB): Relación de protección.

Se describe un procedimiento para determinar la mínima separación en frecuencia y en distancia, el cual se resume en la Fig. 8:

- Etapa 1: determinar el nivel de la señal deseada, P_d (dBW), en la etapa de entrada del receptor interferido.
- Etapa 2: calcular el nivel de potencia de interferencia resultante en la entrada del receptor víctima de interferencia, aplicando el balance de enlace de la ecuación (11):

$$P_i = P_t + G_r - L_p - OCR(\Delta f), \quad (11)$$

donde:

- P_t (dBW): PIRE del transmisor interferente.
- G_r (dBi): Ganancia de la antena receptora en comparación a un radiador isotrópico.
- L_p (dB): Pérdida de propagación en el trayecto.
- OCR (dB): Factor de rechazo fuera del canal para una separación de frecuencia Δf (en Hz).

- Etapa 3: Sustituir P_d y P_i en (10) para derivar o calcular numéricamente una relación entre la separación en frecuencia y la separación en distancia de forma tal que la interferencia se considere aceptable.

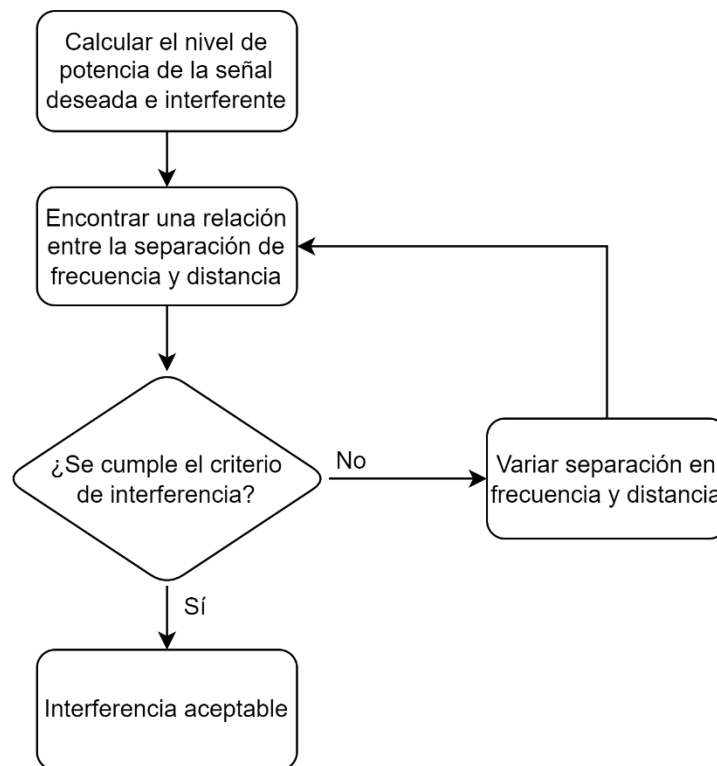


Fig. 8. Procedimiento Rec. ITU-R SM.337.
Fuente: Adaptada de [28].

1.4.4 Estándares de mediciones del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares

El Comité C63 de la ANSI se dedica a la normalización de la medición y control de la EMI y la EMC. Los estándares desarrollados por este comité abordan una amplia gama de temas relacionados con la gestión y mitigación de la interferencia electromagnética. Los siguientes son estándares que se relacionan con el servicio móvil terrestre y la metodología que se busca formular:

- ANSI/TIA-102: establece los estándares para los sistemas de comunicaciones móviles terrestres digitales, incluyendo las tecnologías CDMA2000, 1xEV-DO, y 1xEV-DV. Define las especificaciones técnicas para las interfaces aéreas, el control de potencia, el control de acceso al medio, y otros aspectos del servicio móvil terrestre.
- ANSI/TIA-603: establece los estándares para la interoperabilidad de equipos de radio de dos vías en el servicio móvil terrestre. Define las especificaciones técnicas para las características de transmisión y recepción, la sensibilidad, la selectividad, la potencia de salida, la modulación, y otros parámetros importantes [29].
- ANSI/TIA-804: proporciona los requisitos y recomendaciones para los sistemas de comunicaciones móviles terrestres de banda ancha, conocidos como sistemas 4G y 5G. Establece las especificaciones técnicas para las interfaces aéreas, las antenas, la modulación, la calidad de servicio, y otros aspectos clave de los sistemas de comunicaciones móviles de alta velocidad.

1.4.5 Mediciones del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones

La norma ETSI EN 301 489-1 [30] establece los requisitos técnicos comunes para garantizar que los equipos y servicios de radio cumplan con las regulaciones de EMC con el objetivo de minimizar la interferencia electromagnética y garantizar que los equipos de radio funcionen de manera adecuada en entornos electromagnéticos adversos. La norma trata los siguientes aspectos:

- Condiciones de prueba: establece que la configuración de la prueba y el modo de operación del sistema deben representar el uso previsto e incluirse en el reporte de la prueba. También determina las disposiciones sobre las señales de prueba dependiendo donde se realiza la medición, en la entrada o salida RF del transmisor o en la entrada RF o salida del receptor.
- Banda de exclusión de RF de equipos de radio: define la banda de exclusión para transmisores y receptores para equipos canalizados y no canalizados, teniendo en cuenta las recomendaciones ITU sobre dominios OOB y dominio de espurios o no esencial.
- Evaluación de desempeño del sistema: el fabricante debe proporcionar la siguiente información al presentar el equipo para su prueba, la cual debe ser registrada en el informe de prueba:
 - Las funciones previstas del equipo de radio, que deben estar en conformidad con la documentación que acompaña al equipo.

- El tipo de modulación, las características de la transmisión utilizada para las pruebas y el equipo de prueba necesario para evaluar el Equipo Bajo Prueba (EUT, por sus siglas en inglés).
 - El ancho de banda del filtro de IF inmediatamente antes del demodulador o el ancho de banda del sistema equivalente.
 - El método utilizado para verificar que se establece y mantiene un enlace de comunicación.
 - Las bandas de frecuencia de operación para las cuales se destina el equipo.
 - Cualquier limitación térmica del equipo que impida la prueba continua del EUT.
 - El entorno en el cual se pretende utilizar el equipo.
 - El ancho de banda ocupado de la señal del transmisor correspondiente para equipos no canalizados.
- Límites de emisión: establece límites máximos permitidos para las emisiones electromagnéticas generadas por equipos de radio. Esto se hace para evitar que las emisiones interfieran con otros equipos o servicios de radio, así como para garantizar la coexistencia y el cumplimiento de las regulaciones.
 - Inmunidad: establece requisitos para la inmunidad de los equipos de radio frente a fuentes externas de interferencia electromagnética. Esto implica que los equipos deben ser capaces de funcionar correctamente y sin interrupciones en presencia de interferencias electromagnéticas comunes en el entorno en el que se espera que operen.
 - Métodos de prueba: describe los métodos de prueba que deben utilizarse para evaluar la conformidad de los equipos y servicios de radio con los requisitos de EMC. Esto incluye detalles sobre las condiciones de prueba, los rangos de frecuencia a considerar y los límites de tolerancia permitidos.
 - Marcado y documentación: establece los requisitos sobre el uso de etiquetas, logotipos y declaraciones de conformidad en los productos y documentación que deben cumplir los equipos y servicios de radio para demostrar su conformidad con los requisitos de EMC. Esto incluye información.

1.4.6 Análisis de interferencia de sistemas de radiocomunicaciones basado en la relación de protección de radiofrecuencia.

Se presenta una metodología basada en la Relación de Protección de Radiofrecuencia (RFPR, *Radio Frequency Protection Ratio*) [31], ejecutando pruebas radiadas con el fin de analizar la interferencia para diferentes sistemas de comunicación por radio. También se presenta un método de prueba para calcular la RFPR radiada. La RFPR se expresa en dB y depende de la relación D/U que se describe en la ecuación (12).

$$D/U(\text{dB}) = D - U, \quad (12)$$

donde:

D (dBm): Potencia de la señal deseada en la antena del receptor víctima.

U (dBm): Potencia de la señal no deseada en la antena del receptor víctima.

En esta expresión, cuanto menor sea el valor de la relación D/U , es cuando el sistema se considera más susceptible a señales no deseadas.

1.4.6.1 Configuración de prueba

En la Fig. 9 se presenta la implementación de un sistema de prueba que consta de cuatro subsistemas: el subsistema de generación de señales deseadas; el subsistema de generación de señales de interferencia; el subsistema de recepción; y el subsistema de medición de potencia, cada uno con una antena en una cámara anecoica.

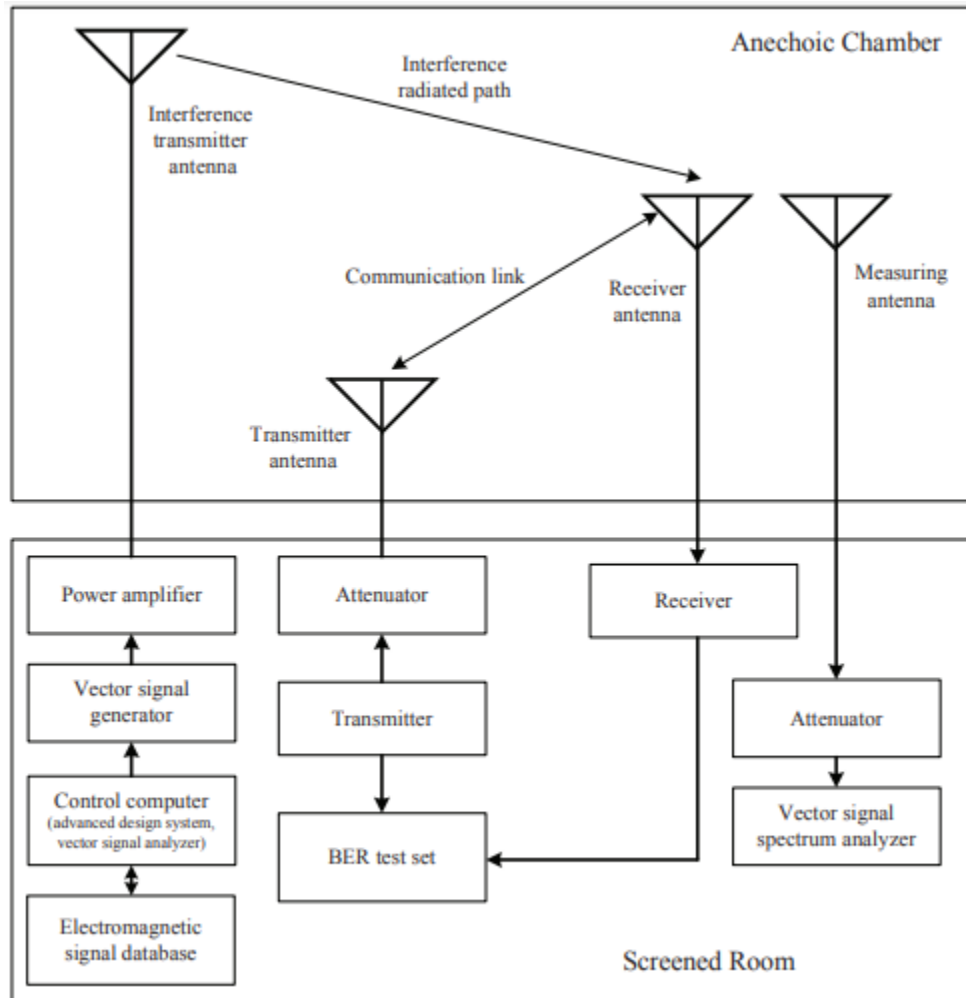


Fig. 9. Configuración de prueba utilizada para RFPR.
Fuente: Tomada de [31].

En la Fig. 10 se establecen los pasos que se utilizan para obtener la RFPR en presencia de una señal interferente:

1. Establecer enlace de radiocomunicación entre el generador deseado y el receptor, y determinar el nivel mínimo de señal. La potencia de señal mínima (en dBm) es la potencia de señal efectiva en la entrada del receptor cuando el nivel de señal en la salida del detector alcanza el umbral de BER.
2. Aumentar el nivel de la señal de entrada en 3dB para hacer una BER superior al umbral de BER.

3. Apagar el receptor y medir la potencia de la señal deseada con el subsistema de medición de potencia.
4. Con el subsistema de generación de señales de interferencia encendido, la potencia de la señal no deseada se aumenta hasta que se alcanza un umbral de BER en la salida del receptor.
5. Apagar el transmisor que irradia la señal deseada, y medir la potencia de la señal no deseada con el subsistema de medición de potencia.
6. La RFPR se calcula con la diferencia de la potencia de la señal deseada y la señal no deseada calculada en los pasos 3 y 5.
7. Finalmente se realizan los pasos anteriores para diferentes separaciones en frecuencia.

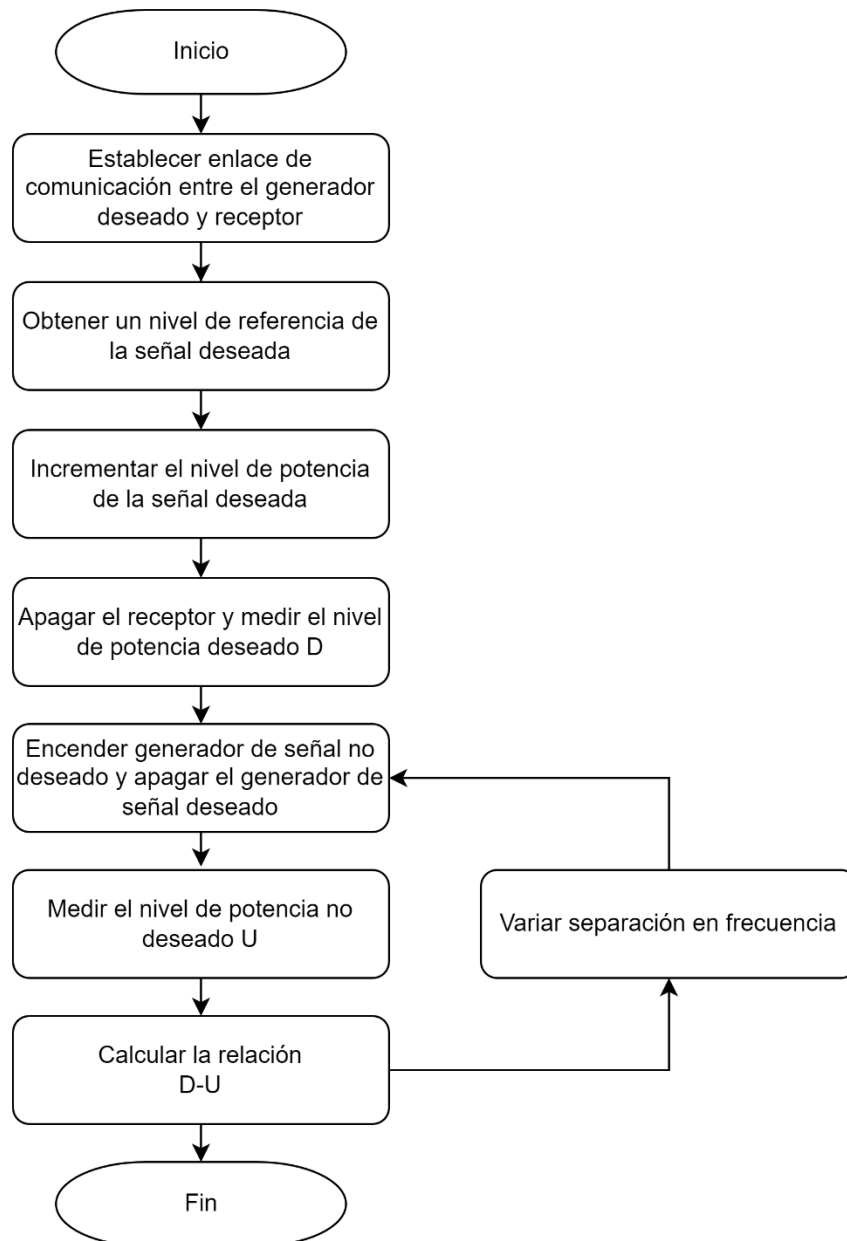


Fig. 10. Procedimiento de prueba basado en RFPR.

Fuente: Elaboración propia.

1.4.6.2 Metodología de análisis de interferencia basado en la RFPR

Se describe una metodología a utilizar en el análisis de interferencia para diferentes sistemas de comunicación por radio, basado en la RFPR obtenida mediante pruebas radiadas. En la Fig. 11 se muestra la metodología para el análisis de interferencia basado en RFPR.

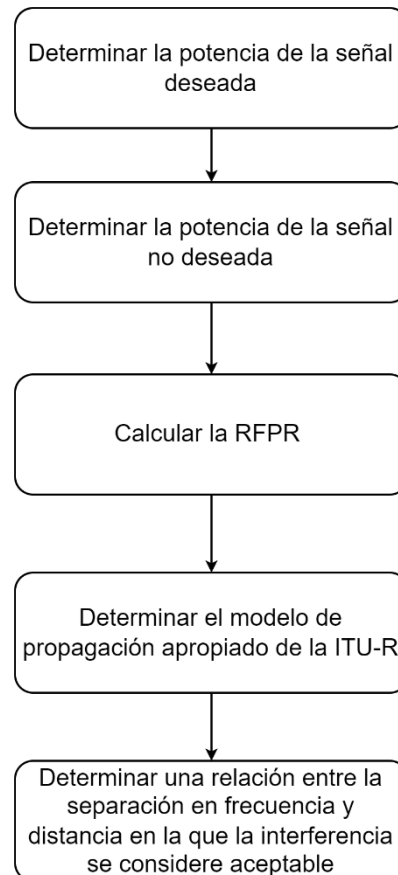


Fig. 11. Metodología de análisis de interferencia basado en RFPR.
Fuente: Elaboración propia.

1. Calcular la potencia de la señal deseada en la antena del receptor víctima.

$$D = Ptx_D + Gtx_D - Ltx_D + Grx_D - L_{RX} - L_b, \quad (13)$$

donde:

D (dBm): Nivel de señal deseado en la antena del receptor víctima.

Ptx_D (dBm): Potencia de salida del transmisor deseado.

Gtx_D (dBi): Ganancia de la antena transmisora deseada en dirección del receptor víctima con respecto a un radiador isotrópico.

Ltx_D (dB): Pérdidas del enlace de alimentación entre la salida del transmisor deseado y la entrada de la antena transmisora deseada.

Grx_D (dBi): Ganancia de la antena receptora en dirección del transmisor deseado con respecto a un radiador isotrópico.

- L_{RX} (dB): Pérdidas del enlace de alimentación entre la salida de la antena receptora y la entrada del receptor.
- L_b (dB): Pérdida de transmisión básica para una distancia de separación entre el transmisor y receptor deseados.

2. Calcular la potencia de la señal no deseada en la antena del receptor víctima.

$$U = Ptx_U + Gtx_U - Ltx_U + Grx_U - L_{RX} - L_b, \quad (14)$$

donde:

- U (dBm) : Nivel de señal no deseado en la antena del receptor víctima.
- Ptx_U (dBm): Potencia de salida del transmisor no deseado.
- Gtx_U (dBi): Ganancia de la antena transmisora no deseada en dirección del receptor víctima con respecto a un radiador isotrópico.
- Ltx_U (dB): Pérdidas del enlace de alimentación entre la salida del transmisor no deseado y la entrada de la antena transmisora no deseada.
- Grx_U (dBi): Ganancia de la antena receptora en dirección del transmisor no deseado con respecto a un radiador isotrópico.
- L_{RX} (dB): Pérdidas del enlace de alimentación entre la salida de la antena receptora y la entrada del receptor.
- L_b (dB): Pérdida de transmisión básica para una distancia de separación entre el transmisor y receptor deseados.

3. Determinar los efectos interactivos entre las señales deseadas y no deseadas para variar frecuencias o separaciones de distancia. Para que la interferencia se considere aceptable en un sistema de comunicación por radio se debe satisfacer la ecuación (15):

$$D - U \geq RFPR_{UMBRAL}, \quad (15)$$

donde:

$RFPR_{UMBRAL}$: RFPR umbral medido.

4. Determinar el modelo de propagación apropiado del ITU-R para ser utilizado.

El modelo de propagación a utilizarse con este procedimiento depende de la configuración del sistema, la banda de frecuencias de trabajo, el entorno geográfico de la zona de servicio y el ancho de banda del sistema. El modelo de propagación determina el aislamiento en distancia requerido en un sistema de radiocomunicaciones, en el que la interferencia se considere aceptable.

5. Finalmente, a partir de los datos obtenidos anteriormente, determinar una relación entre la separación de frecuencia y la separación de distancia en la que la interferencia se considere aceptable.

El valor máximo aceptable de potencia de señal no deseada en el extremo frontal del receptor de la víctima se puede derivar reorganizando la ecuación (15).

$$U_{MAX} \leq D - RFPR_{UMBRAL}, \quad (16)$$

Cuando se especifica el valor máximo aceptable de potencia de señal no deseada de una fuente de interferencia, la ecuación (14) se reordena para proporcionar la pérdida de propagación requerida.

$$L_b(D_U) = Ptx_U + Gtx_U - Ltx_U + Grx_U - L_{RX} - U_{MAX}, \quad (17)$$

Sustituir U_{MAX} en la ecuación (17) para calcular numéricamente una relación entre la separación de frecuencia y distancia.

$$L_b(D_U) = Ptx_U + Gtx_U - Ltx_U + Grx_U - L_{RX} - (D - RFPR_{UMBRAL}). \quad (18)$$

Usando la ecuación (18) se desarrolla un gráfico Frecuencia/Distancia que muestre varias combinaciones de las dos separaciones hasta que se logre la pérdida requerida entre las señales deseadas y no deseadas.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta una metodología para la medida de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles terrestres operando en la banda de 30MHz a 470 MHz. La formulación de la metodología de medición se realiza con base en una adaptación del Modelo en Cascada (*Waterfall Model*) [32]; la adaptación consiste en tres fases que se consideran relevantes para consolidar el cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado, las tres fases propuestas son:

- Análisis de requerimientos: en esta fase se identifican y especifican los requisitos funcionales y no funcionales de la metodología de medición.
- Diseño de la metodología de medición: se seleccionan y adaptan los elementos más adecuados para la metodología propuesta.
- Aplicación de la metodología de medición: en esta fase se implementa y ejecuta la metodología de medición propuesta, utilizando los equipos e instrumentos seleccionados y siguiendo el procedimiento establecido.

En síntesis, para lograr los objetivos planteados en el trabajo de grado y debido a que se ajusta a la secuencialidad y dependencia entre las actividades propuestas en el anteproyecto, se consideran las fases de la Fig. 12:

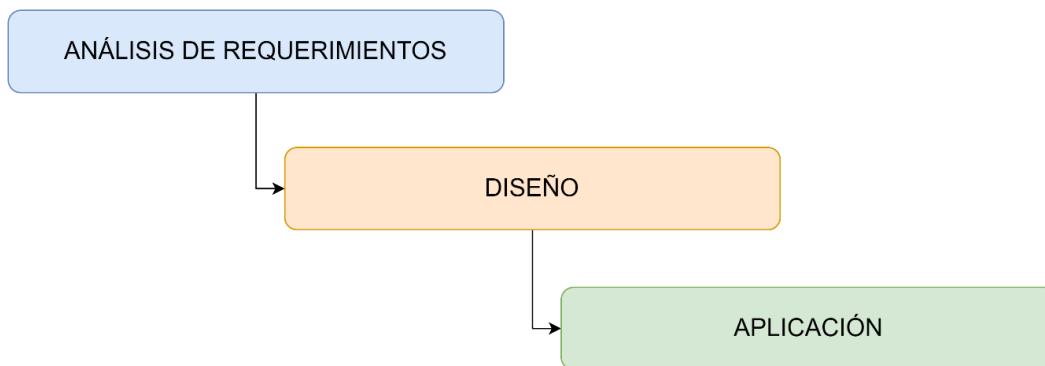


Fig. 12. Desarrollo metodológico del trabajo de grado.
Fuente: Adaptada de [32].

2.1 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

En esta fase se identifica y determina las necesidades de la metodología de medición. Los requerimientos funcionales son aquellos que describen las funciones, características y capacidades que el desarrollo debe realizar o proporcionar, mientras que los requerimientos no funcionales son aquellos que especifican los criterios de calidad, seguridad, usabilidad, entre otros, que el desarrollo debe cumplir o satisfacer [33]. El análisis de requerimientos también debe establecer los criterios de evaluación y validación de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología propuesta.

El despliegue de sistemas de comunicaciones móviles terrestres en la banda de frecuencia de 30 MHz a 470 MHz suele ser una tarea compleja que requiere una cuidadosa planificación y diseño, así mismo suele ser complejo el proceso de medición de señales sobre una red o sistema ya desplegado, puesto que habitualmente no se tiene control sobre los transmisores interferentes.

2.1.1 Requerimientos funcionales

- Definir un proceso para realizar mediciones de los principales parámetros de señales deseadas que permita el análisis de estas en sistemas de comunicaciones móviles terrestres.
- Definir un proceso para realizar mediciones de los principales parámetros de señales interferentes que permita el análisis de estas en sistemas de comunicaciones móviles terrestres.

2.1.2 Requerimientos no funcionales

- La metodología debe ser versátil para adaptarse a diferentes configuraciones y estándares de sistemas de comunicaciones móviles terrestres que operan en el rango de frecuencias establecido.
- La metodología debe ser adaptable a las condiciones variables del entorno y del sistema, con la intención de realizar mediciones en distintos lugares debido a la característica de movilidad del sistema de estudio.
- La metodología debe cumplir con las normas y regulaciones vigentes en materia de espectro radioeléctrico, seguridad y medio ambiente.
- La metodología no debe impactar de manera significativa en el funcionamiento normal del sistema de comunicaciones.

2.2 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

En esta fase se busca diseñar y formular la metodología de medición de señales deseadas e interferentes en el rango de 30 MHz a 470 MHz, teniendo en cuenta las características, configuraciones y metodologías de medición existentes que están relacionadas con los sistemas de comunicaciones que prestan el servicio móvil terrestre, tomando en consideración los parámetros previamente definidos, y tomando como entrada los requerimientos establecidos. Durante la fase de diseño, se establece la arquitectura y la definición de la metodología de medición.

2.2.1 Arquitectura

Se plantea una arquitectura general basada en el modelo de un sistema de comunicación móvil terrestre convencional, que cuenta con dos equipos transmisores, uno es el deseado y el otro el interferente, asociados a un equipo receptor. Para realizar las mediciones del parámetro correspondiente al análisis de las señales deseadas e interferentes, se utiliza un equipo de medición. En la Fig. 13 se presenta la arquitectura diseñada para la metodología de medición y los equipos que la componen.

Donde:

- Transmisor deseado e interferente: corresponde a los transmisores de las señales deseada e interferente que pueden variar su frecuencia de operación separados a una distancia determinada.
- Receptor: corresponde al dispositivo receptor de las señales transmitidas, ubicado a una distancia variable de los transmisores.
- Equipo de medición: corresponde al dispositivo encargado de medir el parámetro bajo análisis.

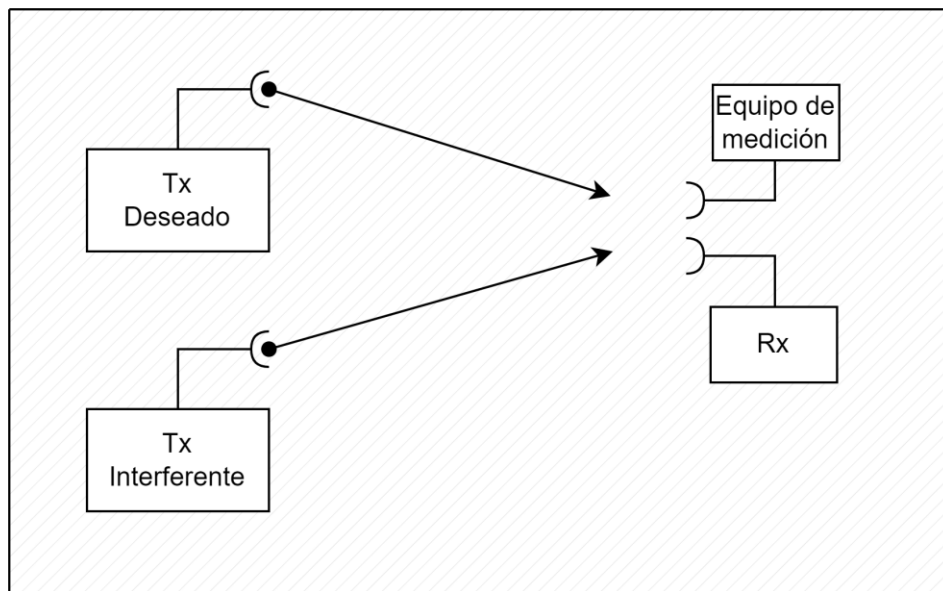


Fig. 13. Arquitectura propuesta para la metodología de medición.

Fuente: Elaboración propia.

Se diseña la metodología en dos escenarios diferentes para cumplir con los requerimientos. El primero se lleva a cabo en un entorno de laboratorio, mientras que el segundo se realiza en campo:

- En el escenario de medición en laboratorio se tiene control sobre los transmisores tanto deseado como interferente y se busca obtener el valor de un parámetro concluyente al momento de determinar la existencia y clasificación de una señal de interferencia. Este parámetro puede ser la relación de protección, la máscara espectral o cualquier otro que sea relevante para el sistema bajo estudio.

- En el escenario de medición en campo, se busca comparar el parámetro obtenido de la metodología en campo con los valores reales medidos en laboratorio. De esta forma, se puede analizar las posibles fuentes y causas de interferencia en el entorno real.

2.2.2 Metodología de medición en laboratorio

Un escenario de laboratorio se refiere a un entorno controlado donde se realizan mediciones en condiciones reguladas. En laboratorio, es posible ajustar o minimizar interferencias externas para obtener resultados precisos y reproducibles [29]. En la Fig. 14 se establecen las fases propuestas para la metodología en laboratorio:

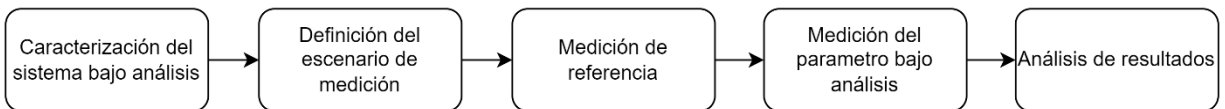


Fig. 14. Metodología de medición en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.1 Caracterización del sistema bajo análisis

Constituye el punto de partida en cualquier metodología de medición de señales. En esta fase, se busca obtener un entendimiento del sistema objeto de estudio mediante su caracterización, lo cual involucra la identificación de los componentes y parámetros esenciales del sistema, que permiten la evaluación de su comportamiento y desempeño en condiciones normales de referencia. Se considera relevante:

- Identificar las bandas de frecuencias asignadas al sistema, en el sitio donde se realiza la medición para reconocer los sistemas que pueden ser posibles fuentes de interferencia.
- Definir el sistema objeto de estudio, las condiciones de funcionamiento y los parámetros típicos del sistema de estudio para verificar su correcta operación y posteriormente, lograr la detección y el análisis de interferencias.

En la Tabla 5 se presentan los valores típicos de los parámetros más relevantes del servicio móvil terrestre [21].

Tabla 5. Parámetros típicos del servicio móvil terrestre

Parámetro	Valor
Ancho de banda	(6.25-12.5-25) KHz
Potencia de transmisión BS	(20-40) W
Potencia de transmisión MS	(1-10) W
Ganancia máxima de antena BS	9.2 dBi
Ganancia máxima de antena MS	2.2 dBi
Piso de ruido	~ -120 dBm
Sensibilidad del receptor BS	-120 dBm (SINAD 12 dB)
Sensibilidad del receptor MS	-120 dBm (SINAD 12 dB)

Relación de protección	≥ 7 dB
Máscara espectral	Tipo B, D, E

2.2.2.2 Definición del escenario de medición

El escenario de medición en laboratorio es un entorno controlado donde se realizan mediciones para evaluar ciertos parámetros y características, su definición se hace para conocer las condiciones de propagación, garantizar el funcionamiento correcto del sistema de comunicación y de los equipos de medición, también su disposición en la arquitectura propuesta facilita el cálculo del parámetro que se desea medir, ya que se busca que sea un escenario con características de espacio libre. En el escenario de medición se buscan establecer los siguientes aspectos [29]:

- Entorno físico: tener en cuenta las características del entorno físico donde se realiza la medición, es importante asegurar la no presencia de EMI, lo cual está contemplado en la fase de medición de referencia. Teniendo en cuenta que la medición se realiza en un entorno controlado, es necesario considerar factores ambientales como la temperatura, humedad y presión atmosférica, u otros que puedan influir en los resultados, las mediciones pueden realizarse dentro de los siguientes límites [29]:
 - Temperatura: 20°C - 35°C, durante cualquier serie de pruebas, la temperatura debe mantenerse dentro de ± 1 °C.
 - Humedad relativa: 45% - 75%.
 - Presión atmosférica: 860hPa - 1060 hPa (860 mbar – 1060 mbar).
- Objeto de la medición: tener claro el propósito de la medición y lo que se pretende obtener a partir de ella, por esto es conveniente en este paso definir el parámetro a medir, con el propósito de evaluar y comparar con resultados analíticos y teóricos.

Las pruebas y mediciones radiadas de EMC se realizan en dos entornos diferentes: interior y exterior, en ambos casos se deben cumplir las condiciones de espacio libre [26]:

- Interior: las pruebas y mediciones en interiores se realizan en salas apantalladas o blindadas y cámaras anecoicas, las cuales aíslan el interior del exterior y eliminan los reflejos internos, es decir, emulan las condiciones ideales de espacio libre con un solo trayecto directo entre Transmisor y Receptor.
- Exterior: el lugar donde se realizan las pruebas y mediciones en exterior se llama Sitio de Prueba de Área Abierta (OATS, *Open Area Test Site*), el cual debe ser una zona electromagnéticamente silenciosa, es decir, libre de interferencias; para corroborar esto, en la metodología se diseña y ejecuta una fase de mediciones de referencia. La Fig. 15 representa un OATS, el sitio es un área elíptica abierta, nivelada y despejada de cualquier obstáculo a la distancia de los ejes mayor y menor de $2R$ y $R\sqrt{3}$, respectivamente. La distancia entre transmisor y receptor es R . La distancia de medición R puede ser de 3 m, 10 m o 30 m.

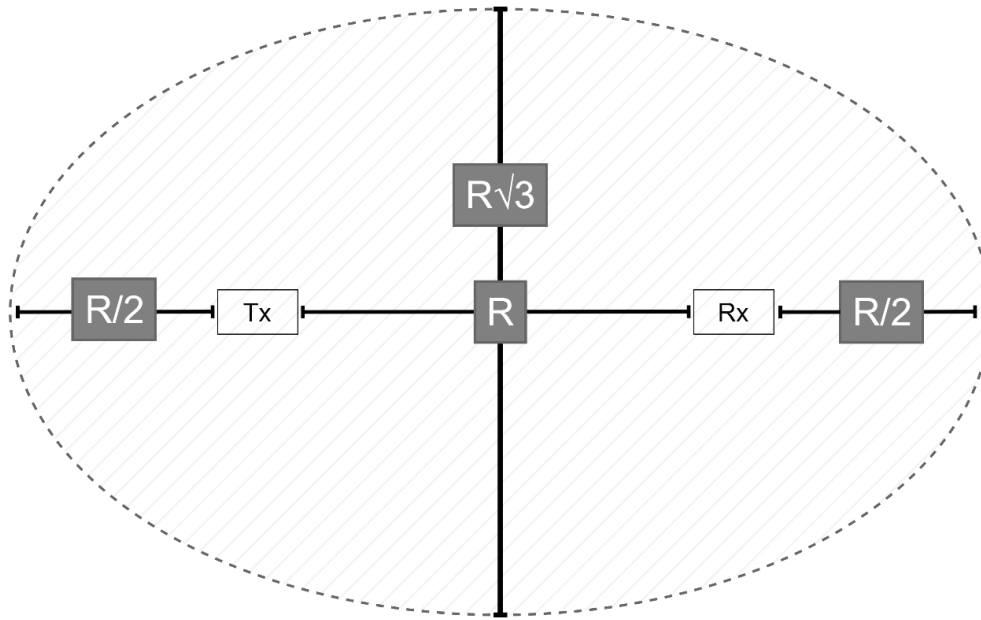


Fig. 15. Bosquejo de un OATS.
Fuente: Adaptado de [26].

- Instrumentos de medición: el equipo de medición se selecciona en función de la precisión necesaria y de la frecuencia de operación del sistema de comunicaciones bajo análisis, con el fin de garantizar mediciones con alto grado de exactitud. Algunos equipos de medición comunes para el análisis de la interferencia son analizadores de espectro, medidores de potencia, medidores de intensidad de campo, osciloscopios, multímetros, entre otros.
- Configuración experimental: se refiere a la disposición y configuración de los elementos involucrados en la medición, esto incluye la ubicación tanto de los componentes del sistema como de los equipos de medición, conexiones y configuraciones, calibración y verificación de estos para garantizar mediciones con alto grado de exactitud.

2.2.2.3 Medición de referencia

La Rec. ITU-R SM.1753 señala que los servicios de radiocomunicaciones tienen que hacer frente a todas las señales no deseadas, ya sean ruidos o interferencias, para funcionar correctamente. Por lo tanto, por razones prácticas es conveniente medir la suma de ambos [27], antes de realizar mediciones del parámetro correspondiente para el análisis de las señales deseadas e interferentes, se deben realizar mediciones de referencia para establecer un punto de partida y detectar si existe alguna señal interferente no contemplada en el escenario de medición, si existe esta señal interferente, es necesario reubicar el equipo de medición hasta garantizar que no se presenten interferencias no controladas o en otro caso, establecer una nueva frecuencia de operación para el sistema.

Esta fase incluye mediciones de piso de ruido y mediciones de ocupación de espectro para determinar si en la banda de operación están presente señales interferentes que puedan afectar el proceso de medición. De acuerdo con el manual de comprobación técnica del espectro, la

metodología de medición de ruido es tipo A, donde se mide solamente la componente WGN, y se descartan las mediciones tipo B y tipo C debido a que su realización requiere una mayor capacidad de procesamiento [15].

En la Fig. 16 se presenta la medición de referencia que corresponde a la tercera fase de la metodología en laboratorio, donde el primer paso es ubicar el equipo de medición de acuerdo con la configuración experimental de la fase anterior, es importante garantizar que las fuentes generadoras de las señales deseadas e interferentes estén apagadas, ya que solo se debe medir el nivel de ruido presente en la banda de operación del sistema. Posteriormente se configura el equipo de medición, lo cual consiste en configurar la frecuencia central, el ancho de banda de medición, el RBW entre 1-100 KHz, y el VBW de un valor de 10 veces el RBW de acuerdo con la Tabla 4. La frecuencia, ancho de banda y demás parámetros de operación del sistema están especificados en la primera fase de esta metodología.

En este punto del proceso se puede evaluar si existe algún tipo de señal interferente en la banda de frecuencia de medición, es decir, en caso de que esta señal exista se debe reubicar el equipo de medición en otro escenario o cambiar la frecuencia de operación del sistema, lo que resulte más viable. En caso de que no exista una señal interferente, es decir, si solo se percibe ruido, se determina que esa frecuencia de operación está libre de interferencias para realizar las mediciones en laboratorio, en seguida se realizan las mediciones del nivel de ruido, y se evalúa si el nivel está sobre el rango adecuado conforme a la Rec. ITU-R P.372 [16] y a la ecuación (3).

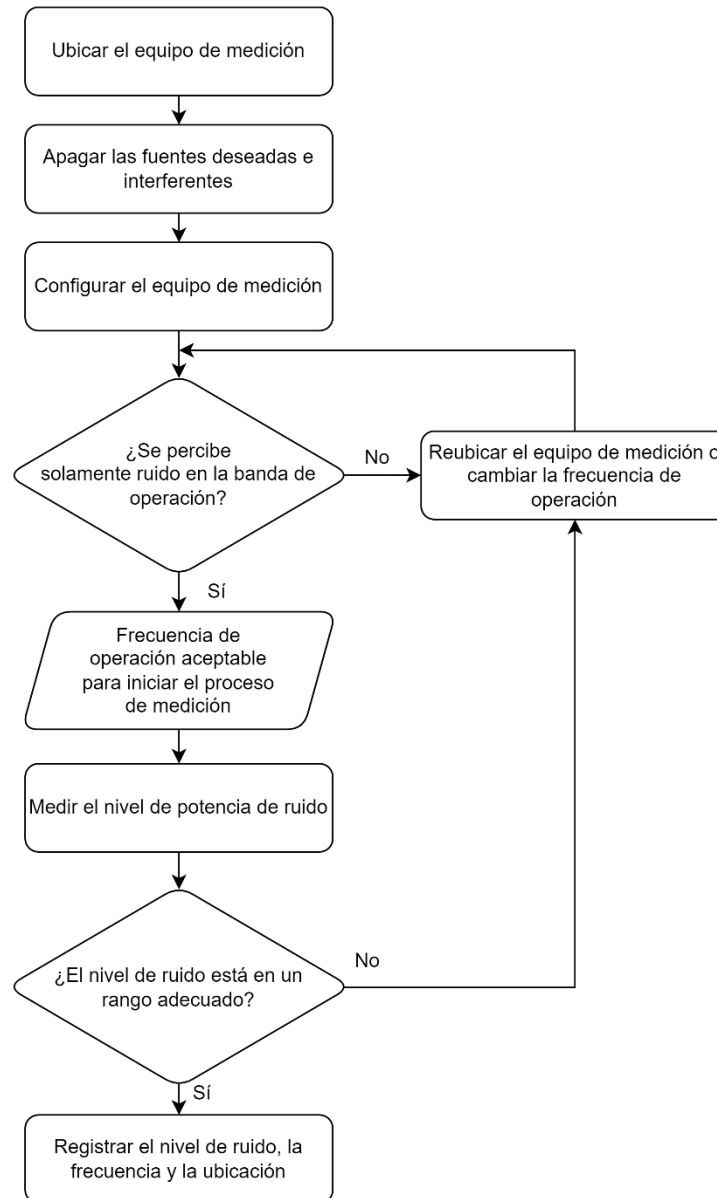


Fig. 16. Medición de referencia.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.4 Medición del parámetro bajo análisis

En esta fase se lleva a cabo la medición del parámetro bajo análisis, teniendo en cuenta la clasificación de interferencia co-canal e interferencia de canal adyacente, se proponen dos parámetros para su análisis y evaluación: nivel de potencia y máscara espectral.

El primer contexto, se concentra en la cuantificación del nivel de potencia de la señal deseada e interferente en el receptor, esta evaluación es esencial para determinar la relación de protección, que corresponde al parámetro de análisis en la interferencia co-canal. Por otro lado, el análisis

de interferencia de canal adyacente se basa en la evaluación de las máscaras espectrales de las señales presentes en los canales contiguos al canal de interés. Esta medición es crítica para evaluar posibles señales interferentes que pueden afectar negativamente la señal deseada.

- Medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente:

Para medir el nivel de potencia de la señal deseada e interferente, es importante definir la ubicación de los equipos del sistema y las condiciones iniciales para realizar una medición precisa.

Para la ubicación de los equipos transmisores (deseado e interferente), se inicia con el peor de los casos, ubicándolos a igual distancia del receptor. En la Fig. 17 se presenta la disposición de los equipos en un entorno controlado, donde inicialmente se ubica el transmisor deseado y el receptor a una distancia determinada, seguidamente se ubica el transmisor interferente, verificando si los dos transmisores están a la misma distancia del receptor, si esta condición no se cumple se debe reubicar el transmisor interferente, hasta garantizar que el transmisor deseado e interferente se encuentran a la misma distancia del receptor, terminado este proceso se inicia la medición del nivel de potencia deseado e interferente.

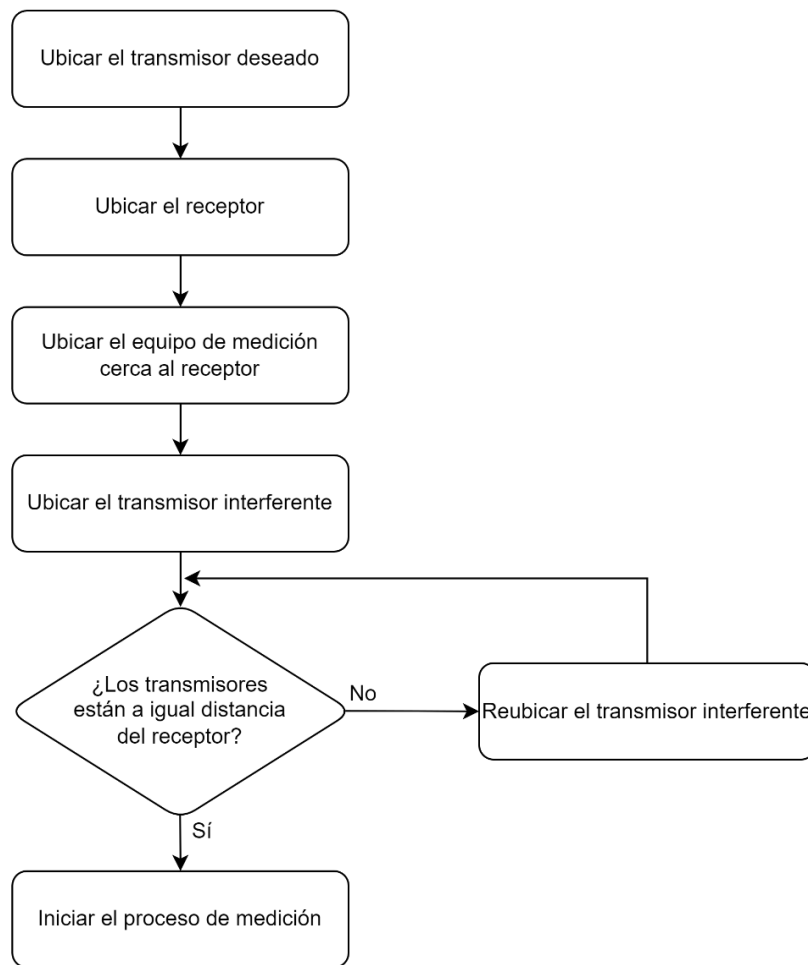


Fig. 17. Ubicación de los equipos en un escenario de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Fig. 18 se presenta el procedimiento para realizar la medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente en un escenario de laboratorio, que cuenta con los siguientes pasos:

1. Configurar el transmisor de señal deseada e interferente con los parámetros establecidos para el servicio móvil terrestre.
2. Configurar el receptor y el equipo de medición con los parámetros establecidos para el servicio móvil terrestre.
3. Establecer un enlace de comunicación entre el transmisor deseado y el receptor.
4. Medir el nivel de potencia de la señal deseada con el equipo de medición.
5. Apagar el transmisor de la señal deseada, y establecer un enlace de comunicación entre el transmisor interferente y el receptor.
6. Medir el nivel de potencia de la señal interferente con el equipo de medición.
7. Calcular la relación $D - U$, que es la diferencia entre el nivel de potencia de la señal deseada medido y el nivel de potencia de la señal interferente medido.
8. Variar separación en distancia entre el transmisor interferente y el receptor hasta garantizar que la interferencia sea aceptable para el sistema, este procedimiento se realiza con los transmisores operando simultáneamente, con el fin de obtener una comunicación eficiente entre el transmisor deseado y el receptor, es decir, que el transmisor interferente no sea captado por el receptor. Inicialmente los transmisores deseado e interferente se encuentran a igual distancia con respecto al receptor, para este caso el transmisor interferente se aleja cierta distancia del receptor y se realiza nuevamente el procedimiento de medición del nivel de potencia interferente.
9. Registrar el valor de la relación de protección donde la interferencia se considere aceptable para el sistema.

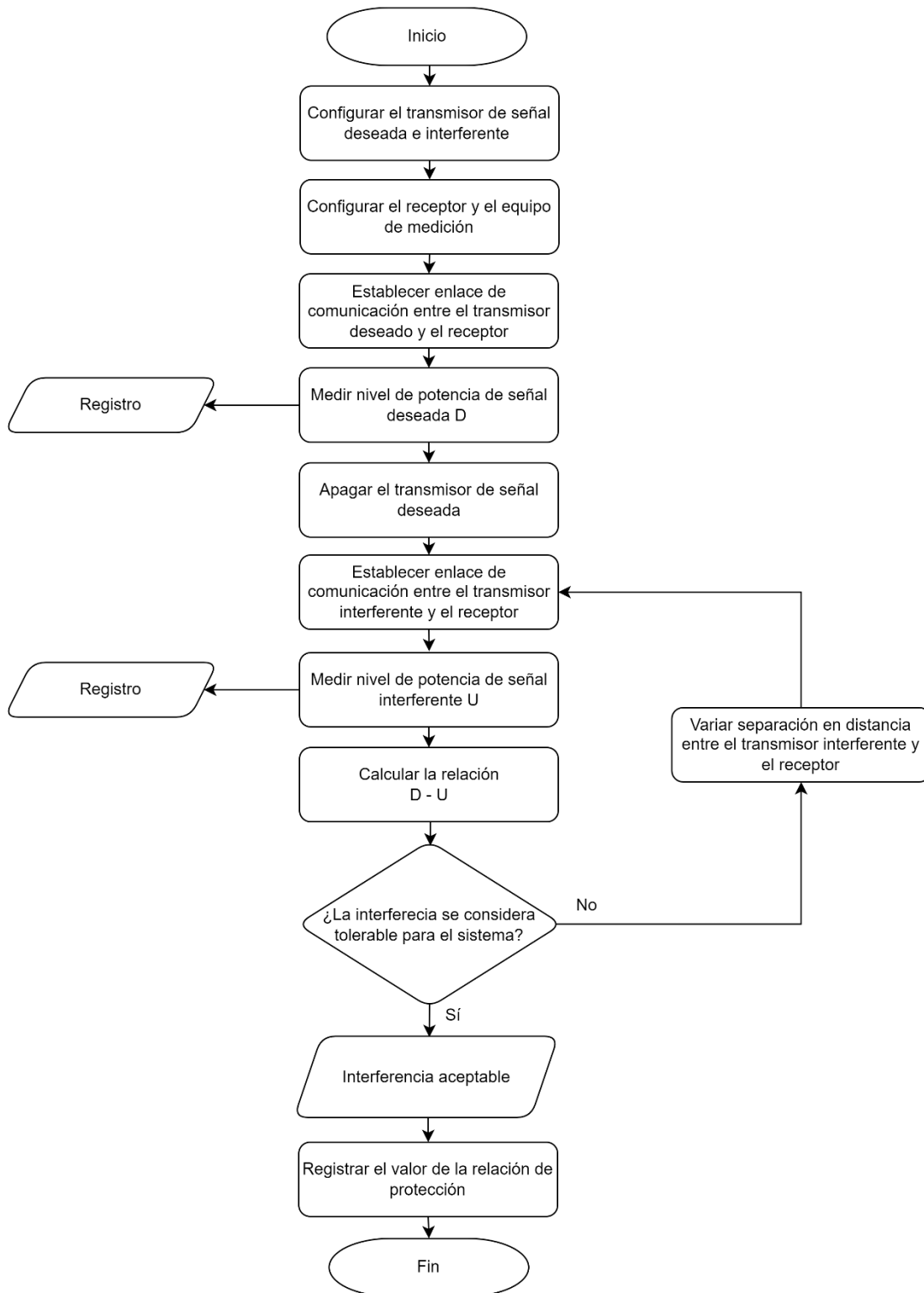


Fig. 18. Procedimiento de medición del nivel de potencia para la obtención de la relación de protección en un escenario de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

- Medición de la máscara espectral:

Ubicando los equipos de acuerdo con la Fig. 17, se realiza la medición de la máscara espectral con el fin de caracterizar una señal de interferencia de canal adyacente, en la Fig. 19 se presenta el procedimiento para realizar la medición de la máscara espectral de la señal deseada e interferente en un escenario de laboratorio, que cuenta con los siguientes pasos:

1. Configurar el transmisor de la señal deseada con los parámetros establecidos para el servicio móvil terrestre.
2. Configurar el receptor y el equipo de medición con los parámetros establecidos para el servicio móvil terrestre.
3. Establecer enlace de comunicación entre el transmisor deseado y el receptor, realizar la transmisión durante un ciclo de trabajo estándar [29].
4. Medir el espectro de la señal deseada con *MaxHold* activo para obtener la máscara espectral de la señal deseada en un ambiente libre de interferencias.
5. Apagar el transmisor de señal deseada.
6. Configurar el transmisor de señal interferente en una frecuencia de un canal adyacente al deseado; o para representar un peor de caso, a una frecuencia desplazada a la mitad del canal adyacente por encima y por debajo de la frecuencia de operación del sistema de la señal deseada.
7. Establecer enlace de comunicación entre el transmisor interferente y el receptor y realizar la transmisión durante un ciclo de trabajo estándar.
8. Medir el espectro con la función *MaxHold* del analizador activo y comparar con la máscara espectral definida.
9. Evaluar si la medición supera la máscara espectral definida; en caso de no superarla se debe modificar uno de los parámetros de la señal interferente:
 - Potencia: aumentar 3 dB.
 - Frecuencia: modificar la frecuencia de la señal interferente a la frecuencia de operación del sistema.
 - Modulación: algunos equipos permiten ajustar los parámetros de modulación¹⁴ como la desviación y la tasa.
10. En caso de que la medición supere la máscara espectral establecida se deben registrar los parámetros de la señal interferente.

¹⁴ En algunos equipos hay opciones preestablecidas para configurar la modulación.

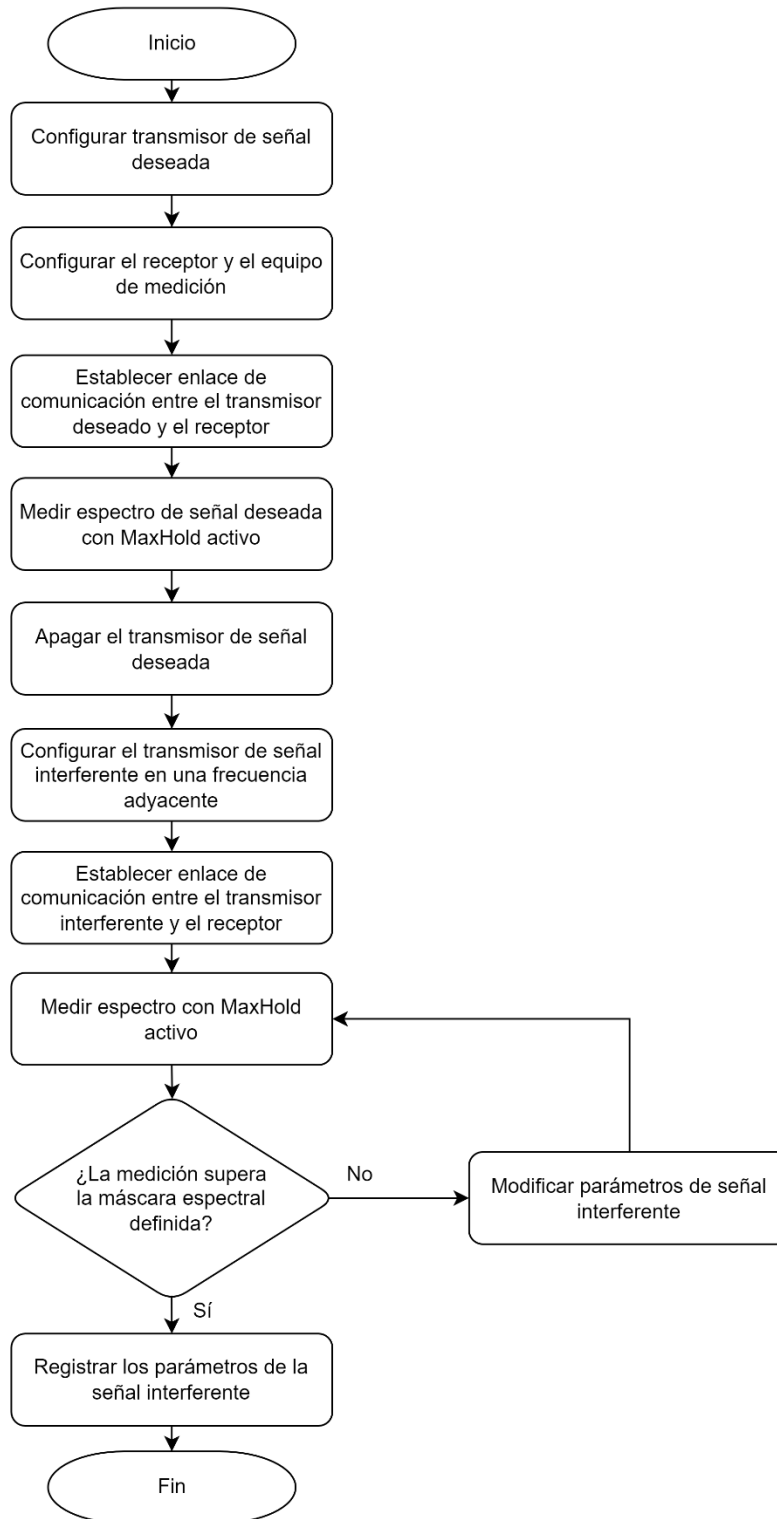


Fig. 19. Procedimiento de medición de máscara espectral en un escenario de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.5 Análisis de resultados

En esta fase se presenta el análisis de los datos recopilados durante las fases previas, haciendo una comparación con los datos teóricos establecidos para el servicio móvil terrestre. Se busca determinar si los resultados obtenidos cumplen con los estándares requeridos, los criterios de desempeño y las normativas establecidas. Los parámetros para realizar el análisis son la relación de protección y la máscara espectral, los cuales permiten evaluar hasta qué grado el sistema conserva una señal deseada de alta calidad en presencia de interferencias tanto co-canal como de canal adyacente, garantizando la comunicación en el entorno operativo previsto.

- Análisis de la relación de protección:

La relación de protección se calcula en los sistemas de comunicaciones móviles para evaluar la calidad y confiabilidad de la señal de RF en relación con el ruido y las interferencias presentes en el entorno de comunicación, en este caso, la señal de interferencia es controlada en un escenario de laboratorio. Para el cálculo de la relación de protección se hace necesario medir el nivel de potencia tanto de la señal deseada como la señal interferente y aplicar la ecuación (19):

$$\text{Relación de protección (dB)} = D - U, \quad (19)$$

donde:

D (dBm): Nivel de potencia de la señal deseada.

U (dBm): Nivel de potencia de la señal interferente.

El nivel de potencia de la señal deseada se registra solamente para una distancia fija entre el transmisor deseado y el receptor, y el nivel de potencia de la señal interferente se registra para cada variación en distancia entre el transmisor interferente con respecto al receptor. La relación de protección se calcula para cada variación en distancia y se debe garantizar que la interferencia sea aceptable para el sistema.

El análisis de la relación de protección proporciona una evaluación cuantitativa de cuán efectivo es el sistema para proteger la señal deseada frente a la presencia de señales interferentes. Una relación de protección alta implica una buena calidad de señal y una mejor capacidad para transmitir datos de manera confiable sin interferencia.

- Análisis de la Máscara espectral:

Consiste en tomar la máscara de emisión medida y superponer la máscara espectral definida para el servicio móvil, la condición dicta que, si la máscara espectral es superada por la máscara de emisión medida, registrar los parámetros de la señal interferente y con estos parámetros, verificar si la señal cumple con la norma correspondiente a la separación en frecuencia, considerando su frecuencia de operación, ancho de banda y modulación. También se analiza si el nivel de potencia registrado cumple con el nivel de potencia permitido.

2.2.3 Metodología de medición en campo

La metodología para el escenario en campo determina el procedimiento para determinar las señales deseadas e interferentes sobre sistemas que operan en un entorno real, con el fin de obtener una separación mínimo requerido en frecuencia y distancia que garantice un nivel de interferencia aceptable.

En la Fig. 20 se establecen las fases propuestas para la metodología en campo:

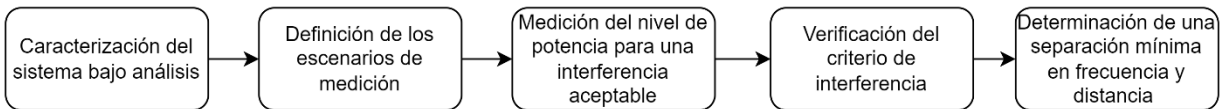


Fig. 20. Metodología de medición en campo.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3.1 Caracterización del sistema bajo análisis

La primera fase, es la caracterización del sistema bajo estudio, tal como se realiza en la metodología en laboratorio. Una premisa fundamental que guía esta fase es la necesidad de tener línea de vista entre las estaciones de transmisión, recepción y medición, para garantizar mediciones precisas y representativas del entorno real. El cumplimiento de la condición de línea de vista constituye un pilar fundamental en el diseño de la metodología y es esencial para obtener resultados fiables y reproducibles.

La metodología de medición en campo puede ser aplicada tanto en sistemas desplegados como en fase de planificación, que aún no lo están. Su implementación en diversas etapas del ciclo de vida de un sistema móvil terrestre, desde la planificación y diseño, hasta la optimización y diagnóstico de interferencias en sistemas ya operativos, determina los escenarios de medición, ya que establece el tipo de estaciones sobre las se realizan las mediciones y el tipo de receptor que se puede utilizar.

Las características del equipo de medición son más complejas en caso de realizar mediciones que impliquen movilidad, en distintos lugares y una rápida respuesta, lo cual implica el uso de equipos de medición portables como:

- Dispositivos SDR.
- Analizadores de espectro portables.
- Medidores de potencia portables.
- Medidores de intensidad de campo portables.

2.2.3.2 Definición de los escenarios de medición

Se definen los escenarios de medición donde se realizarán las pruebas para determinar y analizar las interferencias que se puedan presentar en un entorno real. En la Rec. ITU-R SM.1753 [27] se sugiere la definición de al menos diez escenarios por cada categoría o zona en la que el sistema opera, por ejemplo, zonas urbanas, rurales, industriales, entre otras, para determinar

con un alto grado de certeza el nivel de ruido. En este caso para realizar el procedimiento de medición, los escenarios deben representar las condiciones típicas de operación del sistema bajo análisis, y los resultados obtenidos deben ser comparables, por esto se propone definir al menos tres escenarios de medición por cada categoría o zona en la que el sistema opere, y así poder comparar entre estos los resultados obtenidos. Esto permite obtener resultados más confiables, repetibles, comparables y representativos del comportamiento del sistema frente a interferencias.

Considerar si el sistema está desplegado y analizar si cuenta con una infraestructura de estaciones base instalada o si es un sistema convencional sin desplegar. Si el sistema está desplegado, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La estación transmisora deseada y la estación transmisora interferente se encuentran en una ubicación fija y no pueden moverse durante el procedimiento de medición.
- El propósito de la estación transmisora deseada es representar una fuente de señal deseada en el sistema de radio móvil terrestre.
- El propósito de la estación transmisora interferente es representar una fuente de interferencia que normalmente se presenta en el sistema de radio móvil terrestre.
- El receptor y el equipo de medición deben ser móviles y se deben desplazar por diferentes puntos del área de cobertura del sistema, entre una estación base deseada y una estación base interferente, registrando el nivel de potencia recibido y las posibles interferencias.
- Considerar los parámetros técnicos del sistema previamente definidos como potencia, frecuencia, altura y ganancia de antenas, sensibilidad, características de los equipos, entre otros.

En la Fig. 21 se presenta el escenario de medición en campo para un sistema desplegado, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores.

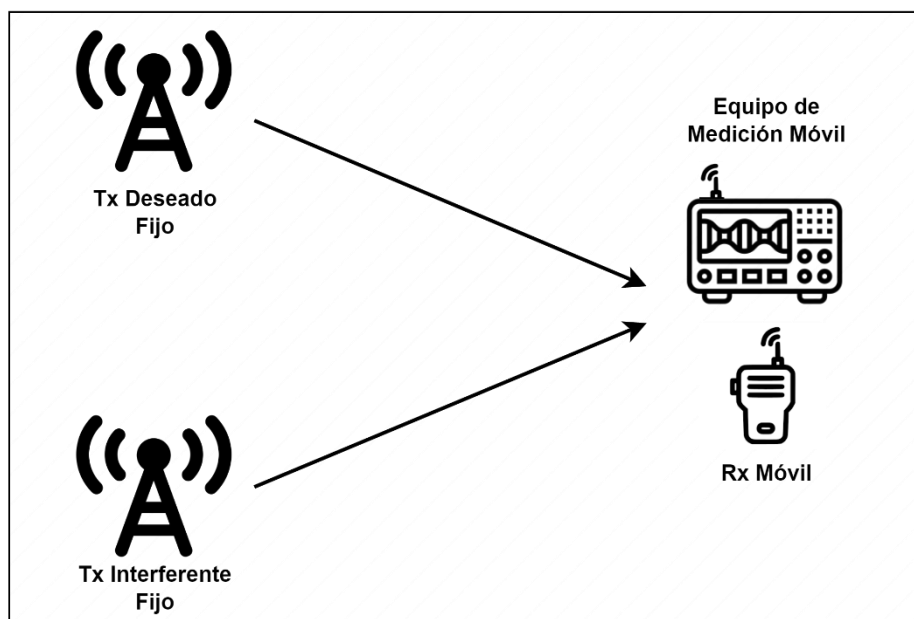


Fig. 21. Escenario de medición en campo para un sistema desplegado.
Fuente: Elaboración propia.

Si el sistema no está desplegado, y no posee una infraestructura definida e instalada, se consideran transmisores móviles y se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los transmisores deseado e interferente se pueden ubicar en cualquier punto del escenario de medición, y su distancia con respecto al receptor puede ser variable.
- El receptor y el equipo de medición se encuentran en una ubicación fija, por lo que no se pueden mover durante el procedimiento de medición.
- Considerar los parámetros técnicos del sistema bajo estudio como potencia, frecuencia, altura y ganancia de antenas, sensibilidad, características de los equipos, entre otros.

En la Fig. 22 se presenta el escenario de medición en campo para un sistema no desplegado, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores.

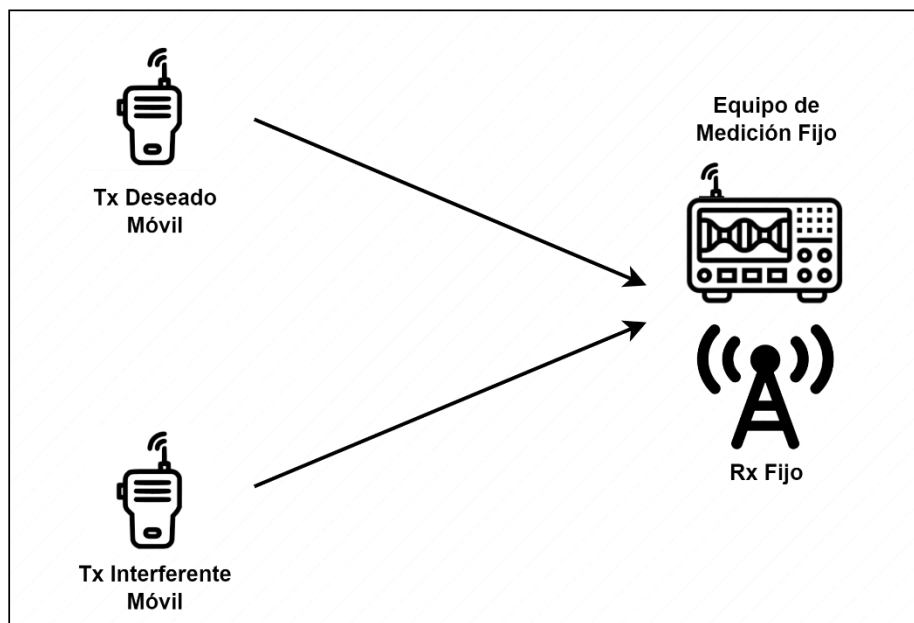


Fig. 22. Escenario de medición en campo para un sistema no desplegado.
Fuente: Elaboración propia.

Se configuran los equipos de medición según las especificaciones técnicas del sistema de radio móvil terrestre y las frecuencias de operación de la estación transmisora deseada y la estación transmisora interferente.

2.2.3.3 Medición del nivel de potencia para una interferencia aceptable

Ubicar los equipos que componen el sistema en un escenario de campo, teniendo en cuenta si el sistema está desplegado o no, con el fin de realizar la medición del nivel de potencia deseado e interferente. El procedimiento inicia considerando el peor de los casos, donde los transmisores se encuentran a la misma distancia del receptor.

En la Fig. 23 se presenta la disposición de los equipos en un escenario de campo, teniendo en cuenta que el sistema se encuentra desplegado, el primer paso es determinar la ubicación del transmisor deseado y el transmisor interferente que se encuentran en un lugar fijo, seguidamente se ubica el receptor y el equipo de medición, verificando si se encuentran a igual distancia de los

dos transmisores, si esta condición no se cumple se deben reubicar estos equipos hasta garantizar que se encuentran a la misma distancia de los trasmisores, terminado este procedimiento se inicia la medición.

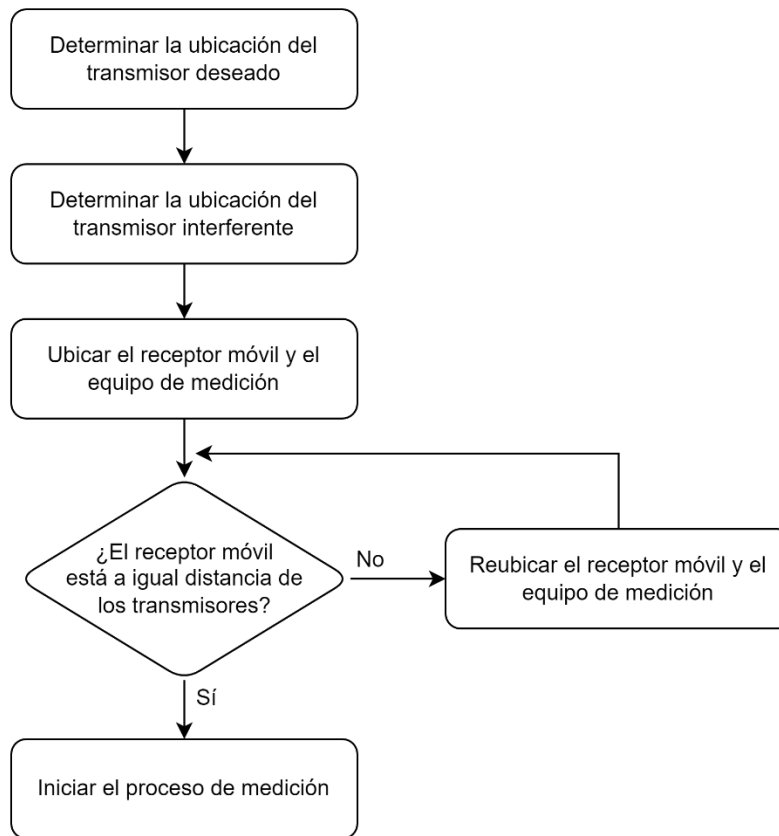


Fig. 23. Ubicación de los equipos en un escenario de campo para un sistema desplegado.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 24 se presenta la disposición de los equipos en un escenario de campo, teniendo en cuenta que el sistema no se encuentra desplegado, donde el primer paso es determinar la ubicación del receptor y el equipo de medición, seguidamente se ubica el transmisor deseado y el interferente, verificando si se encuentran a igual distancia del receptor, si esta condición no se cumple se debe reubicar el transmisor interferente hasta garantizar que el transmisor deseado e interferente se encuentran a la misma distancia del receptor, terminado este proceso se inicia la medición.

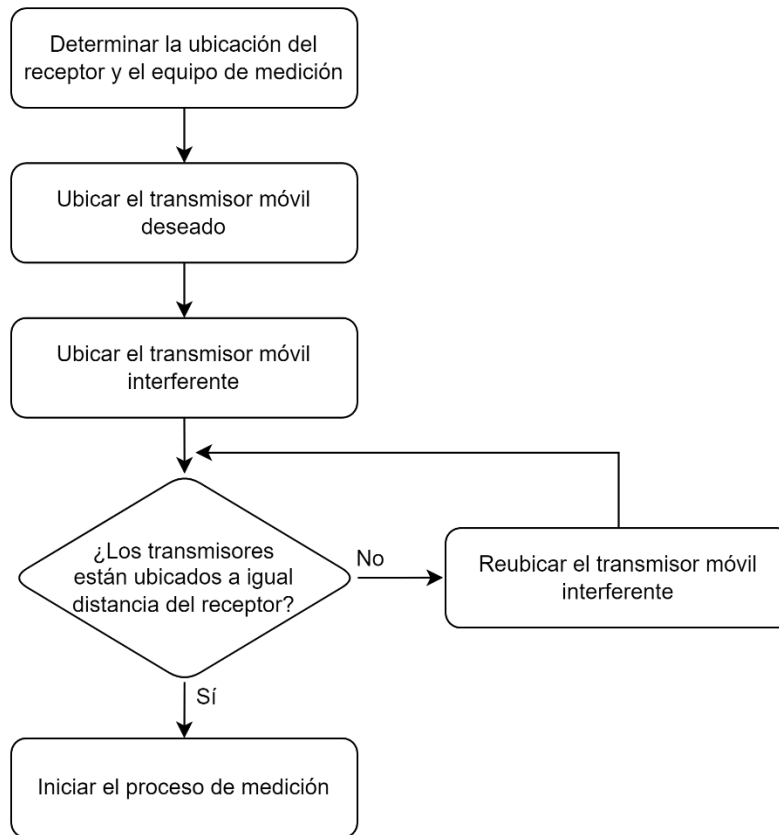


Fig. 24. Ubicación de los equipos en un escenario de campo para un sistema no desplegado.
Fuente: Elaboración propia.

Se deben realizar mediciones del nivel de potencia, con el objetivo de determinar un nivel aceptable de interferencia co-canal e interferencia de canal adyacente.

Para mediciones de interferencia co-canal los transmisores deben operar a la misma frecuencia, y ser configurados con los mismos parámetros. Inicialmente los transmisores se encuentran a igual distancia del receptor, y solo se varía la distancia del transmisor interferente alejándolo del receptor hasta alcanzar un nivel de potencia aceptable, es decir, que permita una comunicación eficiente entre el transmisor deseado y el receptor. En un sistema con dos estaciones transmisoras fijas lo ideal es ubicar el receptor móvil entre estas dos y encontrar el punto en el que la interferencia es aceptable.

En la Fig. 25 se presenta el procedimiento para realizar la medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente para interferencia co-canal en un escenario de campo, con el fin de determinar una separación mínima en distancia entre el transmisor interferente y el receptor, en el que la interferencia se considere aceptable:

1. Configurar el transmisor deseado e interferente con la misma frecuencia de operación, y los parámetros establecidos para el servicio móvil terrestre.
2. Configurar el receptor y equipo de medición de acuerdo con la configuración de los transmisores deseado e interferente.
3. Establecer enlace de comunicación entre los transmisores y el receptor, es decir, el transmisor deseado e interferente deben operar simultáneamente.

4. Variar separación en distancia entre el transmisor interferente y el receptor hasta garantizar que el transmisor interferente no afecta la comunicación en el sistema, es decir, cuando el receptor no detecta señales interferentes. Para esta fase es muy importante tener en cuenta el efecto captura, asegurando que la señal que detecta el receptor es la deseada.
5. Medir el nivel de potencia deseado que capta el receptor.
6. Apagar el transmisor deseado y medir el nivel de potencia interferente que capta el receptor.
7. Calcular la relación de protección, que es la diferencia entre el nivel de potencia de la señal deseada medido y el nivel de potencia de la señal interferente medido.
8. Determinar una separación experimental mínima en distancia entre el transmisor interferente y el receptor víctima, este proceso se realiza determinando la distancia cuando la interferencia co-canal no afecta la comunicación del sistema, es decir, cuando la interferencia se considera aceptable.

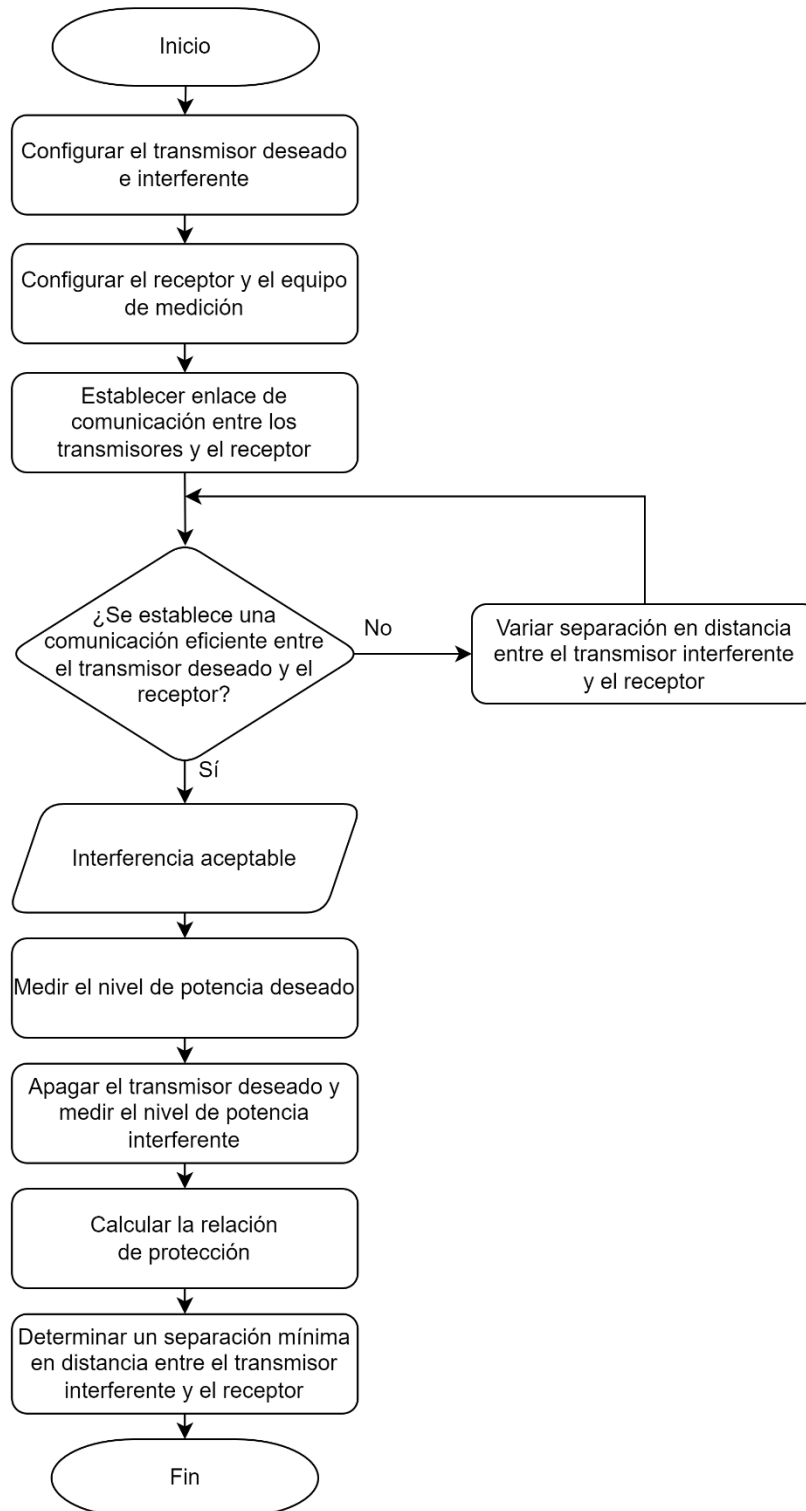


Fig. 25. Procedimiento de medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente para interferencia co-canal en un escenario de campo.

Fuente: Elaboración propia.

Para mediciones de interferencia de canal adyacente la frecuencia de operación del transmisor interferente debe estar en el canal contiguo de la frecuencia de operación del transmisor, o en el peor de los casos a la mitad del canal contiguo. En este caso los parámetros de configuración como potencia, ancho de banda, distancias de los transmisores, deben ser iguales.

En la Fig. 26 se presenta el procedimiento para realizar la medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente para interferencia de canal adyacente en un escenario de campo, con el fin de determinar una separación mínima en frecuencia entre el transmisor deseado e interferente, en el que la interferencia se considere aceptable:

1. Configurar el transmisor interferente a una frecuencia contigua de la frecuencia de operación del transmisor deseado. Los transmisores deben estar a igual distancia del receptor y deben ser configurados con los parámetros establecidos para el servicio móvil terrestre.
2. Configurar el receptor y equipo de medición de acuerdo con la configuración de los transmisores deseado e interferente.
3. Establecer enlace de comunicación entre los transmisores y el receptor, es decir, el transmisor deseado e interferente deben operar simultáneamente.
4. Variar separación en frecuencia entre el transmisor deseado e interferente hasta garantizar que el transmisor interferente no afecta la comunicación en el sistema, es decir, cuando el receptor no detecta señales interferentes. Para esta fase es muy importante tener en cuenta el efecto captura, asegurando que la señal que detecta el receptor es la deseada.
5. Medir el nivel de potencia deseado que capta el receptor.
6. Apagar el transmisor deseado y medir el nivel de potencia interferente que capta el receptor.
7. Calcular la relación de protección, que es la diferencia entre el nivel de potencia de la señal deseada medido y el nivel de potencia de la señal interferente medido.
8. Determinar una separación experimental mínima en frecuencia entre el transmisor deseado e interferente, este proceso se realiza determinando el corrimiento en frecuencia que existe entre los dos transmisores cuando la interferencia es aceptable en el sistema.

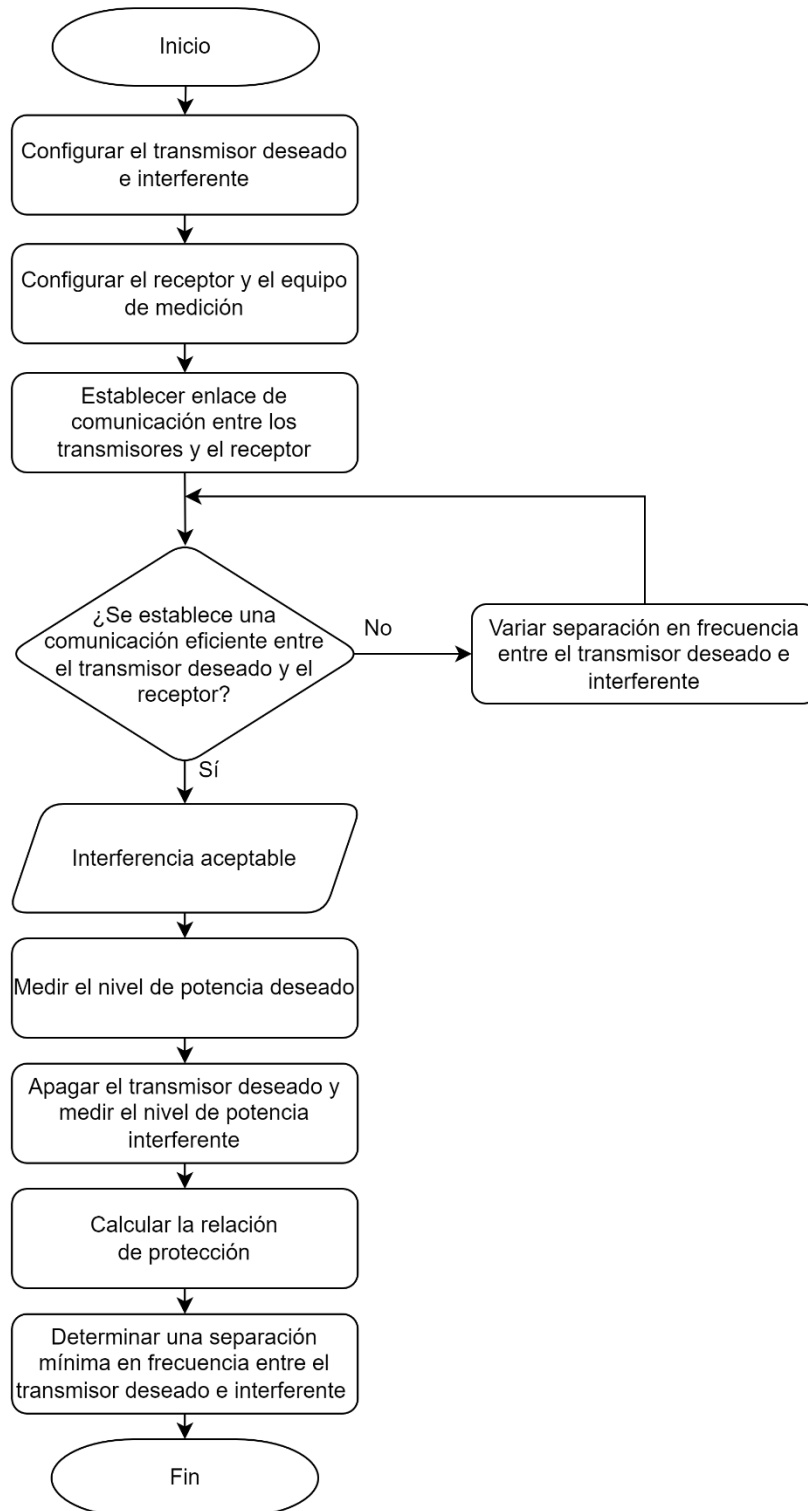


Fig. 26. Procedimiento de medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente para interferencia de canal adyacente en un escenario de campo.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3.4 Verificación del criterio de interferencia

Los resultados de las mediciones deben ser analizados para determinar la presencia y el nivel de las señales deseadas e interferentes, esto incluye la identificación de patrones de interferencia entre los escenarios y la evaluación del impacto de las interferencias en el sistema de comunicaciones. Esta verificación aporta fiabilidad a las mediciones, ya que se han realizado en al menos tres escenarios con características similares.

Tomando como base los resultados y su análisis, en caso de identificar interferencias que pueden afectar el funcionamiento del sistema de comunicaciones, se deben tomar medidas correctivas para reducir o eliminar la interferencia. Esto puede incluir el uso de filtros, la reubicación de antenas, equipos o la modificación de la frecuencia de operación del sistema de comunicaciones.

En la Fig. 27 se realiza la evaluación del criterio de interferencia, con el fin de determinar si la interferencia se considera aceptable o perjudicial en el sistema, la cual se expresa mediante la relación de protección. Para determinar este criterio, se considera la relación de protección obtenida en campo y se compara con la relación de protección teórica para el servicio móvil terrestre, obtenida en laboratorio, si la relación de protección en campo es igual o mayor a la relación de protección teórica se considera que la interferencia es aceptable para el sistema bajo estudio, es decir, la interferencia no es crítica en la comunicación. Si esta condición no se cumple se considera que la interferencia es perjudicial para el sistema bajo estudio.

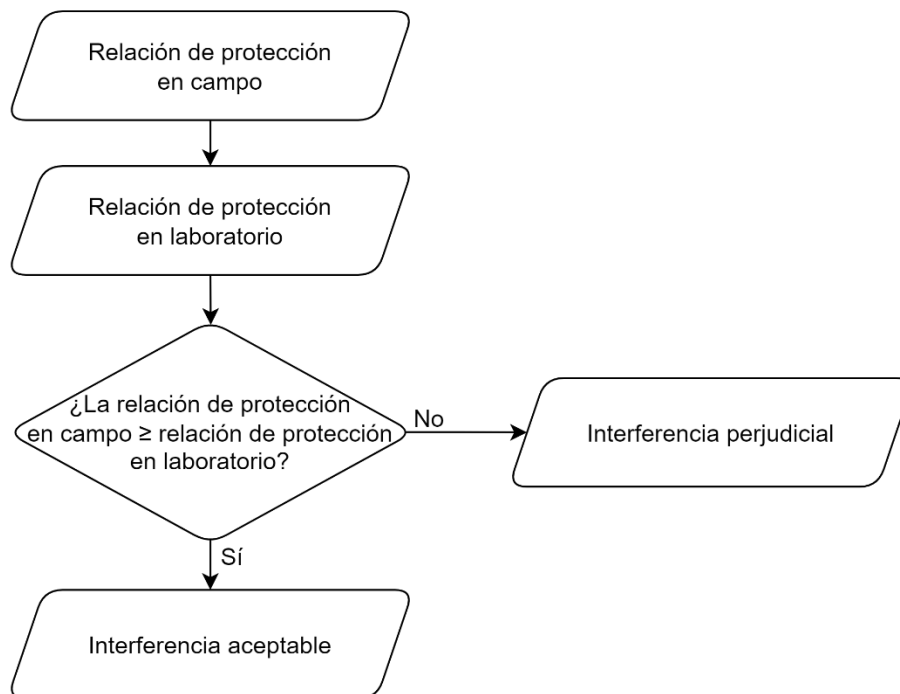


Fig. 27. Evaluación del criterio de interferencia.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.3.5 Determinación de una separación mínima en distancia y frecuencia

En la última fase de la metodología en campo se determina la separación mínima en distancia y frecuencia de manera experimental, con el fin de garantizar un nivel de calidad de servicio adecuado¹⁵ para el sistema de comunicación.

Para determinar la separación mínima en distancia de manera experimental en un escenario de campo, se establece el enlace de comunicación entre los transmisores y el receptor, que operan a la misma frecuencia. Inicialmente los transmisores se encuentran a igual distancia del receptor, y por el efecto captura, el receptor detecta la señal más fuerte proveniente de alguno de ellos. El transmisor interferente se aleja cierta distancia hasta que el receptor solo capte la señal deseada y no se vea afectado por la señal interferente. La distancia del transmisor interferente en ese instante, se considera la mínima separación en distancia que garantiza una interferencia co-canal aceptable para el sistema de comunicación.

Para determinar la separación mínima en frecuencia de manera experimental en un escenario de campo, se establece el enlace de comunicación entre los transmisores y el receptor, operando inicialmente a la misma frecuencia y ubicados a igual distancia del receptor. El transmisor interferente debe tener un corrimiento en frecuencia hasta que el receptor solamente detecte la señal deseada y no se vea afectado por el transmisor interferente. El corrimiento en frecuencia del transmisor interferente en ese instante se considera como la mínima separación en frecuencia que garantiza una interferencia de canal adyacente aceptable para el sistema de comunicación.

2.3 APLICACIÓN

Se presenta la aplicación de la metodología de medición de señales deseadas e interferentes en un sistema de comunicaciones móviles terrestres operando en la banda de 30 MHz a 470 MHz. Esta sección se presenta en el capítulo 30.

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología de medición de señales deseadas e interferentes en sistemas móviles terrestres. Los equipos utilizados están disponibles en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca; sus características y parámetros operativos se describen a lo largo de este capítulo.

¹⁵ Un nivel de calidad de servicio adecuado de manera experimental ocurre cuando no se percibe en absoluto la señal interferente en el receptor [29] *Land Mobile FM or PM Communications Equipment Measurement and Performance Standards*, ANSI/TIA-603-E-2016, Asociación de la Industria de Telecomunicaciones and Instituto Nacional Estadounidense de Estándares, Arlington, VA, U.S.A., 2016. [Online]. Available: <https://fasma.org/wp-content/uploads/TIA-603-E-1.pdf>.

3.1 PLAN DE PRUEBAS

Un plan de pruebas facilita la organización y la gestión de las actividades, los recursos, los tiempos y los riesgos involucrados en el proceso y contribuye a garantizar la calidad, la validez, y la fiabilidad de los resultados obtenidos, proporcionando una ruta para la repetición de las mediciones. En ocasiones puede ser necesario efectuar ensayos preliminares para establecer ciertos aspectos del plan de pruebas [34].

3.1.1 Escenario de laboratorio

En un escenario de laboratorio el plan incluye diferentes pruebas para evaluar la interferencia bajo múltiples condiciones. El objetivo es proporcionar una guía para la realización de mediciones de interferencia precisas, confiables y reproducibles en sistemas de comunicaciones de radio móvil terrestre.

3.1.1.1 Prueba 1: Medición del nivel de referencia a una frecuencia en VHF

Consiste en la medición del nivel de potencia de ruido a la frecuencia de operación establecida en la banda de VHF, en la Tabla 6 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 6. Condiciones para la medición del nivel de ruido en VHF.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración
VHF	Nivel de potencia de ruido	60	1 muestra cada 5 segundos

3.1.1.2 Prueba 2: Medición del nivel de referencia a una frecuencia en UHF

Consiste en la medición del nivel de potencia de ruido a la frecuencia de operación establecida en la banda de UHF, en la Tabla 7 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 7. Condiciones para la medición del nivel de ruido en UHF.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración
UHF	Nivel de potencia de ruido	30	1 muestra cada 5 segundos

3.1.1.3 Prueba 3: Medición del nivel de potencia de la señal deseada a la frecuencia en VHF y UHF

Consiste en la medición del nivel de potencia de la señal deseada en la banda de VHF y UHF, está se realiza estableciendo un enlace entre el transmisor deseado y el receptor a una distancia fija, en la Tabla 8 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 8. Condiciones para la medición del nivel de potencia deseado en VHF y UHF.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración	Distancia transmisor deseado y receptor
VHF-UHF	Nivel de potencia señal deseada	30	1 muestra cada 5 segundos	3 metros

3.1.1.4 Prueba 4: Medición del nivel de potencia de la señal interferente a la frecuencia en VHF y UHF

Consiste en la medición del nivel de potencia de la señal interferente en la banda de VHF y UHF, esta prueba se realiza estableciendo un enlace entre el transmisor interferente y el receptor a una distancia variable, en la Tabla 9 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 9. Condiciones para la medición del nivel de potencia interferente en VHF y UHF.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración	Distancia transmisor interferente y receptor	Variación en distancia
VHF-UHF	Nivel de potencia señal interferente	30	1 muestra cada 5 segundos	3 metros inicialmente	Cada metro

3.1.2 Escenario de campo

Incluye pruebas para evaluar la interferencia en diferentes condiciones de distancia y frecuencia, la dificultad de este tipo de pruebas radica en la definición de los escenarios, al determinar ubicaciones equidistantes al receptor, la movilidad de las estaciones y la condición de línea de vista entre las estaciones. El objetivo de este plan es proporcionar una guía para la realización de mediciones confiables y reproducibles en un entorno de campo.

3.1.2.1 Prueba 1: Medición del nivel de potencia captado por el receptor, con los transmisores a igual distancia

Consiste en la medición del nivel de potencia a la frecuencia de operación establecida tanto en la banda de VHF como en la de UHF, los transmisores, están a igual distancia del receptor y operando a la misma frecuencia, ancho de banda y potencia de transmisión. en la Tabla 10 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 10. Condiciones para la medición del nivel de potencia captado por el receptor.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración	Separación en distancias entre los transmisores y el receptor (m)
VHF-UHF	Nivel de potencia captado por el receptor	30	1 muestra cada 5 segundos	700

3.1.2.2 Prueba 2: Medición del nivel de potencia deseado, con una separación mínima en distancia entre el transmisor interferente y el receptor

Consiste en encontrar una separación en distancia en la que el transmisor interferente no afecte de manera considerable la comunicación entre el transmisor deseado y el receptor, es decir, en la que la interferencia se considere aceptable. Se realiza la medición del nivel de potencia deseado a la frecuencia de operación establecida tanto en la banda de VHF como de la de UHF, en la Tabla 11 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 11. Condiciones para la medición del nivel de potencia deseado considerando una separación mínima en distancia.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración	Consideración entre el transmisor interferente y el receptor
VHF-UHF	Nivel de potencia deseado	30	1 muestra cada 5 segundos	Separación mínima en distancia

3.1.2.3 Prueba 3: Medición del nivel de potencia interferente, con una separación mínima en distancia entre el transmisor interferente y el receptor

Consiste en la medición del nivel de potencia interferente teniendo en cuenta la separación en distancia encontrada anteriormente, donde la interferencia se considera aceptable, esta medición se realiza apagando el transmisor deseado y estableciendo un enlace de comunicación entre el

transmisor interferente y el receptor. La prueba se realiza tanto en la banda de VHF como de la de UHF, en la Tabla 12 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 12. Condiciones para la medición del nivel de potencia interferente considerando una separación mínima en distancia.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración	Consideración entre el transmisor interferente y el receptor
VHF-UHF	Nivel de potencia interferente	30	1 muestra cada 5 segundos	Separación mínima en distancia

3.1.2.4 Prueba 4: Medición del nivel de potencia deseado, con una separación mínima en frecuencia entre los dos transmisores

Consiste en encontrar una separación en frecuencia en la que el transmisor interferente no afecte de manera considerable la comunicación entre el transmisor deseado y el receptor, es decir, en la que la interferencia se considere aceptable y la comunicación del enlace deseado sea eficiente. Los transmisores deseado e interferente operan a igual distancia del receptor, igual potencia, e igual ancho de banda. Se realiza la medición del nivel de potencia deseado a la frecuencia de operación establecida tanto en la banda de VHF como de la de UHF, en la Tabla 13 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 13. Condiciones para la medición del nivel de potencia deseado considerando una separación mínima en frecuencia.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración	Consideración entre el transmisor interferente y el deseado
VHF-UHF	Nivel de potencia deseado	30	1 muestra cada 5 segundos	Separación mínima en frecuencia

3.1.2.5 Prueba 5: Medición del nivel de potencia interferente, con una separación mínima en frecuencia entre los dos transmisores

Consiste en la medición del nivel de potencia de la señal interferente, la cual está operando a una frecuencia adyacente a la frecuencia de operación del enlace deseado, tanto en la banda de VHF como UHF. Para realizar la medición del nivel de potencia interferente se debe apagar el transmisor deseado y registrar el nivel de potencia captado por el receptor, en la Tabla 14 se muestran las condiciones para la medición.

Tabla 14. Condiciones para la medición del nivel de potencia interferente considerando una separación mínima en frecuencia.

Banda de frecuencia	Parámetro	Número de muestras	Duración	Consideración entre el transmisor interferente y el receptor
VHF-UHF	Nivel de potencia interferente	30	1 muestra cada 5 segundos	separación mínima en frecuencia

3.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN LABORATORIO

El primer escenario para la aplicación de la metodología definida corresponde al escenario de laboratorio, la metodología consta de cinco fases, y para cada una de ellas se describe cómo es el proceso de aplicación.

3.2.1 Caracterización del sistema bajo análisis

La aplicación de la metodología se centra en un sistema móvil terrestre convencional, sus parámetros típicos se presentan en la Tabla 5. La identificación de los componentes y los parámetros que se utilizan en el escenario de laboratorio son:

- Un generador de señales de RF HP 8656B, que desempeña el rol de transmisor deseado e interferente, sus especificaciones se presentan en la Tabla 15 [35].

Tabla 15. Especificaciones del generador RF HP 8656B.

Rango de frecuencia	Ptx (dBm)	Impedancia de salida (Ω)	Nivel de exactitud de salida (dB)	Modulación	Tasa de modulación
100 KHz a 990 MHz	-127 a +13	50	≤ 1	AM-FM	400 Hz y 1 KHz

- Una USRP B210 configurada como analizador de espectro mediante el software *SDRConsole*, sus especificaciones se presentan en la Tabla 16 [36].

Tabla 16. Especificaciones USRP B210.

Rango de frecuencia (MHz)	Potencia máxima de recepción (dBm)	Impedancia de entrada (Ω)	Software de configuración
70 a 6000	-15	50	SDRConsole

- Un radio de dos vías Baofeng UV-5R+PLUS como receptor, sus especificaciones se presentan en la Tabla 17 [37].

Tabla 17. Especificaciones Baofeng UV-5R+PLUS.

Rango de frecuencias (MHz)	Ptx (W)	Impedancia de salida (Ω)	Sensibilidad (dBm)	Modulación	Ancho de banda (KHz)
136 a 174	1/4	50	-120 (SINAD 12 dB)	FM	11(Narrow) y 16(Wide)
400 a 480					

- Tres antenas de banda dual con conector SMA hembra utilizadas en el transmisor, receptor y equipo de medición, sus especificaciones se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Especificaciones antena dual.

Rango de frecuencia (MHz)	Ganancia (dBi)	Impedancia (Ω)	Longitud (cm)	Potencia máxima (W)	Conector
136 a 174	2,15	50	14	10	SMA hembra
400 a 520	3				

- Un adaptador N a SMA para conectar el generador de RF con la antena dual.
- Dos cables coaxiales de baja pérdida de SMA macho a SMA macho de un metro de longitud, con una impedancia de 50 Ω .
- Dos mesas de soporte, una para el generador de RF y otra para el receptor y el equipo de medición.
- Un trípode de soporte para la antena de recepción del equipo de medición.
- Un soporte para la antena de transmisión.

En la Tabla 19 se presentan las frecuencias de operación y el ancho de banda utilizados para la aplicación de la metodología en un escenario de laboratorio.

Tabla 19. Frecuencias y ancho de banda de operación del sistema.

MHz	Frecuencia de operación (MHz)	Ancho de banda (KHz)
VHF	144,9	12,5
UHF	430,1	

3.2.2 Definición del escenario de medición

El escenario corresponde al laboratorio 325 de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, un entorno cerrado en el que se encuentran equipos electrónicos, sillas, mesas, entre otros elementos. En la Fig. 28 se presenta el escenario de medición y la disposición de los equipos utilizados en la aplicación de la metodología.



Fig. 28. Escenario para medición en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 20. se presentan las condiciones ambientales de la medición.

Tabla 20. Condiciones ambientales para la medición en un escenario de laboratorio.

Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión atmosférica (mbar)
26	56	1021

Es necesario medir el nivel de potencia de la señal deseada e interferente para obtener una relación de protección de manera experimental, y lograr el propósito de la medición. En la Fig. 29 se presenta la configuración, en la cual se tiene un generador de RF que actúa como transmisor deseado e interferente, el transmisor deseado durante el procedimiento de medición se ubica a una distancia fija del receptor y del equipo de medición, mientras que el transmisor interferente varía su distancia hasta alcanzar una separación mínima que garantice una interferencia aceptable.



Fig. 29. Configuración experimental en un escenario de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Medición de referencia

Al aplicar el procedimiento de la Fig. 16 en el que se ubica el equipo de medición y se configura de acuerdo con las especificaciones de la Tabla 21, se determina si existe la presencia de señales interferentes en las bandas de medición en VHF y UHF, con el fin de encontrar las frecuencias de operación aceptables para el proceso de medición. En la Tabla 21 se presenta la configuración del equipo de medición.

Tabla 21. Configuración del equipo de medición: USRP B210 como analizador de espectro.

Frecuencia central (MHz)	Ancho de banda de medición (KHz)	RBW (Hz)	Span (KHz)	Tipo de detector	Tamaño FFT
144,9	12,5	6,1	200	RMS	32000
430,1					

El procedimiento de medición se realiza durante cinco minutos, cada hora, por las cuatro horas de duración total del procedimiento, los datos se recopilan en un archivo de Valores Separados por Comas (CSV, *Comma Separated Values*) y se convierten a una hoja de cálculo de Excel para el tratamiento y análisis de datos. Los resultados se presentan en la Tabla 22. Durante la medición se comprobó que el nivel de ruido para las frecuencias de operación presenta una variación mínima comparado con el nivel de ruido teórico, obtenido al reemplazar los valores de F_a y B en la ecuación (3), el nivel de potencia de ruido para la frecuencia de 144,9 MHz oscila sobre el valor de -111 dBm, y para la frecuencia de 430,1 MHz, el nivel de ruido oscila sobre el valor de -116 dBm.

Tabla 22. Nivel de potencia de ruido en las frecuencias de operación.

Frecuencia de operación (MHz)	¿Frecuencia libre de interferencias?	Nivel de potencia de ruido (dBm)	
		Moda	Promedio
144,9	Si	-111,27	-111,22
430,1	Si	-116,31	-116,35

El cálculo teórico para la frecuencia de 144,9 MHz se presenta en la ecuación (23), se considera un valor de $F_a = 17$ y $B = 10 \log(12.500 \text{ Hz})$:

$$P_n(\text{dBW}) = 17 + 10 \text{ Log}(12.500) - 204, \quad (20)$$

$$P_n(\text{dBW}) = -146, \quad (21)$$

$$P_n(\text{dBm}) = -146 + 30, \quad (22)$$

$$P_n(\text{dBm}) = -116. \quad (23)$$

El cálculo teórico para la frecuencia de 430,1 MHz se presenta en la ecuación (27), se considera $F_a = 12$ y $B = 10 \log(12.500 \text{ Hz})$:

$$P_n(\text{dBW}) = 12 + 10 \text{ Log}(12.500) - 204, \quad (24)$$

$$P_n(\text{dBW}) = -151, \quad (25)$$

$$P_n(\text{dBm}) = -151 + 30, \quad (26)$$

$$P_n(\text{dBm}) = -121. \quad (27)$$

Se considera que el nivel de ruido se encuentra en un rango adecuado, varía sobre los niveles de -111 dBm para 144,9 MHz, y -116 dBm para 430,1 MHz. Por lo tanto, se registran estos niveles de ruido y se realiza la medición del parámetro bajo análisis.

3.2.4 Medición del parámetro bajo análisis

El parámetro que se mide en esta fase depende del tipo de interferencia a analizar, para el primer caso se considera la interferencia co-canal, midiendo el nivel de potencia de la señal deseada e interferente con el fin de determinar una relación de protección donde la interferencia se considere aceptable. A continuación, en la Fig. 30 se presenta la ubicación de los equipos en un escenario de laboratorio, se inicia con una distancia de 3 metros de separación entre los transmisores y el receptor de acuerdo con el estándar [29].



Fig. 30. Ubicación inicial de los equipos en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Para la medición del nivel de potencia de la señal deseada e interferente se debe seguir el procedimiento presentado en la Fig. 18. A continuación, en la Tabla 23. se presenta la configuración de los parámetros del transmisor deseado e interferente en laboratorio.

Tabla 23. Parámetros de transmisión del generador HP 8656B.

Frecuencia de operación (MHz)	Potencia de transmisión (dBm)	Modulación	Tasa de modulación (Hz)	Ganancia de antena (dBi)
144,9	-30	FM	400	2,15
430,1				3

En la Tabla 24 se presenta la configuración de los parámetros del receptor.

Tabla 24. Parámetros del receptor Baofeng UV-5R+PLUS.

Frecuencia de operación (MHz)	Sensibilidad (dBm)	Modulación	Squelch	Ganancia de antena (dBi)
144,9	-120 (SINAD de 12 dB)	FM	5	2,15
430,1				3

En la Tabla 25 se presenta la configuración de los parámetros del equipo de medición.

Tabla 25. Parámetros del equipo de medición USRP B210.

Frecuencia de operación (MHz)	Potencia máxima de recepción (dBm)	Software de configuración	Ganancia de antena (dBi)
144,9	-15	SDRConsole	2,15
430,1			3

Se establece el enlace de comunicación entre el transmisor deseado y el receptor, y se enciende el equipo de medición. El transmisor deseado se encuentra inicialmente a una distancia de 3 metros con respecto al receptor y al equipo de medición, siendo esta distancia fija durante el proceso de medición. Se debe medir el nivel de potencia de la señal deseada cada 5 segundos durante un periodo de aproximadamente 3 minutos, los datos se recopilan en un archivo CSV y se convierten a una hoja de cálculo de Excel para su tratamiento. Seguidamente se apaga el

transmisor deseado y se establece el enlace de comunicación entre el transmisor interferente y el receptor. El transmisor interferente se encuentra inicialmente a una distancia de 3 metros con respecto al receptor y al equipo de medición, esta distancia varía cada metro mientras se encuentra experimentalmente una separación en distancia entre el transmisor interferente y el receptor donde la interferencia se considere aceptable para el sistema, y se calcula la relación de protección para cada separación en distancia. El nivel de potencia de la señal interferente se debe medir de la misma manera que el nivel de potencia de la señal deseada.

Los resultados obtenidos para la banda de VHF se presentan en la Tabla 26, y los resultados para la banda de UHF se presentan en la Tabla 27.

Tabla 26. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente en la banda de VHF.

Frecuencia de operación (MHz)	Distancia de separación Tx deseado (m)	Nivel de potencia deseado (dBm)		Distancia de separación Tx interferente (m)	Nivel de potencia interferente (dBm)	
		Moda	Promedio		Moda	Promedio
144,9	3	-63,1	-63,01	3	-63,3	-63,22
				4	-65,2	-65,17
				5	-67,9	-67,68
				6	-69,4	-69,56
				7	-70,5	-70,61
				8	-71,8	-71,85
				9	-72,9	-72,98

Tabla 27. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente en la banda de UHF.

Frecuencia de operación (MHz)	Distancia de separación Tx deseado (m)	Nivel de potencia deseado (dBm)		Distancia de separación Tx interferente (m)	Nivel de potencia interferente (dBm)	
		Moda	Promedio		Moda	Promedio
430,1	3	-71,8	-71,84	3	-71,9	-71
				4	-74,2	-74,18
				5	-76,5	-76,57
				6	-77,8	-77,76
				7	-79,3	-79,24
				8	-80,9	-80,93
				9	-81,4	-81,33

Después de tener los resultados del nivel de potencia deseado e interferente en las bandas de VHF y UHF, se calcula la relación de protección para cada separación en distancia entre el transmisor interferente y el receptor, este proceso se realiza hasta alcanzar una separación en distancia en la que la interferencia se considere aceptable para el sistema. Para cumplir con dicho requerimiento, los transmisores deseado e interferente deben operar simultáneamente con los mismos parámetros de configuración, separados inicialmente a igual distancia del receptor,

variando la separación en distancia hasta garantizar que la señal que capta el receptor es la deseada del sistema, en ese instante se obtiene experimentalmente la separación mínima en distancia entre el transmisor interferente y el receptor, calculando la relación de protección para una interferencia co-canal aceptable.

Se puede concluir que experimentalmente una señal interferente es aceptable para un sistema de comunicación en el momento que no afecta de manera considerable la comunicación entre el transmisor deseado y el receptor, siendo despreciable para el sistema. En la Fig. 31 y Fig. 32 se observan los niveles de potencia del transmisor interferente para cada separación en distancia en la banda de VHF y UHF, se visualiza que cuando la separación en distancia aumenta, el nivel de potencia interferente recibida disminuye, por factores como la dispersión, la absorción y las pérdidas de propagación. Los valores de moda y promedio del nivel de potencia interferente muestran una alta concordancia lo cual indica que ambos proporcionan una representación prácticamente idéntica de la distribución de potencias.

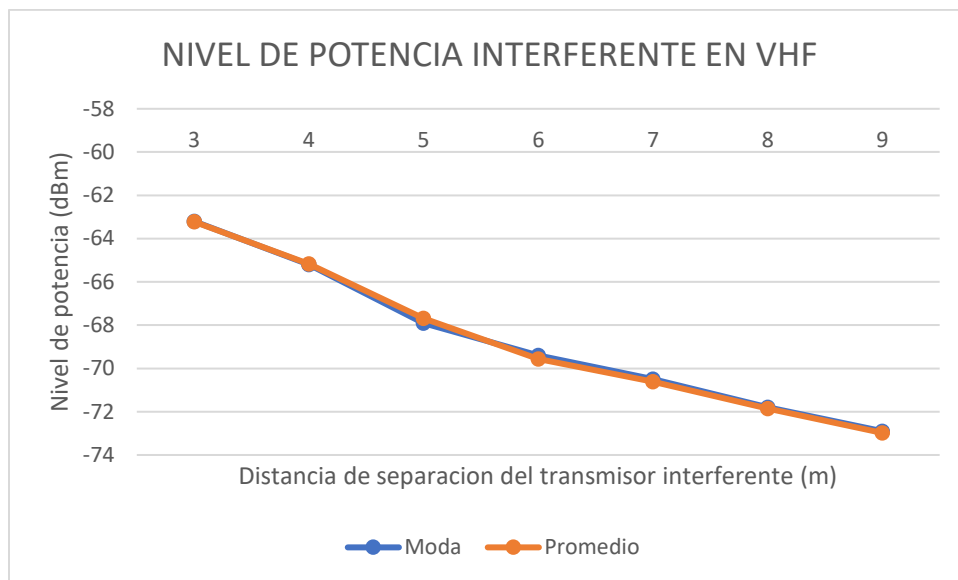


Fig. 31. Nivel de potencia interferente en la banda de VHF.
Fuente: Elaboración propia.

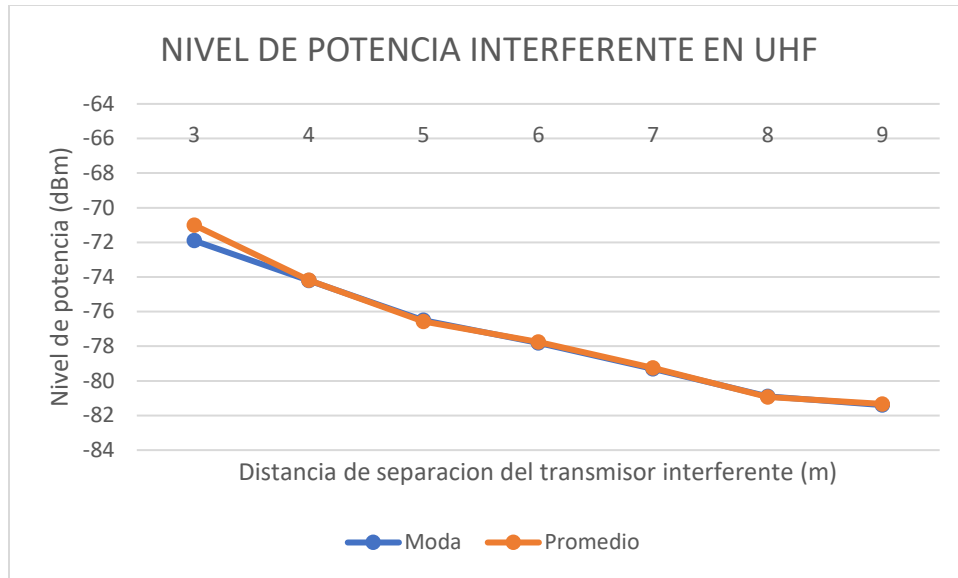


Fig. 32. Nivel de potencia interferente en la banda de UHF.
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los resultados obtenidos en la metodología de medición en un escenario de laboratorio se presenta en la siguiente fase.

3.2.5 Análisis de resultados

Se calcula la relación de protección para cada distancia en la que se varía el transmisor interferente haciendo una diferencia entre el nivel de potencia recibido del transmisor deseado y el nivel de potencia recibido del transmisor interferente, el criterio de interferencia es que la comunicación en el enlace deseado sea constante y solo se escuche de manera legible la transmisión del deseado, los resultados obtenidos se consignan en la Tabla 28 para la banda de VHF, y para la banda de UHF en la Tabla 29. Para el cálculo de la relación de protección se utiliza la moda como medida estadística del nivel de potencia deseado e interferente debido a su capacidad para resaltar los valores más comunes en el conjunto de datos, lo cual puede ser esencial para la toma de decisiones en el diseño y optimización de sistemas de radiocomunicaciones.

Tabla 28. Resultados de la relación C/I para cada variación en distancia en la banda de VHF.

Frecuencia de operación (MHz)	Distancia de separación Tx deseado (m)	Nivel de potencia deseado (dBm)	Distancia de separación Tx interferente (m)	Nivel de potencia interferente (dBm)	Relación C/I (dB)
144,9	3	-63,1	3	-63,3	0,2
			4	-65,2	2,1
			5	-67,9	4,8
			6	-69,4	6,3
			7	-70,5	7,4
			8	-71,8	8,7
			9	-72,9	9,8

Tabla 29. Resultados de la relación C/I para cada variación en distancia en la banda de UHF.

Frecuencia de operación (MHz)	Distancia de separación Tx deseado (m)	Nivel de potencia deseado (dBm)	Distancia de separación Tx interferente (m)	Nivel de potencia interferente (dBm)	Relación C/I (dB)
430,1	3	-71,8	3	-71,9	0,1
			4	-74,2	2,4
			5	-76,5	4,7
			6	-77,8	6
			7	-79,3	7,5
			8	-80,9	9,1
			9	-81,4	9,6

En la Tabla 28 el valor más alto de la relación de protección es de 9,8 dB y en la Tabla 29 es de 9,6 dB, ambos para una separación en distancia de 9 metros entre el transmisor interferente y el receptor, por lo que se determina que la relación de protección mínima aceptable debe ser aproximadamente 10 dB. Para esta relación de protección se garantiza que el receptor capta solamente la señal deseada y no se afecta por señales interferentes que puedan operar en el sistema a una misma frecuencia. En la Fig. 33 se observa la relación de protección para cada separación en distancia entre el transmisor interferente y el receptor, en la banda de VHF y UHF.

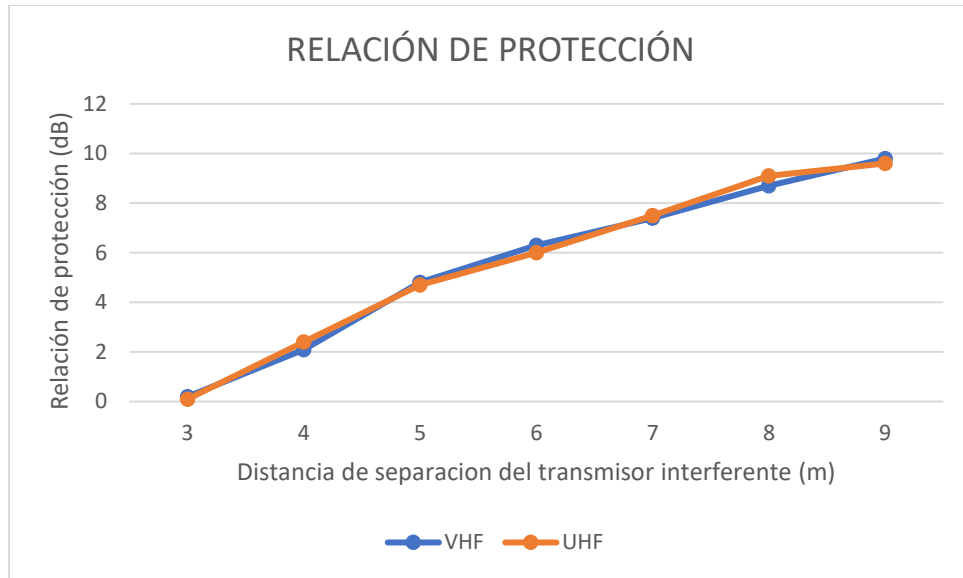


Fig. 33. Relación de protección en la banda de VHF y UHF.
Fuente: Elaboración propia.

Se observa de la Fig. 33 la relación de protección obtenida en las bandas de VHF y UHF, cuando el transmisor interferente se aleja del receptor, la relación de protección aumenta significativamente, esto es debido a que el nivel de potencia de la señal interferente disminuye a medida que el transmisor interferente se aleja del receptor. La relación de protección para cada separación en distancia y banda de operación es similar, lo cual garantiza que la relación de protección mínima aceptable es la misma para VHF y UHF. Se considera que la relación de protección encontrada de forma experimental debe ser de 10 dB para sistemas de comunicación en VHF y UHF operando a la misma frecuencia, y se obtiene experimentalmente una separación en distancia entre el transmisor deseado y el receptor en un escenario de laboratorio, donde se garantiza que la interferencia se considere aceptable para el sistema.

3.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN CAMPO

La metodología de medición en un escenario de campo consta de cinco fases, cuya aplicación para un sistema de radio móvil convencional se describe a continuación.

3.3.1 Caracterización del sistema bajo análisis

Para la aplicación de la metodología en campo se emplea un sistema móvil terrestre convencional, la identificación de sus componentes y parámetros son:

- Una USRP B210 configurada como analizador de espectro mediante el software *SDRConsole*, sus especificaciones se presentan en la Tabla 16.
- Las estaciones móviles de transmisión y de recepción corresponden al radio de dos vías Baofeng, cuyas especificaciones están descritas en la Tabla 17.

- Una antena de banda dual con conector SMA hembra utilizada para el equipo de medición, sus especificaciones se presentan en la Tabla 18.
- Un cable coaxial de baja pérdida de SMA macho a SMA macho de un metro de longitud, con una impedancia de 50 Ω para la antena del equipo de medición.
- Trípode de soporte para la antena de recepción del equipo de medición.

En la Tabla 19 se presentan las frecuencias de operación y el ancho de banda utilizados para la aplicación de la metodología en un escenario de campo.

3.3.2 Definición de los escenarios de medición

- Análisis de la interferencia co-canal en la banda de VHF y UHF.

Para la aplicación de la metodología en campo se definen cuatro escenarios de medición con características de un entorno real, tanto en la banda de VHF como de UHF. En la Tabla 30 se presentan las coordenadas para la ubicación del receptor y el equipo de medición, correspondiente al Cerro del Morro.

Tabla 30. Ubicación del receptor y equipo de medición para estudio de interferencia co-canal.

Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m)
2.44478236	-76.60019868	1773.70

En la Fig. 34 se observa la disposición del receptor y el equipo de medición en el Cerro del Morro.



Fig. 34. Receptor y equipo de medición en escenario de campo: Cerro del Morro.
Fuente: Elaboración propia.

En la banda de VHF se definen cuatro escenarios de medición, el primer escenario se compone de un transmisor deseado e interferente a igual distancia del receptor, mientras que en los otros tres escenarios se varía la distancia para determinar una separación en distancia mínima requerida. En la Tabla 31 se presentan los escenarios con las variaciones en distancia y sus coordenadas.

Tabla 31. Características de los escenarios de medición de interferencia co-canal en VHF.

Escenario	Descripción del transmisor	Distancia al receptor (m)	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m)
	Deseado: Canchas la Bombonera	740	2.44852299	-76.60573214	1728.40
1	Interferente 1: Torres de Catania	740	2.44478236	-76.60019868	1773.70
2	Interferente 2: Campo Real	1235	2.45097042	-76.59096584	1741.40
3	Interferente 3: Boulevard Rose	1130	2.45475281	-76.60230589	1744.80
4	Interferente 4: Aldabón	1090	2.44643689	-76.60988920	1727.70

En la Fig. 35 se presenta un mapa con los escenarios de medición en campo para la banda de VHF.

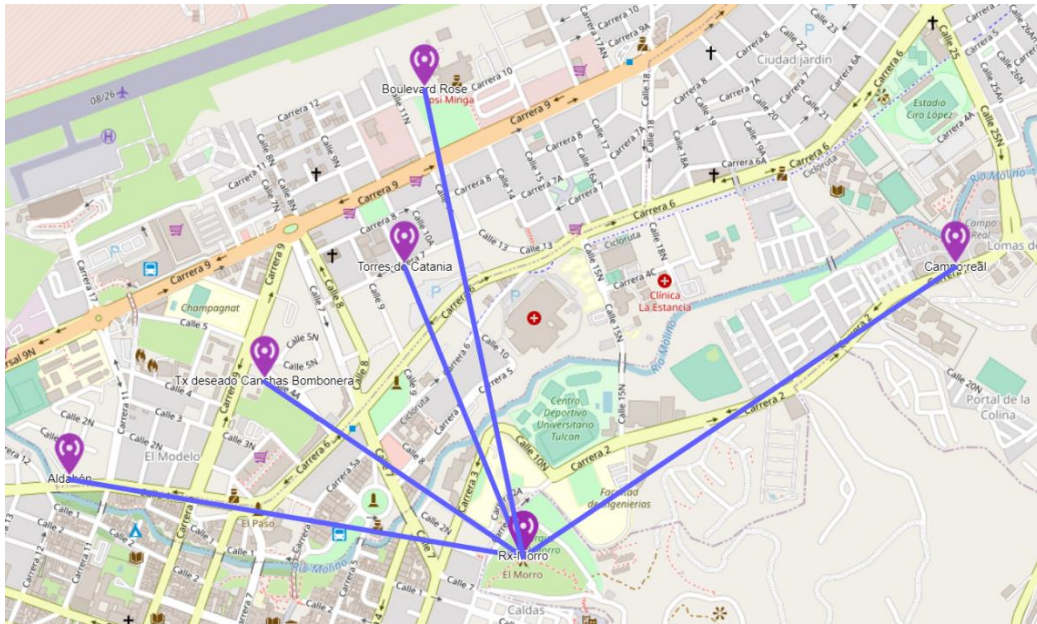


Fig. 35. Escenarios de medición para interferencia co-canal en VHF.
Fuente: Tomada de *Radio Mobile Online* [38].

En La banda de UHF se definen cuatro escenarios de medición, con los mismos criterios de la banda de VHF, los cuales se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Características de los escenarios de medición para interferencia co-canal en UHF.

Escenario	Descripción del transmisor	Distancia al receptor (m)	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m)
	Deseado: Canchas la Bombonera	740	2.44852299	-76.60573214	1728.40
1	Interferente: Torres de Catania	740	2.45097201	-76.60273175	1742.60
2	Interferente: Puente de Pomona	1015	2.44998264	-76.59268993	1747.30
3	Interferente: Parqueadero Boulevard	997	2.45357632	-76.60195027	1742.10
4	Interferente: Semáforo Cadillal	985	2.44630084	-76.60893486	1727.40

En la Fig. 36 se presenta un mapa con los escenarios de medición en campo para la banda de UHF.

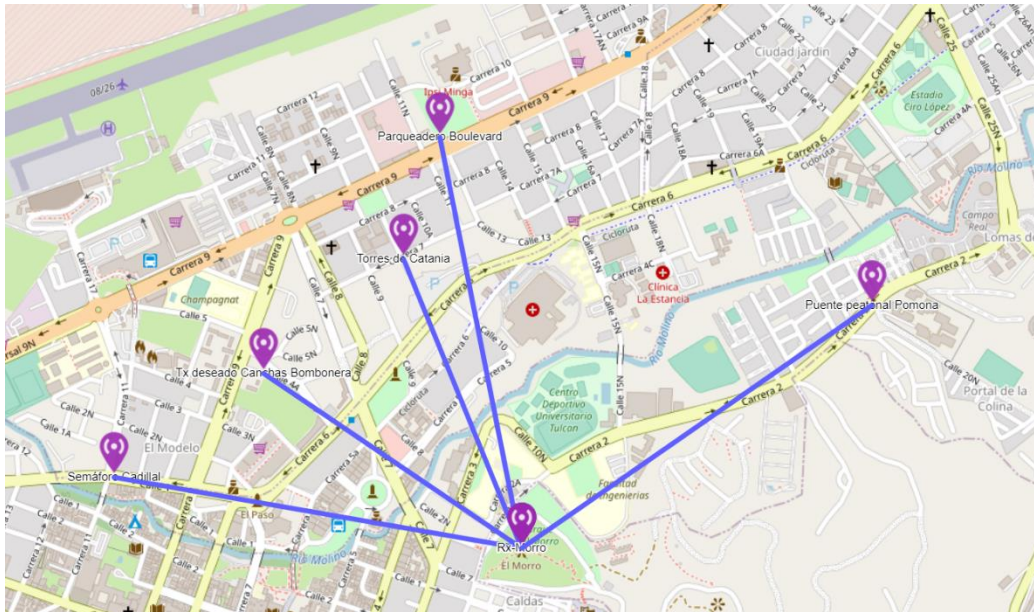


Fig. 36. Escenarios de medición para interferencia co-canal en UHF.
Fuente: Tomada de *Radio Mobile Online* [38].

- Análisis de la interferencia de canal adyacente en la banda de VHF y UHF.

En la Tabla 30 y Tabla 33 se presentan las coordenadas del receptor y el equipo de medición, correspondientes al Cerro del Morro, y la azotea de la oficina 409 de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

Tabla 33. Ubicaciones del receptor y equipo de medición para estudio de interferencia de canal adyacente.

Ubicación del receptor para	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m)
Escenario 1	2.44478236	-76.60019868	1773.70
Escenario 2	2.44681894	-76.59860347	1769.00

En la Fig. 34 se observa la disposición del receptor y el equipo de medición para el primer escenario, y en la Fig. 37 para el segundo.



Fig. 37. Receptor y equipo de medición en escenario de campo: azotea oficina 409.
Fuente: Elaboración propia.

Para las bandas de VHF y UHF se definen los mismos escenarios de medición, ya que el transmisor deseado y el interferente en este caso no varían su ubicación y están a igual distancia del receptor. El parámetro que cambia en las mediciones para el análisis de interferencia de canal adyacente es la frecuencia de operación del transmisor interferente, con el objetivo de determinar una separación en frecuencia mínima requerida. En la Tabla 34 se presentan los escenarios con sus coordenadas y distancias al receptor.

Tabla 34. Características de los escenarios de medición para interferencia de canal adyacente en VHF y UHF.

Escenario	Descripción del transmisor	Distancia al receptor (m)	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m)
1	Deseado: Canchas la Bombonera	740	2.44852299	-76.60573214	1728.40
	Interferente: Torres de Catania	740	2.45097201	-76.60273175	1742.60
2	Deseado: CDU Tulcán	280	2.44783092	-76.60035776	1732.30
	Interferente: Liceo	280	2.44769088	-76.59677161	1739.60

En la Fig. 38 se presenta un mapa con los escenarios de medición en campo para interferencia de canal adyacente.

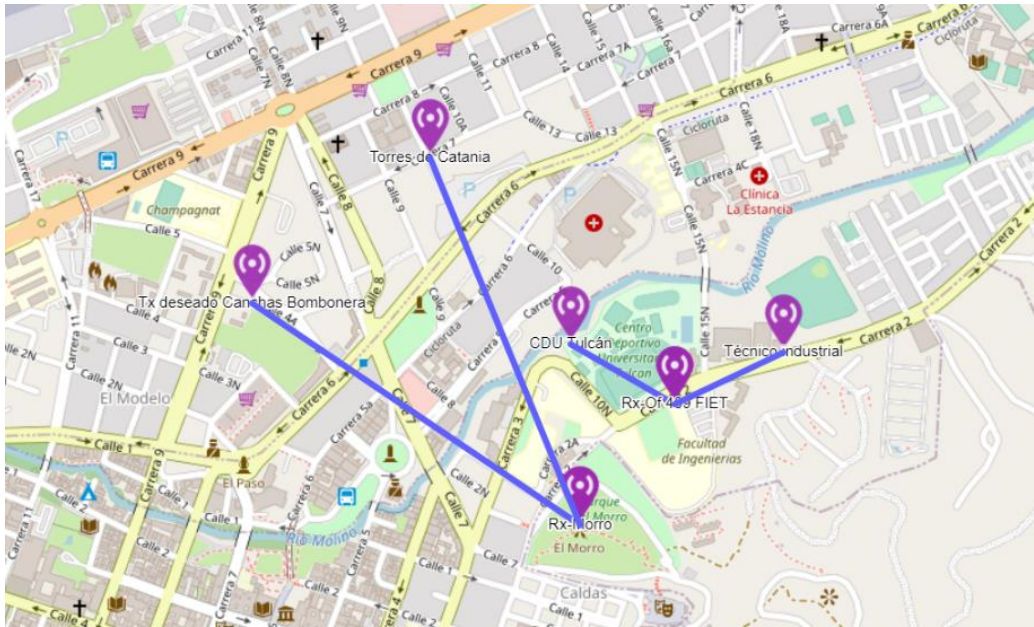


Fig. 38. Escenarios de medición para interferencia de canal adyacente en VHF y UHF.
Fuente: Tomada de *Radio Mobile Online* [38].

3.3.3 Medición del nivel de potencia para una interferencia aceptable

Se define que el parámetro para el análisis de interferencia co-canal y de canal adyacente en un escenario de campo es el nivel de potencia de la señal deseada e interferente. En la Fig. 39 se presenta la ubicación inicial de los equipos en un escenario de campo. En la ecuación (28) se presenta la fórmula del balance de potencias, con el fin de hacer una comparación de los datos obtenidos con valores teóricos para el servicio móvil terrestre [4].

$$P_r = P_t - L_{tt} + G_t - L_b + G_r - L_{tr} \quad (28)$$

donde:

- P_r : Potencia de recepción.
- P_t : Potencia de transmisión.
- L_{tt} : Pérdidas en la línea de transmisión.
- G_t : Ganancia de antena transmisora.
- L_b : Pérdida básica de propagación.
- G_r : Ganancia de antena receptora.
- L_{tr} : Pérdidas en la línea de recepción.

Las pérdidas básicas de espacio libre se calculan mediante la ecuación (29).

$$L_b(dB) = 32,4 + 20 \log f(MHz) + 20 \log d(Km) \quad (29)$$

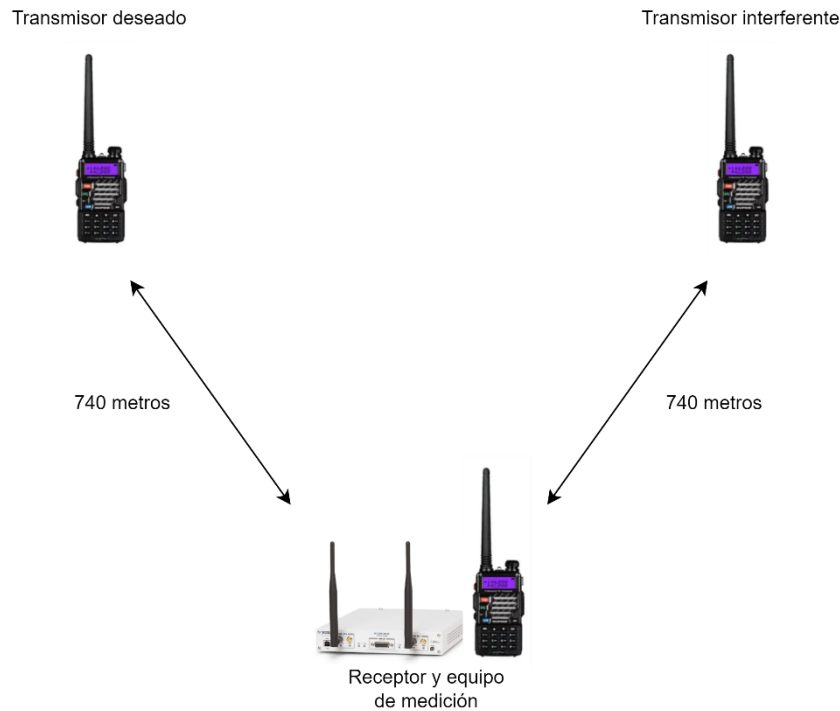


Fig. 39. Ubicación inicial de los equipos en campo.
Fuente: Elaboración propia.

- Medición del nivel de potencia para el análisis de interferencia co-canal.

Se sigue el procedimiento de la Fig. 25 para realizar la medición del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia co-canal. En la Tabla 35 se presenta la configuración de los transmisores deseado e interferente y del receptor en un escenario de campo.

Tabla 35. Parámetros del Baofeng UV-5R+PLUS.

Frecuencia de operación (MHz)	Potencia de transmisión (dBm)	Sensibilidad (dBm)	Modulación	Ancho de banda (KHz)	Squelch	Ganancia de antena (dBi)
144,9	30	-120 (SINAD 12 dB)	FM	11(Narrow)	5	2,15
430,1						3

En la Tabla 21 se presenta la configuración del equipo de medición, la cual es igual para los escenarios de laboratorio y campo. A continuación, se establece el enlace de comunicación entre los transmisores deseado e interferente y el receptor, determinando experimentalmente una separación mínima en distancia donde la interferencia se considere aceptable. Seguidamente se

mide el nivel de potencia de la señal deseada captada por el receptor, donde el transmisor interferente se considera despreciable en la comunicación.

Para realizar la medición del nivel de potencia de la señal interferente, se apaga el transmisor deseado, y medir el nivel de potencia interferente captado por el receptor. Los datos se recopilan en un archivo CSV y se convierten a una hoja de cálculo de Excel para su tratamiento. Seguidamente se calcula la relación de protección que garantiza una interferencia aceptable para el sistema. Los resultados obtenidos para la banda de VHF se presentan en la Tabla 36, y los resultados para la banda de UHF se presentan en la Tabla 37.

Tabla 36. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia co-canal en VHF.

Frecuencia de operación (MHz)	Distancia de separación Tx deseado (m)	Nivel de potencia deseado (dBm)	Escenario	Distancia de separación Tx interferente (m)	Nivel de potencia interferente (dBm)	Relación C/I (dB)
144,9	740	-64,3	1	740	-65,6	1,3
			2	1235	-77,4	13,1
			3	1130	-76,9	12,6
			4	1090	-78,5	14,2

En la Tabla 36 se observa que para el análisis de interferencia co-canal en la banda de VHF, el transmisor deseado se encuentra a 740 metros del receptor con una potencia captada de -64,3 dBm. Se plantean cuatro escenarios de medición, tomando como primer escenario el peor de los casos, donde el transmisor deseado e interferente se encuentran a igual distancia del receptor, se observa que la relación de protección es baja, debido a que las potencias deseada e interferente captadas por el receptor a igual distancia son similares.

Para cumplir con los requerimientos planteados en la metodología de campo se definen tres escenarios de medición, determinando de forma experimental una separación en distancia entre el transmisor interferente y el receptor, donde la comunicación no sea afectada por señales interferentes, garantizando una interferencia co-canal aceptable para el sistema. Al comparar los resultados de los tres escenarios, se observa que la separación en distancia no presenta una variación significativa, porque los niveles de potencia captados por el receptor son similares. Una vez calculada la relación de protección para los tres escenarios de medición, se observan variaciones de aproximadamente 1 dB, por lo tanto, se determina que la relación de protección mínima aceptable para un escenario de campo en la banda de VHF debe ser aproximadamente 13 dB.

Tabla 37. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia co-canal en UHF.

Frecuencia de operación (MHz)	Distancia de separación Tx deseado (m)	Nivel de potencia deseado (dBm)	Escenario	Distancia de separación Tx interferente (m)	Nivel de potencia interferente (dBm)	Relación C/I (dB)
430,1	740	-70,5	1	740	-72,1	1,6
			2	1015	-81,1	10,6
			3	997	-82,3	11,8
			4	985	-81,9	11,4

De acuerdo con la Tabla 37, para el análisis de interferencia co-canal en la banda de UHF el transmisor deseado también se encuentra a una distancia de 740 metros con respecto al receptor, la potencia deseada que capta el receptor es de -70,5 dBm. Inicialmente se utiliza el mismo escenario en la banda de VHF, y se observa una relación de protección baja, debido a que la distancia de los transmisores con respecto al receptor es la misma. Se definen tres escenarios de medición donde se determina de manera experimental la separación en distancia entre el transmisor interferente y el receptor, garantizando una interferencia co-canal aceptable.

Se observa que la separación en distancia y el nivel de potencia de los tres escenarios son muy similares, porque la relación de protección no presenta variaciones significativas, determinando que la relación de protección mínima aceptable para un escenario de campo en la banda de UHF debe ser aproximadamente 11 dB.

- Medición del nivel de potencia para el análisis de interferencia de canal adyacente.

Siguiendo el procedimiento de la Fig. 26 para la medición del nivel de potencia deseado e interferente. Se realiza la configuración de los transmisores deseado e interferente y del receptor en un escenario de campo de acuerdo con la Tabla 35.

La Tabla 38 presenta la configuración del equipo de medición, para medir el nivel de potencia de las señales adyacentes.

Tabla 38. Configuración del equipo de medición para interferencia de canal adyacente.

Frecuencia central (MHz)	Ancho de banda de medición (KHz)	RBW (Hz)	Span (KHz)	Tipo de detector	Tamaño FFT
144,9	48	6,1	200	RMS	32000
430,1					

Se establece el enlace de comunicación entre los transmisores y el receptor, todos operando a la misma frecuencia, 144.9 MHz para VHF y 430.1 MHz para UHF. Los radios Baofeng permiten realizar una variación en frecuencia de al menos 2.5 KHz [37], por lo que la frecuencia de operación del transmisor interferente se varía a este paso de frecuencia y se verifica si hay una comunicación eficiente entre el transmisor deseado y el receptor, si aún se percibe la señal interferente en receptor, se sigue variando la frecuencia de operación hasta que la señal interferente no se perciba en el receptor. En este momento la interferencia de canal adyacente se considera aceptable para el sistema.

Se mide la potencia de la señal deseada, luego se apaga el transmisor deseado y se mide la potencia de la señal interferente, registrando también la frecuencia de operación cuya diferencia con la frecuencia del transmisor deseado es la separación mínima en frecuencia. Posteriormente, se calcula la relación de protección. Los resultados obtenidos para la banda de VHF se presentan en la Tabla 39, y los resultados para la banda de UHF se presentan en la Tabla 40.

Tabla 39. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia de canal adyacente en VHF.

Escenario	Distancia entre transmisores y receptor (m)	Separación en frecuencia (KHz)	Nivel de potencia deseado (dBm)	Nivel de potencia interferente (dBm)	Relación de protección (dB)
1	280	7,5	-56,3	-68,8	12,5
2	740	5	-64,3	-76,1	11,8

Tabla 40. Resultados del nivel de potencia deseado e interferente para interferencia de canal adyacente en UHF.

Escenario	Distancia entre transmisores y receptor (m)	Separación en frecuencia (KHz)	Nivel de potencia deseado (dBm)	Nivel de potencia interferente (dBm)	Relación de protección (dB)
1	280	10	-63,6	-78,5	14,9
2	740	7,5	-70,05	-83,9	13,85

En los escenarios de medición se tiene en cuenta que los transmisores deseado e interferente están a igual distancia del receptor, se determina experimentalmente la separación en frecuencia entre estos transmisores, donde se garantiza que el receptor solo detecta la señal deseada y no se afecta por señales interferentes. En la Tabla 39 se observan las separaciones en distancia para los dos escenarios, comparando los resultados, cuando los transmisores se encuentran a mayor distancia con respecto al receptor, la separación en frecuencia es menor que cuando los transmisores están más cercanos a este. Al comparar los resultados de la relación de protección para la banda de VHF, no presentan variaciones significativas para los dos escenarios, por lo cual se determina que la relación de protección mínima aceptable para un escenario de campo en VHF debe ser aproximadamente 12 dB.

De acuerdo con la Tabla 40 para la banda de UHF es necesario considerar una mayor separación en frecuencia que para la banda de VHF, para garantizar una comunicación aceptable sin señales interferentes críticas. En la banda de VHF tampoco se presentan variaciones significativas en la relación de protección, por lo cual se determina que la relación de protección mínima aceptable para un escenario de campo en UHF debe ser de aproximadamente 14 dB.

En la Tabla 41 se presentan los resultados de pérdidas de espacio libre para el análisis de interferencia co-canal y de canal adyacente en las bandas de VHF y UHF aplicando la ecuación (29).

Tabla 41. Pérdidas de espacio libre en la banda de VHF y UHF.

Frecuencia (MHz)	144,9				430,1			
Distancia (m)	740	1090	1130	1235	740	985	997	1015
Pérdidas de espacio libre (dB)	73,05	76,41	76,72	77,49	82,5	84,98	84,09	85,24

En la Tabla 42 se presentan los resultados del balance de potencias para la banda de VHF y UHF aplicando la ecuación (28), teniendo en cuenta que las pérdidas en la línea de transmisión y recepción son de 1,2 dB, y la ganancia de la antena transmisora y receptora para la banda de VHF es de 2,15 dBi y para la banda de UHF es de 3 dBi.

Tabla 42. Balance de potencias para la banda de VHF y UHF.

Frecuencia de operación (MHz)	Distancia de separación (m)	Potencia de recepción medida (dBm)	Potencia de recepción calculada (dBm)
144,9	740	-65,6	-41,15
	1090	-78,5	-44,51
	1130	-76,9	-44,82
	1235	-77,4	-45,59

430,1	740	-72,1	-48,9
	985	-81,9	-51,38
	997	-82,3	-51,49
	1015	-81,1	-51,64

Se puede observar de la Tabla 42 una diferencia de más de 20 dB entre la potencia medida y la calculada tanto para la banda de VHF como para UHF, esto se debe a que en un entorno real se presentan pérdidas por obstáculos, por desvanecimiento, por multitrayecto, entre otras, que no son tenidas en cuenta en el balance de potencias para espacio libre.

En la Tabla 43 se pueden observar los valores calculados de la relación de protección en un escenario de campo, con el fin de analizar estos resultados obtenidos de manera experimental con resultados teóricos para el servicio móvil terrestre.

Tabla 43. Resultados de la relación de protección para análisis de interferencia en VHF y UHF.

	Interferencia Co-canal		Interferencia Canal Adyacente	
	VHF	UHF	VHF	UHF
Relación de protección (dB)	13	11	12	14

3.3.4 Verificación del criterio de interferencia

La verificación del criterio de interferencia es importante para determinar si la interferencia presente en el sistema es aceptable o perjudicial. Para aplicar el criterio de interferencia se debe seguir el proceso de la Fig. 27.

Los resultados de relación de protección en un escenario de campo se observan en Tabla 43, estos datos deben compararse con la relación de protección obtenida en laboratorio para el servicio móvil terrestre. En la Tabla 44 se presenta el criterio de interferencia para un escenario en campo.

Tabla 44. Criterio de interferencia.

	Interferencia Co-canal		Interferencia Canal Adyacente		Obtenida en laboratorio
	VHF	UHF	VHF	UHF	
Relación de protección (dB)	13	11	12	14	10
Criterio de interferencia	Interferencia aceptable	Interferencia aceptable	Interferencia aceptable	Interferencia aceptable	

Los resultados de la Tabla 44 del criterio de interferencia aplicando la metodología en un escenario de campo, demuestran que tanto la interferencia co-canal y la interferencia de canal adyacente son aceptables para el sistema de comunicación móvil terrestre, garantizando una calidad adecuada en la comunicación.

3.3.5 Determinación de una separación mínima en distancia y frecuencia

En la Tabla 45 se observan los valores experimentales de separación mínima en distancia y frecuencia, en los que la interferencia se considera aceptable para el sistema.

Tabla 45. Separación mínima en distancia y frecuencia.

Frecuencia de operación (MHz)	Separación mínima en distancia (m)	Separación mínima en frecuencia (KHz)
144,9	1150	6,25
430,1	1015	8,75

La separación mínima en distancia que garantiza una comunicación estable sin señales interferentes es de aproximadamente 1150 metros para la banda de VHF y 1015 metros para la banda de UHF, comparando los resultados, se observa que para la frecuencia en UHF la separación en distancia es menor que en VHF, esto es debido a que las pérdidas de propagación en UHF es mayor a las pérdidas en VHF, por lo que se hace necesario una menor separación en distancia para garantizar una comunicación estable entre el transmisor deseado y el receptor.

La separación mínima en frecuencia que garantiza una interferencia de canal adyacente aceptable es de aproximadamente 6,25 KHz para la banda de VHF y 8,75 KHz para la banda de UHF. Estas variaciones mínimas presentadas entre estas dos bandas se deben a las pérdidas de propagación presentadas y a factores externos que no se tuvieron en cuenta durante el proceso de medición.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 CONCLUSIONES

Se formuló una metodología versátil para la medida de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles terrestres que abarcan la banda de 30 MHz a 470 MHz. La metodología, basada en los estándares, normas de medición y bibliografía existente, simplifica y adapta los procedimientos y los criterios bajo las condiciones específicas de los sistemas de comunicaciones que prestan el servicio móvil terrestre; la metodología se propone para dos escenarios, una para laboratorio, y otra para campo, y puede ser aplicada en diversos sistemas de comunicaciones móviles que operan en esta banda.

La metodología formulada simplifica la lectura y sintetiza la información y ejecución de las mediciones, facilitando su comprensión y aplicación. Durante el proceso de Revisión Sistemática de la Literatura (SLR, *Systematic Literature Review*) realizado durante el anteproyecto y parte del trabajo de grado, se evidenció la escasez de documentación académica en el campo de las mediciones en sistemas de comunicaciones que prestan el servicio móvil terrestre en las bandas de VHF y UHF, lo cual dificulta el acceso y la consulta de información relevante y actualizada para el desarrollo del trabajo de grado. En cambio, se encontraron varios estándares como [29] y [21], manuales y recomendaciones de la ITU como [15], [27] y [28], y libros como [5], [6], entre otros, que de manera más universal determinan procesos de medición en sistemas inalámbricos en general, pero que algunas veces resultan tediosos y muy extensos, puesto que incluyen y abarcan otros temas que no son pertinentes para el campo estudiado.

Se analizaron los métodos y métricas de medida de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos, identificando las principales características de estos sistemas, de la interferencia y los fenómenos de propagación que se presentan en las bandas de VHF y parte baja de UHF. También se identificó que la relación de protección y la máscara espectral son las principales métricas para el análisis de interferencia co-canal y de canal adyacente, que influyen en la calidad y el desempeño de los sistemas de comunicaciones que prestan el servicio móvil terrestre. Los principales parámetros que se deben considerar para controlar la interferencia en sistemas de comunicaciones móviles terrestres son: la potencia de transmisión, frecuencia de operación, ancho de banda, ganancia de antena, sensibilidad del receptor, y la separación mínima tanto en distancia como en frecuencia entre el transmisor interferente y el receptor.

Al aplicar la metodología formulada en un sistema de comunicaciones móvil convencional operando con modulación FM en frecuencias VHF y UHF, fue posible determinar el nivel de potencia de señal deseada e interferente, y se calculó un valor mínimo de relación de protección encontrado de manera experimental, bajo criterios de niveles de interferencia fundamentados en la literatura consultada, el cual garantiza que la interferencia co-canal y de canal adyacente es aceptable, este valor fue de aproximadamente 12 dB. Se debe entender que este valor de relación de protección garantiza una calidad adecuada solamente para sistemas de radio móvil terrestre.

Al aplicar la metodología en un escenario de laboratorio, se obtuvo de forma experimental una relación de protección de 10 dB que garantizó que la interferencia fuera aceptable para el sistema. Esta relación de protección fue comparada con valores teóricos que están definidos previamente en manuales y estándares para el servicio móvil terrestre, comprobando que la relación de protección teórica es similar a la relación obtenida de manera experimental en laboratorio.

Al aplicar la metodología en un escenario de campo, se obtuvo experimentalmente una separación en distancia y frecuencia que garantizó que la interferencia co-canal y de canal adyacente fueran aceptables para el sistema. La separación mínima en distancia que se obtuvo de manera experimental fue de 1150 metros para la banda de VHF y 1025 metros para la banda de UHF, mientras que la separación en frecuencia que se obtuvo de manera experimental fue de 6,25 KHz para la banda de VHF y 8,75 KHz para la banda de UHF. Estas variaciones mínimas que se presentaron en la separación en distancia y frecuencia para la banda de VHF y UHF se deben a las pérdidas de propagación, longitud de la onda, obstáculos y factores externos que se presentaron durante el proceso de medición.

Los equipos utilizados para la aplicación de la metodología presentaron ciertas dificultades al momento de realizar la medición, por lo que es importante realizar una calibración y verificación de los equipos antes de empezar el proceso de medición para garantizar mediciones precisas y confiables. Se tuvo la posibilidad de trabajar con un dispositivo SDR como analizador de espectro haciendo uso del software *SDRConsole*, y se determinó que la USRP B210 es un dispositivo confiable al momento de realizar mediciones.

4.2 RECOMENDACIONES

Antes de aplicar la metodología de medición se debe verificar si los equipos están calibrados, al menos de forma experimental y además se debe corroborar el correcto funcionamiento del receptor, también mediante pruebas experimentales de verificación de sensibilidad y en caso de utilizar los radios de dos vías como transmisores, examinar la posibilidad de verificar su potencia de transmisión, ancho de banda transmisión y demás parámetros mediante pruebas conducidas.

Es importante disponer de tiempo para la ejecución de medidas de señales en estos sistemas, puesto que hay tareas que demandan un tiempo de planificación considerable, por ejemplo, la elección de los escenarios de medición en campo presenta un nivel alto de complejidad, ya que las condiciones que se plantean en la metodología, como la línea de vista, la condición de que ambas estaciones deben estar a la misma distancia del receptor y la movilidad para variar distancia hacen que sea más difícil la determinación de las ubicaciones para las estaciones.

La antena utilizada en los equipos influye considerablemente en las mediciones, por ejemplo, al momento de hacer pruebas de sensibilidad en los radios Baofeng se transmitió una señal en VHF con una antena monopolo de aproximadamente 40 cm y esta hizo que la señal recibida fuera mayor en comparación, utilizando antenas propias del Baofeng que tienen ganancia de aproximadamente 3 dBi. Por esto se decidió utilizar la antena de los radios Baofeng para todos los equipos.

Durante la aplicación de la metodología de medición, se identificaron desafíos significativos relacionados con el generador de señales Rigol, se sugiere una revisión detallada de su etapa de amplificación, dado que los resultados indicaron niveles de potencia superiores en la banda de VHF en comparación con la de UHF, lo cual contradice las expectativas teóricas basadas en las pérdidas asociadas a frecuencias más altas.

Al realizar mediciones en laboratorio se percibió que cualquier uso de dispositivos electrónicos afecta incluso en lo más mínimo la medición, en este caso el uso del computador (al moverlo), al utilizar celulares para tomar fotos de evidencia, e incluso que una persona se encuentre cerca del escenario de medición, produce variaciones significativas en la recepción.

Es importante la elección de la antena adecuada para el sistema bajo estudio, en este caso se utilizaron las antenas de los radios Baofeng para todos los equipos, incluido el de medición, para el cual fue necesario utilizar un cable coaxial para lograr conexión entre la antena y los conectores de la USRP B210, ya que la antena de 2,4 GHz que es la que generalmente se usa, presentaba problema al momento de la medición en la banda de VHF, puesto que prácticamente no se lograba percibir ningún tipo de señal en esta banda haciendo uso de *SDRConsole*, la razón es que en las especificaciones de la antena de 2,4 GHz no está incluida ninguna frecuencia de la banda de VHF.

Al aplicar la metodología de medición, en los radios Baofeng se utilizó un *Squelch* de 5, este parámetro se debe tener en cuenta puesto que, al realizar pruebas de sensibilidad en los radios Baofeng, al variar el *Squelch* entre 1 y 10 su sensibilidad variaba.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

- Aplicación de la metodología de medición de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles terrestres que emplean modulación digital.
- Aplicación de la metodología de medición de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles terrestres para un escenario de laboratorio en una cámara anecoica.
- Aplicación de la metodología de medición de señales deseadas e interferentes en sistemas de comunicaciones móviles terrestres para un escenario de campo sobre un sistema desplegado.
- Formular y aplicar una metodología para la calibración y verificación de equipos en sistemas de comunicaciones móviles.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Simon Haykin, S. A. Editorial Limusa, Ed. *Sistemas de Comunicación*. México D.F., 2002.
- [2] *Reglamento de Radiocomunicaciones - Artículos*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2020. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/req/R-REG-RR-2020-ZPF-S.zip
- [3] J. M. Hernando Rábanos, *Transmisión por radio*, 6a ed ed. Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, 2008, p. 651 p.
- [4] J. M. Hernando Rábanos, J. M. Riera Salís, and L. Tomás Mendo, *Transmisión por radio*, 7a ed ed. Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, 2013, p. 651 p.
- [5] B. R. Elbert, *Radio Frequency Interference in Communications Systems* (Artech House Space Technology and Applications Series). Artech House, 2016.
- [6] U. Vered, A. M. Egger, Ed. *Intersystem EMC Analysis, Interference, and Solutions* (Artech House Electromagnetics Series). Artech House, 2018.
- [7] *Ruido radioeléctrico*, Rec. ITU-R P.372-10, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2009.
- [8] M. d. T. d. I. y. I. C. d. C. Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico: Ingeniería del Espectro Radioeléctrico (Título II)," ed. Bogotá, Colombia, 2012.
- [9] C. Hernández, V. Quintero, M. Vargas, D. Galvis, M. Benavídez, and R. Zambrano, "Recomendaciones Sobre Parámetros Técnicos Esenciales de Operación y Análisis de Interferencia para Sistemas de Comunicaciones VHF en Colombia," ed: Universidad del Cauca, 2021.
- [10] *Definición y Medición de los Productos de Intermodulación en Transmisores que Utilizan Técnicas de Modulación de Frecuencia, de Fase o Compleja.*, ITU-R SM.1446, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza., 2020.
- [11] Agencia Nacional del Espectro, "Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia," ed. Bogotá, Colombia, 2022.
- [12] *Vocabulario de Radiocomunicaciones*, ITU-R V.573-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2015.
- [13] Agencia Nacional del Espectro. "Visor de Espectro." https://espectro-co.ane.gov.co/TesMonitorPlanning/TesMonitorPlanningWeb/#TMP_Main (accessed 21 Oct, 2021).
- [14] K. Malarić, *EMI Protection for Communication Systems*. Artech House, 2010.
- [15] *Manual de Comprobación Técnica del Espectro*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2011. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf
- [16] *Ruido Radioeléctrico*, Rec. ITU-R P.372-16, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2022. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-16-202208-!!!PDF-S.pdf
- [17] *Relaciones de Protección e Intensidades Mínimas de Campo Necesarias en os Servicios Móviles*, I. ITU-R M.358-5, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 1986.
- [18] *Compartición entre el servicio de radiodifusión y los servicios fijo y/o móvil en las bandas de ondas métricas y decimétricas-Recomendación UIT-R SM.851-1*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1993. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.851-1-199304-!!!PDF-S.pdf
- [19] *Information on the Evaluation of VHF and UHF Terrestrial Cross-Border Frequency Coordination Requests*, TB-7, Industry Canada, 2013.

- [20] *Unwanted Emissions In The Out Of Band Domain*, Rec. ITU-R SM.1541-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra, Suiza, 2015.
- [21] *47 CFR Part 90 - Private Land Mobile Radio Services*, Title 47 Chapter I Subchapter D Part 90, Code of Federal Regulations, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-90>
- [22] *Vocabulario de términos de las telecomunicaciones móviles internacionales*, Rec. ITU-R M.1224-1, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012.
- [23] A. Riaz, "Radio Interference Calculations," in *ITU Workshop on cross border Radio Frequency Management in Arab States*, Union Internacional de Telecomunicaciones, Ed., ed. Dubai, United Arab Emirates, 2017, pp. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/ArabStates/Documents/events/2017/MENASMC/Pres/Aamir%20-%20Radio%20Interference%20Calculations.pdf>.
- [24] Comisión Electrotécnica Internacional. "IEC Glossary." <https://std.iec.ch/terms/terms.nsf/3385f156e728849bc1256e8c00278ad2/9e8312e7deae3c35c12573f5003804b5?OpenDocument> (accessed).
- [25] A. o. EMC. "EMC Standards | Academy of EMC." <https://www.academyofemc.com/emc-standards> (accessed).
- [26] L. Sevgi, *A Practical Guide to EMC Engineering*. Artech House Publishers, 2017.
- [27] *Methods for measurements of radio noise*, Rec. ITU-R SM.1753-2, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1753-2-201209-!!!PDF-E.pdf
- [28] *Separaciones en frecuencia y en distancia*, Rec. ITU-R SM.337-6, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2020.
- [29] *Land Mobile FM or PM Communications Equipment Measurement and Performance Standards*, ANSI/TIA-603-E-2016, Asociación de la Industria de Telecomunicaciones and Instituto Nacional Estadounidense de Estándares, Arlington, VA, U.S.A., 2016. [Online]. Available: <https://fasma.org/wp-content/uploads/TIA-603-E-1.pdf>
- [30] *ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements; Harmonised Standard for ElectroMagnetic Compatibility*, Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones, Sophia Antípolis, Francia, 2019.
- [31] *Research on Interference Analysis Methodology of Radio Communication Systems Based on Measured Radio Frequency Protection Ratio*, Electronic System Engineering Company of China, Beijing, China, 2011.
- [32] A. Singh and D. H. Peña, *Agile & Scrum*. Babelcube Incorporated, 2021.
- [33] K. A. Saleh, *Software Engineering*. J. Ross Pub., 2009.
- [34] *Compatibilidad Electromagnética (CEM) Parte 4-3: Técnicas de ensayo y de medida*, UNE EN-6100-4-3, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2003. [Online]. Available: https://www.donsion.org/calidad/documentacion/normativa/37-UNE-EN_61000-4-3=2003.pdf
- [35] alldatasheet.es. "HP8656/57 Series Technical Data." <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/133358/HP/HP8656B.html> (accessed sep, 2023).
- [36] Ettus Research. "USRP Hardware Driver and USRP Manual: USRP B2x0 Series." https://files.ettus.com/manual/page_usrp_b200.html#b200_hw_ref (accessed sep., 2023).
- [37] Fujian Baofeng Electronics Co. "Manual de instrucciones BAOFENG UV-5R+Plus." <https://baofeng.s3.amazonaws.com/Baofeng%20UV-5R%20%26%20GT-3%20Series%20User%20Manual%20Digital%20Version%2020201023.pdf> (accessed sep, 2023).

- [38] R. Coudé. "Radio Mobile Online." https://www.ve2dbe.com/rmonline_s.asp (accessed sep, 2023).
- [39] SDR-Radio.com Ltd. "SDR Console - Main Program in the SDR-radio.com Suite." <https://www.sdr-radio.com/console> (accessed nov., 2023).

ANEXO A: GUÍA DE INSTALACIÓN Y USO DE SDRCONSOLE CON USRP B210

Esta guía proporciona instrucciones detalladas sobre cómo instalar y utilizar *SDRConsole* con un dispositivo SDR USRP B210, para captura y registro de datos de medición. *SDRConsole* es una aplicación de software libre que permite el procesamiento de señales de radio en tiempo real utilizando hardware SDR [39].

REQUISITOS

Se debe contar con los siguientes elementos:

- USRP B210 y su conexión a la antena establecida; es el hardware utilizado para recibir y procesar señales de RF.
- Cable USB para conectar la tarjeta USRP B210 al computador.
- Computador con Windows y acceso a internet; *SDRConsole* es compatible con sistemas operativos Windows.

PASOS DE INSTALACIÓN

Se proporcionan los pasos para instalación del controlador de la USRP B210 y de *SDRConsole*

Instalación de controladores para la USRP B210

- Conectar la USRP B210 al computador haciendo uso del cable USB.
- Para el controlador del hardware, abrir el navegador web de preferencia y descargar la última actualización del archivo `uhd_X.X.X-release_Win64_VS20XX.exe` http://files.ettus.com/binaries/uhd/latest_release
- Navegar hasta la carpeta de descargas y buscar el archivo descargado, y ejecutarlo, se muestra la pantalla de bienvenida. Clic en *Siguiente*.



Fig. A 1. Pantalla de bienvenida instalador de controlador hardware.

- Aceptar los términos del acuerdo de la licencia del software. Clic en *Acepto*.



Fig. A 2. Términos del acuerdo de licencia.

- Clic en *Add UHD to the system PATH for all users* y en *Siguiente*.

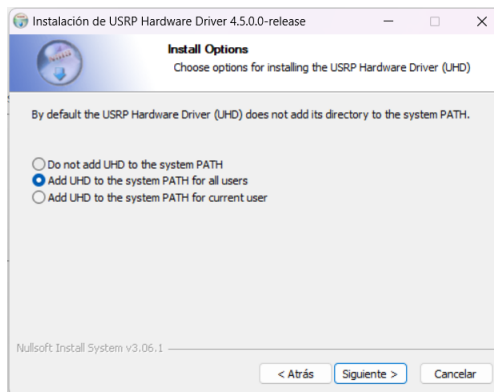


Fig. A 3. Adición de la variable de entorno.

- Seleccionar la ubicación de instalación y dar clic en *Siguiente*.

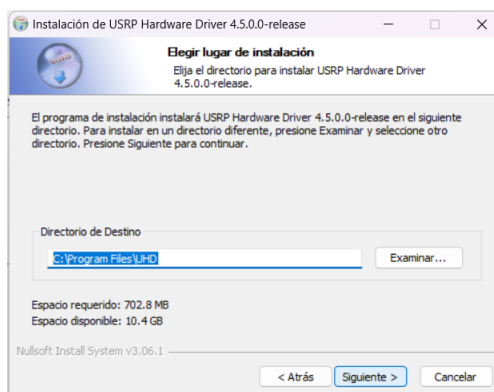


Fig. A 4. Selección de la ruta de instalación.

- Clic en *Siguiente* para elegir la carpeta del menú inicio por defecto.

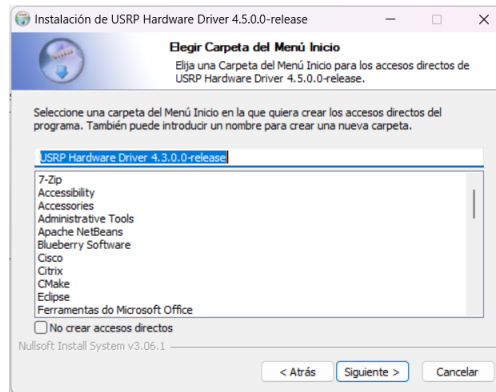


Fig. A 5. Elección de la carpeta del menú inicio.

- Clic en *Instalar* para instalar todos los componentes seleccionados del controlador.

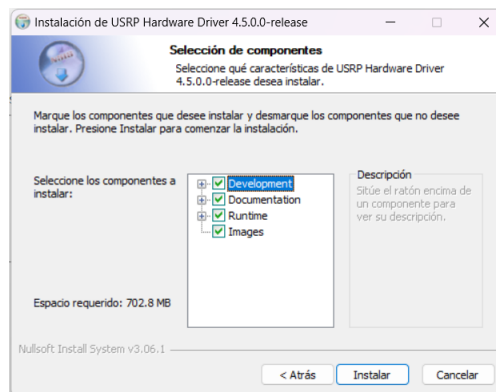


Fig. A 6. Selección de componentes de instalación.

- A continuación, empieza la instalación del controlador del hardware, al finalizar clic en *Terminar* para culminar con el proceso.

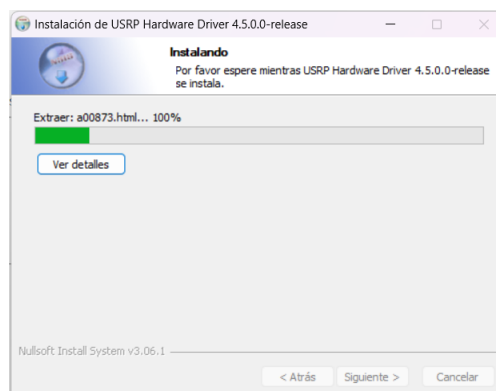


Fig. A 7. Instalación del controlador

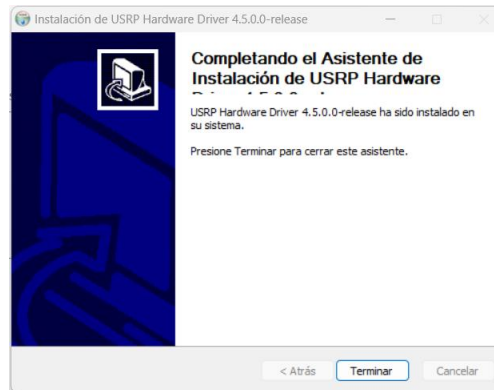


Fig. A 8. Terminar

- Para el controlador *USB*, abrir el navegador web de preferencia y descargar el siguiente archivo http://zhixun-wireless.top/data/john-wu/2020/10/erllc_uhd_winusb_driver.zip.
- Ubicar la USRP B210 en *Panel de control\Hardware y sonido\Dispositivos e impresoras*. Clic derecho en *Propiedades*.
- Cambiar el controlador manualmente.
- Navegar hasta la carpeta de descargas y seleccionar el archivo e instalarlo.

Descarga e instalación de *SDRConsole*

- Abrir el navegador web de preferencia e ir al sitio web oficial de descarga de *SDRConsole*: <https://www.sdr-radio.com/download>. Descargar la versión más reciente, adecuada para el sistema operativo en uso.
- Ejecutar el archivo de instalación ubicado en la carpeta de descarga de este.
- Seguir las instrucciones del asistente de instalación para completar el proceso.
- Con la USRP B210 conectada al computador, abrir *SDRConsole*.
- En la barra de menú, selecciona *Options* y luego *Device*.
- Seleccionar "UHD (USRP)" como el tipo de dispositivo.
- Se abrirá una ventana de configuración. Seleccionar la USRP B210 de la lista de dispositivos disponibles.
- Seleccionar la USRP B210 y el puerto donde la antena de recepción está conectada. Clic en *Start*.

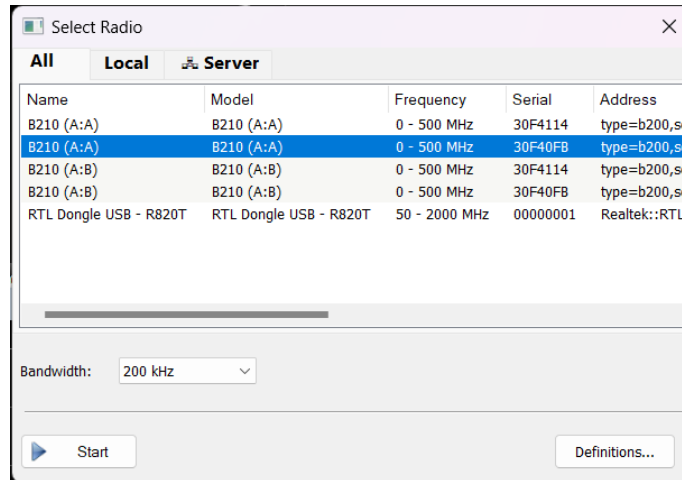


Fig. A 9. Selección de Radio en *SDRConsole*.

CONFIGURACIÓN Y USO PARA TOMAR Y EXPORTAR MEDIDAS

- En la interfaz de *SDRConsole*, selecciona la frecuencia y el modo de operación para empezar a recibir señales.
- Utilizar las herramientas de visualización y análisis disponibles en *SDRConsole* para procesar y analizar las señales recibidas, un ejemplo de esta interfaz es la siguiente.

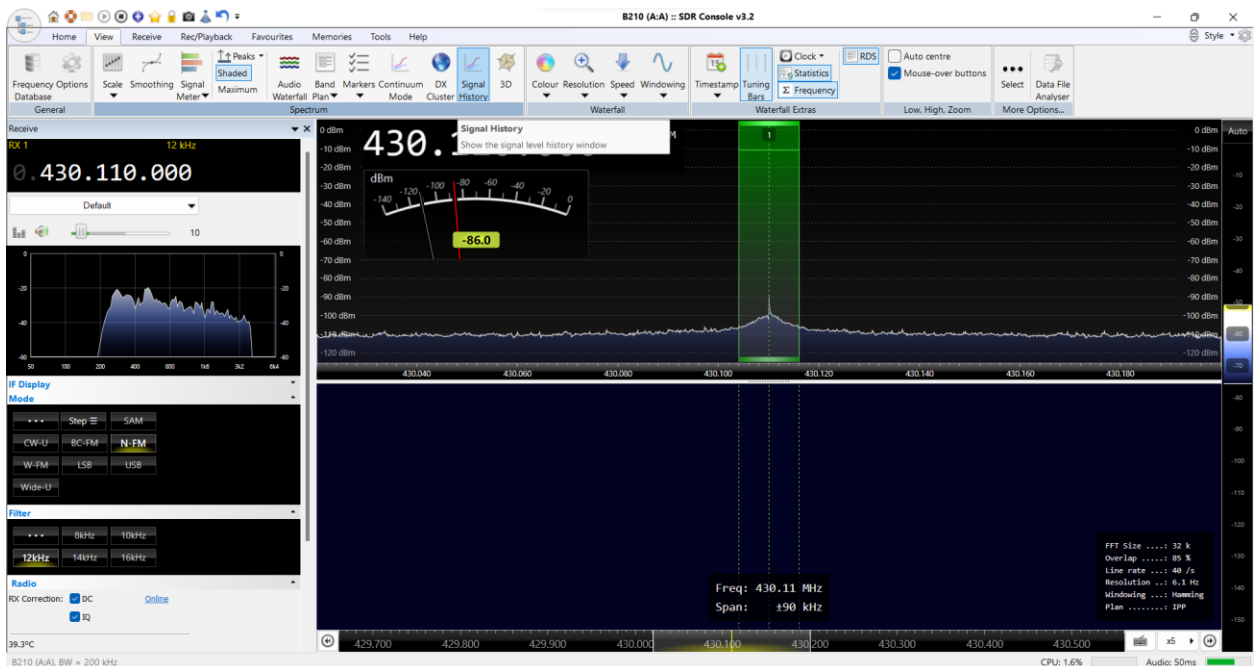


Fig. A 10. Interfaz de *SDRConsole*.

- Para la toma de datos en la opción *View*, se debe seleccionar *Signal History*, se despliega una ventana como la de la Fig. A 11. Clic en *Enable* para habilitar el historial de la señal.

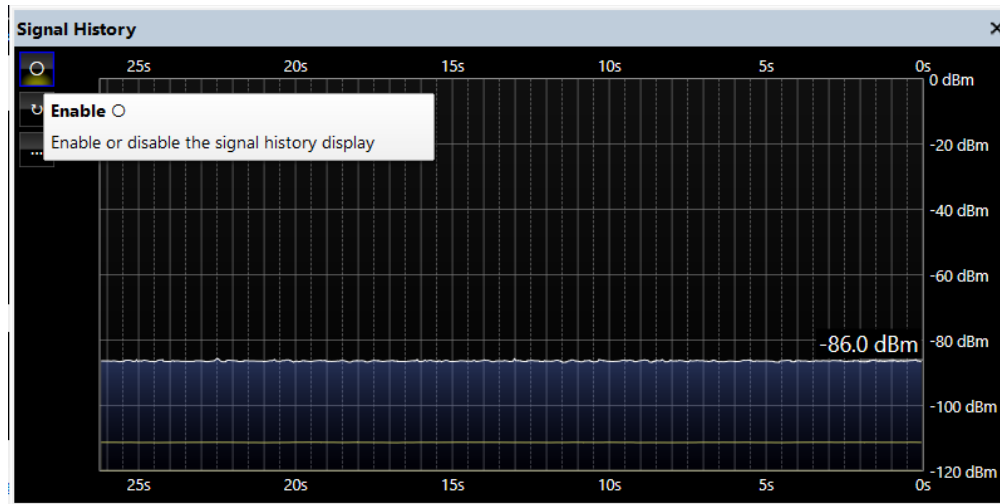


Fig. A 11. *Signal History a.*

- Una vez habilitado el *Signal History*. Se configura la toma de datos. Clic en *Options* del *Signal History* como en la Fig. A 12.

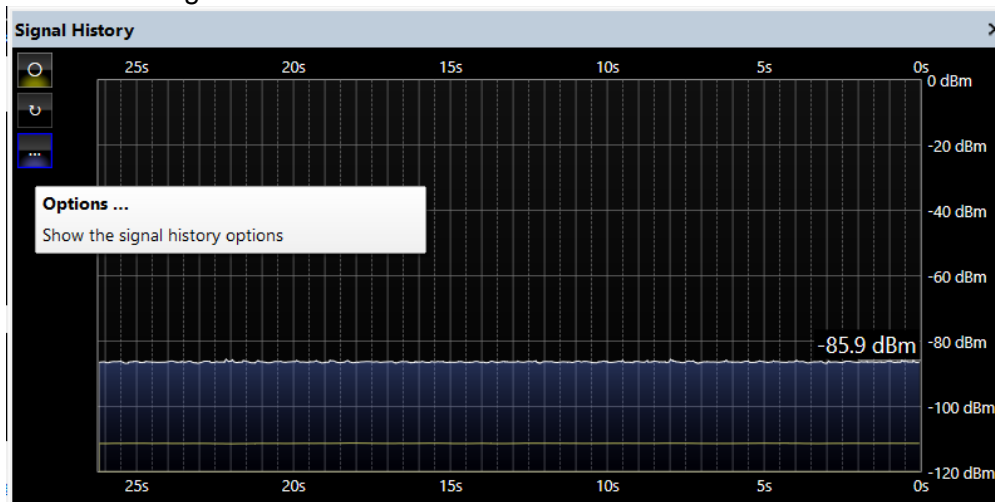


Fig. A 12. *Signal History b.*

- Se despliega una ventana con dos pestañas una de *Configuration* y la otra de *Export*.

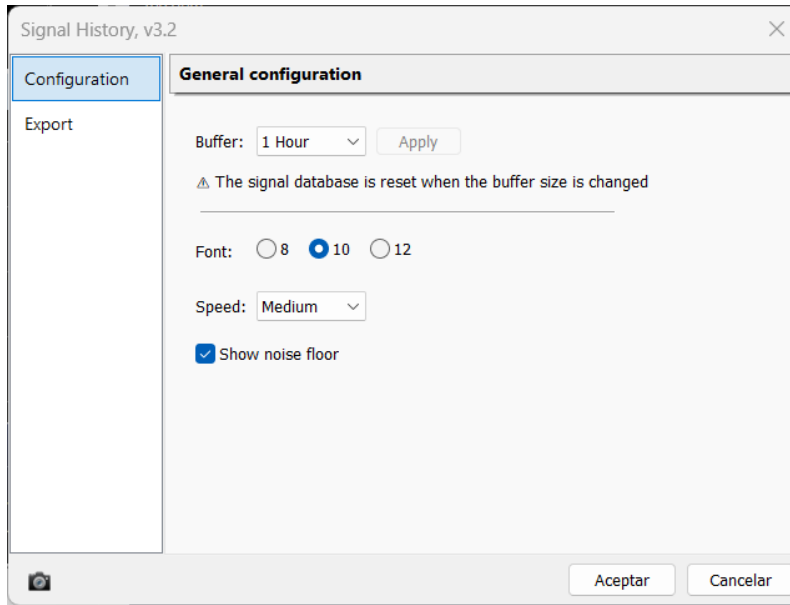


Fig. A 13. Configuración del *Signal History*.

- Se configura el *Buffer* como el tiempo en el que se almacenarán datos. En *Export* se presenta la opción de exportar los datos en un archivo CSV, darle nombre a ese archivo, seleccionar el tipo de delimitador de campo, separador de decimales, el periodo en el que se registrará en el archivo CSV la medida, entre otras opciones. Para exportar el archivo se debe dar clic en *Export*.

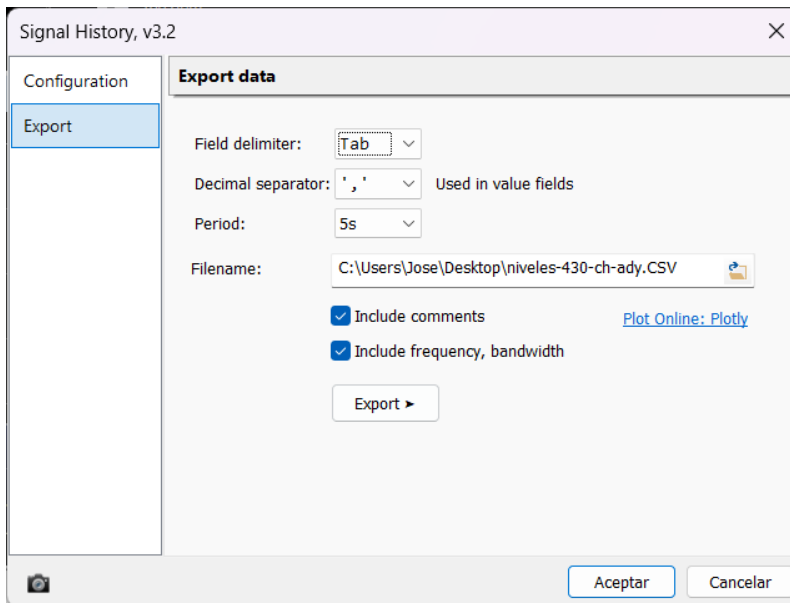


Fig. A 14. Exportación de datos a un archivo CSV.

Un ejemplo del registro de los datos tomados se observa a continuación.

```
1 # SDR Console version 3.2 build 2731 : Signal History
2 #
3 # Created : 27/09/2023 10:04:33 p. m.
4 # Interval : 5000 ms
5 # Buff secs : 3600
6 # Buff rate : 20
7 # Buff size : 72000
8 # Total : 20030
9 # Frequency : kHz
10 # Bandwidth : kHz
11 # Level : dBm
12 # Noise : dBm
13 # Date : UTC
14 #
15 # Delimiter : Comma
16 # Separator : .
17 # Lines : 204
18 #
19 "Time","Level","Noise","Frequency","Bandwidth"
20 02:40:15,-86.39,-111.33,430110.000,48000
21 02:40:20,-86.39,-111.36,430110.000,48000
22 02:40:25,-86.37,-111.36,430110.000,48000
23 02:40:30,-86.39,-111.35,430110.000,48000
24 02:40:35,-86.39,-111.36,430110.000,48000
25 02:40:40,-86.42,-111.36,430110.000,48000
26 02:40:45,-86.41,-111.31,430110.000,48000
```

Fig. A 15. Ejemplo de registros en archivo CSV.