

Sistema experimental basado en SDR y GNU Radio para estudiar interferencias de radiodifusión en las comunicaciones aeronáuticas en el espacio aéreo colombiano.

Christian Camilo Ellis Jiménez, Daniel Felipe Orduz Pinzón y Leidy Diana Escobar Serna

Trabajo de Grado para optar por el Título de Ingenieros Electrónicos

Director

Homero Ortega Boada

Ph.D. en Ciencias de la Ingeniería

Codirector

Omar Javier Tijaro Rojas

Ph.D. en Ingeniería (UIS)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T)

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga, Santander

2026

Dedicatoria 1

Primeramente agradezco a Dios, por permitirme culminar exitosamente esta etapa de mi vida y por darme las fuerzas para lograr mis metas. Todo honor y honra es para él.

A mi madre, Patricia Jiménez, por ser la luz que ilumina mi vida, el motor de todos mis sueños y mi mayor fuente de inspiración para cumplir cada una de las metas que me trace en la vida. Gracias mamá por enseñarme con tus ejemplos a nunca rendirme, a entender que cada obstáculo de la vida solo es un motivo más para seguir avanzando, siguiendo tus pasos he logrado ser el profesional que soy hoy. Gracias mamá por enseñarme que la fortaleza más grande que tendré en mi vida es tu amor y tu apoyo, todo lo que soy es gracias a ti.

A mi padre, Alvin Ellis, por ser mi voz de aliento en los momentos más difíciles de mi pregrado, por escucharme y orientarme en cada dificultad que tuve a lo largo de mi carrera profesional. Gracias papá por ayudarme a comprender la vida desde los ojos de quien solo quiere lo mejor para mí y por sostenerme en los momentos de mayor debilidad. Gracias por creer siempre en mí papá, este logro es de los dos.

A mi hermana, Laura Ellis, por apoyarme desde la distancia y en silencio, con el amor que solo un hermano puede brindar. Gracias por preocuparse por mí y ayudarme siempre para sobresalir ante cualquier dificultad. Gracias por ser el mejor ejemplo de persona que podría tener.

A mi amada Natalia, por ser mi sustento en las noches de inseguridad, por creer en mí en los días en los que dudé, por brindarme tu amor y tu compañía en la distancia, por apoyarme en cada proyecto emprendido durante esta larga travesía. Gracias por darme tu amor incondicional, por ser mi consejera, mi refugio, mi cómplice y mi compañera de estudios durante tanto tiempo. Gracias por alegrarte por mis triunfos y acompañarme en mis derrotas. Gracias por nunca dejar de arroparme con tu amor.

A mi ángel, mi abuelo, gracias por ser el primero en apoyarme en este viaje que comencé hace unos años y por cuidarme desde el cielo todos los días. Espero que desde el cielo puedas sentirte orgulloso de tu nieto.

A mis amigos y familiares que fueron parte de este proceso, gracias por creer en mí y apoyarme siempre, este logro es tanto mío como de ustedes.

Lo mejor está por venir.

Christian Camilo Ellis Jiménez

Dedicatoria 2

Este logro es el resultado de años de esfuerzo, perseverancia y aprendizaje, pero también del apoyo de quienes caminaron a mi lado y confiaron en el proceso. En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la fortaleza y las oportunidades necesarias para alcanzar esta meta, y a mi familia por ser mi principal motivación.

Quiero agradecer a mi mamá, María Teresa, por ser una madre y mujer ejemplar, quien siempre me resguardó entre sus brazos brindándome amor y protección. Su entrega, fortaleza y capacidad para afrontar cada desafío la convirtieron en mi principal fuente de inspiración y en el modelo de persona que aspiro a ser.

A mi papá, German Orlando, quien siempre me apoyó y me enseñó a ser un hombre fuerte, perseverante y perspicaz, capaz de enfrentar los desafíos sin rendirse ante las adversidades. Es un hombre íntegro y comprometido, cuyo ejemplo de disciplina y determinación ha sido fundamental en mi formación personal y profesional.

A todos mis abuelos, quienes fueron mi motor, mi sustento y una de las principales fuentes de enseñanza en mi vida. Gracias por transmitirme valores como la honestidad, el respeto, la humildad y la perseverancia, que han guiado cada uno de mis pasos. Su amor, consejos y ejemplo dejaron una huella imborrable en mi formación personal y han sido fundamentales para convertirme en la persona que soy hoy.

A mis amigos de la Universidad, quienes nunca me dejaron solo ante las dificultades académicas o personales. Les estaré infinitamente agradecido por haber hecho más amena una de las etapas más exigentes de mi vida y por brindarme una amistad sincera que atesoraré siempre.

Y, finalmente, a Karen, por haber sido un pilar indispensable en mi vida desde mi ingreso a la Universidad, hasta la culminación de esta etapa. Gracias a ti experimenté una redención académica y personal que fortaleció mi responsabilidad, disciplina y compromiso. Gracias por ser la mujer que me brindó su amor, compañía y apoyo incondicional durante estos años tan significativos.

Hoy es muy grato recordarles que este logro no habría sido posible sin ustedes y sin todo el apoyo que me brindaron. Los amo profundamente y les dedico este primer gran triunfo de mi vida como Ingeniero.

Daniel Felipe Orduz Pinzón

Dedicatoria 3

Le agradezco en primera instancia a Dios por ser mi fortaleza; ha sido el motor y el sostén para superar los momentos difíciles de mi carrera.

A mi señora madre, Mariluz Serna, por todo su amor y apoyo en cada paso, por creer en mí y transmitirme sus virtudes, siendo el pilar fundamental durante todos los semestres de esta hermosa carrera.

A mi papá, cuyo carácter fue el escudo que me enseñó a no rendirme jamás y a buscar siempre la excelencia.

Dedico este logro a mi hermana, por su apoyo constante en cada torneo de baloncesto y por inspirarme a ganar a través de sus sabios consejos y motivación.

Especialmente a Michell, por su presencia constante y su apoyo incondicional en la etapa final de este camino, demostrando su lealtad en todo momento.

A mis profesores de carrera, por compartir sus conocimientos y guiar mi formación académica con dedicación a lo largo de estos años.

A mis directores de tesis, por su alta disposición para enseñar y apoyarme con sus consejos tanto a nivel profesional como personal; sus enriquecedoras enseñanzas desempeñaron un rol fundamental en este proyecto.

A mis compañeros de tesis, por todo su entusiasmo y compromiso en cada etapa de este trabajo.

Al semillero de investigación Radiogis, por brindarnos todas las herramientas para desarrollar los objetivos planteados, logrando cumplir con cada una de las misiones propuestas.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a mis amigos de la universidad, quienes compartieron este viaje conmigo y celebraron con sincera alegría cada uno de mis logros y metas cumplidas.

Leidy Diana Escobar Serna

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	13
Objetivos	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.....	15
1. Conceptos previos	16
1.1. El espectro radioeléctrico como recurso estratégico: banda de radiodifusión FM (88–108 MHz) y comunicaciones aeronáuticas VHF COM (117.975–136.975 MHz).....	16
1.2. Intermodulación.....	17
1.3. Fenómeno de no linealidades en RF y análisis de productos de intermodulación (IM2, IM3, IM5)	17
1.4. Fenómeno de intermodulación de origen pasivo (PIM).....	19
1.5. Fenómeno de intermodulación de origen activo (AIM).....	20
1.6. Fenómeno de intermodulación de tipo reversivo (RIM).....	20
1.7. Modelos básicos de propagación: pérdidas en espacio libre (FSPL) y niveles de potencia (PRA, dBm)	21
1.8. Envolvente compleja (I/Q) y su relación con el desarrollo.....	21
1.8.1. Conversión ascendente a radiofrecuencia (Up conversion)	22
1.8.2. Conversión descendente a banda base (Down conversion)	23
2. Diseño general del banco experimental	24
2.1. Arquitectura e integración del banco de pruebas	24
2.1.1. Desarrollo e integración de componentes en el banco experimental	25

2.1.2. Metodología para el análisis de interferencias mediante el banco de pruebas.....	26
2.2. Diseño y desarrollo del NOEV Toolkit	26
2.2.1. Arquitectura interna del sistema	27
2.2.2. Diseño del generador de intermodulación	30
2.2.2.1. Diseño con ruido gaussiano	31
2.2.2.2. Diseño con fuente de audio	32
2.3. Experiencias de uso del NOEV Toolkit	34
2.3.1. Ejecutable, interfaz y parámetros operativos	34
2.3.2. Registro y trazabilidad de resultados	35
2.3.3. Resultados por ubicación geográfica	35
2.3.3.1. Cerro Gualí	37
2.3.3.2. Bogotá	37
2.3.3.3. Cartagena	38
2.3.4. Análisis comparativo mediante figuras	38
2.3.4.1. Potencia vs. interferencia	38
2.3.4.2. Mapas de calor	39
2.4. Escenarios de evaluación	41
2.4.1. Escenario 1: Entrenamiento y aprendizaje	41
2.4.2. Escenario 2: Generación controlada de intermodulación	42
2.4.3. Aplicación en Bucaramanga	42
2.4.3.1. Análisis mediante el visor del espectro	42
2.4.3.2. Comprobación en Aerospace Guard	43

3. Resultados y lineamientos técnicos	47
3.1. Recomendaciones para la ANE.....	47
3.2. Estrategias de mitigación	48
3.3. Consideraciones normativas	48
4. Conclusiones	50
5. Recomendaciones	52
Referencias Bibliográficas	53

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Esquemático general del banco de pruebas</i>	25
Figura 2 <i>Generación de las señales FM de entrada y conformación de la señal RF compuesta</i>	28
Figura 3 <i>Aplicación del modelo no lineal y obtención de la señal RF con productos de intermodulación</i>	28
Figura 4 <i>Subsistema de conversión I/Q del NOEV Toolkit</i>	29
Figura 5 <i>Acondicionamiento de la señal compleja y transmisión SDR de la señal Intermodulada</i>	30
Figura 6 <i>Módulo de observación del canal aeronáutico y estabilización de la señal en GNU Radio</i>	31
Figura 7 <i>Implementación del NOEV Toolkit con señales de entrada gaussianas en GNU Radio</i>	32
Figura 8 <i>Interfaz del NOEV Toolkit</i>	35
Figura 9 <i>Interfaz visor del espectro</i>	36
Figura 10 <i>Potencia vs Interferencia dentro de VHF COM</i>	39
Figura 11 <i>Heatmap de intermodulación de tercer orden (IM3)</i>	41
Figura 12 <i>Resultados simulación interferencias Bucaramanga</i>	44
Figura 13 <i>Mapa de calor del par (92.3 MHz, 105.1 MHz)</i>	44
Figura 14 <i>Mapa de calor del par (95.7 MHz, 106.7 MHz)</i>	45
Figura 15 <i>Comprobación de intermodulación entre 92.3 MHz, 105.1 MHz con NOEV Toolkit</i>	46

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Variables y parámetros principales del NOEV Toolkit</i>	33
Tabla 2 <i>Comprobación de productos de IM3 en emisoras del Cerro Gualí mediante FSPL</i>	37
Tabla 3 <i>Potencia de interferencia por IM3 bajo variación de las ganancias relativas</i> <i>G1 y G2</i>	40
Tabla 4 <i>Matriz de recomendaciones ANE</i>	47

Lista de apéndices

Apéndice A *Entrenamiento y aprendizaje.*

Apéndice B *Figuras arquitectura NOEV Toolkit*

Apéndice C *Guión Esquemático NOEV Toolkit.*

Apéndice D *Justificación de variables y parámetros en NOEV Toolkit.*

Apéndice E *Investigación IM5.*

Apéndice F *Ejecutable NOEV Toolkit.*

Apéndice G *Bitácora de registro de NOEV Toolkit.*

Apéndice H *Tabla de interferencias de Bogotá.*

Apéndice I *Tabla de interferencias Cartagena.*

Apéndice J *Curvas Potencia vs Interferencia.*

Apéndice K *Manual de usuario Aerospace Guard.*

Apéndice L *Tabla de interferencias de Bucaramanga.*

Apéndice M *Archivo tipo JSON del receptor y emisoras de Bucaramanga.*

Apéndice N *Simulaciones de comprobación en NOEV Toolkit.*

Apéndice Ñ *Análisis del impacto de la variación de ganancias relativas en la generación de productos de intermodulación de tercer orden (IM3).*

Apéndice O *Tabla del visor del espectro Emisoras AM en Bucaramanga.*

Apéndice P *Informe de resultados Cerro Gualí, Bogotá, Cartagena.*

Apéndice Q *Informe recomendaciones para la ANE / Apéndice recomendaciones ANE (IM3).*

Apéndice R *PDDE-IA-Intermodulación.*

Apéndice S *PDDE-IA-Diagnóstico.*

Apéndice T *Manual NOEV Toolkit.*

Resumen

Las interferencias en la banda aeronáutica VHF COM generadas por señales de radiodifusión FM constituyen un problema relevante en la gestión del espectro radioeléctrico, debido a la generación de productos de intermodulación bajo condiciones de no linealidad. Estos fenómenos pueden producir componentes espectrales que coinciden con frecuencias aeronáuticas, afectando la calidad de las comunicaciones y generando riesgos operacionales. En este trabajo se desarrolla un banco de pruebas experimental basado en radio definida por software (SDR) y GNU Radio, orientado a la simulación y análisis de escenarios de intermodulación en condiciones controladas. El sistema principal propuesto, denominado NOEV Toolkit, permite modelar la interacción entre múltiples señales, analizar la generación de productos de intermodulación, particularmente de tercer orden (IM3), y evaluar su impacto sobre la banda aeronáutica.

El NOEV Toolkit se integra con herramientas complementarias que fortalecen el proceso de análisis, incluyendo un agente inteligente entrenado para el diagnóstico de interferencias, capaz de identificar configuraciones críticas de frecuencia, potencia y condiciones de no linealidad, y una herramienta de análisis georreferenciado como Aerospace Guard, que permite contextualizar los resultados en escenarios reales. A partir de la evaluación de casos de estudio, se validó la coherencia entre los resultados simulados y las condiciones observadas, identificando patrones de generación de intermodulación y estableciendo criterios para su análisis. Como resultado, se propone una metodología experimental y reproducible para el diagnóstico de interferencias en sistemas de radiocomunicaciones, basada en la integración de estas herramientas, lo que contribuye al fortalecimiento de procesos técnicos y a la toma de decisiones en la gestión del espectro radioeléctrico.

Palabras clave: Intermodulación (IM3), VHF COM, Radio definida por software (SDR), Diagnóstico de interferencias

Abstract

Interference in the VHF COM aeronautical band caused by FM broadcasting signals represents a relevant challenge in radio spectrum management, mainly due to the generation of intermodulation products under nonlinear conditions. These phenomena can produce spectral components that overlap with aeronautical frequencies, affecting communication quality and posing operational risks. This work presents the development of an experimental testbed based on Software Defined Radio (SDR) and GNU Radio, aimed at the simulation and analysis of intermodulation scenarios under controlled conditions. The proposed system, named NOEV Toolkit, enables the modeling of signal interaction, the analysis of intermodulation products—particularly third-order (IM3)—and the evaluation of their impact on the aeronautical band.

The NOEV Toolkit is integrated with complementary tools that enhance the analysis process, including an intelligent agent trained for interference diagnosis, capable of identifying critical configurations of frequency, power, and nonlinear conditions, and a geospatial analysis tool such as Aerospace Guard, which allows contextualizing results in real-world scenarios. Through the evaluation of case studies, consistency between simulated results and observed conditions was validated, enabling the identification of intermodulation patterns and the establishment of analysis criteria. As a result, a reproducible experimental methodology for interference diagnosis in radiocommunication systems is proposed, based on the integration of these tools, contributing to improved technical processes and decision-making in radio spectrum management.

Keywords: Intermodulation (IM3), VHF COM, Software-Defined Radio (SDR), Interference diagnostics

Introducción

En Colombia, la complejidad geográfica y la distribución poblacional hacen del transporte aéreo un componente esencial para la conectividad del país, lo que exige garantizar comunicaciones aeronáuticas confiables en la banda VHF COM. Sin embargo, en diferentes zonas del territorio se han reportado interferencias que degradan la calidad de las comunicaciones entre aeronaves y los sistemas de control de tráfico aéreo (ATC), lo cual implica riesgos operacionales y afectaciones en la prestación del servicio. Este problema ocurre en un entorno de coexistencia de múltiples servicios radioeléctricos, particularmente con la radiodifusión sonora FM, cuyas emisiones (en presencia de condiciones de no linealidad) pueden derivar en armónicos, emisiones no deseadas y, de manera crítica, productos de intermodulación que llegan a coincidir con frecuencias aeronáuticas. En consecuencia, la problemática no depende únicamente de la asignación de canales, sino de la interacción entre señales y equipos en escenarios reales (Delgado López, 2021; ITU-R, 2000; Kerczewski, 2022).

El análisis de estos fenómenos se ha abordado tradicionalmente mediante mediciones de campo y estudios técnicos. Aunque dichas estrategias permiten detectar eventos interferentes, suelen presentar limitaciones para repetir condiciones, controlar variables y comparar resultados entre campañas o ubicaciones. Esto evidencia la necesidad de un enfoque complementario: un entorno experimental que permita reproducir el fenómeno bajo condiciones configurables, documentar de forma trazable cada ensayo y conectar lo observado en simulación con situaciones plausibles de campo. En respuesta a ello, este trabajo realizó el diseño e implementación de una primera versión del banco de pruebas basado en radio definida por software (SDR) y GNU Radio, orientado a la simulación, análisis y verificación de escenarios representativos de interferencia FM sobre VHF COM.

El banco de pruebas se concibe como un ecosistema integrado de herramientas y procedimientos. Su componente principal es el NOEV Toolkit, desarrollado para modelar de manera controlada la generación de productos de intermodulación, con énfasis en intermodulación de tercer orden (IM3) como caso de mayor probabilidad práctica. Para lograrlo, el trabajo plantea explícitamente: (i) el planteamiento del problema y el alcance

experimental, (ii) la arquitectura interna de la herramienta y el flujo de señal, y (iii) el diseño del generador de intermodulación como núcleo funcional, permitiendo manipular parámetros como frecuencias, niveles relativos de señal, presencia de ruido y condiciones de no linealidad. En paralelo, se integran herramientas complementarias: Aerospace Guard para contextualizar la evaluación en un entorno georreferenciado (emisoras, receptor, potencias, condiciones operativas) y un protocolo de diagnóstico y decisión en escenarios específicos (PDDE) implementando como un agente IA (PDDE - IA) para organizar evidencias, priorizar hipótesis y soportar decisiones técnicas.

Se propone una metodología, por etapas para estudiar la situación que podría llegar a presentarse en la banda aeronáutica en diferentes sitios de interés por cuenta del fenómeno IM de acuerdo a las asignaciones de frecuencia de radiodifusión actuales. La metodología busca identificar variables, como combinaciones de frecuencia, que pueden ser usadas en la toma de decisiones regulatorias o de tipo correctivo. La metodología abarca lo siguiente: identificación inicial de emisoras y combinaciones candidatas con datos institucionales, simulación y verificación controlada del fenómeno en NOEV Toolkit, evaluación contextual en escenarios geográficos y, finalmente, consolidación de resultados en productos reproducibles (tablas, figuras y registros). Como parte de los casos de estudio, se desarrollan análisis por ubicación (incluyendo Cerro Gualí y un escenario aplicado en Bucaramanga/Palonegro) donde se contrastan resultados calculados y simulados, buscando coherencia entre el cálculo de candidatos interferentes y su reproducción experimental. Adicionalmente, se incorporan recursos orientados a la experiencia de uso (ejecutable, manual y bitácora) para fortalecer la operación por terceros y la trazabilidad de pruebas.

En conjunto, el proyecto todo el proyecto ha sido consolidado con otros productos como un prototipo de banco de pruebas (i) una herramienta experimental para estudiar intermodulación FM-VHF COM bajo condiciones controladas, (ii) una metodología reproducible para pasar de una alerta inicial a una verificación técnica, y (iii) insumos para formular lineamientos y recomendaciones aplicables al diagnóstico y mitigación de interferencias en el marco de la gestión del espectro radioeléctrico, particularmente con enfoque de utilidad para la ANE.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un entorno de pruebas controlado con SDR y GNU Radio que emule escenarios representativos de interferencia por radiodifusión en comunicaciones aeronáuticas y generen posibles insumos técnicos para la sustentación de toma de medidas preventivas y correctivas ante la ANE.

Objetivos específicos

Diseñar e implementar un banco de pruebas SDR (GNU Radio).

Evaluar el desempeño del banco de pruebas frente a diferentes escenarios controlados de interferencia.

Formular posibles lineamientos y medidas de mitigación para la ANE.

1. Conceptos previos

1.1. El espectro radioeléctrico como recurso estratégico: banda de radiodifusión FM (88–108 MHz) y comunicaciones aeronáuticas VHF COM (117.975–136.975 MHz)

El espectro radioeléctrico constituye un recurso estratégico para la sociedad, ya que sobre él se soportan servicios esenciales de comunicación, navegación, seguridad, información y acceso a contenidos. En Colombia, su gestión se distribuye entre distintas entidades con competencias complementarias. El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) cumple funciones rectoras en el sector; la Agencia Nacional del Espectro (ANE) ejerce funciones técnicas especializadas de planeación, atribución, vigilancia y control del espectro; y, en el ámbito aeronáutico, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC) administra y gestiona el uso de las bandas atribuidas al servicio móvil aeronáutico y a la radionavegación aeronáutica.

Esta gestión nacional no ocurre de manera aislada. A nivel internacional, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), a través de su Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R), cumple un papel central en la administración mundial del espectro radioeléctrico y en la elaboración de recomendaciones técnicas orientadas a promover su uso racional, equitativo, eficiente y libre de interferencias perjudiciales. De forma complementaria, en el ámbito regional americano, la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL) constituye un espacio de cooperación y articulación técnica entre los Estados del continente en materias relacionadas con telecomunicaciones y radiocomunicaciones.

En el contexto de este proyecto, interesan dos porciones del espectro cuya convivencia resulta especialmente sensible. Por un lado, la banda de radiodifusión sonora FM, comprendida entre 88 MHz y 108 MHz, la cual presta un servicio de amplia cobertura y alto impacto social. Por otro lado, la banda (117.975–136.975 MHz), atribuida al servicio móvil aeronáutico VHF COM, utilizada para las comunicaciones entre aeronaves y dependencias en tierra. Aunque ambos servicios cumplen funciones legítimas y valiosas, su proximidad espectral y las condiciones reales de operación pueden dar lugar a afectaciones

sobre la banda aeronáutica, particularmente cuando aparecen emisiones no deseadas o productos de intermodulación (Agencia Nacional del Espectro, 2025; UAEAC, 2007; UAEAC, 2023).

1.2. Intermodulación

Una vez reconocido que un medio no lineal puede alterar una señal, surge una pregunta adicional: **¿qué ocurre cuando no es una sola señal, sino dos o más señales de diferentes frecuencias las que atraviesan simultáneamente ese medio?** La respuesta es que el sistema deja de comportarse como un simple canal de paso y comienza a generar nuevas componentes espectrales que no estaban presentes en las señales originales.

La diferencia importante frente al fenómeno general de no linealidad es que aquí las nuevas componentes no provienen únicamente de la deformación individual de cada señal, sino de la interacción entre varias señales al mismo tiempo. En otras palabras, la no linealidad deja de afectar a cada componente por separado y empieza a mezclarlas entre sí. Como resultado, aparecen frecuencias nuevas asociadas a combinaciones entre las frecuencias de entrada, lo que produce una redistribución de energía hacia otras regiones del espectro.

Desde el punto de vista físico, esto significa que un conjunto de señales que originalmente ocupaban una banda específica puede dar lugar a componentes que aparecen fuera de esa banda. Por ello, la intermodulación tiene especial relevancia en escenarios donde coexisten servicios radioeléctricos distintos, ya que una señal interferente no necesariamente debe ser transmitida de manera directa en la banda afectada: también puede surgir como consecuencia de la mezcla no lineal de otras señales presentes en el entorno. Para mayor contexto sobre tipos (activa/pasiva/reversiva) y ejemplos aplicados al proyecto, consúltese el **Apéndice A**.

1.3. Fenómeno de no linealidades en RF y análisis de productos de intermodulación (IM2, IM3, IM5)

En un escenario compartido FM–VHF COM, varios efectos no deseados (incluida la intermodulación) pueden explicarse por la presencia de un bloque no lineal: su salida no es

proporcional a la entrada y , por tanto, el sistema no cumple el principio de superposición. Una aproximación ampliamente utilizada para modelar una no linealidad sin memoria es el modelo polinómico:

$$y(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + \dots \quad (1)$$

donde a_1 representa el término lineal, mientras que $a_2, a_3 \dots$ cuantifican la contribución de los términos no lineales responsables de generar armónicos y productos de intermodulación; a mayor magnitud de estos coeficientes, mayor es la severidad del comportamiento no lineal (Montgomery, Peck, Vining, 2012).

Por otra parte, la intermodulación requiere la participación de dos señales, en este caso de de dos estaciones FM, veamos un análisis suponiendo que se tiene una señal $X(t)$ que resulta de la suma de dos tonos:

$$x(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cos(2\pi f_2 t) \quad (2)$$

Al pasar $x(t)$ por un elemento no lineal, el término cuadrático produce componentes en:

$$f_1 + f_2 \quad \text{y} \quad |f_1 - f_2| \quad (3)$$

El término cúbico produce productos IM3:

$$f_{IM3} = 2f_1 + f_2 \quad \text{o} \quad f_{IM3} = 2f_2 - f_1 \quad (4)$$

y todos los demás términos que resultan del polinomio producen componentes en una amplia gama del espectro.

Con base en la deducción anterior, el modelo mínimo recomendado para análisis y simulación orientados a IM3 (franja baja de VHF COM) es:

$$y(t) = a_1 x(t) + a_3 x^3(t) \quad (5)$$

donde la entrada representa la suma de portadoras FM relevantes en el sitio:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cos(2\pi f_k t) \quad (6)$$

Donde los productos IM3 de referencia son f_1 y f_2 corresponden que a las frecuencias de las señales incidentes y $m, n \in \mathbb{Z}^+$. En particular, los productos de intermodulación de tercer orden (IM3) adquieren especial relevancia debido a su mayor nivel de potencia relativa y a su proximidad espectral a las señales originales, siendo expresados como:

$$f_{IM3} = |2f_1 - f_2| \quad , \quad |2f_2 - f_1| \quad (7)$$

lo cual los convierte en los principales candidatos a generar interferencia dentro de la banda VHF COM. Este enfoque permite estructurar el análisis no solo desde la teoría, sino desde la identificación concreta de combinaciones de emisoras que pueden explicar un canal afectado (ITU-R, 2000; Haykin, 2007; Montgomery et al., 2012).

Pregunta operacional: *¿Donde esta el bloque operacional que implementa $y(t) = a_1 x(t) + a_3 x^3(t)$ en el mundo real?*

La respuesta organiza a continuación la contextualización de los escenarios AIM/PIM/RIM.

1.4. Fenómeno de intermodulación de origen pasivo (PIM)

La intermodulación de origen pasivo ocurre cuando el elemento no lineal no está dentro del transmisor ni del receptor, sino en el camino de propagación de las señales. Esto puede suceder, por ejemplo, en conectores defectuosos, uniones metálicas deterioradas, superficies oxidadas o estructuras que, aunque en principio son pasivas, terminan comportándose de manera no lineal al ser excitadas por varias señales intensas al mismo tiempo. En este caso, las señales provenientes de distintas estaciones inciden simultáneamente sobre ese punto del entorno y allí se mezclan, dando lugar a nuevas

componentes espectrales que no estaban presentes en las transmisiones originales. Por tanto, la señal interferente no nace necesariamente en el transmisor, sino en algún punto intermedio del trayecto recorrido por las ondas. (PDDE-IA).

1.5. Fenómeno de intermodulación de origen activo (AIM)

La intermodulación de origen activo ocurre cuando el elemento no lineal se encuentra dentro de un equipo electrónico, y no en el camino de propagación. En este caso, varias señales están presentes simultáneamente en el sistema y terminan atravesando una etapa interna que ya no está trabajando de manera lineal, como puede suceder en amplificadores, transmisores u otros bloques activos del equipo.

Dicho de forma simple, aquí también existe un medio no lineal y también interactúan varias señales, pero el problema no proviene de algo externo al sistema, sino de una condición interna de la estación o del equipo. Puede tratarse, por ejemplo, de una etapa que entra en saturación, de una ganancia mal ajustada o de un componente que ya no responde de manera adecuada. Como consecuencia, esas señales se mezclan dentro del propio equipo y generan nuevas componentes espectrales que no estaban presentes en las entradas originales. (PDDE-IA).

1.6. Fenómeno de intermodulación de tipo reversivo (RIM)

La intermodulación reversiva se presenta cuando una señal externa suficientemente fuerte logra penetrar el interior de otro sistema (por acoplos, filtrado insuficiente, aislamiento degradado o entradas no previstas) y, una vez dentro, se mezcla con la señal propia del equipo al atravesar una etapa interna con comportamiento no lineal. A diferencia de otros casos, el fenómeno no se origina porque el equipo procese de manera normal múltiples señales internas, sino porque una señal ajena “se cuelga” y termina interactuando con la señal local dentro de un componente que no responde linealmente (por ejemplo, una etapa saturada, un elemento deteriorado o una condición de operación fuera de su rango).

Este escenario es especialmente crítico porque la mezcla ocurre antes de la salida final del sistema. En consecuencia, el producto interferente no solo se genera dentro de la estación, sino que puede ser amplificado y finalmente radiado con niveles comparables a

los del transmisor afectado. En términos prácticos, una estación que originalmente no era la fuente del problema puede terminar emitiendo una componente interferente “como si fuera propia”, lo que complica el diagnóstico y exige identificar el punto de no linealidad y el mecanismo de acoplo que permitió el ingreso de la señal externa (PDDE).

1.7. Modelos básicos de propagación: pérdidas en espacio libre (FSPL) y niveles de potencia (PRA, dBm)

Las herramientas como NOEV Toolkit y Aerospace Guard no buscan reproducir toda la complejidad de la propagación radioeléctrica en escenarios reales, solo requieren un modelo básico que permita hacer aproximaciones razonables sobre el comportamiento de las señales en campo. Bajo esta lógica, un modelo suave como la pérdida en espacio libre resulta suficiente para estimar, de manera preliminar, qué señales podrían llegar con mayor nivel a un punto de interés y cuáles merecen ser consideradas primero dentro del análisis. Para comparar niveles y pérdidas en un enlace se trabaja en dB/dBm. La potencia absoluta se expresa como:

$$P_{dB} = 10 \log_{10}(Pmw) \quad (8)$$

Para una priorización inicial de emisoras que pueden impactar un punto de estudio se emplea la pérdida en espacio libre (FSPL):

$$FSPL(dB) = 32.4 + 20 \log_{10}(fMHz) + 20 \log_{10}(dkm) \quad (9)$$

y una estimación mínima de potencia recibida:

$$Prx = PRA(dBm) - FSPL \quad (10)$$

Este criterio (FSPL+PRA) se usó en Cerro Gualí para seleccionar las emisoras con mayor potencia recibida estimada antes de evaluar combinaciones IM3 (ITU-R P.525-4, 2019).

1.8. Envoltente compleja (I/Q) y su relación con el desarrollo

Aunque para un ingeniero E3T no es extraño trabajar con señales en radiofrecuencia, en sistemas SDR conviene recordar una idea central: muchas operaciones

que en el mundo físico ocurren alrededor de una portadora de alta frecuencia pueden trasladarse matemáticamente a frecuencia cero. Este cambio de perspectiva es extremadamente útil, porque permite estudiar, procesar y manipular señales de distintas bandas como si todas estuvieran concentradas alrededor del origen del espectro.

En este contexto aparece la representación en I/Q, también conocida como envolvente compleja. En lugar de describir directamente la señal pasabanda, se trabaja con dos componentes en banda base: una componente en fase $I(t)$ y una componente en cuadratura $Q(t)$, las cuales pueden reunirse en una sola expresión compleja:

$$x(t) = I(t) + jQ(t) \quad (11)$$

Esta señal compleja no reemplaza la señal física, pero sí constituye una representación equivalente en banda base que conserva la información relevante de amplitud y fase. A partir de ella, la señal en radiofrecuencia puede reconstruirse como:

$$x(t) = \Re\{x(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (12)$$

donde f_c es la frecuencia portadora y $\Re\{\cdot\}$ indica la parte real. Así, una señal que en el mundo real “vive” alrededor de una frecuencia alta puede analizarse en SDR como una señal compleja centrada en frecuencia cero.

Esta idea resulta especialmente poderosa porque simplifica enormemente el diseño de sistemas flexibles. Operaciones como filtrado, traslación espectral, demodulación, sincronización y análisis FFT pueden realizarse directamente sobre la envolvente compleja, sin necesidad de trabajar todo el tiempo en la frecuencia portadora real (Haykin, 2007; Ortega & Reyes, 2019).

1.8.1. Conversión ascendente a radiofrecuencia (Up conversion)

En los sistemas de comunicación, la traslación de una señal desde banda base hacia frecuencias más altas se realiza mediante un proceso de modulación, el cual consiste en multiplicar la señal de entrada por una portadora sinusoidal, desplazando su contenido espectral alrededor de una frecuencia central (Haykin, 2001). Matemáticamente, si es $x(t)$ la

señal en banda base y la frecuencia de la portadora, la señal modulada puede F_c expresarse como:

$$s(t) = x(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (13)$$

Este proceso produce un desplazamiento del espectro de la señal hacia $\pm f_c$, permitiendo su transmisión en bandas de radiofrecuencia. En sistemas prácticos, esta operación se asocia al proceso de conversión ascendente (Haykin, 2007; Ortega & Reyes, 2019).

1.8.2. Conversión descendente a banda base (Down conversion)

El proceso inverso corresponde a la traslación de una señal desde radiofrecuencia hacia banda base, lo cual se realiza mediante la multiplicación de la señal recibida por una señal sinusoidal generada localmente, conocida como oscilador local (Haykin, 2001). Si es $s(t)$ la señal en RF, la señal resultante del proceso puede expresarse como:

$$r(t) = s(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (14)$$

Este proceso genera componentes en diferentes frecuencias, por lo que se requiere un filtrado posterior para recuperar la señal original en banda base. Este mecanismo se conoce en sistemas prácticos como conversión descendente (Haykin, 2007; Ortega & Reyes, 2019).

2. Diseño general del banco experimental

En este capítulo, se presenta el diseño general del banco experimental desarrollado para el análisis de interferencias asociadas a emisiones de radiodifusión FM sobre la banda aeronáutica VHF COM. Más allá de lograr una reproducibilidad adecuada del fenómeno de intermodulación en un entorno controlado, el banco experimental tiene como principal finalidad integrar simulación, análisis de escenarios reales y estructuración de planes diagnósticos dentro de un mismo marco metodológico. Siguiendo el propósito descrito previamente se presenta la estructura general del sistema, se hace énfasis en cómo se integran cada una de las herramientas y el flujo metodológico adoptado, así como la implementación del NOEV Toolkit como núcleo experimental para la generación, observación y evaluación de productos de intermodulación.

2.1. Arquitectura e integración del banco de pruebas

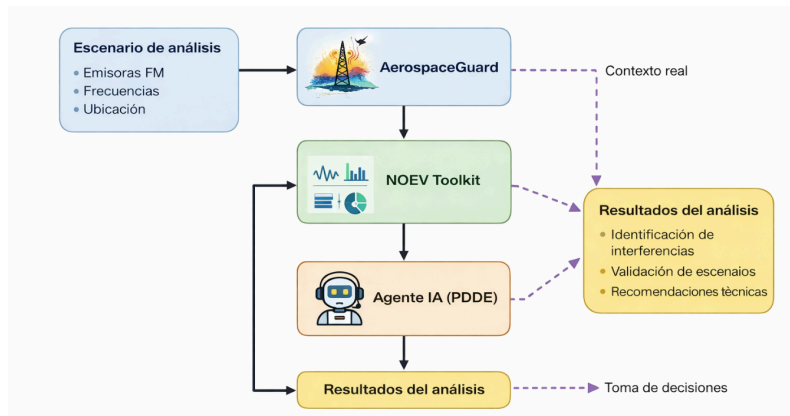
El banco de pruebas fue creado para analizar de forma estructurada las interferencias generadas por emisiones de radiodifusión FM que repercuten en la banda aeronáutica VHF COM, no obstante, el problema no radica únicamente en identificar combinaciones de frecuencias que podrían causar la problemática, también consiste en desarrollar un entorno que permita visualizar el fenómeno, reproducirlo en condiciones controladas y relacionarlo con escenarios reales. En este sentido, la arquitectura desarrollada permite crear un ecosistema en el que convivan diferentes herramientas, así como también permite integrar diferentes enfoques dentro de un marco común de análisis, validación y apoyo de la decisión.

La integración del banco se estructuró alrededor de tres componentes complementarios. El primero es el NOEV Toolkit, orientado a la simulación y generación controlada de escenarios de intermodulación; el segundo es Aerospace Guard, diseñado para visualizar, comparar y comunicar riesgos FM–VHF COM en escenarios reales mediante información geográfica, línea de vista y análisis “what-if”; y el tercero es el Agente IA basado en PDDE, que transforma eventos aislados en escenarios diagnósticos con criterios, evidencias mínimas, rutas de descarte y acciones recomendadas (RADIOGIS (s. f.), 2025) . En conjunto, estos componentes permiten pasar de la simulación al análisis

de campo y, posteriormente, a una interpretación técnica más ordenada y trazable (véase **Figura 1**).

Figura 1.

Esquemático general del banco de pruebas



Nota. El esquema representa de manera general el banco de pruebas desarrollado, en el cual se muestra la relación entre las herramientas que lo componen y el flujo de información entre ellas, permitiendo visualizar de manera integral el enfoque adoptado en el presente trabajo. Figura realizada con apoyo de inteligencia artificial.

2.1.1. Desarrollo e integración de componentes en el banco experimental

El desarrollo del banco experimental se apoyó en la integración funcional de herramientas con roles diferenciados, pero complementarios. El NOEV Toolkit actúa como núcleo de simulación, al permitir recrear condiciones de interferencia con señales auténticas y parámetros configurables. Aerospace Guard traslada ese análisis al entorno real al incorporar emisoras, receptores, geometría, línea de vista y visualización operativa del riesgo sobre el mapa. Finalmente, el Agente IA basado en PDDE-IA organiza la información obtenida, prioriza hipótesis diagnósticas y orienta la toma de decisiones mediante escenarios estructurados y trazables. Esta integración evita que cada componente opere de forma aislada y convierte el banco en un ecosistema de análisis reproducible y útil para contextos técnicos reales.

2.1.2. Metodología para el análisis de interferencias mediante el banco de pruebas

Como parte del desarrollo del presente proyecto, el banco de pruebas no se utilizó únicamente como una plataforma de simulación aislada, sino como el eje metodológico que permitió pasar de la identificación inicial del problema a la obtención y validación de los resultados reportados en este informe. En este sentido, la metodología seguida organizó el uso de las herramientas del banco en una secuencia de etapas orientadas a articular simulación controlada, análisis de escenarios reales, estructuración diagnóstica y validación técnica dentro de un mismo marco de trabajo. Son 5 las etapas:

Etapa 1: Identificación del problema y análisis de escenarios de interferencia potencial.

Etapa 2: Modelado y simulación del fenómeno de intermodulación en entorno controlado mediante NOEV Toolkit.

Etapa 3: Análisis de escenarios reales utilizando herramientas de visualización como Aerospace Guard.

Etapa 4: Estructuración del diagnóstico y apoyo a la toma de decisiones mediante el protocolo PDDE y el Agente IA.

Etapa 5: Validación de resultados y generación de lineamientos técnicos.

2.2. Diseño y desarrollo del NOEV Toolkit

El NOEV Toolkit tuvo como principal propósito de creación el estudio y reproducción de manera controlada de productos de intermodulación no lineal que pueden presentarse en la banda aeronáutica VHF COM, generados a partir de señales de radiodifusión FM. El enfoque principal consistió en disponer de un entorno técnico que garantiza la generación, el análisis y verificación de estos fenómenos bajo condiciones configurables y reproducibles, con utilidad tanto para validación conceptual como para análisis experimental. En esta sección se explora a profundidad el desarrollo de la herramienta NOEV Toolkit, la arquitectura interna del sistema y el diseño del generador de intermodulación que constituye su núcleo funcional.

2.2.1. Arquitectura interna del sistema

La arquitectura del NOEV Toolkit se estructuró de manera modular. Esto se realizó para separar correctamente por fases la etapa de generación de la señal con intermodulación con una etapa posterior que prepara la señal resultante para las pruebas experimentales. La primera etapa del sistema, que fue introducida previamente, corresponde a la creación de la señal RF distorsionada a partir de señales de entrada controladas, y la segunda etapa corresponde a su conversión a banda base compleja, adaptación espectral y transmisión mediante hardware SDR.

En las **Figuras 2 y 3** se ilustra el funcionamiento de la primera etapa. El subsistema inicia con la introducción de dos fuentes de audio independientes, cada una seguida por una etapa de filtrado mediante dos filtros pasabanda (LPF) con el fin de acondicionar la señal modulante y limitar su contenido espectral. Seguidamente, ambas señales son remuestreadas y trasladadas a otras componentes de frecuencia (simulando la señal RF), cuya combinación da como resultado una señal compuesta que contiene información espectral de ambas señales y libre de productos de intermodulación. En este punto se realiza la primera medición, la cual es tomada para su presentación en la interfaz de la herramienta ilustrada en la **Figura 8**. A continuación, la señal atraviesa la etapa no lineal del sistema, la cual introduce una distorsión al componente original y crea productos de intermodulación de segundo y tercer orden, formados a partir del polinomio ilustrado en la **Ecuación 1**. En este punto se procede a realizar una segunda medición que muestra la señal RF resultante que contiene los productos de intermodulación.

Figura 2

Generación de las señales FM de entrada y conformación de la señal RF compuesta.

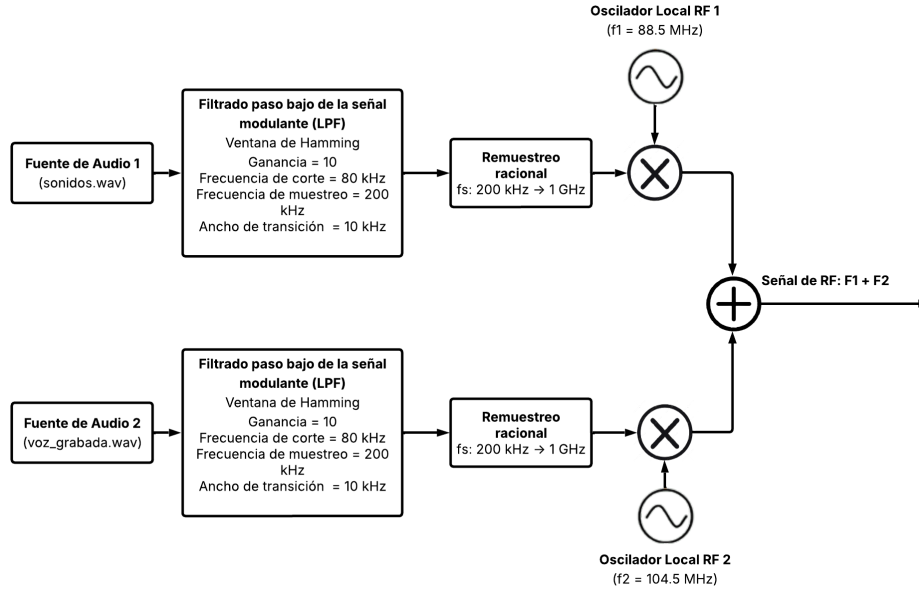
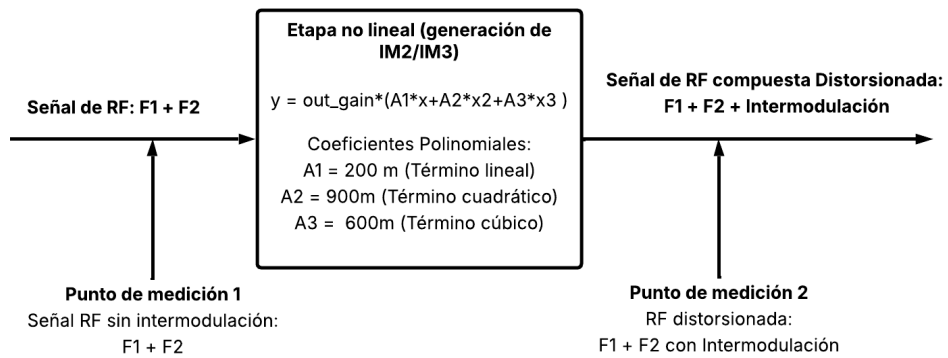


Figura 3

Aplicación del modelo no lineal y obtención de la señal RF con productos de intermodulación.

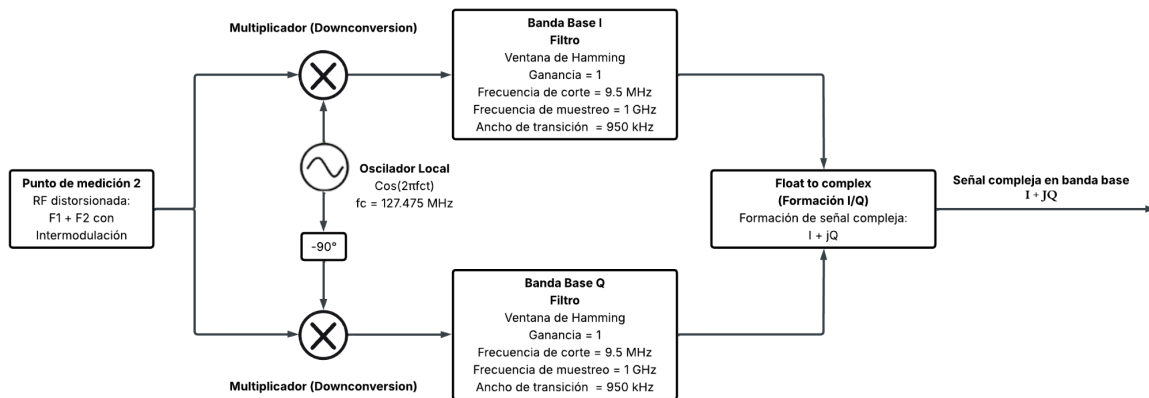


Nota. Las siglas LPF corresponden a *Low Pass Filter*. El punto de medición 1 representa la señal RF compuesta antes de la etapa no lineal, mientras que el punto de medición 2 corresponde a la señal RF distorsionada con productos de intermodulación.

Las **Figuras 4 y 5** ilustran la segunda etapa de la arquitectura. Este subsistema recibe la señal obtenida en la etapa anterior y se somete a un proceso de conversión en cuadratura para obtener sus componentes en fase (I) y cuadratura (Q). Este proceso es realizado mediante una etapa de down conversion (véase **Ecuación 14**) utilizando una componente representada como un oscilador local definido por una señal cosenoidal y otra componente representada por una señal sinusoidal obtenida a partir del oscilador local y un desfase de 90° . Seguidamente, las componentes son filtradas y combinadas para la conformación de la señal compleja $I + jQ$. Posterior a esto se agrega un ruido gaussiano controlado a la señal compleja, se remuestrea a la tasa necesaria para la transmisión y, de ser necesario, se configura la transmisión de la señal mediante un dispositivo HackRF (Ortega & Reyes, 2019; Silva Cruz et al., 2023).

Figura 4

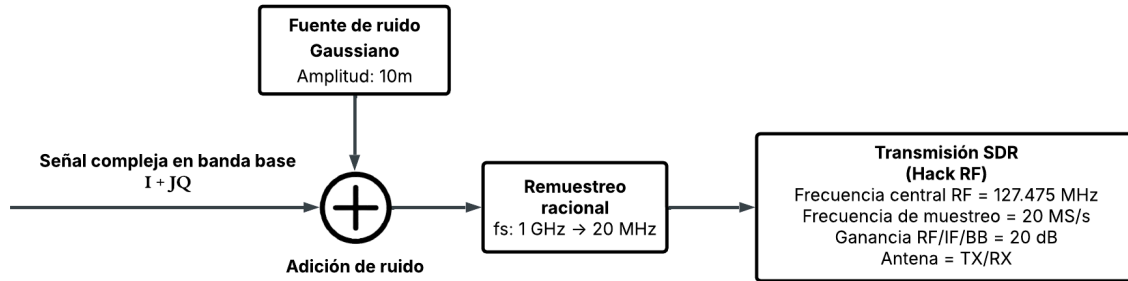
Subsistema de conversión I/Q del NOEV Toolkit.



Nota. Conversión de la señal RF distorsionada a banda base compleja mediante procesamiento I/Q.

Figura 5

Acondicionamiento de la señal compleja y transmisión SDR de la señal Intermodulada.



Nota. La figura presenta la etapa de adición de ruido, remuestreo y acondicionamiento de la señal compleja para su transmisión mediante SDR.

En conclusión, esta arquitectura permite separar la creación de la señal no lineal de su implementación experimental. Esto facilita la trazabilidad del proceso, la reutilización de partes y la validación del sistema. El NOEV Toolkit no sólo reproduce la generación de productos de intermodulación, sino que también proporciona una forma coherente de observar y transmitir la señal en un entorno controlado.

2.2.2. Diseño del generador de intermodulación

El NOEV Toolkit fue implementado en GNU Radio, su objetivo es generar, observar y analizar productos de intermodulación en escenarios donde coexisten la radiodifusión FM y la banda aeronáutica VHF COM. La estructura implementada en la herramienta fue la que se introdujo previamente en la **sección 2.2.1**: generación de dos señales de entrada, modelado de no linealidades, conversión a banda base compleja, acondicionamiento para SDR y visualización del comportamiento del fenómeno en la banda aeronáutica y su desempeño espectral. De este modo, la herramienta no solo reproduce la aparición de productos IM3, sino que permite seguir su comportamiento a lo largo de toda la cadena de procesamiento

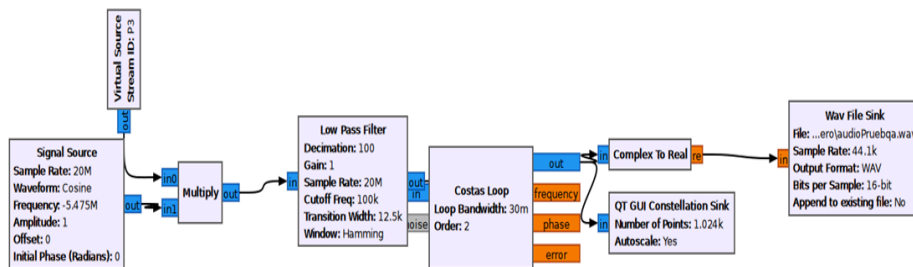
De acuerdo con la información consignada en el **Apéndice B**, la implementación de la herramienta en GNU Radio evidencia que la señal compuesta generada a partir de las dos entradas es transformada al atravesar un bloque no lineal polinomial. Este bloque es el

responsable de producir los productos de segundo y tercer orden. Aunque el modelo genera distintos productos espectrales, el enfoque principal de este proyecto se encuentra en IM3, como se detalla en la **sección 1.3** del presente documento, pues resultan ser los más relevantes en el análisis de afectación sobre la banda aeronáutica.

Como se observa en la **Figura 6**, el sistema también presenta un módulo de observación del canal aeronáutico, donde la señal es desplazada en frecuencia, filtrada y estabilizada mediante un Costas Loop antes de su conversión a salida temporal y a representación compleja. Esta etapa permite evaluar de forma más directa el efecto de los productos de intermodulación sobre la señal recibida.

Figura 6

Módulo de observación del canal aeronáutico y estabilización de la señal en GNU Radio.



Nota. La figura presenta la etapa de observación del canal aeronáutico, incluyendo desplazamiento en frecuencia, filtrado, estabilización mediante Costas Loop y conversión de la señal para su análisis.

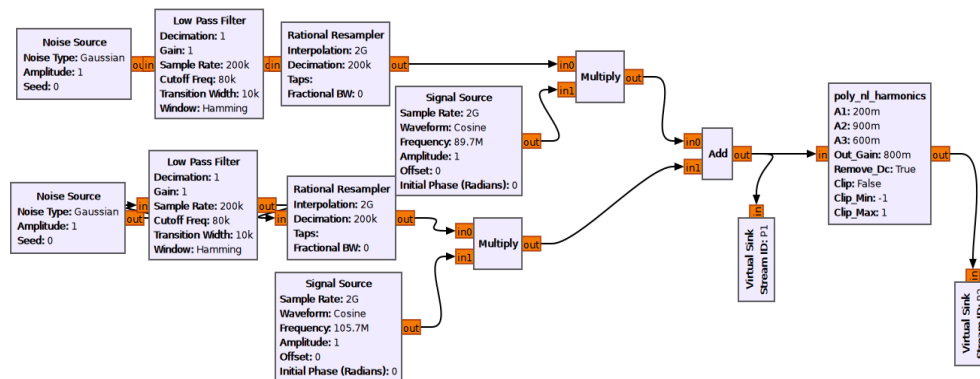
Los parámetros específicos de operación empleados en la implementación se resumen en la **Tabla 1**, con el fin de mantener la descripción del sistema breve y enfocada.

2.2.2.1. Diseño con ruido gaussiano. En la **Figura 7** se presenta el primer diseño, en la cual las dos señales de entrada del NOEV Toolkit fueron introducidas como fuentes de ruido gaussiano que se producen de manera aleatoria. Esta versión conserva la misma estructura del sistema, pero reemplaza los modulantes controlables por excitaciones

aleatorias, lo que permite estudiar el comportamiento del modelo ante diferentes estímulos introducidos, sin depender de un contenido específico. Desde el punto de vista metodológico, este diseño resulta útil para replicar pruebas controladas y realizar un análisis sobre cómo aparecen los productos de intermodulación en condiciones generales. Adicionalmente, el desarrollo de esta primera modalidad configuró un primer acercamiento hacia el estudio del comportamiento del fenómeno de intermodulación de tercer orden introduciendo un escenario con variables aleatorias y características controladas teniendo como meta el desarrollo de la herramienta utilizando señales reales.

Figura 7

Diseño del NOEV Toolkit con señales de entrada gaussianas en GNU Radio.



Nota. Implementación del NOEV Toolkit con dos señales de entrada gaussianas, acondicionamiento espectral, traslación en frecuencia y aplicación del modelo no lineal en GNU Radio.

2.2.2.2. Diseño con fuente de audio. En la segunda modalidad de implementación, las dos señales de entrada fueron construidas a partir de archivos de audio tipo wav, específicamente sonidos.wav y voz_grabada.wav, como se aprecia en el **Apéndice B**. Esta modalidad permite trabajar con señales modulantes que presentan componentes propias de la naturaleza humana, tales como variaciones temporales, transitorios y componentes no estacionarias que acercan la solución a condiciones reales de operación. En consecuencia, la señal compuesta obtenida antes de la etapa no lineal contiene características espectrales

más robustas y representativas, lo que fortalece el valor demostrativo del NOEV Toolkit como herramienta de análisis y validación experimental.

Tabla 1

Variables y parámetros principales del NOEV Toolkit.

Variable	Valor típico	Función en el sistema
$f_{fm,i} \cdot f_{fm,f}$	88 – 108 MHz	Definen los límites de la banda FM y restringen el ajuste de las frecuencias f_{c1} y f_{c2} .
$f_{vhfcom,i} \cdot f_{vhfcom,f}$	117.975 – 136.975 MHz	Definen los límites de la banda aeronáutica VHF COM y restringen la sintonía de f_{demod} y la clasificación espectral de los productos generados.
BW_{fm}	20 MHz	Ancho banda FM (108–88)
BW_{vhfcom}	19 MHz	Ancho banda VHF COM (136.975–117.975)
f_c	127.475 MHz	Frecuencia central de referencia para la banda VHF COM, definida como el punto medio del intervalo de análisis.
$samp_rate_senal_mensaje$	200 kS/s	Tasa de muestreo de la señal de audio; satisface el criterio de Nyquist para un ancho de banda de mensaje de 80 kHz.
$BW_senal_mensaje$	80 kHz	Ancho de banda útil de la señal modulante; corresponde al corte del filtro paso bajo aplicado al mensaje.
$samp_rate$	1 GHz	Tasa de muestreo interna de la simulación; permite representar portadoras y productos de intermodulación sin aliasing significativo.
$samp_rate_ec$	20 MS/s	Tasa de muestreo final compatible con SDR; permite la adaptación de la señal a hardware como HackRF.
$Fmax_SenalPasoBandas$	500 MHz	Frecuencia máxima observable en el espectro total, correspondiente a $f_s/2$ cuando $f_s = 1$ GHz
$f_{c1} \cdot f_{c2}$	88 – 108 MHz	Frecuencias centrales de las dos emisoras FM simuladas; su combinación determina la posible aparición de productos IM3 dentro de VHF COM.
amp_fm1, amp_fm2	0 – 1	Amplitud relativa de las señales FM1 y FM2; controla la potencia relativa de entrada y, por tanto, la magnitud de los productos de intermodulación.
P_{ruido}	0 – 1 (def. 0.01)	Nivel de ruido añadido al sistema; establece un piso de ruido más realista y afecta la detectabilidad de los productos espectrales.
f_{demod}	117.975 – 136.975 MHz	Frecuencia del canal aeronáutico observado; permite sintonizar el análisis sobre un canal específico dentro de la banda VHF COM.
BW_{canal_RF}	200 kHz	Ancho de banda de referencia para la canalización y el filtrado durante la etapa de observación/demodulación.

Nota. Se presentan las variables principales utilizadas en el modelo, junto con su rango de operación y su justificación dentro del entorno experimental.

Con el fin de ampliar la información presentada, en los **Apéndices C y D** se incluye el guión del esquemático del NOEV Toolkit y la justificación de las variables y parámetros

del sistema respectivamente. Se realizó un estudio para dar respuesta al enfoque del diseño en IM3 y no IM5 para ver el detalle consulte el **Apéndice E**.

2.3. Experiencias de uso del Noev toolkit.

La experiencia de uso del NOEV Toolkit se entiende como el conjunto de interacciones que realiza el usuario para configurar escenarios, ejecutar la herramienta y relacionar las variables de entrada con los efectos observados en el espectro y en el canal aeronáutico. Además de la capacidad técnica del simulador, se prioriza que el entorno sea estructurado e intuitivo para facilitar el análisis progresivo del fenómeno de intermodulación.

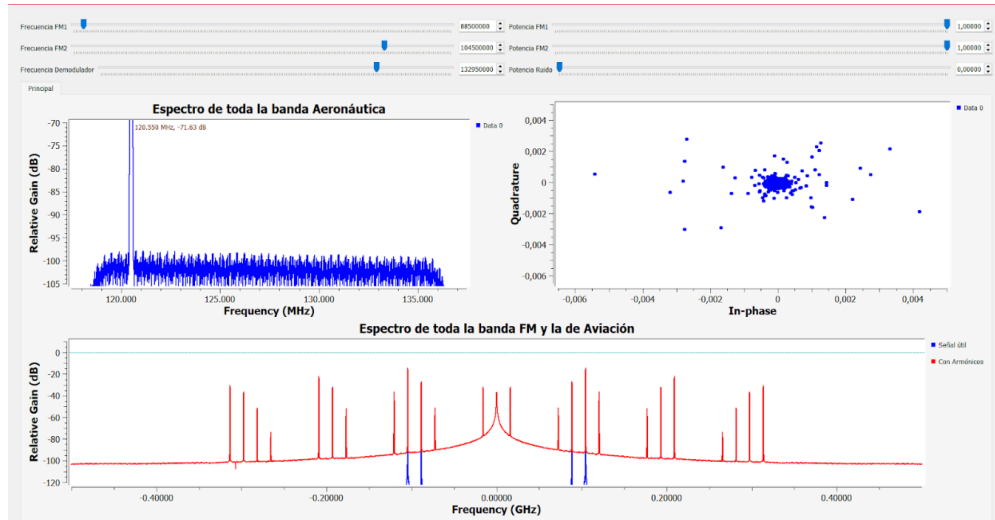
2.3.1. Ejecutable, interfaz y parámetros operativos

Con el fin de facilitar el acceso y la adopción de la herramienta, el NOEV Toolkit se distribuye en forma de ejecutable, lo que permite su uso sin requerir instalación de entornos de desarrollo ni conocimientos avanzados de programación. Esta decisión busca habilitar su aplicación en contextos académicos y técnicos, e incluso como apoyo en análisis preliminares en campo, manteniendo un flujo de operación homogéneo entre usuarios. El contenido asociado al ejecutable y su despliegue se presenta en el **Apéndice F**.

Al ejecutarse, la herramienta muestra una interfaz gráfica basada en controles deslizantes y visualizadores como se ilustra en la **Figura 8**. En términos operativos, el usuario configura las frecuencias de las emisoras FM (FM1 y FM2), sus niveles relativos de potencia/amplitud, la frecuencia del demodulador (canal VHF COM objetivo) y el nivel de ruido (cuando aplica). Como salida, se observan representaciones espectrales de la banda aeronáutica y la convivencia FM–VHF COM, y en la versión extendida se incluye un diagrama de constelación para monitorear el comportamiento I/Q bajo variaciones de ruido y sintonía. Esta interfaz permite asociar de forma inmediata los cambios de parámetros con la aparición o desplazamiento de productos interferentes.

Figura 8

Interfaz del NOEV Toolkit.



Nota. La figura muestra la interfaz del NOEV Toolkit para ajustar la ubicación en frecuencia de las señales, su ganancia, la sintonía del demodulador y la potencia de ruido, junto con la visualización espectral y en el plano I/Q de los resultados.

2.3.2. Registro y trazabilidad de resultados

La bitácora de uso se incorpora como un mecanismo de registro que permite documentar, por ejecución, los parámetros configurados y los resultados observados. En el análisis de interferencias, este registro es especialmente relevante porque facilita la trazabilidad (qué se probó, con qué valores y qué se obtuvo) y permite comparar escenarios de manera estructurada, reduciendo ambigüedades durante la interpretación. La bitácora también apoya la construcción de conocimiento a partir de la repetición controlada, al permitir identificar patrones recurrentes en la generación de productos de intermodulación. El formato completo de bitácora se presenta en el **Apéndice G**.

2.3.3. Resultados por ubicación geográfica

En esta subsección se busca responder una pregunta concreta: dado el conjunto de emisoras FM asignadas en un sitio, qué nivel de agresividad potencial puede presentarse

sobre la banda aeronáutica VHF COM. El interés no está en describir cada frecuencia de manera aislada, sino en evaluar cómo la coexistencia de múltiples portadoras puede generar combinaciones interferentes dentro de la banda de interés. Por ello, las asignaciones consultadas en el Visor del Espectro de la ANE se toman como insumo para calcular productos de intermodulación y estimar, por ubicación geográfica, qué tan crítico puede resultar cada entorno desde el punto de vista de la convivencia FM–VHF COM (Agencia Nacional del Espectro, s. f.).

En esta subsección se presentan los resultados del ejercicio por sitio de interés a partir de una metodología común: las frecuencias (y, cuando aplica, potencias asociadas) de emisoras FM se extrajeron del Visor del Espectro de la ANE (véase **Figura 9**) en el apartado de Asignación Nacional de espectro – Radio FM, aplicando filtros por municipio para obtener el conjunto de estaciones del área evaluada. Con ese conjunto se calcularon productos de intermodulación de tercer orden mediante el modelo de la **Ecuación 7** y se clasificaron los resultados según si caen dentro de la banda aeronáutica VHF COM (117.975 – 136.975 MHz). Las tablas completas por sitio se presentan en los apéndices correspondientes.

Figura 9

Interfaz visor del espectro.



Nota. La figura presenta la interfaz del Visor del Espectro de la ANE empleada para la consulta de emisoras FM utilizadas en el análisis. Tomado de TesMonitorPlanning (Visor del espectro), por Agencia Nacional del Espectro, s. f., https://espectro-co.ane.gov.co/TesMonitorPlanning/TesMonitorPlanningWeb/#TMP_Main

2.3.3.1. Cerro Gualí. En el Cerro Gualí se inició con una depuración por proximidad (coordenadas del sitio) y, con las emisoras más cercanas, se calcularon combinaciones IM3 (**Ecuación 7**); no se obtuvieron productos dentro de VHF COM, por lo que el criterio espacial resultó insuficiente para priorizar riesgo. Por ello se aplicó un segundo filtro basado en pérdida en espacio libre (FSPL), ya que la potencia que “llega” al cerro depende fuertemente de la distancia y la frecuencia, no solo de la cercanía administrativa. Se usó la expresión de la **Ecuación 9**, y, combinándola con la **Ecuación 10**, se priorizaron las 10 emisoras con mayor potencia recibida estimada para recalculas las combinaciones IM3. Como resultado, se consolidó la selección final de emisoras dominantes y se organizó el conjunto de frecuencias evaluadas en una tabla resumen (véase **Tabla 2**), la cual sirve como base para el cálculo posterior de productos IM3 y su comparación con la banda aeronáutica (ITU-R, 2019).

Tabla 2 Comprobación de productos de IM3 en emisoras del Cerro Gualí mediante FSPL.

ID	Frecuencia Emisora [MHz]	Interferencias en simulador (GNU Radio) [MHz]										
		92.7	91.7	96.3	89.7	95.7	99.7	101.7	105.7	95.1	101.2	
2492	92.7	X	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	118.7	FB	FB
1437	91.7	FB	X	FB	FB	FB	FB	FB	FB	119.7	FB	FB
3088	96.3	FB	FB	X	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB
2009	89.7	FB	FB	FB	X	FB	FB	FB	FB	121.7	FB	FB
1429	95.7	FB	FB	FB	FB	X	FB	FB	FB	FB	FB	FB
1547	99.7	FB	FB	FB	FB	FB	X	FB	FB	FB	FB	FB
3085	101.7	FB	FB	FB	FB	FB	FB	X	FB	FB	FB	FB
1552	105.7	118.7	119.7	FB	121.7	FB	FB	FB	X	FB	FB	FB
2929	95.1	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	X	FB
2811	101.2	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	FB	X

Nota. El color verde corresponde a productos ubicados dentro de la banda aeronáutica VHF COM (117.975–136.975 MHz), indicando además la frecuencia específica en la que caen. El color rojo, señalado con la notación FB, corresponde a productos fuera de dicha banda.

2.3.3.2. Bogotá. Para Bogotá se filtraron en el Visor del Espectro (Radio FM) las emisoras del municipio y, por tratarse de una ciudad con alta densidad de estaciones, se trabajó el conjunto completo “por proximidad urbana” (municipio) para calcular combinaciones IM3 e identificar productos dentro y fuera de VHF COM. Los resultados se presentan en el **Apéndice H** (Bogotá).

2.3.3.3. Cartagena. Para Cartagena se repitió el mismo procedimiento, cambiando únicamente el filtro del Visor del Espectro al municipio correspondiente; las tablas se incluyen en el **Apéndice I** (Cartagena).

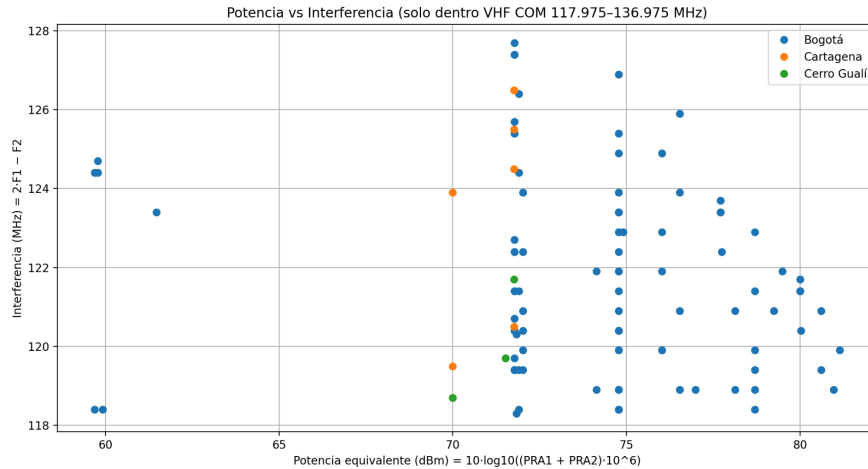
2.3.4. Análisis comparativo mediante figuras

Con el fin de sintetizar resultados y facilitar su lectura, se generaron figuras comparativas en dos líneas: (i) curvas Potencia–Interferencia para contrastar el comportamiento de productos IM3 dentro/fuera de VHF COM, y (ii) mapas de calor para estudiar la sensibilidad del fenómeno frente a variaciones de ganancia relativa y su carácter no lineal.

2.3.4.1. Potencia vs Interferencia. Se elaboraron tres gráficas tipo dispersión con resultados de Cerro Gualí, Bogotá y Cartagena: productos dentro de VHF COM, fuera de VHF COM y una gráfica combinada. La **Figura 10** muestra el caso dentro de VHF COM (117.975 - 136.975 MHz), donde cada punto corresponde a un producto IM3 y los sitios se diferencian por color. Estas curvas permiten relacionar la frecuencia interferente f_{IM3} en función de una potencia equivalente expresada en dBm (a partir de potencias reportadas), distinguiendo comportamientos según si el producto cae o no en la banda aeronáutica. Las gráficas de fuera de banda y del conjunto total (junto con el código) se presentan en el **Apéndice J**.

Figura 10

Potencia vs Interferencia dentro de VHF COM.



Nota. La figura presenta la relación entre potencia equivalente e interferencia para los productos IM3 ubicados dentro de VHF COM, diferenciados por sitio de análisis.

2.3.4.2. Mapas de calor. En este apartado se analiza la sensibilidad de los productos de intermodulación de tercer orden (IM3) frente a variaciones en las ganancias relativas aplicadas a las señales *FM1* y *FM2*. El propósito es mostrar, de forma compacta, cómo cambios en los niveles relativos de entrada pueden amplificar o atenuar la interferencia generada, y con ello identificar regiones de operación críticas y zonas donde pequeñas variaciones producen cambios relevantes.

Para ello, primero se consolidaron los valores de potencia de interferencia IM3 en dB para distintas combinaciones de ganancias *G1* y *G2* en la **Tabla 3**. A partir de estos datos tabulados se elaboró una representación tipo mapa de calor (heatmap) (véase **Figura 11**), con el fin de visualizar con mayor claridad la magnitud de las potencias observadas y su patrón de crecimiento o disminución según la configuración de ganancias.

Tabla 3 Potencia de interferencia por IM3 bajo variación de las ganancias relativas G_1 y G_2 .

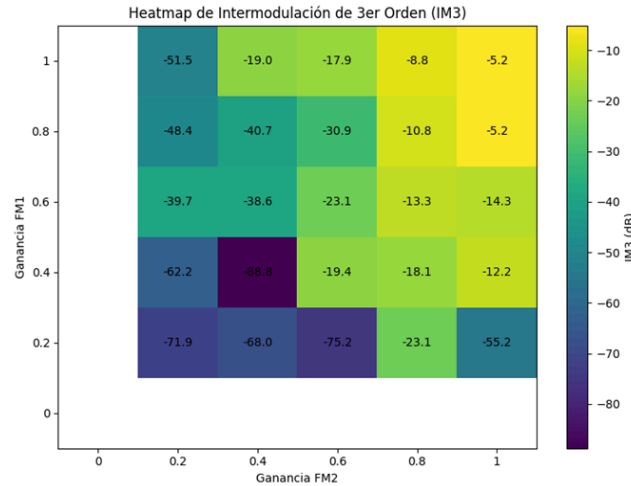
FM2 \ FM1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.2	N/A	-71.87 dB	-68.01 dB	-75.19 dB	-23.15 dB	-55.18 dB
0.4	N/A	-62.24 dB	-88.78 dB	-19.37 dB	-18.12 dB	-12.24 dB
0.6	N/A	-39.68 dB	-38.58 dB	-23.12 dB	-13.26 dB	-14.26 dB
0.8	N/A	-48.44 dB	-40.71 dB	-30.94 dB	-10.77 dB	-5.15 dB
1	N/A	-51.45 dB	-18.98 dB	-17.85 dB	-8.77 dB	-5.21 dB

Nota. Los casos marcados como N/A no se consideran relevantes para el análisis, debido a que cuando $G_1 = 0$ o $G_2 = 0$ no se produce interacción no lineal entre las dos señales de entrada; por tanto, la potencia de los productos de intermodulación de tercer orden (IM3) resulta nula.

El heatmap evidencia el carácter no lineal del fenómeno: la potencia interferente tiende a incrementarse de forma consistente cuando ambas ganancias aumentan, alcanzando sus máximos cuando se aproximan al 100% (sin atenuación). Asimismo, se identifica una zona crítica para ganancias iguales o superiores a 0.8 y una región de transición entre 0.6 y 0.8, donde incrementos pequeños en ganancia producen aumentos significativos en la interferencia. En contraste, para ganancias bajas (0.2 – 0.4) se observa una reducción marcada de la potencia interferente. Finalmente, la distribución no presenta simetría perfecta, lo cual sugiere dominancia de una de las señales (FM1) en la generación de IM3, coherente con el comportamiento típico del término principal proporcional a $FM1^2 * FM2$.

Figura 11

Heatmap de intermodulación de tercer orden (IM3).



Nota. La figura presenta un mapa de calor de la potencia de interferencia por IM3 en función de las ganancias relativas $G1$ y $G2$, permitiendo identificar regiones de operación donde la interferencia aumenta o disminuye de manera significativa.

2.4. Escenarios de evaluación

En este apartado se presentan los escenarios de evaluación definidos para analizar la utilidad del banco de pruebas en diferentes niveles de aplicación. En primer lugar, se aborda un escenario orientado al entrenamiento y aprendizaje, que permite familiarizarse con la herramienta y sus funciones básicas. Posteriormente, se desarrolla un escenario de generación controlada de intermodulación, enfocado en la obtención reproducible de candidatos interferentes. Finalmente, se expone su aplicación en el caso Bucaramanga–Palonegro, donde se articula el uso del Visor del Espectro, Aerospace Guard y NOEV Toolkit dentro de un flujo de análisis verificable.

2.4.1. Escenario 1: Entrenamiento y aprendizaje

Aerospace Guard se presenta como una herramienta georreferenciada para apoyar el análisis preliminar de interferencias aeronáuticas, al representar emisoras FM y receptores VHF COM sobre un mapa con parámetros básicos (frecuencia, potencia y altura). La

construcción del escenario se realiza en el módulo Componentes, donde transmisores y receptores se editan y se gestionan escenarios reproducibles mediante importación/exportación JSON, con funciones de ajuste (enfocar, eliminar y reubicar). El procedimiento completo se describe en el Manual de uso de Aerospace Guard (véase **Apéndice K**).

2.4.2. Escenario 2: Generación controlada de intermodulación

En esta subsección se describe cómo Aerospace Guard permite obtener, de forma reproducible, candidatos de intermodulación a partir de las torres FM cargadas y un receptor aeronáutico VHF COM seleccionado. La intermodulación “controlada” se realiza por cálculo (no por emisión real): el usuario define el receptor objetivo, la ventana (\pm kHz), el orden máximo (en este proyecto, principalmente IM3) y un filtro de selectividad. Con estos parámetros, el software evalúa combinaciones de portadoras, calcula los productos y entrega una tabla con la frecuencia resultante, niveles estimados (Raw/Filtro en dBm) e IDs de emisoras involucradas, lo que permite trazar el origen del candidato y preparar su verificación posterior en NOEV Toolkit (véase **Figura 12**).

2.4.3. Aplicación en Bucaramanga

Esta sección presenta la aplicación del banco de pruebas en Bucaramanga–Palonegro mediante un flujo en dos etapas:

- Un filtrado inicial con datos del Visor del Espectro para identificar combinaciones IM3 potencialmente críticas
- Una comprobación en Aerospace Guard incorporando georreferenciación y potencias, con validación final en NOEV Toolkit.

El resultado demuestra un proceso reproducible y verificable desde la alerta inicial hasta la confirmación experimental.

2.4.3.1. Análisis mediante el visor del espectro. Se realizó una verificación preliminar para generar una advertencia técnica sobre posibles productos IM3 dentro de VHF COM usando únicamente frecuencias FM del área metropolitana (sin propagación ni georreferenciación). Para ello se consultó el Visor del Espectro de la ANE y se extrajeron

las 11 emisoras de Bucaramanga, Girón y Piedecuesta. Con esas frecuencias se aplicó el modelo ideal (**Ecuación 7**) y se construyó una tabla con todas las combinaciones, marcando los productos que caen en (117.975 – 136.975 MHz), con el fin de priorizar pares de emisoras candidatos para análisis posterior (Agencia Nacional del Espectro, s. f.).

Los resultados completos del modelo ideal y las combinaciones evaluadas entre las 11 emisoras del área metropolitana de Bucaramanga se presentan en el **Apéndice L**, donde se listan los productos IM3 calculados y su clasificación dentro/fuera de la banda VHF COM. Adicionalmente, el **listado base de emisoras** (frecuencias y datos extraídos del Visor del Espectro de la ANE) utilizado para construir dicho modelo se incluye en el **Apéndice O**.

2.4.3.2. Comprobación en Aerospace Guard. En esta etapa se realizó la comprobación en un entorno más realista mediante Aerospace Guard, incorporando georreferenciación y niveles de potencia. A diferencia del modelo ideal basado solo en frecuencia, aquí se consideraron las coordenadas del receptor aeronáutico y de las emisoras, además de parámetros de configuración del cálculo (ventana en kHz, orden máximo y filtro), con el fin de estimar de forma más operativa la aparición de productos IM3 en el entorno Bucaramanga–Palonegro.

Tras cargar el escenario y ejecutar el cálculo de interferencias, el sistema reportó dos productos IM3 dentro de VHF COM, asociados a dos pares de emisoras: (**92.3 MHz, 105.1 MHz**) y (**95.7 MHz, 106.7 MHz**). La información detallada del receptor y de las emisoras incluidas en el escenario se presenta en el **Apéndice M**, correspondiente al archivo JSON que contiene la base de datos del caso. La salida del cálculo se resume en la **Figura 11**, donde se observa la frecuencia interferente estimada para cada producto y los identificadores de las emisoras contribuyentes. A partir de estos resultados se generaron mapas de interferencia (heatmaps) centrados en cada frecuencia interferente, de modo que la visualización espacial representara el comportamiento del producto calculado alrededor del área de interés.

Figura 12

Resultados simulación interferencias Bucaramanga

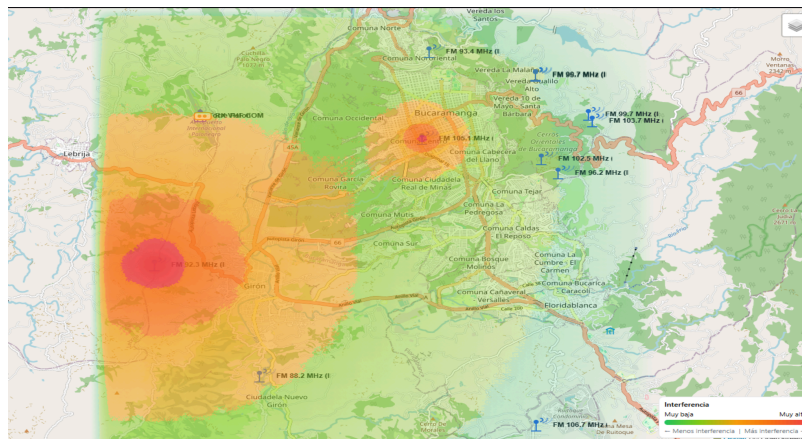
Interferencias — cálculo			
<input type="radio"/> Portadoras <input checked="" type="radio"/> IM2 <input type="radio"/> IM3			
Tipo	f (MHz)	Raw (dBm)	Filtro (dBm) IDs
im3	117.9000	-79.8	-124.8 fm8, fm11
im3	117.9000	-79.8	-124.8 fm11, fm8
im3	117.7000	-81.7	-151.7 fm1, fm4
im3	117.7000	-81.7	-151.7 fm4, fm1

Nota. Elaboración propia.

La primera visualización espacial corresponde al producto IM3 generado por el par de emisoras (92.3 MHz, 105.7 MHz) centrado en $f_{RX} = 117.9 \text{ MHz}$ con una ventana $\pm 150 \text{ kHz}$ (o $\pm 200 \text{ kHz}$). La **Figura 13** presenta la Mancha 1, donde se aprecia la distribución geográfica relativa del nivel de interferencia estimado por Aerospace Guard para ese producto. Esta figura se utiliza como evidencia de que el cálculo no sólo entrega un valor en frecuencia, sino que permite representar su impacto potencial en el área geográfica definida.

Figura 13

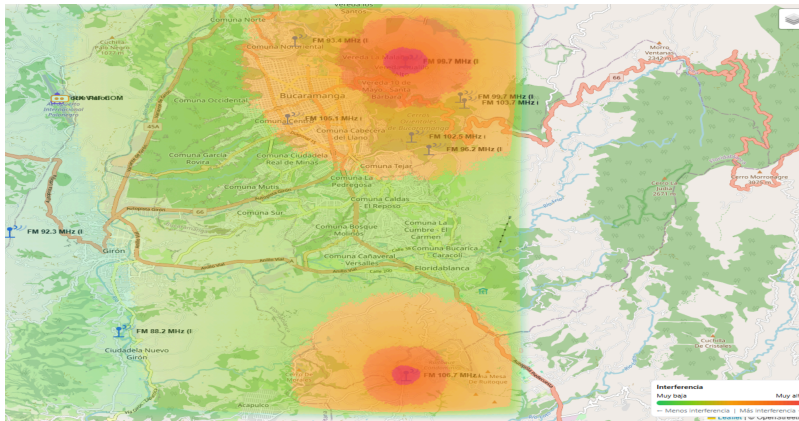
Mapa de calor del par (92.3 MHz, 105.1 MHz)



De forma análoga, se generó una segunda visualización espacial para el producto IM3 asociado al par **(95.7 MHz, 106.7 MHz)**, centrado en $f_{RX} = 117.7 \text{ MHz}$ con una ventana $\pm 150 \text{ kHz}$ (o $\pm 200 \text{ kHz}$). La **Figura 14** muestra la Mancha 2, permitiendo comparar que distintos pares de emisoras pueden producir productos interferentes en frecuencias cercanas dentro de la franja aeronáutica, y que cada uno da lugar a una distribución espacial propia según la configuración del escenario.

Figura 14

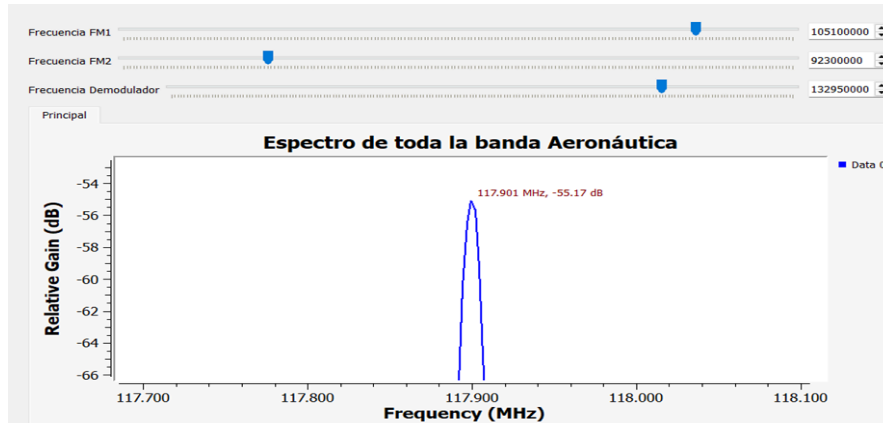
Mapa de calor del par (95.7 MHz, 106.7 MHz)



Con el fin de cerrar el ciclo del banco de pruebas y no depender únicamente del cálculo georreferenciado, se realizó una validación cruzada en NOEV Toolkit. Para ello se tomaron las frecuencias de las emisoras que originaron el producto interferente y se ingresaron en el flujo experimental del toolkit, verificando que el producto IM3 aparece en la misma frecuencia predicha por Aerospace Guard. La **Figura 15** presenta un ejemplo de esta validación para el par **(95.7 MHz, 106.7 MHz)**, donde el pico interferente observado en NOEV Toolkit coincide con el valor reportado por Aerospace Guard, confirmando coherencia matemática y consistencia entre herramientas.

Figura 15

Comprobación de intermodulación entre FM8 y FM11 con NOEV Toolkit



Finalmente, debido a que en NOEV Toolkit se realizaron cuatro simulaciones (correspondientes a los distintos pares/condiciones de validación), en el cuerpo del capítulo se presenta únicamente una de ellas como ejemplo (**Figura 15**). El conjunto completo de evidencias experimentales se incluye como material de soporte en formato de apéndice (véase **Apéndice N**), donde se adjuntan las capturas restantes y la configuración empleada en cada caso, de manera que el procedimiento quede documentado y sea reproducible por terceros.

3. Resultados y lineamientos técnicos

Éste capítulo tiene como principal propósito reunir los principales resultados técnicos del banco experimental y los convierte en recomendaciones prácticas para la ANE. Se presentan lineamientos para diagnóstico, mitigación y consideraciones operativas/normativas, sustentados en evidencia obtenida con NOEV Toolkit y Aerospace Guard.

3.1. Recomendaciones para la ANE

Esta sección reúne recomendaciones operativas para agilizar el diagnóstico y mejorar la trazabilidad de casos de interferencia en VHF COM. Con base en los resultados del NOEV Toolkit y el análisis de sensibilidad por ganancias, se adopta un enfoque de diagnóstico “IM3 primero”, que conecta la detección de un pico interferente con la identificación de pares FM candidatos y su verificación espectral. La **Tabla 4** resume las acciones propuestas, el riesgo que reducen, lo que requiere la ANE y los indicadores de verificación (ANE, 2025; UAEAC, 2007; UAEAC, 2023; Kerczewski, 2022); para mayor detalle y sustento metodológico, véase el **Apéndice Q**.

Tabla 4

Matriz de recomendaciones ANE.

ID	Acción propuesta	Qué reduce	Qué requiere la ANE	Cómo se verifica (indicador)
R1	Protocolo de diagnóstico “IM3 primero” en sitios críticos VHF COM	Riesgo por IM3 en canal aeronáutico	Procedimiento + plantilla + capacitación corta	Δ nivel del espurio (dB) + evidencia antes/después
R2	Lista de vigilancia por sitio (pares FM que generan IM3 en VHF COM)	Tiempo de diagnóstico y falsas hipótesis	Base de datos + cálculo automatizado	Concordancia con mediciones/eventos + actualización periódica
R3	Priorización del transmisor dominante (acción focal)	IM3 por desbalance de contribuciones	Coordinación/visitas focalizadas	Caída del espurio al reducir una sola emisora FM
R4	Umbral operativo (zona crítica / transición) para coordinación técnica	Operación en régimen de mayor generación IM3	Criterio técnico documentado	El espurio disminuye al pasar de zona crítica a transición
R5	Mitigación condicionada con filtro de muesca (notch) de alto Q	Interferencia puntual fuera de la portadora útil	Criterios de aplicabilidad + medición	Atenuación \geq objetivo sin afectar el canal útil
R6	Gestión espectral/corrimiento del contribuyente dominante (cuando el notch no aplica)	IM3 coincidente con frecuencia útil	Evaluación técnica y coordinación regulatoria	Desplazamiento del espurio: $f_{IM3,nueva} = f_{IM3} + 2\Delta f$
R7	Estandarizar registro y trazabilidad (bitácora + capturas + JSON/escenarios)	Dificultad de reproducir y soportar decisiones	Formato único + repositorio	Auditoría: reproducibilidad del caso y evidencia

Se recomienda implementar un protocolo de diagnóstico IM3 (R1), una lista de vigilancia por sitio (R2), la priorización del transmisor dominante para acciones focales (R3) y un esquema de registro estandarizado con bitácora y evidencias (R7), verificando el efecto mediante comparación antes/después y variación del nivel del espurio en dB.

3.2. Estrategias de mitigación

Esta sección propone medidas de mitigación cuando se detecta un IM3 en VHF COM, distinguiendo acciones de bajo impacto (operativas/filtrado) y de mayor impacto (gestión espectral). Se sugiere definir un umbral operativo (zona crítica vs transición) para orientar coordinaciones técnicas (R4). Si el espurio no coincide con el canal útil, se considera un notch de alto Q con verificación pre/post (R5); si coincide o el notch es inviable, se plantea el corrimiento del transmisor dominante (R6), aprovechando que el producto se desplaza aproximadamente:

$$f_{IM3, nueva} = f_{IM3} + 2\Delta f \quad (15)$$

Nota. Para un análisis con mayor profundidad de la **Ecuación 15** revisar el **Apéndice Ñ**.

3.3. Consideraciones normativas

Las recomendaciones propuestas se formulan dentro del ámbito técnico razonable de la ANE como autoridad de monitoreo, análisis y soporte a decisiones sobre el espectro. En términos operativos, varias acciones (listas de vigilancia, protocolos de diagnóstico, trazabilidad institucional) son de implementación interna y se verifican mediante evidencia técnica documentada. Otras medidas, en especial aquellas asociadas a filtrado selectivo o a corrimientos de frecuencia, requieren coordinación con operadores y entidades competentes, por lo que se consideran aplicables caso a caso, priorizando escenarios críticos y recurrentes.

De manera consistente con el enfoque de verificación, la adopción de estas medidas debe apoyarse en evidencia reproducible (capturas espectrales antes/después, parámetros de configuración, escenarios y registros), evitando conclusiones sancionatorias sin confirmación técnica. Bajo este marco, el banco de pruebas propuesto aporta un soporte

metodológico que facilita la trazabilidad de cada caso y la justificación de acciones técnicas, alineando diagnóstico, mitigación y documentación como insumos para la gestión del riesgo sobre VHF COM (ANE, 2025; UAEAC, 2007; UAEAC, 2023; Kerczewski, 2022).

4. Conclusiones

El banco de pruebas basado en SDR y GNU Radio permitió cumplir el objetivo del proyecto al consolidar un entorno reproducible y trazable para estudiar interferencias asociadas a radiodifusión FM en VHF COM, integrando simulación controlada, contextualización geográfica y soporte metodológico al diagnóstico. Los resultados confirman que la ocurrencia de interferencias no depende de un único parámetro, sino de la interacción entre niveles relativos de potencia, relaciones espectrales entre portadoras y condiciones de no linealidad, lo que refuerza la necesidad de un análisis integrado.

El análisis experimental permitió identificar patrones consistentes de generación de productos de intermodulación, particularmente mediante barridos de ganancia, donde se evidencian zonas críticas y zonas de transición: existen rangos en los que pequeñas variaciones de nivel producen incrementos desproporcionados en la potencia del producto interferente. Este hallazgo aporta criterios técnicos para reconocer configuraciones de mayor riesgo y orientar acciones de priorización y mitigación.

Se estableció que la intermodulación de tercer orden (IM3) constituye el mecanismo más relevante para el diagnóstico en VHF COM, debido a su mayor probabilidad práctica y a niveles típicamente más significativos que los de órdenes superiores. En contraste, productos de orden cinco (IM5) pueden ampliar la cobertura en frecuencia, pero su impacto suele ser menor por potencia y queda condicionado a escenarios de no linealidad más severa; por ello, IM5 se plantea como análisis complementario para casos específicos y no como enfoque principal.

La integración de NOEV Toolkit, Aerospace Guard y el enfoque de diagnóstico (PDDE/Agente_IA) demostró coherencia metodológica al permitir pasar de candidatos calculados o estimados a su reproducción y verificación mediante evidencia espectral. La validación cruzada (por ejemplo, en el caso Bucaramanga–Palonegro) respalda que el banco puede apoyar el diagnóstico técnico al asociar productos interferentes con configuraciones específicas y reproducibles.

Como principal limitación, el entorno experimental simplifica ciertos efectos del mundo real (propagación compleja, multi-trayecto y variaciones del entorno). No obstante, esta simplificación resulta útil para aislar variables y establecer relaciones causa–efecto de manera clara, dejando como aporte una metodología experimental aplicable y una base de evidencia que puede escalarse a campañas de medición y procesos institucionales de gestión del espectro.

5. Recomendaciones

- Dar continuidad a la maduración del banco de pruebas RAINA.
Se recomienda que el banco no quede como un desarrollo puntual de trabajo de grado, sino como una capacidad experimental en evolución dentro de la UIS.
- Fortalecer NOEV Toolkit, AerospaceGuard y PDDE-IA como herramientas complementarias.
Se recomienda continuar su desarrollo para mejorar robustez, facilidad de uso, validación y utilidad técnica, evitando que permanezcan en un nivel únicamente experimental.
- Ampliar la validación hacia escenarios más cercanos a condiciones reales.
Futuros trabajos deberían incorporar mayor complejidad de propagación, contrastación con mediciones de campo y evaluación en escenarios operativos más exigentes.
- Impulsar pilotos específicos en articulación con ANE y Aerocivil.
Se recomienda que la evolución del proyecto se dé mediante pilotos acotados, con objetivos claros de validación, escalamiento o transferencia técnica.
- Desarrollar materiales pedagógicos y de entrenamiento.
Se recomienda aprovechar lo construido para generar guías, manuales, prácticas y casos de estudio que fortalezcan la formación técnica en la UIS y en otros espacios de cooperación.
- Fortalecer la infraestructura UIS para proyectos SDR y análisis de espectro.
Se recomienda prever sostenibilidad en hardware, software, documentación y almacenamiento de resultados, de modo que la continuidad del trabajo no dependa únicamente de sus autores actuales.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional del Espectro. (s. f.). *TesMonitorPlanningWeb*.
https://espectro-co.ane.gov.co/TesMonitorPlanning/TesMonitorPlanningWeb/#TMP_Main
- Agencia Nacional del Espectro. (2025). *Cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencia–CNABF 2025*. ANE.
- Delgado López, J. Á. (2021). *Estudio del impacto de las señales de difusión FM en los sistemas de radionavegación aérea* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Sevilla].
- Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica. (s. f.). *Uso de sistemas radio en ATC. Curso 2109: Vigilancia y comunicaciones aeronáuticas 2*.
- Haykin, S. (2007). *Sistemas de comunicación* (5.^a ed.). Pearson Educación.
- International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector. (2000). *Recommendation ITU-R SM.1446-0: Definition and measurement of intermodulation products in transmitter using frequency, phase, or complex modulation techniques*.
- International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector. (2019). *Recommendation ITU-R P.525-4: Calculation of free-space attenuation*. ITU.
- Kerczewski, R. J. (2022). *Spectrum research for aviation: Final report* (Aerospace Report No. ATR-2022-02442). The Aerospace Corporation.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (5th ed.). Wiley.

Ortega Boada, H., & Reyes Torres, Ó. M. (2019). *Comunicaciones digitales basadas en radio definida por software*. Editorial UIS, Universidad Industrial de Santander.

RADIOGIS. (s. f.). *Agente IA. NOEV Toolkit*.
<https://sites.google.com/radiogis.uis.edu.co/noevtoolkit/noev-ia-agent>

Silva Cruz, E. M., Sánchez Maldonado, M. J., Castellanos Baltazar, R. T., & Jiménez Ramos, V. M. (2023). *Modem FM mediante radio definido por software (SDR), Octave, GNU Radio y Hackrf One: Una revisión de software y hardware*. *Pistas Educativas*, 44(144).

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2007). *Resolución aeronáutica No. 0034 de 2007: Por la cual se reglamentan las funciones de administración y gestión del uso de las bandas de frecuencias radioeléctricas atribuidas al servicio móvil aeronáutico (R) y al servicio de radionavegación aeronáutica*. UAEAC.

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2023). *Reglamentos aeronáuticos de Colombia, parte primera: Disposiciones iniciales, definiciones y abreviaturas*. UAEAC.