



Desarrollo del prototipo de un sistema transportable de monitoreo del espectro radioeléctrico y localización aproximada del sector del ángulo de arribo de las fuentes de señales en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz, programable

Egüez Cruz, Gabriela Cristina y Loor Vélez, Lucía Flor

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones

Msc. León Vásquez, Rubén Darío

26 de enero del 2022



04_Escrito_Eguez_Loor-FINAL.pdf

Scanned on: 23:12 January 28, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	172
Words with Minor Changes	21
Paraphrased Words	254
Ommited Words	0



RUBEN DARIO
LEON VASQUEZ

M.Sc. León Vásquez, Rubén Darío

Director de Proyecto

C.C. 1801654284



Website | Education | Businesses



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Desarrollo del prototipo de un sistema transportable de monitoreo del espectro radioeléctrico y localización aproximada del sector del ángulo de arribo de las fuentes de señales en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz, programable" fue realizado por las señoritas Egúez Cruz, Gabriela Cristina y Loor Vélez, Lucía Flor el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 26 de enero de 2022



Firmado digitalmente por:
**RUBEN DARIO
LEON VASQUEZ**

León Vásquez, Rubén Darío

C. C. 1801654284



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotras, Egüez Cruz, Gabriela Cristina y Loor Vélez, Lucía Flor, con cédulas de ciudadanía n°1720032711 y n°1724015746, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: Desarrollo del prototipo de un sistema transportable de monitoreo del espectro radioeléctrico y localización aproximada del sector del ángulo de arribo de las fuentes de señales en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz, programable; es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 26 de enero de 2022

.....
Egüez Cruz, Gabriela Cristina

C.C.: 1720032711

.....
Loor Vélez, Lucía Flor

C.C.: 1724015746



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotras Egüez Cruz, Gabriela Cristina y Loor Vélez, Lucía Flor, con cédulas de ciudadanía n°1720032711 y n°1724015746, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: Desarrollo del prototipo de un sistema transportable de monitoreo del espectro radioeléctrico y localización aproximada del sector del ángulo de arribo de las fuentes de señales en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz, programable; en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 26 de enero de 2022

.....
Egüez Cruz, Gabriela Cristina

C.C.: 1720032711

.....
Loor Vélez, Lucía Flor

C.C.: 1724015746

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios, a mis hijos y a toda mi familia por ser la fuente de motivación para culminar mis estudios.

A mis hijos ya que, con su amor, sus sonrisas y su vida concebida junto a mi esposo, me permitieron recargarme de energía y continuar, que este trabajo sirva de motivación para su futuro.

A mis padres por ser la luz y guía de amor infinito e incondicional, a pesar de cualquier adversidad.

A toda mi familia, incluyendo a mis seres queridos que partieron durante la pandemia y quienes fueron mi inspiración para avanzar día a día en la culminación de la ingeniería.

Eguez Cruz, Gabriela Cristina

DEDICATORIA

En primer lugar, este trabajo dedico a Dios porque sin su presencia en mi vida nada de lo que soy y he logrado sería posible.

A mi madre Flor, porque es la mujer más fuerte, valiente, hermosa y cariñosa que conozco y por ser mi razón para seguirme superando.

A mi tío Víctor, por su calidez, sus bromas y su ejemplo de esfuerzo y trabajo honesto por sobre todas las cosas.

Loor Vélez, Lucía Flor

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por permitirme cumplir con todos los requisitos para finalizar esta carrera universitaria ya que con su ayuda y bendición me ha sabido sostener y levantar en todos los momentos difíciles.

Agradezco a mis hijos por ser esa gran motivación y porque me brindaron ese poder incalculable de alcanzar todo lo que me proponga junto a mi esposo.

A mis padres que con su amor, guía y soporte han sembrado lo mejor de ellos en mi y han creado un ser humano capaz con valores y virtudes.

A mi hermano y todos mis familiares que siempre me han dado su palabra de aliento para no decaer y continuar en las metas propuestas.

Finalmente, agradecer al Ejército Ecuatoriano por darme la oportunidad de estudiar en las Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y que, con la guía del Ing. Rubén León, Ing. Alexis Tinoco e Ing. Héctor Moya se ha logrado plasmar el presente trabajo de titulación.

Eguez Cruz, Gabriela Cristina

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios porque sé que me bendijo y me dio la oportunidad de estudiar esta compleja y hermosa carrera, a cada paso que he dado me ha acompañado, me ha cuidado y a pesar de fallar muchas veces Él siempre me ha levantado, no hay más palabras que gracias infinitamente.

Gracias a mi madre Flor por todo su apoyo incondicional, en especial durante los años de universidad, que a pesar de los deslices ella siempre me ha acompañado en las celebraciones e incluso en las noches de desvelo, todo para nunca darme por vencida.

Gracias a mi tío Víctor que a pesar de la distancia siempre se ha preocupado por mí, con sus bromas ha alegrado cualquier momento y sus consejos son como diamantes valiosos que con el tiempo prevalecerán en mi mente y decisiones.

Gracias a mi enamorado David que por creer en mí afianzó la confianza para arriesgarme a tomar retos que permitieron aumentar mis habilidades, además que con su cariño a dado brillo a mis días.

Gracias a mis amigos por su compañía, por brindarme tantos divertidos y emotivos recuerdos que me acompañarán toda la vida.

Finalmente, agradezco especialmente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, los docentes que me formaron a lo largo de mi carrera y sobre todo a los ingenieros Rubén León, Alexis Tinoco y Héctor Moya que han sido los mentores principales para el desarrollo de este trabajo de titulación y han permitido su exitosa culminación.

Loor Vélez, Lucía Flor

TABLA DE CONTENIDOS

ANÁLISIS DE COPYLEAKS.....	2
CERTIFICACIÓN.....	3
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA.....	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
DEDICATORIA.....	6
DEDICATORIA.....	7
AGRADECIMIENTO.....	8
AGRADECIMIENTO.....	9
TABLA DE CONTENIDOS.....	10
Índice de Tablas.....	15
Índice de Figuras.....	16
Resumen.....	19
Abstract.....	20
CAPÍTULO I.....	21
Introducción.....	21
Antecedentes.....	21
Planteamiento del Problema.....	22
Justificación.....	22
Objetivos.....	23
Objetivo General.....	23

	11
Objetivos Específicos	23
Alcance.....	24
Metodología.....	24
CAPITULO II	26
Fundamentación Teórica	26
Espectro radioeléctrico.....	26
División del espectro radioeléctrico	26
Ondas radioeléctricas	26
Guerra electrónica.....	27
Definición	27
Características.....	27
Clasificación.....	28
Sistemas de Soporte Electrónico.....	29
Soporte Electrónico	29
Ventajas	29
Comando y control	30
Componentes COTS.....	30
Red de guerra electrónica.....	30
Nuevos desarrollos en inteligencia de señales y guerra electrónica	31
Arquitectura del Sistema Receptor	34
Receptores de monitoreo	34

	12
Receptor Superheterodino	34
Evolución de receptores digitales	35
Probabilidad de interceptación (POI).....	36
Búsqueda de dirección (DF)	36
Líneas base de búsqueda de dirección	37
Distancia de la línea base.....	37
Requerimientos del Sistema de Búsqueda de Dirección.....	38
Ángulo de arribo (AoA).....	39
CAPITULO III	41
Análisis y descripción de elementos	41
Elementos del sistema de pruebas.....	41
Descripción de elementos.....	42
Plato reflector parabólico.....	42
Antena Log-Periódica (LPDA).....	43
Generador de señales ESG E4438C	44
Trípode base para sujeción de plato parabólico.....	45
Arreglo de 4 antenas Log-periódicas impresas en el laboratorio.....	46
Receptor digital Signal Hound BB60C	48
Switch de RF de 4 puertos (ZSDR - 425)	49
Motor de pasos 86HS8040A4J y driver HY-DIV268N-5A	51
Módulo GPIO USB de 8 canales con entradas analógicas.....	54

	13
Router WiFi Doble Banda AC750	55
Computador	56
Nuc o mini PC.....	57
Base para soporte de antenas	58
Trípode para sujeción del sistema receptor.....	58
Fuente de poder 1761	59
Visual Studio.....	60
VNC Viewer	61
Spike	62
CAPITULO IV.....	64
Diseño e implementación del sistema.....	64
Diseño del esquema de pruebas	64
Diagrama de bloques para obtener el patrón de irradiación	66
Diagrama de bloques de conexión del prototipo transportable.....	67
Diagrama de bloques de funcionamiento del prototipo transportable	68
Implementación del sistema para el patrón de radiación.....	69
Implementación del prototipo transportable	70
Implementación de la función Procesar_Trace del sistema Arturo.....	71
CAPITULO V.....	75
Pruebas y resultados	75
Funcionamiento del Arreglo de antenas.....	75

Pruebas de medición para obtener el patrón de radiación	77
Pruebas de funcionamiento de la interface	90
CAPITULO VI.....	96
Conclusiones y Recomendaciones	96
Conclusiones.....	96
Recomendaciones	98
Trabajos Futuros	99
Acrónimos	101
Referencias	102
Anexos	107

Índice de Tablas

Tabla 1	Características de Antena Log-Periódica (LPDA)	44
Tabla 2	Características de generador de señales ESG E4438C	45
Tabla 3	Características de trípode	46
Tabla 4	Características de arreglo de antenas log-periódicas	47
Tabla 5	Características de receptor digital Signal Hound BB60C	48
Tabla 6	Características de Switch de RF de 4 puertos (ZSDR - 425)	49
Tabla 7	Tabla de verdad del circuito lógico	51
Tabla 8	Motor de pasos 86HS8040A4j	52
Tabla 9	Driver para motor de pasos HY-DIV268N-5A	53
Tabla 10	Driver para motor de pasos HY-DIV268N-5A	54
Tabla 11	Características de Router WiFi doble banda AC750	55
Tabla 12	Características de computador	56
Tabla 13	Fuente de poder 1761	60
Tabla 14	Frecuencias establecidas para obtención de muestras	78

Índice de Figuras

Figura 1	Opacidad de la atmósfera a la radiación electromagnética	26
Figura 2	Vista posterior del módulo OpenVPX	33
Figura 3	Pentek Talon RTX 2684	33
Figura 4	Ejemplo de receptor superheterodino.....	35
Figura 5	Representación de un punto fijo	36
Figura 6	Distancia de línea base	37
Figura 7	Probabilidad de Error Circular (CEP).....	39
Figura 8	Plato reflector parabólico con antena log-periódica	42
Figura 9	Antena log-periódica modelo TDJ-0227DSAN10.....	43
Figura 10	Generador de señales ESG E4438C.....	44
Figura 11	Sistema transmisor, trípode base para sujeción de plato parabólico	45
Figura 12	Antenas Log – periódicas.....	46
Figura 13	Receptor digital Signal Hound BB60C.....	48
Figura 14	Switch de RF de 4 puertos (ZSDR - 425).....	49
Figura 15	Diagrama del control lógico.....	50
Figura 16	Motor de pasos 86HS8040A4j.....	51
Figura 17	Driver para motor de pasos HY-DIV268N-5A.....	52
Figura 18	Módulo GPIO USB de 8 canales con entradas analógicas.....	54
Figura 19	Router WiFi doble banda AC750	55
Figura 20	Computador de referencia	56
Figura 21	Nuc o mini PC.....	57
Figura 22	Base para soporte de antenas.....	58
Figura 23	Trípode para sujeción del sistema receptor	59
Figura 24	Fuente de poder	59

Figura 25 Software Visual Studio	61
Figura 26 Software VNC Viewer.....	61
Figura 27 Software Spike	62
Figura 28 Proceso para obtener el patrón de radiación base para el sistema.....	66
Figura 29 Conexión de los elementos en el receptor del prototipo transportable.....	67
Figura 30 Proceso para analizar señales recibidas en tiempo real.....	68
Figura 31 a) Esquema General, b) Esquema receptor, c) Esquema transmisor	69
Figura 32 a) Conexión de antenas, b) Conexión de equipos	70
Figura 33 Interfaz mejorada del sistema Arturo	72
Figura 34 Bloque de botones del sistema Arturo.....	73
Figura 34 Botones de control de la interfaz del sistema Arturo.....	74
Figura 36 Esquema representativo del patrón de radiación de una antena.....	75
Figura 37 Impresión de antenas.....	76
Figura 38 Verificación y control del funcionamiento de antenas	77
Figura 39 Datos con antenas Log periódicas en polarización vertical sin cubierta	79
Figura 40 Patrón de radiación con una antena Log periódica en polarización vertical sin cubierta	80
Figura 41 Patrón de radiación con una antena Log periódica en polarización vertical con cubierta	80
Figura 42 Patrón de radiación con una antena Log periódica en polarización horizontal sin cubierta.....	81
Figura 43 Patrón de radiación con una antena Log periódica en polarización horizontal con cubierta.....	82
Figura 44 Patrón de radiación con antena Log periódica en polarización vertical con cubierta en todas las frecuencias establecidas para tomar las muestras.	82

Figura 45 Patrón de radiación con cuatro antenas Log periódicas en polarización vertical sin cubierta en 500 MHz	83
Figura 46 Patrón de radiación con cuatro antenas Log periódicas en polarización vertical sin cubierta en 1000 MHz	84
Figura 47 Patrón de radiación con cuatro antenas Log periódicas en polarización vertical sin cubierta en 1750 MHz	84
Figura 48 Definición de cuadrantes de arribo de la señal	85
Figura 49 Comparación de los valores de potencias de cada antena. a) antena A1 y A2, b) antena A2 y A3, c) antena A3 y A4, d) antena A4 y A1.....	86
Figura 50 Relación para obtener la ventana de potencia en la antena 1	88
Figura 51 Obtención de los valores de potencia de cada antena	89
Figura 52 Señal en la banda de frecuencia de FM	90
Figura 53 Señal en la banda de frecuencia de Radiotaxis	91
Figura 54 Señal en la banda de frecuencia de VHF	91
Figura 55 Señal en la banda de frecuencia de UHF	92
Figura 56 Señal en la frecuencia de 111 MHz	93
Figura 57 Señal en la frecuencia de 400 MHz	93
Figura 58 Señal en la frecuencia de 400 MHz con umbrales de inicio y fin de la portadora	94
Figura 59 Señal en la frecuencia de 400 MHz con vector ordenado de menor a mayor valor.....	94

Resumen

En el proyecto se desarrolló un prototipo transportable de un sistema de monitoreo de señales radioeléctricas con alta Probabilidad de Interceptación - POI (superior al 90%) en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz y localización del sector aproximado del ángulo de arribo de las fuentes de señales, utilizando el sistema Arturo del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica (AGRUCOMGE) y dispositivos *Original Equipment Manufacturer* (OEM) con arquitectura de recepción avanzada en fase I y cuadratura Q, que permite sustituir las actuales estructuras superheterodinas cuya POI es extremadamente baja y así incrementar las capacidades operativas de las Fuerzas Armadas. Bajo este contexto se ejecutó el análisis del estado del arte tomando como base los trabajos de (Andrade & Machado, 2019) (Calderón & Reinoso, 2019) (Contreras, 2021) (Morales, 2020); también se realizó el desarrollo de técnicas y algoritmos que permitan identificar automáticamente las frecuencias de operación y ubicación aproximada del sector del ángulo de arribo de las señales radioeléctricas de la banda de interés; así como la elaboración del arreglo circular de antenas en base a (Morales, 2020) (Oñate, 2020) y obtención de los resultados orientados a detectar, identificar, reconocer, “trackear” y discriminar objetivos radioeléctricos de interés. Finalmente, la tecnología desarrollada fue evaluada experimentalmente con los recursos existentes en el CICTE, utilizando sistemas prototipo en diversas fases de implementación.

Palabras Clave:

- **SISTEMA TRANSPORTABLE**
- **ESPECTRO RADIOELÉCTRICO**
- **ÁNGULO DE ARRIBO**
- **ANTENAS**

Abstract

The project developed a transportable prototype of a radio signal monitoring system with a high Interception Probability - POI (greater than 90%) in the band from 100 KHz to 6.0 GHz and location of the approximate sector of the arrival angle of the sources of signals, using the Arturo system of the Grouping of Communications and Electronic Warfare (AGRUCOMGE) and Original Equipment Manufacturer (OEM) devices with advanced reception architecture in phase I and quadrature Q, which allows to replace the current superheterodyne structures whose POI is extremely low and thus be able to increase the operational capabilities of the Armed Forces. Under this context, the study and analysis of the state of the art based on the work of (Andrade & Machado, 2019) (Calderón & Reinoso, 2019) (Contreras, 2021) (Morales, 2020), was also carried out the development of techniques and algorithms that allow automatically identifying the operating frequencies and approximate location of the sector of the angle of arrival of the radioelectric signals of the band of interest; as well as the elaboration of the circular array of antennas based on (Morales, 2020) (Oñate, 2020) and obtaining the results aimed at detecting, identifying, recognizing, "tracking" and discriminating radioelectric targets of interest. Finally, the technology developed was experimentally evaluated with existing resources at CICTE, using prototype systems in various phases of implementation.

Keywords:

- TRANSPORTABLE SYSTEM
- RADIOELECTRIC SPECTRUM
- ANGLE OF ARRIVAL
- ANTENNAS

CAPÍTULO I

Introducción

El presente capítulo describe los principales factores para tener una visión general del trabajo de investigación titulado: “Desarrollo del prototipo de un sistema transportable de monitoreo del espectro radioeléctrico y localización aproximada del sector del ángulo de arribo de las fuentes de señales en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz, programable”.

Antecedentes

Un factor importante dentro de las operaciones militares ha sido la Guerra Electrónica, pues su uso tiene la finalidad de preservar y controlar la soberanía de la nación además de degradar las comunicaciones y sistemas de armas del adversario, para reducir su capacidad de combate.

La Universidad de Fuerzas Armadas ESPE y el Ejército Ecuatoriano fomentan su vinculación inherente, estableciendo proyectos de interés y beneficio mutuo coordinando las actividades de vinculación e investigación, así como el desarrollo e innovación de tecnología para la defensa nacional. El Centro de Investigación de Aplicaciones Militares (CICTE) atiende de forma permanente a las necesidades de las Fuerzas Armadas, desarrollando proyectos que permitan a las unidades operativas cumplir con las misiones asignadas. Por lo cual, el presente trabajo toma en consideración los requerimientos del AGRUCOMGE (Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica) y desarrolla técnicas y procedimientos para recuperar los sistemas existentes e incrementar nuevas funcionalidades.

Por medio del CICTE, la ESPE en 1996 a través de un contrato con la Honorable Junta de Defensa, se desarrolló un sistema de guerra electrónica que cuenta con el software Arturo como base para el prototipo de un sistema transportable de monitoreo del espectro radioeléctrico y localización aproximada del ángulo de arribo de las fuentes de señales.

Planteamiento del Problema

Los Sistemas de Guerra Electrónica, disponibles en el mercado, son un conjunto de equipos y procedimientos sofisticados que controlan el espectro electromagnético para el apoyo de operaciones militares, pero estos tienen costos de inversión y operación altos y por lo general son sistemas de producción cerrados que no permiten la transferencia tecnológica.

El AGRUCOMGE dentro de sus operaciones militares en el área de las comunicaciones tiene la necesidad operativa y táctica de identificar y monitorear las señales radioeléctricas emitidas en el territorio nacional, siendo la tecnología electrónica una pieza clave en sus maniobras, pues la explotación y control del espectro electromagnético impide que el enemigo pueda hacer uso del mismo en las acciones que se conducen en el campo de batalla. Siendo el espectro radioeléctrico un recurso estratégico del Estado, es una obligación el control de su uso y el monitoreo de señales o de posibles amenazas que pongan en riesgo la seguridad de la ciudadanía y soberanía territorial, para lo cual en este proyecto se realizó el estudio y análisis de los métodos de detección de señales de RF para el desarrollo del prototipo propuesto.

Justificación

El presente proyecto es parte del programa que ha recuperado progresivamente los sistemas de guerra electrónica existentes en el AGRUCOMGE (proyecto de

investigación eSIGINT), contribuyendo con el desarrollo del prototipo transportable de un nuevo sistema del monitoreo de las fuentes de señales radioeléctricas con alta POI (superior al 90%) para sistemas de seguridad y vigilancia, con tecnología desarrollada en los laboratorios del CICTE que cumplen con las etapas de I+D+i (Investigar, Desarrollar e Innovar).

Los altos costos de los equipos existentes en la industria militar, falta de soporte técnico, así como también la deficiencia en la transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción, pueden ser sustituidos mediante el desarrollo de sistemas con base en la investigación aplicada e ingeniería inversa que puedan solventar estos inconvenientes con costos reducidos y con la garantía de ejecutar transferencia tecnológica real dentro de los procesos de implementación.

Finalmente, el prototipo desarrollado está dotado de técnicas y algoritmos para un sistema transportable de monitoreo del espectro radioeléctrico hasta 6.0 GHz, que genera automáticamente el listado de frecuencias detectadas en la banda de interés, así como el desarrollo del arreglo circular de antenas para determinar el sector aproximado de arribo de las señales radioeléctricas detectadas.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un prototipo de un sistema transportable de monitoreo del espectro radioeléctrico y localización aproximada del ángulo de arribo de las fuentes de señales en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz, programable.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos se resumen de la siguiente forma:

- Realizar un estudio teórico y analítico del estado del arte en relación al monitoreo de las fuentes de señales radioeléctricas, así como la determinación aproximada del sector de arribo de las señales radioeléctricas.
- Utilizar técnicas avanzadas de procesamiento digital para identificar automáticamente las frecuencias de operación y ubicación aproximada del sector de arribo de las señales radioeléctricas de interés.
- Desarrollar el respectivo arreglo circular de antenas.
- Evaluar los algoritmos y procesos desarrollados para el prototipo de monitoreo de las señales radioeléctricas.
- Reducir peso, volumen y precio del prototipo del sistema transportable.
- Implementar el sistema transportable de monitoreo en base a la filosofía de empleo del sistema Arturo que dispone el AGRUCOMGE y verificar su funcionamiento realizando pruebas de operatividad.

Alcance

El presente proyecto es parte del programa que ha recuperado progresivamente los sistemas de guerra electrónica existentes en el AGRUCOMGE (proyecto de investigación eSIGINT), contribuyendo con el desarrollo del prototipo transportable de un nuevo sistema de monitoreo de las fuentes de señales radioeléctricas para sistemas de seguridad y vigilancia, con tecnología desarrollada en los laboratorios del CICTE que cumplen con las etapas de I+D+i (Investigar, Desarrollar e Innovar).

Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, dentro del campo de investigación se hará uso de una metodología experimental, basada en el uso de

herramientas de hardware y software computacionales OEM, así como también en teorías de origen matemático, estadístico, predictivo y probabilístico.

Dentro del sentido organizacional se hará uso de una metodología participativa, por medio de la generación de redes de conocimiento y foros; ejecutando actividades de investigación y desarrollo en conjunto entre instituciones involucradas como por ejemplo el AGRUCOMGE, combinando entre sesiones presenciales y/o virtuales. Además, se establecerá un cronograma de actividades dentro de las diferentes fases del proyecto; iniciando con la obtención de información, investigación, luego pasando por el desarrollo, experimentación, pruebas de prototipos y otros. El mecanismo de trabajo grupal será esencial dentro de todos los procesos anteriormente descritos. La metodología de trabajo permitirá a los participantes intercambiar experiencias relevantes sobre el proyecto en ejecución y que puedan compartir lecciones aprendidas en las diferentes fases de investigación, además presentar las dificultades encontradas y proponer las posibles soluciones a casos planteados.

En este capítulo se plantea tanto los antecedentes como el problema a resolver, además de los objetivos del trabajo de investigación y la metodología a utilizar para realizarlo.

En el siguiente capítulo se resume la investigación realizada respecto al estado del arte que fundamenta el presente trabajo de investigación en el área de Guerra Electrónica.

CAPITULO II

Fundamentación Teórica

Espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es un subconjunto del espectro electromagnético que posibilita las radiocomunicaciones y de acuerdo al reglamento de radiocomunicaciones de la UIT-R corresponde al conjunto de ondas de frecuencias por debajo de 3000 GHz y se propagan sin la ayuda de una guía artificial. (Ordoñez, 2012)

El espectro radioeléctrico es un recurso natural escaso que no puede guardarse para futuras generaciones, pero sí es renovable y puede ser usado eficientemente de acuerdo a las necesidades de cobertura en telecomunicaciones. (Álvarez, 2016)

División del espectro radioeléctrico

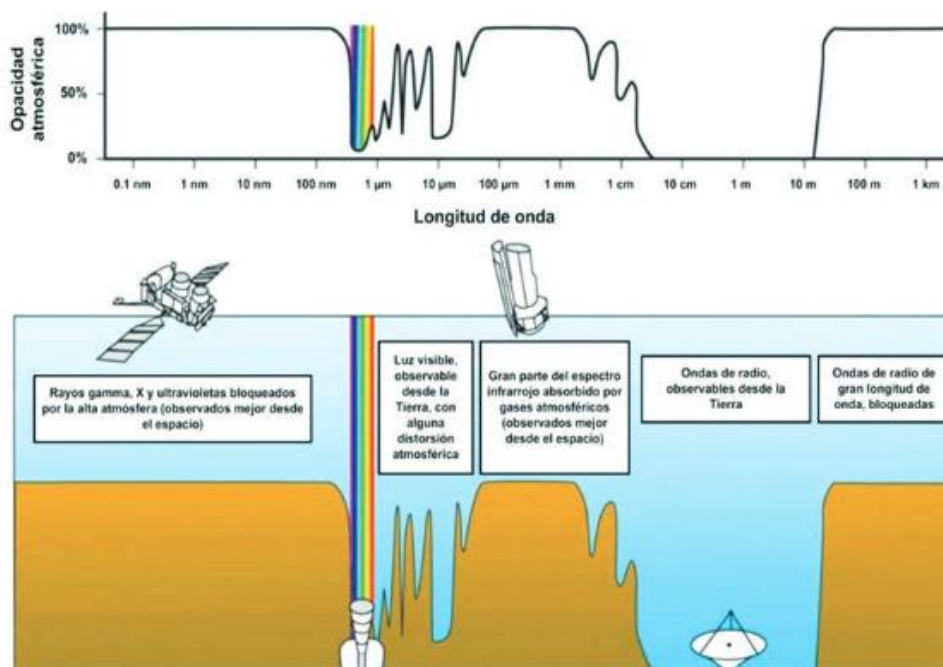
Para fines militares el espectro radioeléctrico está dividido en las siguientes bandas de frecuencia HF (3 – 30 MHz), VHF (30 – 300 MHz), UHF (300 – 3000 MHz) y banda SHF (sobre los 3000 MHz). (Ordoñez, 2012)

Ondas radioeléctricas

Permiten la propagación de señales y tienen la posibilidad de facilitar las comunicaciones espaciales cuando atraviesan la atmósfera originando las radiocomunicaciones, como se observa en la Figura 1. (Ordoñez, 2012)

Figura 1

Opacidad de la atmósfera a la radiación electromagnética



Nota: Tomado de (Ordoñez, 2012, pág. 24).

Guerra electrónica

Definición

La guerra electrónica puede ser considerada como el “arte de lo invisible” debido a que ocupa las partes invisibles del espectro electromagnético para enviar señales. Dentro de sus roles, la guerra electrónica consiste en medidas de protección diseñadas para mantener el acceso al espectro, medidas ofensivas que degradan o niegan el acceso del adversario al espectro y medidas de apoyo que permiten identificar y almacenar emisiones para desarrollar planes para negar el acceso al enemigo. (Smith, Russian Electronic Warfare, 2020)

Características

- Permite disminuir las capacidades de un adversario.

- Permite interrumpir las comunicaciones de las fuerzas enemigas para la consecución de los objetivos planteados.
- Interrumpe o degrada los sistemas de navegación utilizados por las fuerzas contrarias para ubicar o identificar objetivos.
- Puede incrementar el potencial de combate de las fuerzas terrestres y con ello disminuir las pérdidas terrestres, aéreas y navales de fuerzas propias.
- Continuo interés en desarrollar las capacidades del personal militar para utilizar el espectro electromagnético. (Smith, Russian Electronic Warfare, 2020)

Clasificación

La taxonomía moderna de la guerra electrónica se divide en tres áreas fundamentales: (Poisel, Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems, 2014)

- Soporte Electrónico: conjunto de procesos para interceptar las transmisiones en el campo de batalla con la finalidad de generar información de combate y permite determinar objetivos para el ataque electrónico. (Poisel, Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems, 2014)
- Ataque Electrónico: son todas las acciones para insertar señales falsas en equipos destinados a recibir las transmisiones. (Poisel, Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems, 2014)
- Protección Electrónica: son las acciones para proteger a las fuerzas propias de los ataques que realizan las fuerzas opuestas por medio del soporte y el ataque electrónico. (Poisel, Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems, 2014)

El tema al cual se enfoca la presente investigación es el soporte electrónico, particularmente, los receptores y sistemas de recepción empleados para monitorear sistemas de comunicación adversarios con alta probabilidad de interceptación (POI).

Sistemas de Soporte Electrónico

Soporte Electrónico

Acción que se toma para buscar, interceptar, localizar y analizar las radiaciones electromagnéticas con el fin de explotarlos en apoyo a las operaciones militares. Suele denominarse también como combate de información. El inconveniente presentado con la vigilancia electrónica es el reconocimiento de señales en un entorno multiseñal extremadamente complejo. En entornos de radiofrecuencia casi todos los canales permanecen ocupados y el receptor de adquisición de señales debe buscar dentro de una banda de frecuencia amplia, a gran velocidad y alta sensibilidad. El sistema de contramedidas electrónicas debe ubicar cada frecuencia de una manera rápida para que la interferencia pueda ser aplicada por un tiempo suficiente, de tal manera que pueda causar la pérdida del mensaje de inteligencia. (Poisel, *Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems*, 2014)

Las tecnologías electrónicas continúan expandiéndose impulsadas por la necesidad de recolectar y procesar mayores cantidades de información. Los sistemas militares de guerra electrónica comenzaron en la banda de HF y luego alcanzaron la banda de VHF y parte de la UHF, pero con las modernas formas de comunicación como los teléfonos celulares, dispositivos móviles y diferentes capacidades de red, el rango de frecuencia se ha expandido hasta 5 GHz y más. (Poisel, *Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems*, 2014)

Ventajas

- Detecta sistemas enemigos siendo completamente pasivo.
- No tiene señales de sensor que un adversario pueda detectar.

- Utilizan señales en varias bandas empleadas por otras fuerzas del ejército para no comprometer el sistema.

Comando y control

Comando significa todas las medidas necesarias para dirigir las acciones y control significa todas las medidas necesarias para asegurar que las acciones dirigidas sean realizadas. (Poisel, *Electronic Warfare Target Location Methods*, 2012)

Un líder militar necesita tener enlaces de comunicaciones para transmitir las direcciones y órdenes a sus fuerzas donde sin duda estas acciones pueden marcar la diferencia si se tiene la desventaja de tener fuerzas más pequeñas en número que las fuerzas enemigas. En la guerra moderna es fundamental poder controlar eficazmente el espectro electromagnético. (Poisel, *Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems*, 2014)

Componentes COTS

Commercial of the shelf (COTS) components, son los componentes comerciales genéricos listos para usar y que son tomados de los mercados de telecomunicaciones y telefonía celular como las tarjetas FPGA y procesadores de señales digitales DSP. Al combinar los avances en los convertidores análogo digital para señales pasa banda, tanto procesadores como receptores digitales pueden detectar una mayor variedad de señales de radiofrecuencia desde radares hasta teléfonos móviles, satelitales y walkie-talkies. (Ames, 2005)

Red de guerra electrónica

El enfoque actual exige variedad de habilidades en guerra electrónica que pueden iniciar con detectar una fuente de radar hasta la identificación del origen para

poder rastrearla y localizarla. Existe un proceso llamado “cadena de muerte” o F2T2EA que es un acrónimo de seis etapas de encontrar, arreglar, rastrear, apuntar involucrar y evaluar. La tecnología de receptores digitales tiene como objetivo reducir todo este ciclo a menos de 10 minutos para alcanzar objetivos emergentes. (Ames, 2005)

Nuevos desarrollos en inteligencia de señales y guerra electrónica

Existen muchos desarrollos en los últimos años debido a la mayor potencia, hardware con gran ancho de banda instantánea y al software como aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI). Los radios presentan hardware reconfigurable y de menor costo con la seguridad que ha incrementado. (Pentek, 2021)

Mediante el uso de aprendizaje automático los sistemas de guerra electrónica pueden ingresar en un entorno sin conocimiento de las capacidades del adversario y comprender el escenario, por medio de una acción para evaluar la respuesta eficaz que brinde el enemigo. La inteligencia artificial y el aprendizaje automático son empleados para impactar en los sistemas de alerta temprana. Con IA y ML, las máquinas pueden emplear sus capacidades como la señal de reconocimiento que les permite aprender de cada conflicto sin la necesidad de la interacción humana generando un curso de acción de manera rápida. (Friedrich, 2021)

La forma más común de deshabilitar las comunicaciones del enemigo es obtener una ventaja en el espectro radioeléctrico y con la ayuda de la inteligencia artificial se puede analizar los datos entrantes de forma rápida y precisa. Estas capacidades permiten acelerar la toma de decisiones por parte de los ejércitos. (Friedrich, 2021)

A medida que las amenazas crecen, las contramedidas deben evolucionar para evadir al oponente, apareciendo los conceptos de ataque o técnicas de jamming.

Como ejemplo se tiene cuando un radar que envía un pulso que se refleje en los objetos del entorno y regrese al receptor del radar. Si se envía un pulso a un F-35 que está en pleno vuelo, al rebotar la energía, un bloqueador de ruido envía ruido de RF de banda ancha, el receptor observa la gran cantidad de energía de ruido y el resultado indica que el objetivo se mueve en otra dirección y el radar pierde la pista. (Friedrich, 2021)

Otro método de interferencia se conoce como frecuencia de memoria de radio digital, donde se recibe la señal de RF de un radar, se digitaliza y se crea nuevas señales de RF que con un procesamiento rápido se puede crear muchos pulsos u objetivos falsos engañando al radar al mostrar miles de objetivos y no solo uno. Es así, que el aprendizaje automático permite aprender de cada conflicto y mejorar las contramedidas para mantenerse a la vanguardia de las amenazas. (Friedrich, 2021)

Las técnicas modernas de aprendizaje automática permiten aumentar la capacidad cognitiva incluyendo reconocimiento de objetivos, inteligencia en toma de decisiones y aprendizaje autónomo, de acuerdo a los sistemas con los siguientes pasos: (Friedrich, 2021)

- La amenaza se da a conocer.
- Los parámetros de identificación se agregan a una base de datos.
- Si el sistema vuelve a ver esa amenaza, responderá con las contramedidas apropiadas.

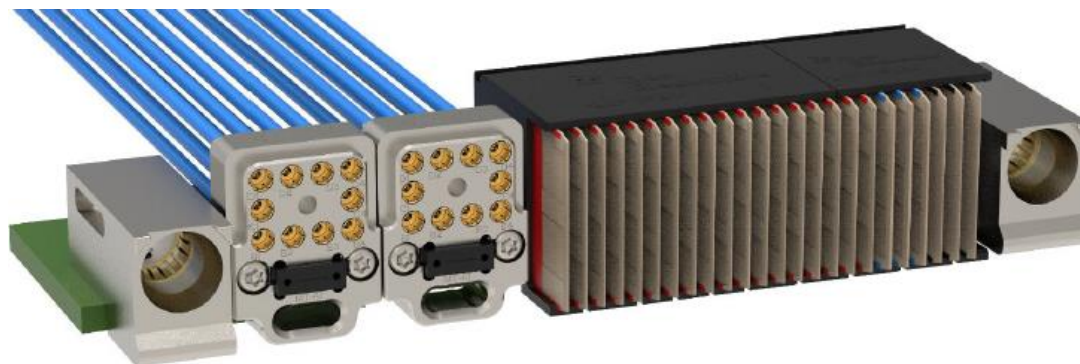
La Arquitectura de Sistemas Abiertos de Sensores (SOSA) está desarrollando estándares abiertos para el diseño y construcción de hardware, software y componentes de firmware de nuevos sistemas electrónicos militares que permitan la interoperabilidad

de proveedores, costos bajos, fáciles actualizaciones tecnológicas y vida útil más larga. (Hosking, 2021)

Un ejemplo de este desarrollo es OpenVPX, Figura 2, que permite la asignación de señales con estándares de interfaz, direcciones y voltajes.

Figura 2

Vista posterior del módulo OpenVPX



Nota: La figura muestra el módulo con dos conectores de plano posterior, cada uno con 10 señales de RF coaxiales y 24 carriles ópticos. Tomado de (Hosking, 2021, pág. 13).

Otro ejemplo es el RTX 2684, Figura 3, que combina la potencia de un sistema de grabación con un sintonizador RF de 26 GHz y software de escaneo de señal inteligente. Está diseñado para entornos extremos y adecuado para operaciones de inteligencia de señales (SIGINT), inteligencia de comunicaciones (COMINT) e inteligencia telemétrica (ELINT). El equipo ofrece excelente rango dinámico y proporciona zoom de frecuencia para grabar la señal en anchos de banda de 500, 250 o 125 MHz. (Pentek I. , 2021)

Figura 3

Pentek Talon RTX 2684



Nota: Tomado de (Hosking, 2021).

Arquitectura del Sistema Receptor

La arquitectura ampliamente utilizada en los sistemas de guerra electrónica es la estructura superheterodina.

Receptores de monitoreo

Son empleados por sistemas de soporte electrónico para recibir o buscar señales de interés. Existen varios tipos como: sintonizado, superheterodino y digital previamente analizados en (Andrade & Machado, 2019).

Receptor Superheterodino

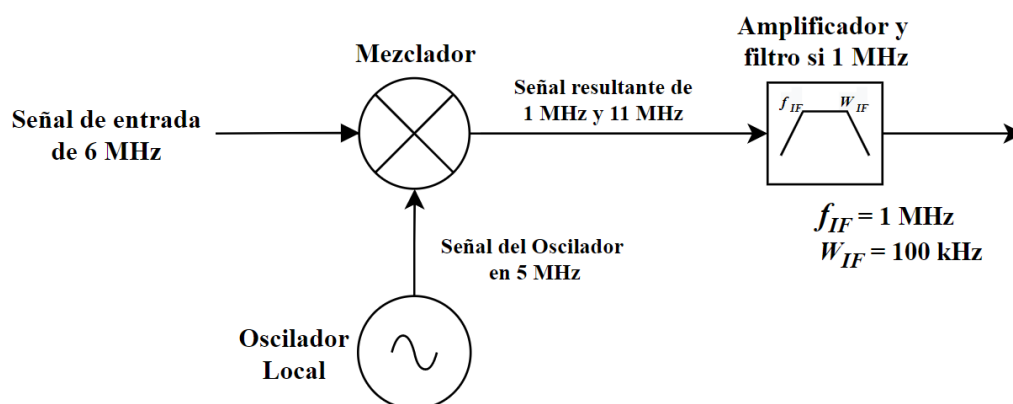
En la Figura 4. se muestra las señales de RF que ingresan al receptor desde la antena, las mismas que primero se amplifican y se filtran. Luego se proceden a mezclar con la señal de un oscilador local (LO) en el mezclador para convertirlos a una frecuencia generalmente más baja. Las señales en todas las frecuencias son convertidas a una frecuencia intermedia para una mayor amplificación y filtrado, el

oscilador local proporciona la frecuencia de mezcla adecuada. (Poisel, Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems, 2014)

La señal de frecuencia intermedia se amplifica y se filtra para eliminar términos no deseados. Luego se procede a detectar la señal de frecuencia intermedia, de acuerdo al tipo de modulación, las señales aparecen a la salida del mezclador y posterior a esto se inicia el procesamiento digital para extraer la información (Poisel, Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems, 2014).

Figura 4

Ejemplo de receptor superheterodino



Nota: Tomado de (Poisel, 2014, pág. 9) .

Evolución de receptores digitales

La continua evolución de los receptores digitales impulsa una nueva generación de guerra electrónica para detectar y localizar radares enemigos y señales de radio, por ejemplo, para cambiarlas y utilizarlas en su contra. El trabajo de hoy en día resulta más complicado pues los insurgentes y terroristas usan equipos de alta tecnología como teléfonos comerciales. La evolución es un tanto lenta pero hoy en día está a

disponibilidad receptores digitales de alto desempeño y bajo costo como el utilizado en (Calderón, y otros, 2021).

En la guerra electrónica ofensiva aún existen retos para lograr sistemas automatizados para cumplir la misión con menos personas, por ejemplo, un operador o piloto que tenga consciencia de la situación en su teatro de operación o monitor de cabina y un tripulante que opere los sistemas de guerra electrónica. (Ames, 2005)

Probabilidad de interceptación (POI)

Es la probabilidad de coincidencia de tiempo de dos o más “funciones de ventana” paramétricas, al realizar un barrido paso a paso de receptores y emisores de frecuencia. (Calderón & Reinoso, 2019)

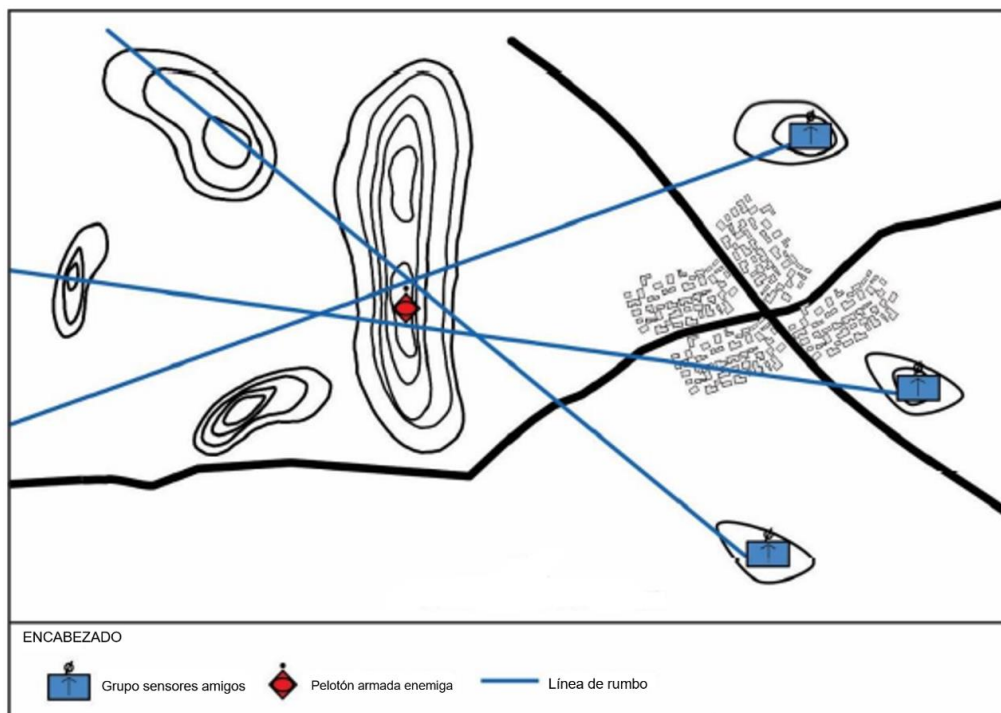
Búsqueda de dirección (DF)

Es el empleo de recursos para detectar transmisiones, recopilar información y triangular la ubicación de los emisores de interés de una manera específica. El DF proporciona: (Headquarters, 2019)

- Un único azimut aproximado proveniente de un sensor de fuerzas propias.
- Un corte proveniente de dos azimuts aproximados que pueden proporcionar la ubicación general de un transmisor.
- Un punto fijo proveniente de tres o más azimuts aproximados que pueden determinar la ubicación de un transmisor enemigo mediante el método de triangulación, gráficamente se puede ver en la Figura 5.

Figura 5

Representación de un punto fijo



Nota: Fija una ubicación más precisa. Tomado de (Headquarters, 2019, págs. 5-4)

Líneas base de búsqueda de dirección

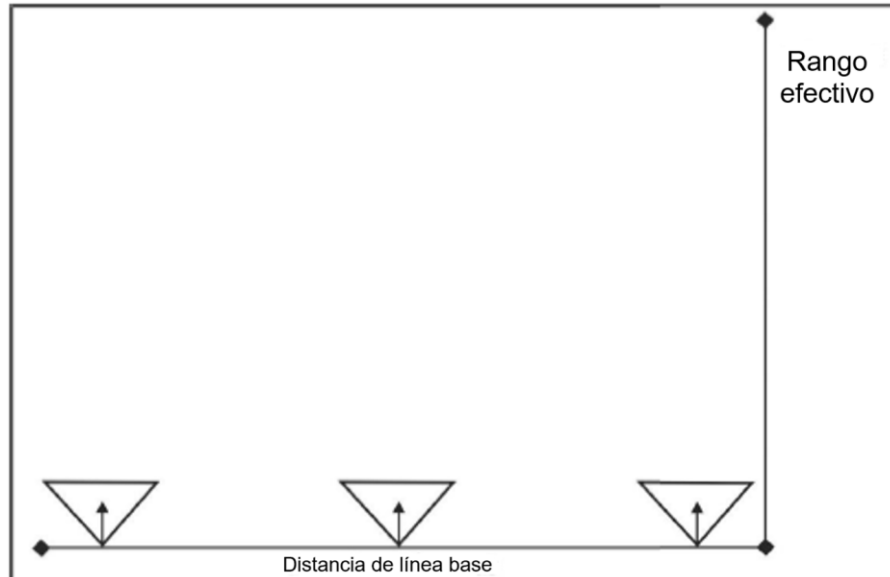
Es una línea o eje imaginario a lo largo del cual se despliega el equipo de radiogoniometría de tal forma que se puedan obtener buenos ángulos de orientación para la triangulación dentro del objetivo. Siendo la triangulación la intersección de varios rumbos en el área del objetivo. (Headquarters, 2019)

Distancia de la línea base

Es la distancia en línea recta que separa los dos sitios DF más externos, se observa en la Figura 6. La profundidad para localizar las antenas transmisoras debe ser la distancia total de la línea base.

Figura 6

Distancia de línea base



Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, págs. 5-6)

Requerimientos del Sistema de Búsqueda de Dirección

Los principales requerimientos a tomar en cuenta son: (Headquarters, 2019)

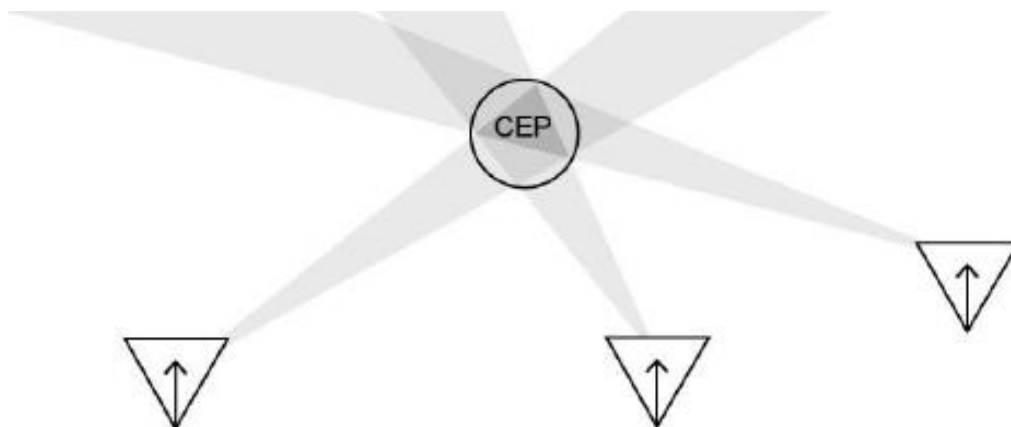
- Exactitud
- Sensibilidad
- Alta velocidad de escaneo
- Inmunidad a señales disruptivas
- Banda de operación

Sin embargo, estos requerimientos se pueden ver afectados por efectos del clima y del terreno, se considera que cuanto más lejos está el receptor del transmisor, mayor será el error del ángulo de interceptación. Es así que surge el concepto de probabilidad de error circular (CEP), dado que la ubicación del transmisor no puede ser

segura, se dibuja un círculo con un radio que cubre todos los puntos de la triangulación como en la Figura 7. (Headquarters, 2019)

Figura 7

Probabilidad de Error Circular (CEP)



Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, págs. 5-7)

Ángulo de arribo (AoA)

Es la estimación de la dirección de arribo o encontrar el posible ángulo en el cual incide una señal electromagnética sobre un arreglo de antenas. Esta estimación permite localizar o rastrear fuentes que emiten señales de interés dentro de aplicaciones civiles o militares. (Aguirre, Acevedo, & Gomez, 2019)

Para realizar esta estimación se tiene diversas técnicas o métodos con gran resolución que han sido desarrolladas y estudiadas en (Andrade & Machado, 2019). Para el presente proyecto se utilizará la antena de banda ancha log-periódica desarrollada en (Morales, 2020) para el desarrollo de un arreglo circular de cuatro antenas.

En este capítulo se ha sintetizado la fundamentación teórica respecto al uso del espectro electromagnético en la guerra electrónica y los nuevos desarrollos de receptores de monitoreo que es la base del enfoque para esta investigación.

En el siguiente capítulo se puede ver todos los materiales que se usaron en el prototipo, con su respectiva descripción y características para una fácil comprensión u obtención de estos, para la mejora del mismo en futuros trabajos.

CAPITULO III

Análisis y descripción de elementos

En este capítulo se desarrolla el diseño de un prototipo transportable de un sistema de monitoreo de señales radioeléctricas con alta Probabilidad de Interceptación - POI (superior al 90%) para la banda de 100 KHz a 6.0 GHz y localización del sector aproximado del ángulo de arribo de las fuentes de señales en la banda de interés.

Para esto se utiliza el sistema Arturo del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica (AGRUCOMGE) y dispositivos *Original Equipment Manufacturer* (OEM) con un receptor cuya arquitectura digital permita monitorear simultáneamente un ancho de banda específico del espectro radioeléctrico.

Se toma como referencias los trabajos de titulación desarrollados previamente como: “Desarrollo de un sistema de DF para la banda de 80 MHz a 2 GHz” (Andrade & Machado, 2019), “Desarrollo de un Sistema de Monitorización del Espectro Radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160 MHz para la banda de 100 KHz a 20 GHz, utilizando el receptor digital SM200B (Contreras, 2021) y “Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas del tipo Log-periódicas impresas para la banda de 2.4 GHz y 5.8 GHz” (Morales, 2020).

Elementos del sistema de pruebas

- Plato reflector parabólico.
- Antena Log-periódica.
- Generador de señales
- Trípode base para sujeción de plato parabólico.
- Arreglo de 4 antenas Log-periódicas construidas en el laboratorio.

- Receptor digital Signal Hound BB60C
- Switch de RF de 4 puertos (ZSDR - 425)
- Motor de pasos y driver
- Módulo GPIO USB de 8 canales con entradas analógicas
- Router WiFi Doble Banda AC750
- Computador
- Nuc o mini PC
- Base para soporte de antenas
- Trípode para sujeción del sistema receptor
- Fuente de poder
- Visual Studio
- VNC Viewer
- Spike

Descripción de elementos

Plato reflector parabólico

Permite concentrar una señal electromagnética en una dirección deseada, el alimentador se ubica en el foco y está formado por la antena log-periódica, en este caso, la misma que emite la energía hacia el plato reflector parabólico. (Fley, 2014) El plato reflector y el foco usado para el presente trabajo se observa en la Figura 8.

Figura 8

Plato reflector parabólico con antena log-periódica



Antena Log-Periódica (LPDA)

Figura 9

Antena log-periódica modelo TDJ-0227DSAN10



La impedancia de la antena depende de varios factores como: frecuencia de operación, estructura geométrica de la antena, método de excitación y proximidad de objetos cercanos. (Zamora, 2012) La antena usada se observa en la Figura 9.

A continuación, en la Tabla 1. se detalla las principales características:

Tabla 1*Características de Antena Log-Periódica (LPDA)*

Características	Detalle
Modelo	TDJ-0727DSAN10
Impedancia de entrada	50 y 200 ohm
Ganancia	7.1 a 12 dBi
Máxima transferencia de potencia	En medio radioeléctrico
VSWR	≤ 1.5
Polarización	Horizontal y vertical
Constantes dieléctricas	$2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$

Nota. Recuperado de (Contreras, 2021)

Generador de señales ESG E4438C

Figura 10*Generador de señales ESG E4438C*

Presenta capacidades para probar sistemas de comunicaciones analógicos y digitales, permite realizar varias configuraciones para ejecutar variedad de pruebas, el equipo usado se observa en la Figura 10 y se destaca las siguientes características en la Tabla 2: (Agilent, 2019)

Tabla 2*Características de generador de señales ESG E4438C*

Características	Detalle
Rango de frecuencia	250 kHz a 1, 2, 3, 4 o 6 GHz
Frecuencia mínima	100 kHz
Resolución de frecuencia	0.01 Hz
Capacidad de modulación digital	ASK, PSK, QAM, FSK, MSK
Estándares	WLAN, Wi-MAX, W-CDMA, CDMA 2000, DVB, GSM
Potencia de salida	+17 dBm
Modulación ancho de banda	160 MHz
Interfaz de comunicación	10BaseT, LAN, GPIB

Nota. Recuperado de (Agilent, 2019)

Trípode base para sujeción de plato parabólico.

Figura 11

Sistema transmisor, trípode base para sujeción de plato parabólico



Para la instalación de un trípode se debe tener en cuenta no solo el peso que puede soportar, sino también el lugar, el viento y demás consideraciones que pueden estar en el ambiente. Estas condiciones respecto al viento pueden ser las detalladas en la Tabla 3 y en la Figura 11 se observa el que se usó en este trabajo.

Tabla 3

Características de trípode

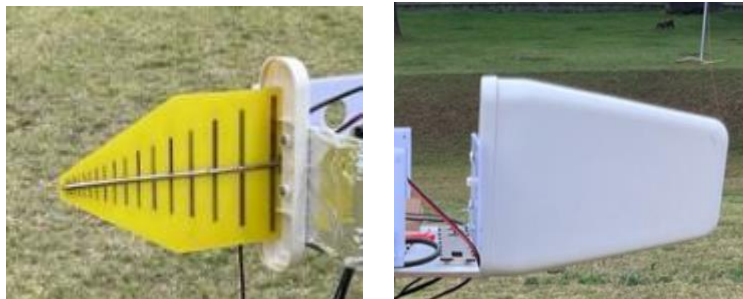
Características	Km/h	Condición
Humo ascendente vertical	<1	Seguro
Dirección de viento por humo	1 - 6	Seguro
Viento observado en las hojas	7 – 12	Seguro
Hojas y ramas en movimiento	13 – 18	Usar con precaución
Polvo y movimiento de ramas	19 – 26	Usar con precaución
Influencia de árboles pequeños	27 – 35	Peligroso
Grandes ramas y alambres en movimiento	36 – 44	Peligroso
Árboles enteros en movimiento	45 - 55	Peligroso

Nota. Recuperado de (BlueSky Mast, 2010, pág. 7)

Arreglo de 4 antenas Log-periódicas impresas en el laboratorio.

Figura 12

Antenas Log – periódicas



El diseño de estas antenas fue tomado como referencia del trabajo de titulación de “Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas del tipo log-periódicas impresa para la banda de 2.4 GHz y 5.8 GHz” (Morales, 2020) y se la puede observar a una en la Figura 12.

El circuito impreso se realiza en una placa de sustrato no conductor de dos caras llamado PCB que permite la conexión de los elementos dispuestos en ambos lados del sustrato (Morales, 2020), siendo sus características de diseño las listadas en la Tabla 4:

Tabla 4

Características de arreglo de antenas log-periódicas

Características	Detalle
Banda de operación	900 MHz a 5.8 GHz
Ganancia	6 dBi
Impedancia de entrada	50 ohmios
VSWR	<2
Material de construcción	FR4 (Resina epoxi/fibra de vidrio, $\epsilon_r=4.23$, $\tan \delta=0.06$)
Espesura del sustrato	1.4 mm
Espesura del cobre	1 Oz/ft ²

Nota. Recuperado de (Morales, 2020, pág. 24)

Receptor digital Signal Hound BB60C

Figura 13

Receptor digital Signal Hound BB60C



Es un analizador de espectro de RF en tiempo real. Sintoniza de 9 kHz a 6 GHz con ancho de banda instantáneo de 27 MHz y recopila 80 millones de muestras por segundo (40 millones por la componente I y 40 millones por la componente Q), permite la transmisión de datos al computador por medio de un puerto USB 3.0 a 140 MB/s, se lo puede observar en la Figura 13 y sus características principales, se listan las siguientes en la Tabla 5:

Tabla 5

Características de receptor digital Signal Hound BB60C

Características	Detalle
Rango de frecuencias	9 kHz a 6 GHz
Velocidad de barrido	24 GHz/s (≥ 10 kHz RBW)
Rango dinámico	-158 dBm a +10 dBm
Ancho de banda de resolución disponible	10 Hz a 10MHz
Alimentación	USB (No necesita fuente externa)
Procesamiento de señales	En PC

Datos IF digitalizados	A 80 millones de muestras por segundo
Ancho de banda instantáneo	27 MHz
Temperatura estándar de operación	0°C a +65°C
Tamaño	219mm x 81mm x 30mm
Peso	1.10 lbs (0.50 kg)
Rendimiento de comunicación USB 3.0	140 MB/s a la PC

Nota. Recuperado de (Hound, 2021, pág. 2)

Switch de RF de 4 puertos (ZSDR - 425)

Figura 14

Switch de RF de 4 puertos (ZSDR - 425)



Es un conmutador de RF, Figura 14, de banda ancha que ofrece un alto aislamiento y baja pérdida de inserción usado en la banda de 10 a 2500 MHz en sistemas de 50 ohmios en aplicaciones como conmutación de antenas, comunicaciones satelitales, etc. (Mini-Circuits, Inc). Sus principales características se pueden ver en la Tabla 6:

Tabla 6

Características de Switch de RF de 4 puertos (ZSDR - 425)

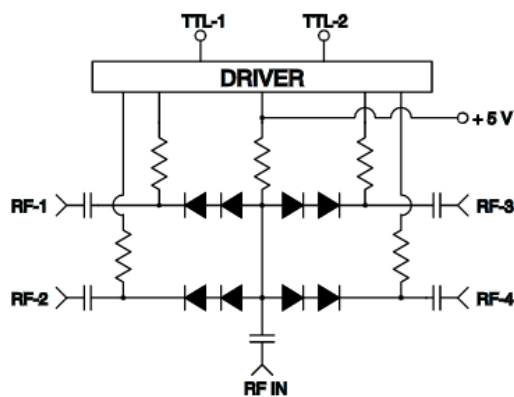
Características	Detalle
Alto aislamiento	40 dB a 2.5 GHz
Pérdida de inserción baja	1.7 dB a 2.5 GHz
Potencia de entrada para compresión de 1 dB	10 a 100 MHz: +6 a +19 dBm Sobre 100 MHz: +19 dBm min.
Voltaje polarización	+5 Vdc
Corriente de polarización	10 mA
Ancho de banda	10 a 2500 MHz
Umbral bajo y alto de entrada de TTL	0.8 V a 2 V
Potencia de entrada máxima Vdd= +5V	+30 dBm
Temperatura de operación	-55 a +100 °C

Nota. Recuperado de (Mini-Circuits, Inc, pág. 1)

Tiene integrado un circuito binario decodificador que permite reducir las líneas de control lógico a dos y se lo observa en la Figura 15, así como la lógica de funcionamiento en la Tabla 7:

Figura 15

Diagrama del control lógico



Nota: Tomado de (Mini-Circuits, Inc, pág. 5)

Tabla 7*Tabla de verdad del circuito lógico*

Entrada de control		Estado de la ruta de la señal
A	B	RFC a:
Alto	Bajo	RF1
Alto	Alto	RF2
Bajo	Alto	RF3
Bajo	Bajo	RF4

Nota. Recuperado de (Mini-Circuits, Inc, pág. 3)***Motor de pasos 86HS8040A4J y driver HY-DIV268N-5A***

Es un motor bipolar que dispone de un controlador de movimiento para realizar el giro en tiempo real lo que permite alterar los parámetros de posición, velocidad y aceleración de acuerdo al ángulo de trabajo escogido, presenta una operación de alta eficiencia y baja disipación de energía y calor (Gutiérrez, 2021), se lo puede observar en la Figura 16 y se presentan sus características en la Tabla 8.

Figura 16*Motor de pasos 86HS8040A4j*



Nota: Tomado de (Electronilab)

Tabla 8

Motor de pasos 86HS8040A4j

Características	Detalle
Tipo de motor	Bipolar
Ángulo de motor	1.8°
Par de retención (Torque)	26 Ncm (2.64 Kg/cm)
Corriente nominal / fase	0.84 A
Resistencia de fase	5.75 ohmios
Tensión recomendada	4.83 V
Inductancia	9.3 mH \pm 20% (1KHz)
Número de derivaciones	4
Peso	230 g

Nota. Recuperado de (Electronilab, pág. 1)

Figura 17

Driver para motor de pasos HY-DIV268N-5A



Nota: Tomado de (Electrónica, 2021)

Es usado para el accionamiento para un motor paso a paso usando DC 12 – 48 V y se lo observa en la Figura 17, mientras que sus características principales se tienen en la Tabla 9:

Tabla 9

Driver para motor de pasos HY-DIV268N-5A

Características	Detalle
Alimentación	12 a 48 V
Corriente de entrada	1 a 5 A
Corriente de salida	0.2 A a 5 A
Peso	200 g
Temperatura de funcionamiento	-10 a 45 °C
Temperatura de almacenamiento	-40 a 70 °C
Control de conexión de señal	Señal de control de PC puede ser alta o baja.
Luz de estado	Verde: trabajo normal Rojo: error
Peso	230 g

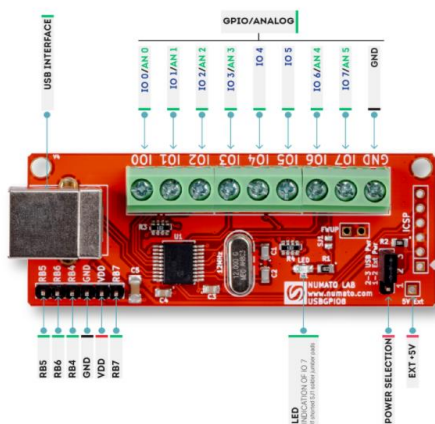
Nota. Recuperado de (Electrónica, 2021, pág. 1)

Módulo GPIO USB de 8 canales con entradas analógicas

El módulo GPIO USB es una solución sencilla y económica para conectar una computadora a un dispositivo electrónico mediante puerto USB, cada entrada analógica se puede configurar de forma individual como entrada o salida a través de aplicaciones personalizadas, se lo observa en la Figura 18 y sus características se listan en la Tabla 10. (Numato Lab, 2021)

Figura 18

Módulo GPIO USB de 8 canales con entradas analógicas



Nota: Tomado de (Numato Lab, 2021)

Tabla 10

Driver para motor de pasos HY-DIV268N-5A

Características	Detalle
Peso	0.1 libras
Número de GPIO	8
Entradas analógicas	6
Interfaz de host	USB 2.0

Resolución de entrada analógica	10 bits
Sistemas operativos compatibles	Windows XP/7/8/10, Linux, Mac OS x, Android

Nota. Recuperado de (Numato Lab, 2021, pág. 1)

Router WiFi Doble Banda AC750

Soporta estándar 802.11 ac y próximas generaciones de Wi-fi, proporciona conexiones simultáneas de 2.4 GHz a 300Mbps y 5GHz a 433 Mbps, presenta eficiencia energética y capacidad para solucionar la congestión ocasionada por varios dispositivos, se lo observa en la Figura 19 y sus características técnicas en la Tabla 11. (TP-LINK, 2021)

Figura 19

Router WiFi doble banda AC750



Nota: Tomado de (TP-LINK, 2021)

Tabla 11

Características de Router WiFi doble banda AC750

Características	Detalle
Standars	802.11ac/n/a 5 GHz 802.11n/b/g 2.4 GHz
Velocidad WiFi	5 GHz: 433 Mbps 2.4 GHZ: 300 Mbps
Capacidad WiFi	Dual-band

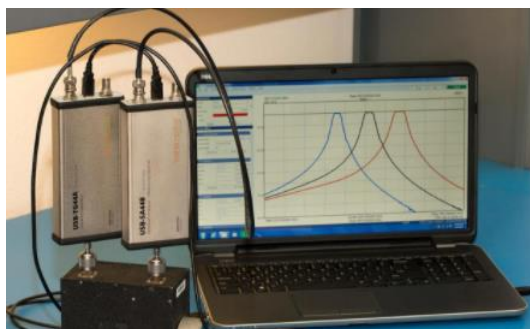
Modo de trabajo	Enrutador Punto de Acceso Extensor de rango
Voltaje y corriente	9 V, 0.6 A
Seguridad	WEP, WPA, WPA2
Protocolo de software	IPv4, IPv6
Certificaciones	FCC, CE, RoHS

Nota. Recuperado de (TP-LINK, 2021)

Computador

Figura 20

Computador de referencia



Nota: Tomado de (Hound, 2021)

Un modelo de computador se lo observa en la Figura 20 y los requerimientos del sistema computacional son los siguientes en la Tabla 12:

Tabla 12

Características de computador

Características	Detalle
------------------------	----------------

Sistema Operativo	7, 8, 10 o Ubuntu Linux
Soporte	64 y 32 bits
RAM	8 GB
Procesador	3ra generación o nuevos
Puerto	USB 3.0 y USB 2.0 adyacente
Unidad de almacenamiento	Al menos 250 MB/s
Procesador gráfico compatible	OpenGL 3.0

Nota. Recuperado de (Hound, 2021, pág. 6)

Nuc o mini PC

Es un computador optimizado de tamaño pequeño que se observa en la Figura 21, con un potente procesador, memoria veloz y gran capacidad de almacenamiento. Su ventaja radica en el menor espacio que ocupa y ofrece más conectividad que otras computadoras portátiles, presenta múltiples puertos USB frontales y traseros, ranura microSD y Gigabit Ethernet. Cuenta con alto rendimiento al disponer de unidades de estado sólido (SSD) o de disco duro (HDD). (Intel, s.f.)

Figura 21

Nuc o mini PC



Nota: Tomado de (Intel, s.f.)

Base para soporte de antenas

La base que sirve de soporte para las antenas tiene una forma cuadrada, la misma que esta acoplada para la sujeción de la antena por medio de tornillos y que debido a su ligero peso y el movimiento que realiza no ocasiona variaciones en las mediciones o pruebas realizadas se la observa en la Figura 22.

Figura 22

Base para soporte de antenas



Trípode para sujeción del sistema receptor

El trípode metálico para la sujeción del sistema receptor permite mantener la antena receptora alineada con la antena de transmisión y además permite la ubicación

de un acoplamiento mecánico mediante el cual el motor de pasos gira para realizar las mediciones requeridas como se observa en la Figura 23. El trípode pertenece al GMREC (Grupo de Monitoreo y Reconocimiento del COMACO) quien facilitó al CICTE para las pruebas.

Figura 23

Trípode para sujeción del sistema receptor



Fuente de poder 1761

Empleada para la alimentación de todos los dispositivos que se encuentran en el sistema de recepción, se la observa en la Figura 24 y se presenta sus características en la Tabla 13.

Figura 24

Fuente de poder



Tabla 13

Fuente de poder 1761

Características	Detalle
Voltaje de salida	0 - 35 V
Corriente de salida	0 - 3 A
Voltaje de operación con carga	$\leq 0.01\% + 3 \text{ mV}$
Corriente de operación con carga	$\leq 0.2\% + 3 \text{ mA}$
Rango de voltímetro	0 – 99.99 V
Rango de amperímetro	0 – 9.99 A
Procesador gráfico compatible	OpenGL 3.0

Nota. Recuperado de (BK Precision, 2021, pág. 1)

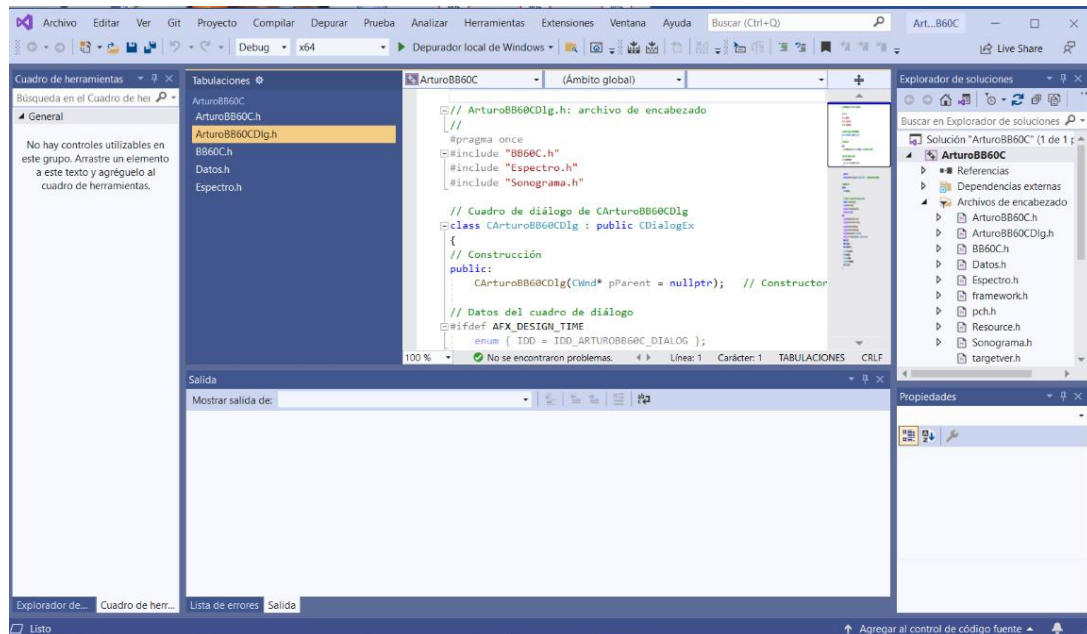
Visual Studio

Es un programa que permite implementar soluciones de código de manera fácil para diferentes aplicaciones ejecutadas para el estudio académico dentro de cualquier sistema operativo y que en este caso es gratuito y de código abierto, lo que facilita la transferencia tecnológica, la Figura 25 muestra la interfaz del software con el código del sistema a implementar. Presenta muchas funcionalidades considerándose un entorno

de desarrollo integrado para el desarrollo de proyectos que puedan proporcionar soluciones a problemas planteados. (Microsoft, 2021)

Figura 25

Software Visual Studio

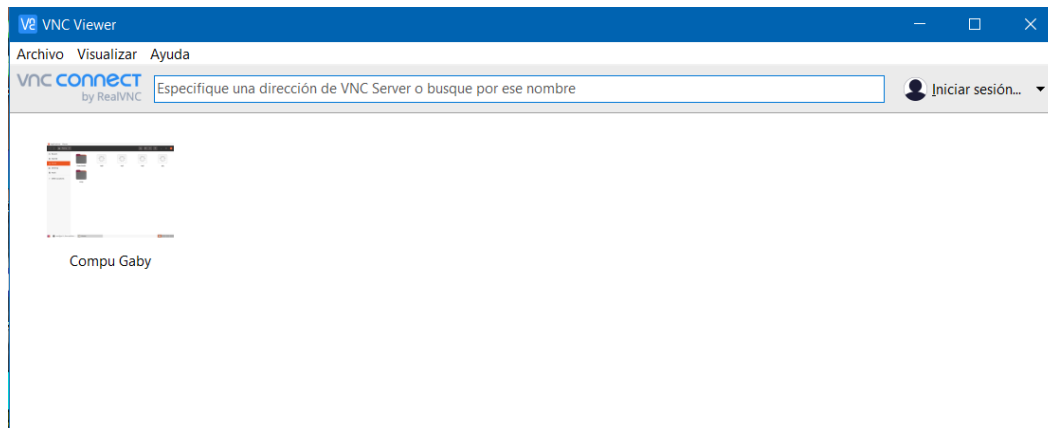


VNC Viewer

Es un programa que se ejecuta luego de la instalación directa en el computador y desde el cual se desea tener el control remoto de otros dispositivos, se observa su interfaz en la Figura 26. Es gratuito y está disponible para Windows, Mac, Linux, iOS y Android. (REALVNC, 2021)

Figura 26

Software VNC Viewer

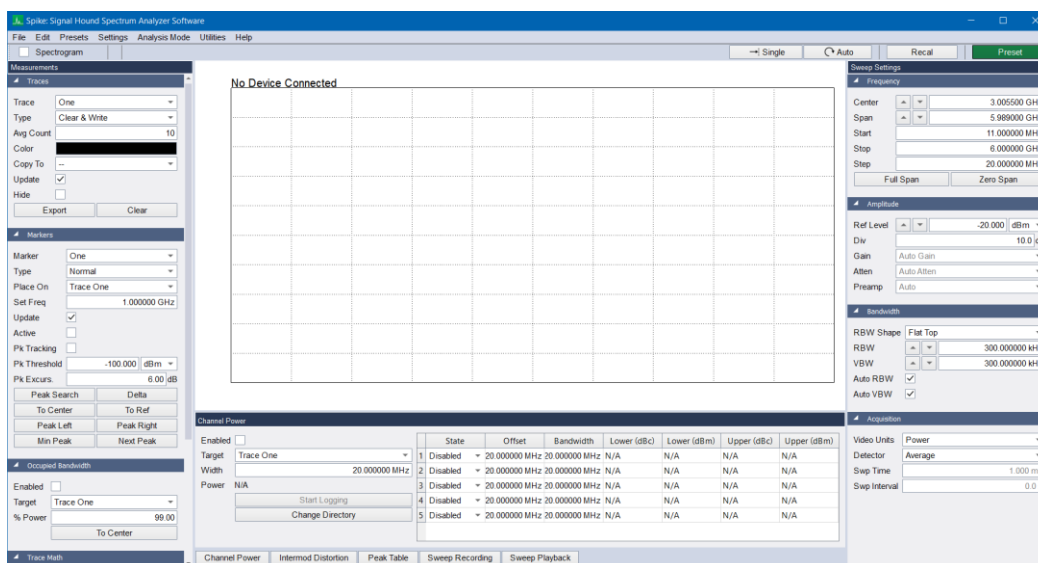


Spike

Es el software analizador de espectro de Signal Hound, se observa su interfaz en la Figura 27, compatibles con los analizadores de espectro de la misma marca, permite tener un control total del dispositivo, una pantalla de espectrograma que puede configurarse para obtener diferentes modos de análisis. (Hound, 2021)

Figura 27

Software Spike



En este capítulo se detalló las características de los materiales adquiridos para el prototipo transportable, así como los softwares que permiten la conexión con el equipo y su programación.

En el siguiente capítulo se muestra el diseño del prototipo en varios esquemas que grafican su funcionamiento físico y lógico además de las conexiones realizadas y la lógica implementada en las funciones del sistema Arturo.

CAPITULO IV

Diseño e implementación del sistema

En el presente capítulo se realiza el diseño e implementación del prototipo transportable de un sistema de monitoreo de señales radioeléctricas con alta Probabilidad de Interceptación - POI (superior al 90%) en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz y localización del sector aproximado del ángulo de arribo de las fuentes de señales considerando un arreglo circular de cuatro antenas log periódicas de banda ancha impresas.

Diseño del esquema de pruebas

La Figura 28, presenta el proceso usado para obtener el patrón de radiación del arreglo de antenas escogido que consta principalmente de:

En el transmisor:

- Plato reflector parabólico.
- Antena Log-periódica.
- Generador de señales
- Trípode base para sujeción del plato parabólico.

En el receptor:

- Arreglo de 4 antenas Log-periódicas impresas en el laboratorio.
- Receptor digital Signal Hound BB60C
- Switch de RF de 4 puertos (ZSDR - 425)
- Motor de pasos y driver
- Módulo GPIO USB de 8 canales con entradas analógicas

- Router WiFi Doble Banda AC750
- Computador
- Nuc o mini PC
- Base para soporte de antenas
- Trípode para sujeción del sistema receptor
- Fuente de poder

Software:

- Visual Studio
- VNC Viewer
- Spike

La figura 29, ilustra la conexión realizada de todos los elementos que conforman el prototipo transportable que podría ser empleado en tiempo cuasi real.

La figura 30, explica el proceso completo que ejecuta el prototipo transportable, para obtener las muestras del espectro radioeléctrico de la banda de interés con ancho de banda instantáneo de 27 MHz.

En la figura 31, se observa la implementación del sistema para tomar las muestras que permiten construir el patrón de radiación de las antenas.

La figura 32, muestra la implementación del prototipo para el empleo del sistema en tiempo cuasi real.

Diagrama de bloques para obtener el patrón de irradiación

Figura 28

Proceso para obtener el patrón de radiación base para el sistema

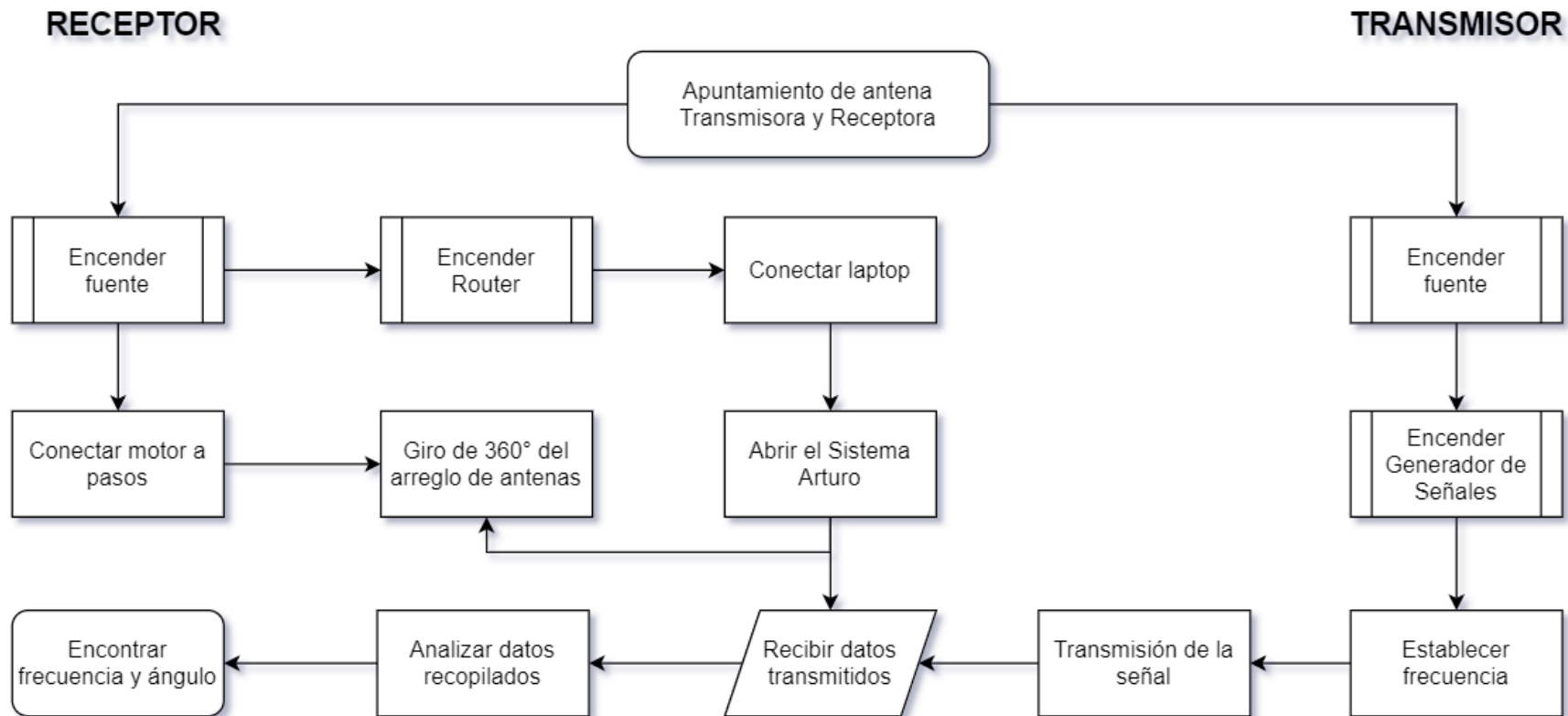


Diagrama de bloques de conexión del prototipo transportable

Figura 29

Conexión de los elementos en el receptor del prototipo transportable

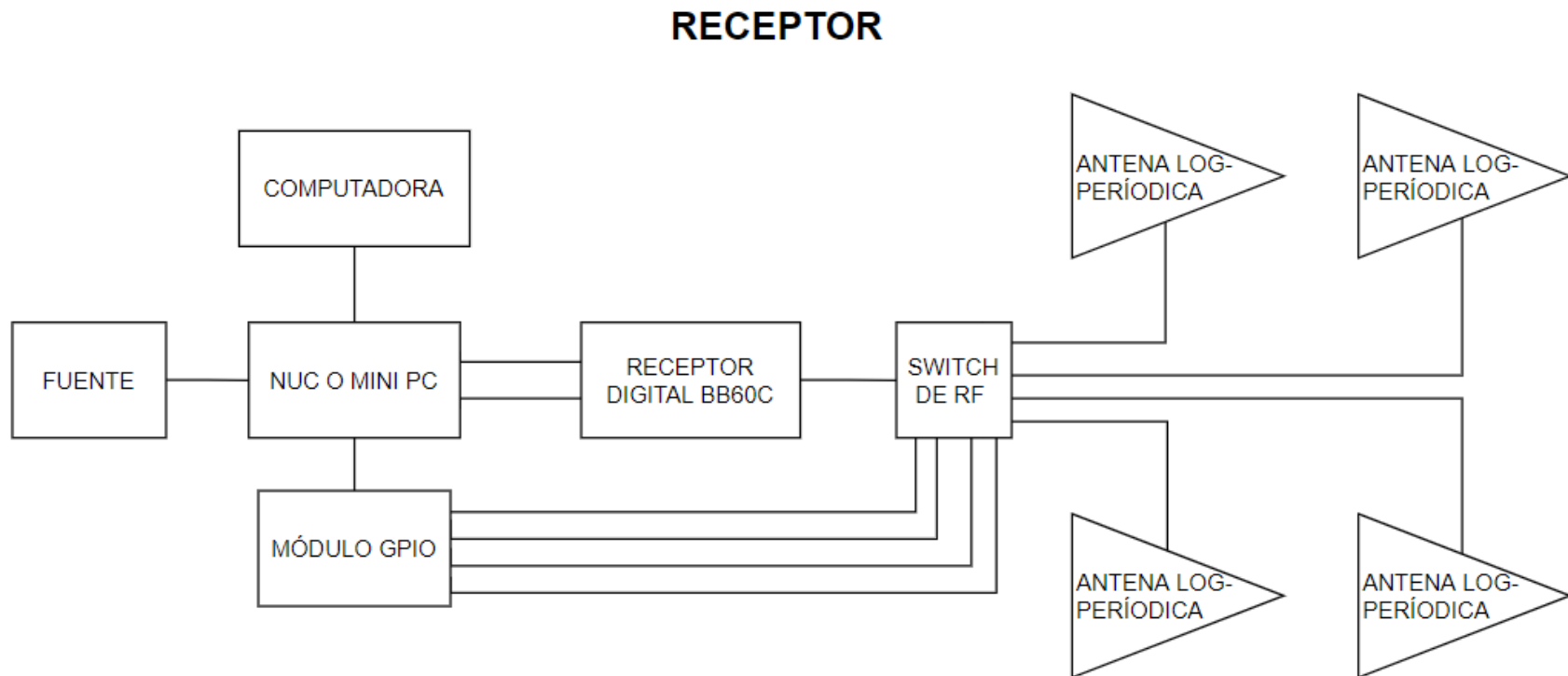
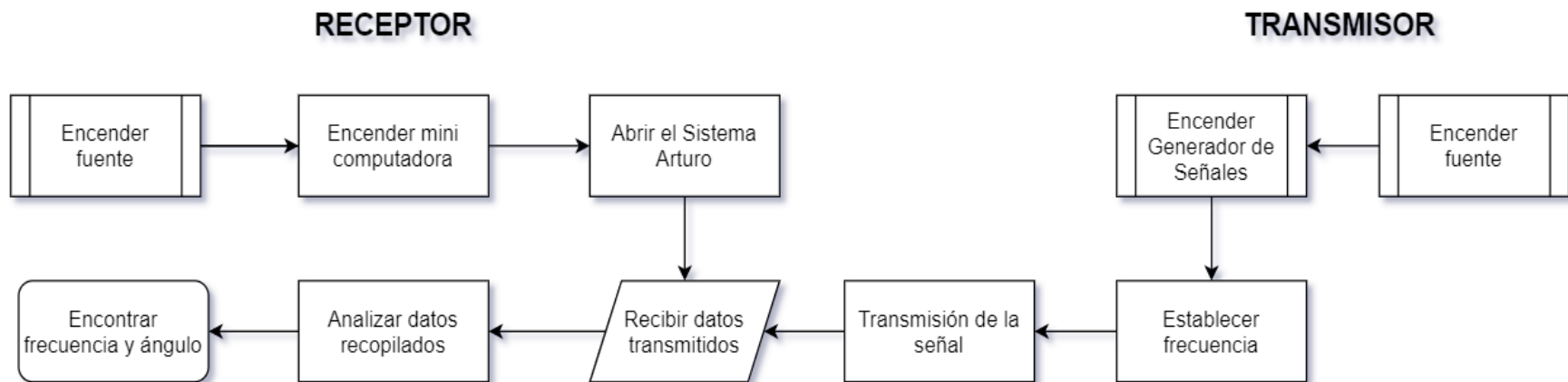


Diagrama de bloques de funcionamiento del prototipo transportable

Figura 30

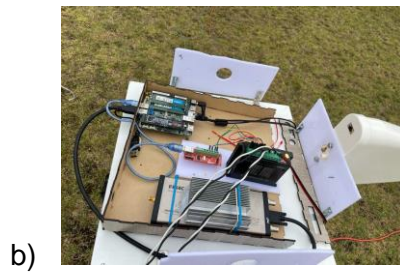
Proceso para analizar señales recibidas en tiempo real



Implementación del sistema para el patrón de radiación

Figura 31

a) *Esquema General*, b) *Esquema receptor*, c) *Esquema transmisor*



Implementación del prototipo transportable

Figura 32

a) *Conexión de antenas, b) Conexión de equipos*



a)



b)

Implementación de la función Procesar_Trace del sistema Arturo

Procesar_Trace es una de las contribuciones más importantes del presente trabajo que se incrementa a las capacidades del sistema Arturo. Esta función inicia su desarrollo gracias a la lógica aplicada en el trabajo de (Naranjo) donde detalla una formulación que propone una forma alternativa de determinar el punto de inicio y fin de palabras aisladas utilizando la energía cuadrática media y la tasa de cruzamiento por cero.

El algoritmo planteado sobre todo va a permitir de forma automática encontrar las características esenciales de las señales presentes en el espectro radioeléctrico que está siendo monitoreado, es decir, la frecuencia de portadora y el ancho de banda de cada portadora.

El proceso inicia guardando todo el vector de datos del espectro que está siendo monitoreado por el receptor BB60C en un vector para ordenar sus valores del menor al mayor. A partir del vector ordenado, se escoge el 15% de muestras iniciales del mismo, las que son consideradas ruido de fondo y con esto se encuentra el mayor valor de esta porción. A este último valor encontrado se suma una pequeña cantidad de dB, entre 1 a máximo 3 dB, para de esta forma determinar un umbral que permita diferenciar las señales presentes del ruido de fondo.

Luego dentro del vector generado por el receptor se compara cada uno de sus valores con el umbral determinado y si sobrepasa el umbral se guarda en otro vector un 1 mientras que si es menor al umbral se guarda un 0, es decir, que se forma un tren de pulsos que permite la identificación del inicio y fin de cada portadora.

Una vez encontrados los puntos de inicio y fin de cada portadora (bloque de procesamiento) se realiza una comparación entre los valores de cada bloque de

procesamiento para determinar el punto máximo, el que es estimado como la frecuencia de portadora del bloque analizado.

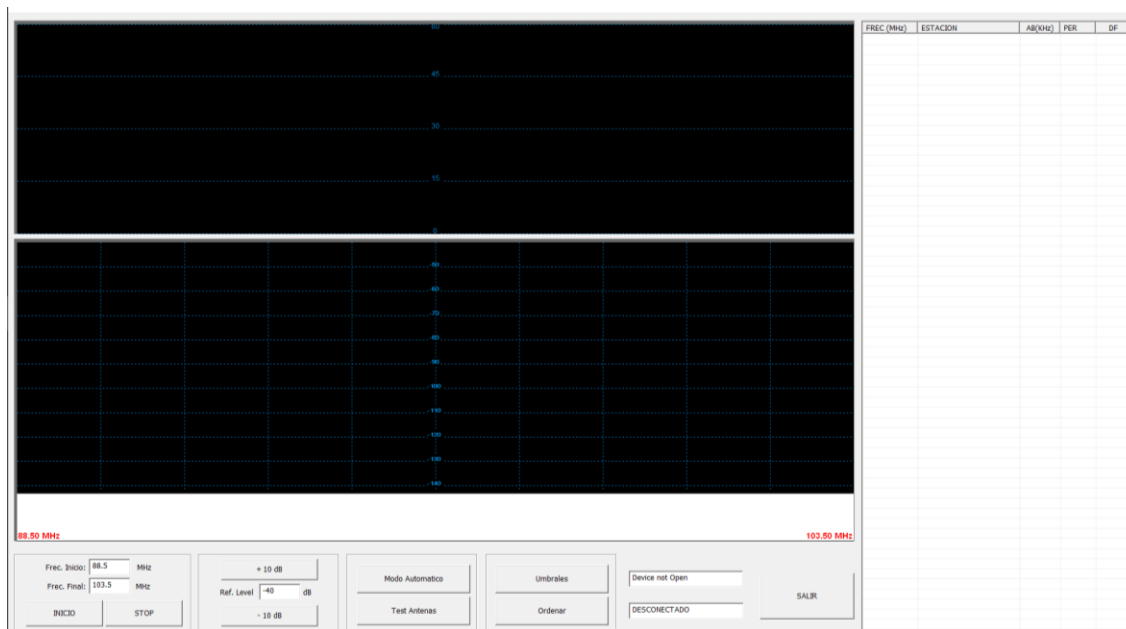
Para encontrar el ancho de banda, se resta cada punto final con el inicial de los bloques de procesamiento para encontrar la distancia entre ellos y estimar el ancho de banda de cada portadora, la determinación del umbral o umbrales, así como la estrategia del procesamiento del vector de datos entregado por el BB60C (que corresponde a la parte del espectro radioeléctrico que está siendo monitoreado) es una propuesta de (Lara, y otros, 2022) que sigue siendo mejorado con el objetivo de obtener la mayor confiabilidad del algoritmo.

De manera adicional se obtuvo un listado de frecuencias concesionadas en la banda de FM que sirve de base de datos en el programa para comparar con las frecuencias encontradas e identificar más rápido las desconocidas junto con su ángulo de arribo, para que el escucha militar pueda reconocer el ancho de banda, analizar la información de la fuente de la señal y verificar si es o no un enemigo.

Dentro de la interfaz del sistema Arturo se realizaron varias mejoras, botones de inicio, control y una tabla de visualización como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Interfaz mejorada del sistema Arturo



En la parte izquierda superior de la Figura 33 se puede observar las pantallas que dibujan el espectro, en la primera se obtiene la señal en frecuencia vs tiempo y en la segunda pantalla se muestra la señal en frecuencia vs potencia, además que debajo se tiene la barra donde se ve el span y la frecuencia monitoreada.

Figura 34

Bloque de botones del sistema Arturo



En la Figura 34 se muestra más de cerca la parte inferior de la interfaz, contiene los botones de control de la interfaz, el botón de Inicio muestra la señal en la pantalla, el botón Stop detiene esta visualización, los botones de +10 dB y -10 dB modifican el nivel de referencia de la señal, seguido está el botón de Modo Automático que permite graficar los umbrales de las portadoras, el botón de Test Antenas verifica que cada antena esté conectada, el botón Umbrales permite ver el punto de inicio y fin de cada portadora, el

botón Ordenar permite ver el vector de la señal organizado de menor a mayor, al lado se tiene el estado del dispositivo y el botón final sirve para cerrar la interfaz.

Figura 35

Botones de control de la interfaz del sistema Arturo

FREC (MHz)	ESTACION	AB(KHz)	PER	DF

Finalmente, en la Figura 35 se tiene la tabla donde se despliegan los resultados más necesarios para operaciones militares en el ámbito de la Guerra Electrónica, es decir la frecuencia, el ancho de banda y el ángulo aproximado del origen de la señal.

Dentro de este capítulo se observó el funcionamiento y conexión del prototipo mediante diagramas de bloques además de la lógica de programación de la función Procesar_Trace y la interfaz mejorada como resultado.

En el siguiente capítulo se muestran las pruebas realizadas con el prototipo transportable para obtener el patrón de radiación, así como verificar la operatividad de las funciones añadidas en la interfaz del sistema Arturo.

CAPITULO V

Pruebas y resultados

En el presente capítulo se detallan las pruebas realizadas con el prototipo implementado, utilizando como base el sistema Arturo (Moya, 2021) para obtener el lóbulo de radiación del arreglo de antenas log periódicas empleadas para el desarrollo del trabajo.

Además, se incrementa el código Procesar_Trace que permite de forma automatizada determinar las portadoras y anchos de banda de las señales presentes en el espectro radioeléctrico que está siendo monitoreado por el BB60C, datos de gran importancia que son medidos en tiempo real y que permiten generar automáticamente un Orden de Batalla Electrónico, es decir, la información resumida de todas las frecuencias de interés en cada día y hora establecida cuando el sistema sea empleado.

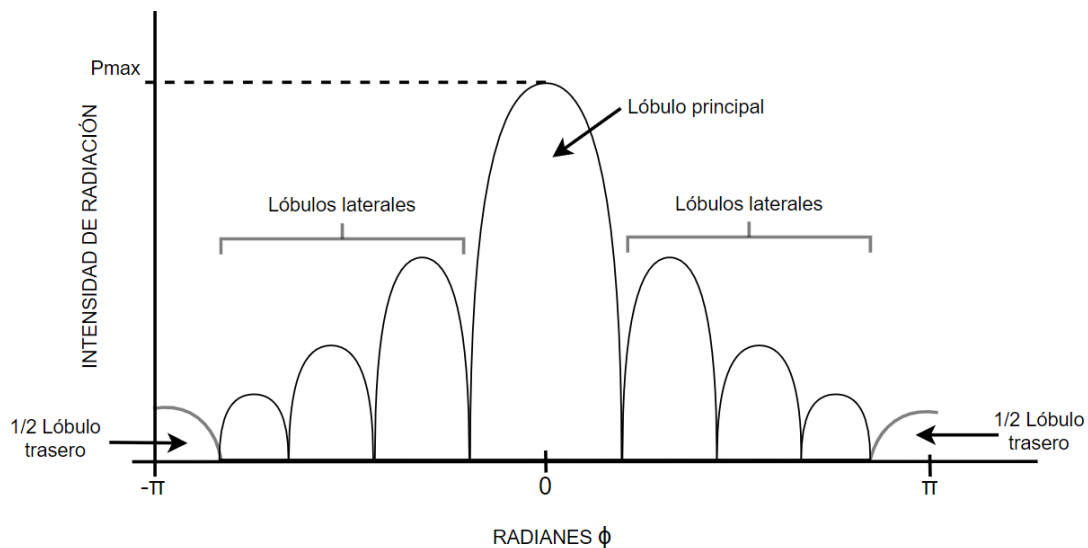
Funcionamiento del Arreglo de antenas

El propósito del arreglo circular de cuatro antenas log periódicas (banda de 300 MHz – 6 GHz) es captar el espectro radioeléctrico en una banda de interés operativo, para que el receptor digital IQ BB60C (Calderón & Reinoso, 2019) genere los valores de datos para el respectivo procesamiento.

Con esto y conforme a (Gutiérrez, 2021) se obtiene el respectivo patrón de radiación del arreglo circular de cuatro antenas log periódicas, lo mencionado se ilustra en la Figura 36.

Figura 36

Esquema representativo del patrón de radiación de una antena



Nota: Tomado de (Vaccaro, 1993, pág. 223)

Las antenas log periódicas del arreglo circular, fueron construidas en los laboratorios del CICTE por el Dr. Alexis Tinoco siguiendo la metodología desarrollada en (Morales, 2020). La Figura 37 y 38 ilustran el proceso realizado.

Figura 37

Impresión de antenas

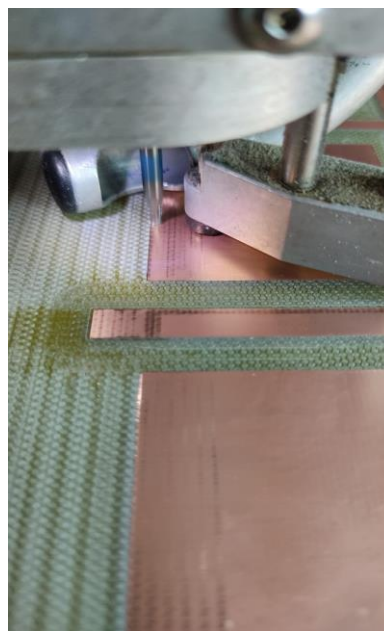


Figura 38

Verificación y control del funcionamiento de antenas



A partir del trabajo de (Andrade & Machado, 2019) se realizaron mejoras y adaptaciones en el algoritmo propuesto, así como mejoras en la programación ya que el arreglo de antenas utilizado en el presente trabajo es diferente al citado.

Pruebas de medición para obtener el patrón de radiación

Para el inicio de las pruebas todos los equipos deben estar conectados adecuadamente y energizados. El control remoto del sistema se lo realiza por medio del software VNC Viewer, que permite al operador desde cualquier punto conectarse con el NUC en donde se encuentra el programa Arturo (Moya, 2021).

En el sistema transmisor, que simula una estación enemiga, se ingresa una frecuencia deseada y se la cambia cuando el sistema receptor haya finalizado la toma

de muestras. Este procedimiento se realiza las veces que sean necesarias y con las frecuencias que se imponga el autor.

En el sistema receptor, el arreglo de cuatro antenas comienza a girar 360° por medio del motor de pasos, obteniendo 400 muestras por cada antena, es decir, las antenas realizan un giro con ángulo de 0,9°. Estas muestras permiten obtener el patrón de radiación de las antenas que se usan para el presente trabajo y se toman como referencia para determinar el AoA de una señal enemiga en cualquier instante o lugar.

Las frecuencias definidas para la realización de la toma de datos fueron las especificadas en la Tabla 14:

Tabla 14

Frecuencias establecidas para obtención de muestras

Valor	Unidad
150	MHz
250	MHz
500	MHz
750	MHz
1000	MHz
1250	MHz
1500	MHz
1750	MHz
2000	MHz
5900	MHz

Nota. Frecuencias establecidas por el autor

Un ejemplo de datos cuyas muestras se extienden hasta el ordinal 405 para completar y asegurar la cobertura de 360°, se presentan a continuación y una parte se observa en la Figura 39:

Figura 39

Datos con antenas Log periódicas en polarización vertical sin cubierta

ANG	A1	A2	A3	A4
0.9	-31.51	-37.4	-65.23	-37.81
1.8	-31.51	-37.15	-65.92	-38.13
2.7	-31.51	-36.93	-66.58	-38.41
3.6	-31.51	-36.68	-67.86	-38.71
4.5	-31.51	-36.48	-68.96	-39.05
5.4	-31.51	-36.28	-70.73	-39.49
6.3	-31.51	-36.1	-72.16	-39.87
7.2	-31.52	-35.91	-75.44	-40.31
8.1	-31.52	-35.68	-80.29	-40.72
9	-31.52	-35.5	-79.73	-41.11
9.9	-31.52	-35.28	-80.96	-41.45
10.8	-31.53	-35.1	-77.21	-41.86
11.7	-31.53	-34.91	-74.45	-42.22
12.6	-31.54	-34.73	-72.62	-42.48
13.5	-31.54	-34.51	-70.5	-42.81
14.4	-31.54	-34.33	-68.74	-43.09
15.3	-31.55	-34.14	-67.47	-43.35
16.2	-31.55	-33.96	-66.46	-43.66
17.1	-31.56	-33.8	-65.83	-43.92
18	-31.57	-33.63	-64.85	-44.26
18.9	-31.58	-33.46	-64.5	-44.63
19.8	-31.58	-33.33	-64.1	-44.95
20.7	-31.59	-33.21	-64.06	-45.45
21.6	-31.6	-33.12	-63.74	-45.86
22.5	-31.61	-33.03	-63.14	-46.35
23.4	-31.61	-32.95	-62.23	-46.77
24.3	-31.62	-32.86	-61.96	-47.27

Nota. Frecuencia empleada 1750 MHz

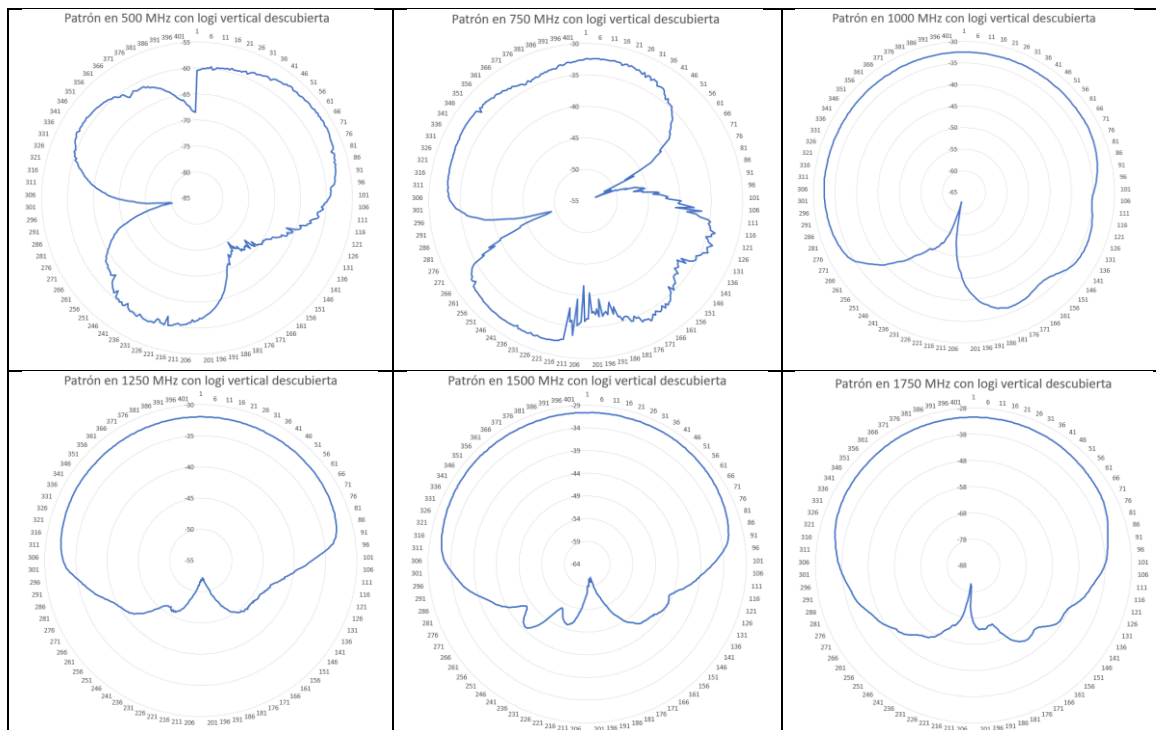
Con la frecuencias definidas y datos obtenidos se procede a graficar los patrones de radiación, los mismos que han sido obtenidos con las antenas log periódicas con cubierta en polarización vertical y horizontal y bajo las mismas condiciones de prueba con las antenas log periódicas sin cubierta en polarización vertical y horizontal respectivamente.

A continuación, en las Figuras 40, 41, 42 y 43, se presentan los patrones de radiación con las condiciones explicadas anteriormente. Mientras en las Figuras desde

la 44 a la 47 se tiene el patrón de radiación de todas las antenas en determinadas frecuencias.

Figura 40

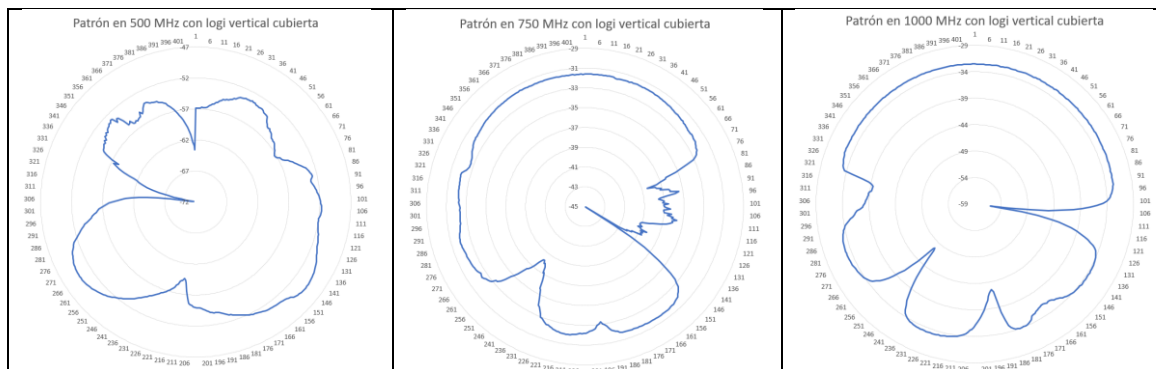
Patrón de radiación con una antena Log periódica en polarización vertical sin cubierta

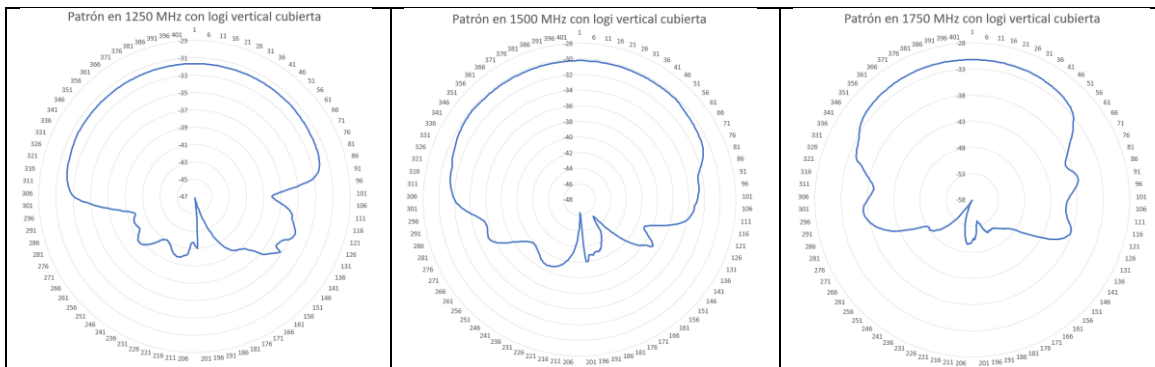


Nota: Las frecuencias tomadas por el autor para los gráficos son de 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 MHz.

Figura 41

Patrón de radiación con una antena Log periódica en polarización vertical con cubierta

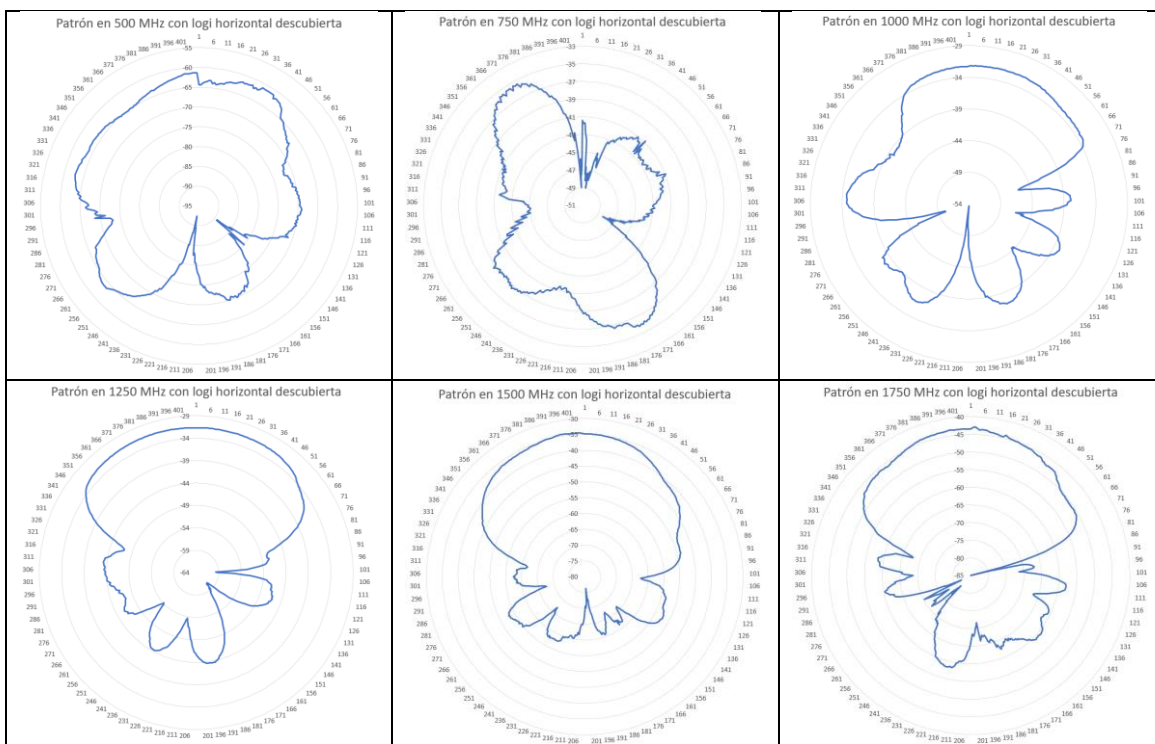




Nota: Las frecuencias tomadas por el autor para los gráficos son de 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 MHz.

Figura 42

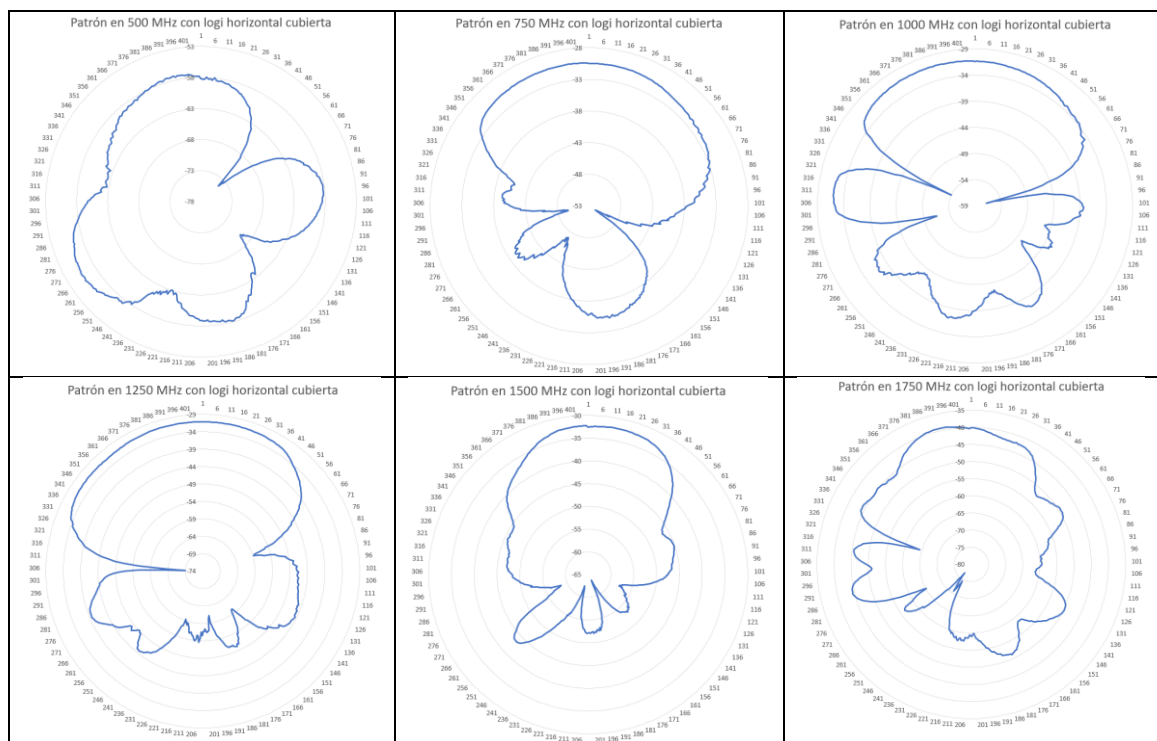
Patrón de radiación con una antena Log periódica en polarización horizontal sin cubierta



Nota: Las frecuencias tomadas por el autor para los gráficos son de 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 MHz.

Figura 43

Patrón de radiación con una antena Log periódica en polarización horizontal con cubierta



Nota: Las frecuencias tomadas por el autor para los gráficos son de 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 MHz.

Figura 44

Patrón de radiación con antena Log periódica en polarización vertical con cubierta en todas las frecuencias establecidas para tomar las muestras.

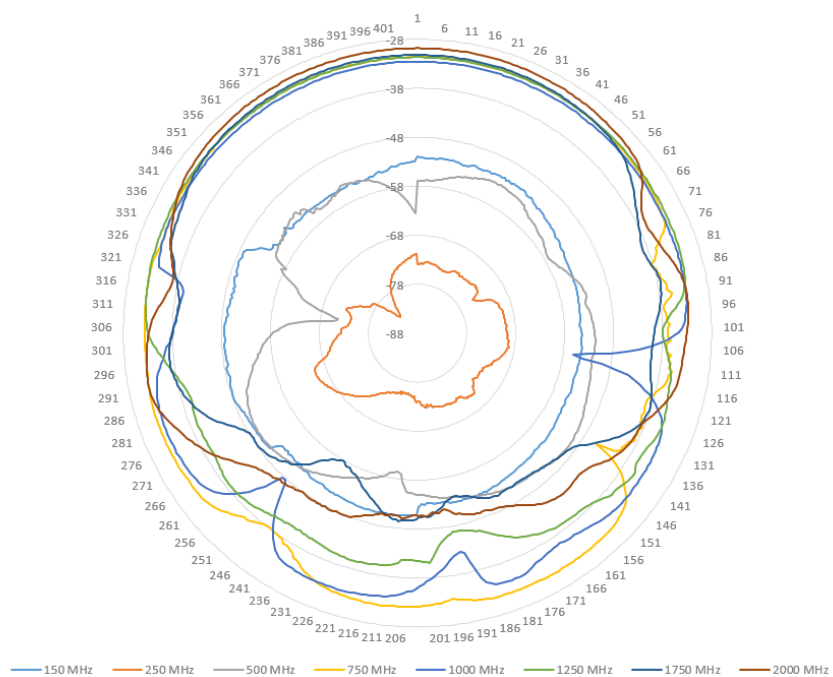


Figura 45

Patrón de radiación con cuatro antenas Log periódicas en polarización vertical sin cubierta en 500 MHz

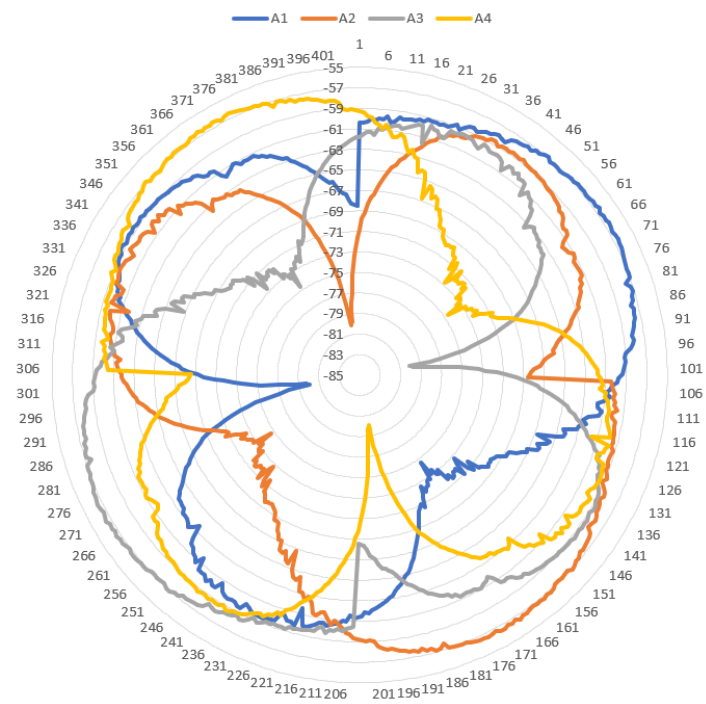
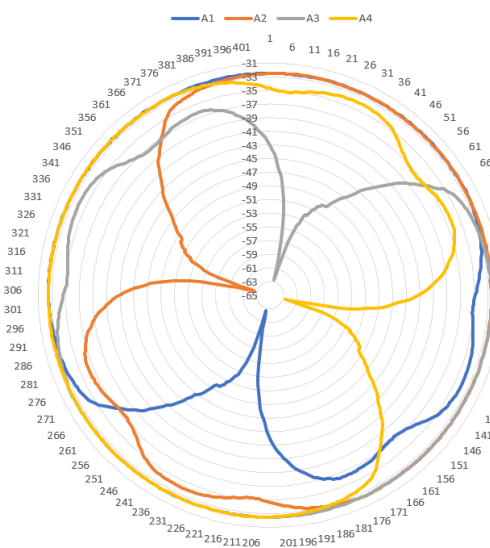
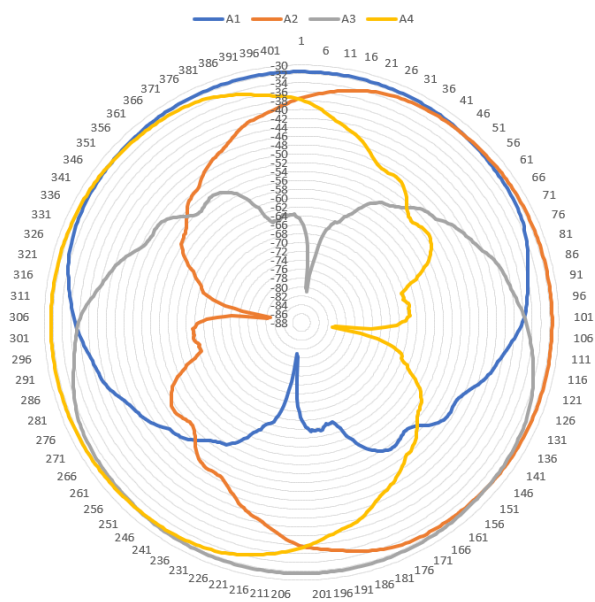


Figura 46

Patrón de radiación con cuatro antenas Log periódicas en polarización vertical sin cubierta en 1000 MHz

**Figura 47**

Patrón de radiación con cuatro antenas Log periódicas en polarización vertical sin cubierta en 1750 MHz

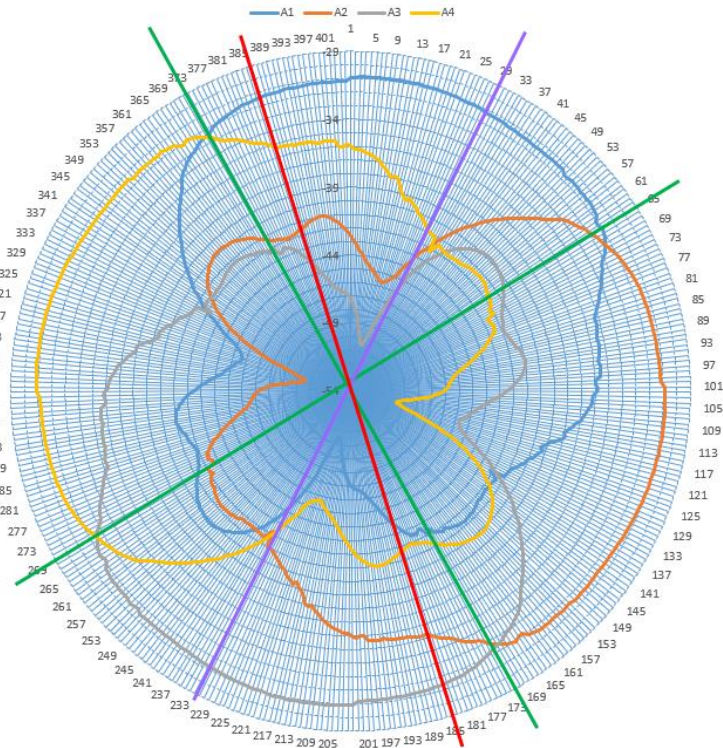


Luego de obtener el patrón de radiación de las antenas empleadas en el estudio se procede a calcular el AoA.

En cada frecuencia establecida se observa las lecturas obtenidas de las cuatro antenas y la función de antena principal o secundaria van cambiando de acuerdo al ángulo dispuesto por el patrón de irradiación como se observa en la Figura 48, la línea morada en el ángulo 29° determina que la antena principal será A1 y la secundaria será A4, la línea verde en el ángulo 65° determina que la antena principal será A1 y la secundaria A2, la línea roja en el ángulo 185° determina que la antena principal será A2 y la secundaria A4 y la línea verde a los 373° determina que la antena principal será A1 y secundaria A4.

Figura 48

Definición de cuadrantes de arribo de la señal



Se comparan los valores entre todas las antenas, es decir, se realiza una resta entre todos los valores obtenidos de cada antena, y se procede a ordenar las medidas de potencia de mayor a menor. De esta manera se puede demostrar que la antena que recibe la mayor potencia, el valor más alto, es el cuadrante por donde arriba la señal. Este valor es el que permitirá realizar la comparación con los datos obtenidos en tiempo real y establecer el AoA. El segundo valor más alto, es la antena adyacente. La comparación de estos dos valores permite garantizar la precisión del AoA encontrado, teoría probada en el trabajo desarrollado de (Andrade & Machado, 2019) mostrando una efectividad del 97.47%. Los dos valores más altos se cambian de dBm a mW y se divide el valor de la antena adyacente para el valor de la antena central y el resultado es un valor adimensional.

Este proceso permite generar una tabla única como base de datos que cada 100 muestras se cambia al siguiente cuadrante o resta de potencias de antenas y por lo tanto la potencia más alta también es la siguiente diferencia, se observa en la Figura 49 el proceso ya explicado y en cada ítem se tiene la potencia más alta para a) la resta de potencias de las antenas A1 y A2, para b) la resta de potencias de las antenas A2 y A3, para c) la resta de potencias de las antenas A3 y A4, finalmente en d) la resta de potencias de las antenas A4 y A1; esta base se usará posteriormente para realizar la comparación con datos obtenidos en tiempo real.

Figura 49

Comparación de los valores de potencias de cada antena. a) antena A1 y A2, b) antena A2 y A3, c) antena A3 y A4, d) antena A4 y A1.

a)

A1N	A2N	A3N	A4N			A1-A2	A2-A3	A3-A4	A4-A1		POTENCIA MÁXIMA	AoA
-12.87	-26.08	-1.66	-0.05			13.21	-24.4	-1.61	12.82		13.21	250.2
-12.5	-26.75	-1.78	-0.05			14.25	-25	-1.73	12.45		14.25	251.1
-12.1	-27.7	-1.93	-0.04			15.6	-25.8	-1.89	12.06		15.6	252
-11.72	-28.44	-2.09	-0.04			16.72	-26.4	-2.05	11.68		16.72	252.9
-11.29	-28.93	-2.23	-0.03			17.64	-26.7	-2.2	11.26		17.64	253.8
-10.94	-30.33	-2.44	-0.03			19.39	-27.9	-2.41	10.91		19.39	254.7
-10.57	-31.21	-2.59	-0.03			20.64	-28.6	-2.56	10.54		20.64	255.6
-10.24	-31.85	-2.75	-0.02			21.61	-29.1	-2.73	10.22		21.61	256.5
-9.97	-32.65	-2.96	-0.02			22.68	-29.7	-2.94	9.95		22.68	257.4

b)

A1N	A2N	A3N	A4N			A1-A2	A2-A3	A3-A4	A4-A1		POTENCIA MÁXIMA	AoA
-0.02	-5.91	-33.74	-6.32			5.89	27.83	-27.4	-6.3		27.83	0.9
-0.02	-5.66	-34.43	-6.64			5.64	28.77	-27.8	-6.62		28.77	1.8
-0.02	-5.44	-35.09	-6.92			5.42	29.65	-28.2	-6.9		29.65	2.7
-0.02	-5.19	-36.37	-7.22			5.17	31.18	-29.2	-7.2		31.18	3.6
-0.02	-4.99	-37.47	-7.56			4.97	32.48	-29.9	-7.54		32.48	4.5
-0.02	-4.79	-39.24	-8			4.77	34.45	-31.2	-7.98		34.45	5.4
-0.02	-4.61	-40.67	-8.38			4.59	36.06	-32.3	-8.36		36.06	6.3
-0.03	-4.42	-43.95	-8.82			4.39	39.53	-35.1	-8.79		39.53	7.2
-0.03	-4.19	-48.8	-9.23			4.16	44.61	-39.6	-9.2		44.61	8.1

c)

A1N	A2N	A3N	A4N			A1-A2	A2-A3	A3-A4	A4-A1		POTENCIA MÁXIMA	AoA
-1.93	-0.05	-13.19	-26.75			-1.88	13.14	13.56	-24.8		13.56	68.4
-2.09	-0.05	-12.87	-27.7			-2.04	12.82	14.83	-25.6		14.83	69.3
-2.23	-0.04	-12.5	-28.44			-2.19	12.46	15.94	-26.2		15.94	70.2
-2.44	-0.04	-12.1	-28.93			-2.4	12.06	16.83	-26.5		16.83	71.1
-2.59	-0.03	-11.72	-30.33			-2.56	11.69	18.61	-27.7		18.61	72
-2.75	-0.03	-11.29	-31.21			-2.72	11.26	19.92	-28.5		19.92	72.9
-2.96	-0.03	-10.94	-31.85			-2.93	10.91	20.91	-28.9		20.91	73.8
-3.15	-0.02	-10.57	-32.65			-3.13	10.55	22.08	-29.5		22.08	74.7
-3.36	-0.02	-10.24	-33.07			-3.34	10.22	22.83	-29.7		22.83	75.6
-3.56	-0.02	-9.97	-32.9			-3.54	9.95	22.93	-29.3		22.93	76.5

d)

A1N	A2N	A3N	A4N			A1-A2	A2-A3	A3-A4	A4-A1		POTENCIA MÁXIMA	AoA
-27.7	-1.66	-0.05	-13.19			-26	-1.61	13.14	14.51		14.51	159.3
-28.44	-1.78	-0.05	-12.87			-26.7	-1.73	12.82	15.57		15.57	160.2
-28.93	-1.93	-0.04	-12.5			-27	-1.89	12.46	16.43		16.43	161.1
-30.33	-2.09	-0.04	-12.1			-28.2	-2.05	12.06	18.23		18.23	162
-31.21	-2.23	-0.03	-11.72			-29	-2.2	11.69	19.49		19.49	162.9
-31.85	-2.44	-0.03	-11.29			-29.4	-2.41	11.26	20.56		20.56	163.8
-32.65	-2.59	-0.03	-10.94			-30.1	-2.56	10.91	21.71		21.71	164.7
-33.07	-2.75	-0.02	-10.57			-30.3	-2.73	10.55	22.5		22.5	165.6
-32.9	-2.96	-0.02	-10.24			-29.9	-2.94	10.22	22.66		22.66	166.5
-32.92	-3.15	-0.02	-9.97			-29.8	-3.13	9.95	22.95		22.95	167.4

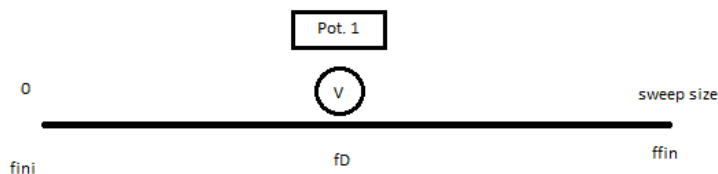
Para trabajar en tiempo real, se requiere:

- Definir el spam deseado, es decir, la frecuencia inicial y la frecuencia final.
- Verificar las muestras que se obtienen por antena, en este caso, cuatro antenas.
- Se establece la relación entre los valores conocidos, para obtener la ventana con el valor de potencia más alto.

Para encontrar una relación y una ecuación que generalice la forma de calcular la ventana de potencia de una antena se puede empezar con el gráfico que se observa en la Figura 50.

Figura 50

Relación para obtener la ventana de potencia en la antena 1



Nota. El mismo proceso será seguido para la antena 2,3 y 4.

$$\frac{\text{sweep size} - 0}{f_{fin} - f_{ini}} = \frac{v - 0}{fD - f_{ini}}$$

$$\frac{\text{sweep size}}{\text{spam}} = \frac{v}{fD - f_{ini}}$$

$$v = \frac{\text{sweep size}(fD - f_{ini})}{\text{spam}}$$

A continuación, en la Figura 51 se tiene un ejemplo de vector con datos del receptor para el análisis de la potencia de cada antena y encontrar el AoA.

Figura 51

Obtención de los valores de potencia de cada antena



Una vez conocidos los valores de máxima potencia en la frecuencia que se ha seleccionado y de cada una de las antenas, se procede a ordenarlos. Ese valor es el que será comparado en la base de datos obtenida con anterioridad y se podrá determinar la antena central, antena adyacente y por ende conocer el AoA.

Al establecer una tabla completa en donde se determina el AoA de acuerdo a la posición que ocupa la antena dentro del arreglo, se puede determinar el sector de arribo de la señal radioeléctrica del enemigo. Este proceso ha sido efectuado manualmente, luego de obtener las muestras y realizar el análisis respectivo, sin embargo, con la automatización de este proceso por medio de la función `Procesar_Tracer` incluida en el programa ARTURO se obtiene de manera instantánea: el ángulo de arribo, la frecuencia de la portadora y por ende la potencia de transmisión del enemigo.

Pruebas de funcionamiento de la interface

Para las pruebas que verifiquen el desempeño de la interfaz mejorada se realizaron mediciones en diferentes bandas de frecuencias que se pueden observar desde la Figura 52 a la 55, las cuales son FM (88 a 108 MHz), Radiotaxis (137 a 174 MHz), VHF (30 a 300 MHz) y UHF (300 a 462.5 MHz) que se encuentran dentro de la banda de interés de este trabajo.

Además, siempre que esté activado el Modo Automático, en la interfaz se podrá observar el listado desplegado de portadoras encontradas, su ancho de banda y ángulo, se debe aclarar que en este trabajo se pudo comparar solo con frecuencias de FM concesionadas, pero la base utilizada no es la única que se puede cargar, si se adquiere más información de diferentes frecuencias concesionadas se puede aumentar a la base de datos original y tener mejor eficiencia al monitorear las señales ya que habrá menor cantidad de frecuencias desconocidas a analizar en las operaciones militares de Guerra Electrónica.

Figura 52

Señal en la banda de frecuencia de FM

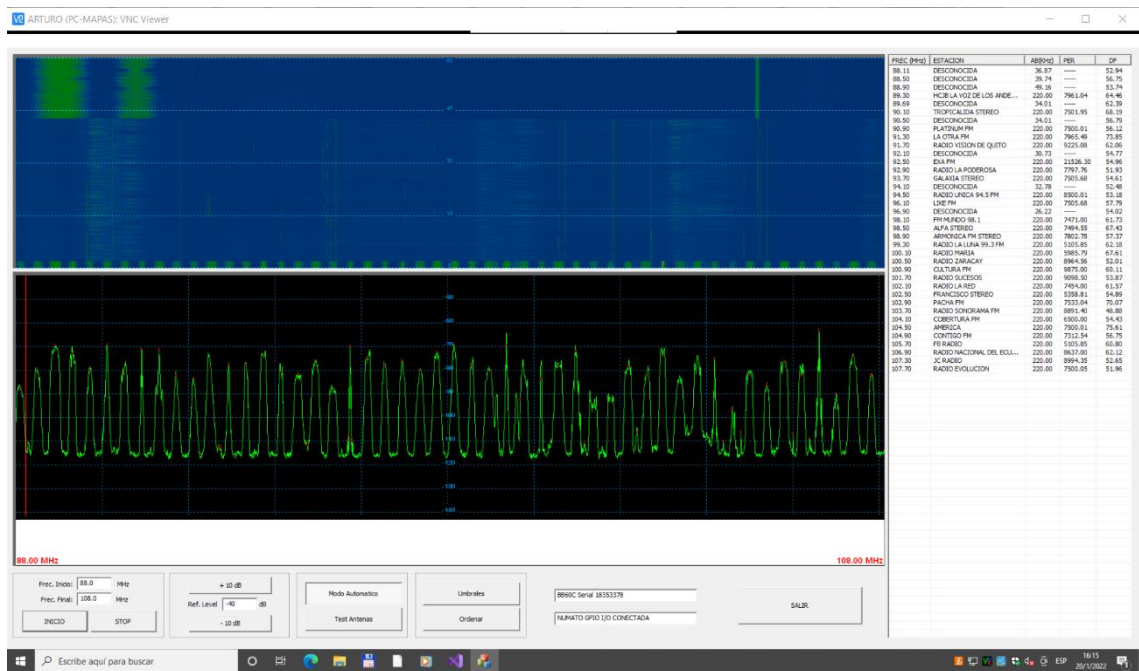


Figura 53

Señal en la banda de frecuencia de Radiotaxis

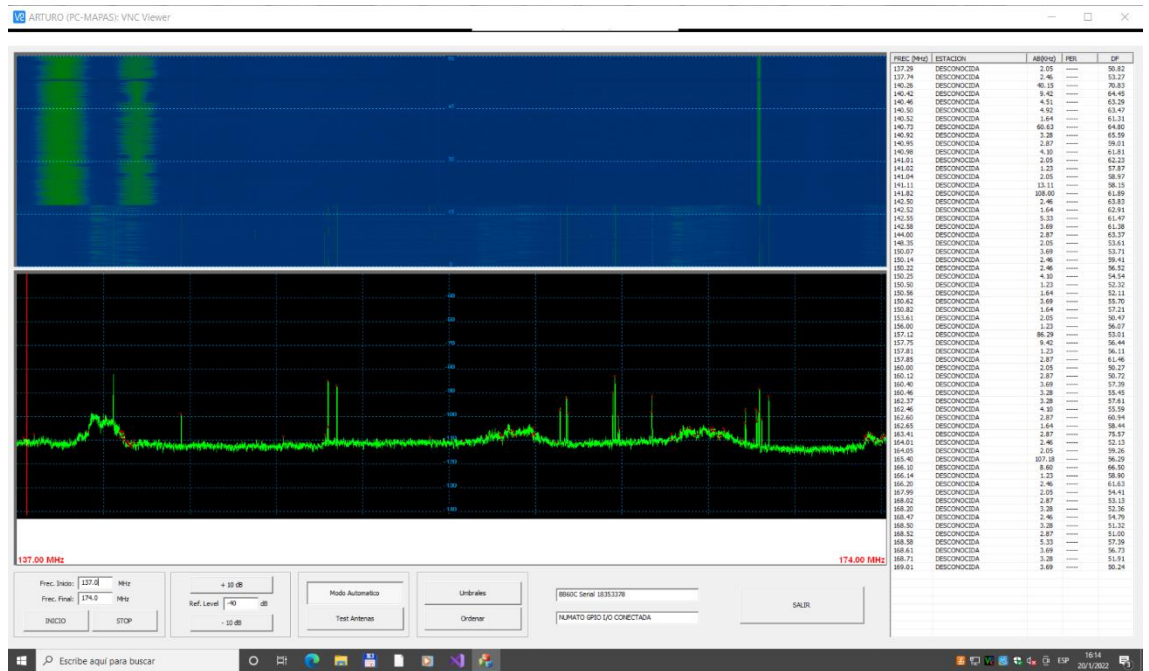


Figura 54

Señal en la banda de frecuencia de VHF

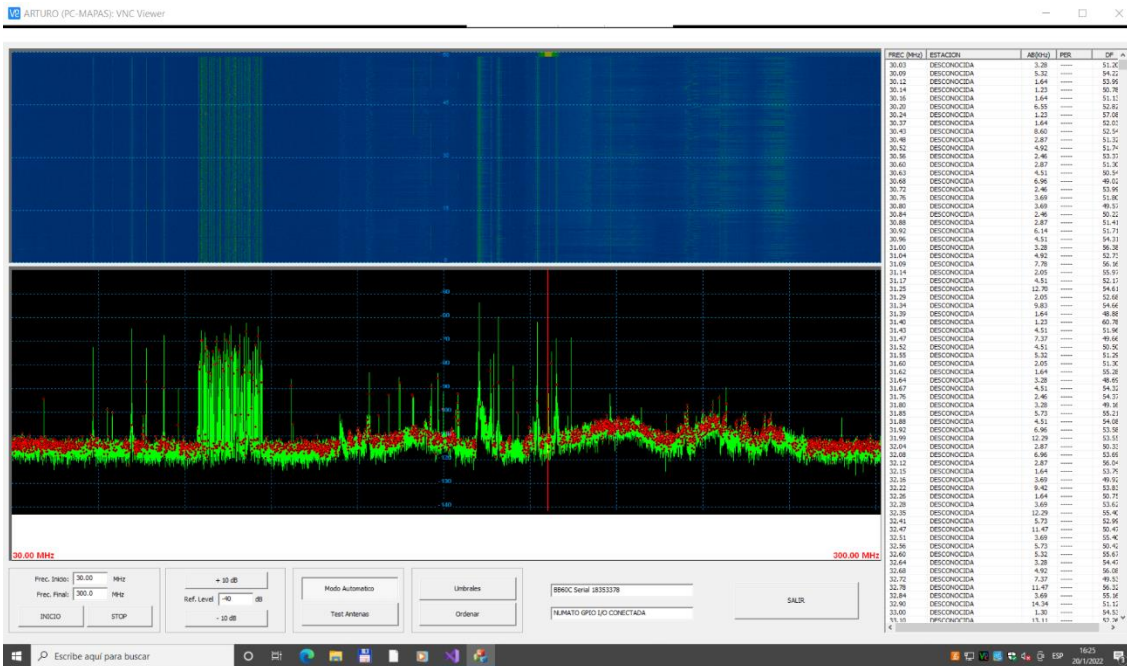
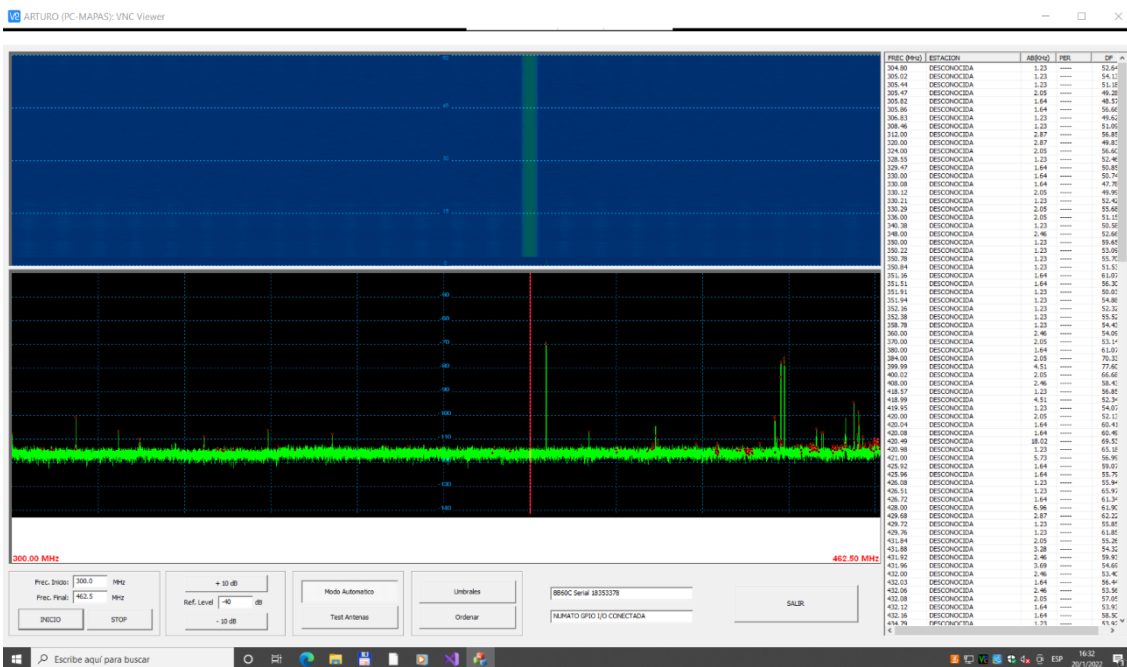


Figura 55

Señal en la banda de frecuencia de UHF

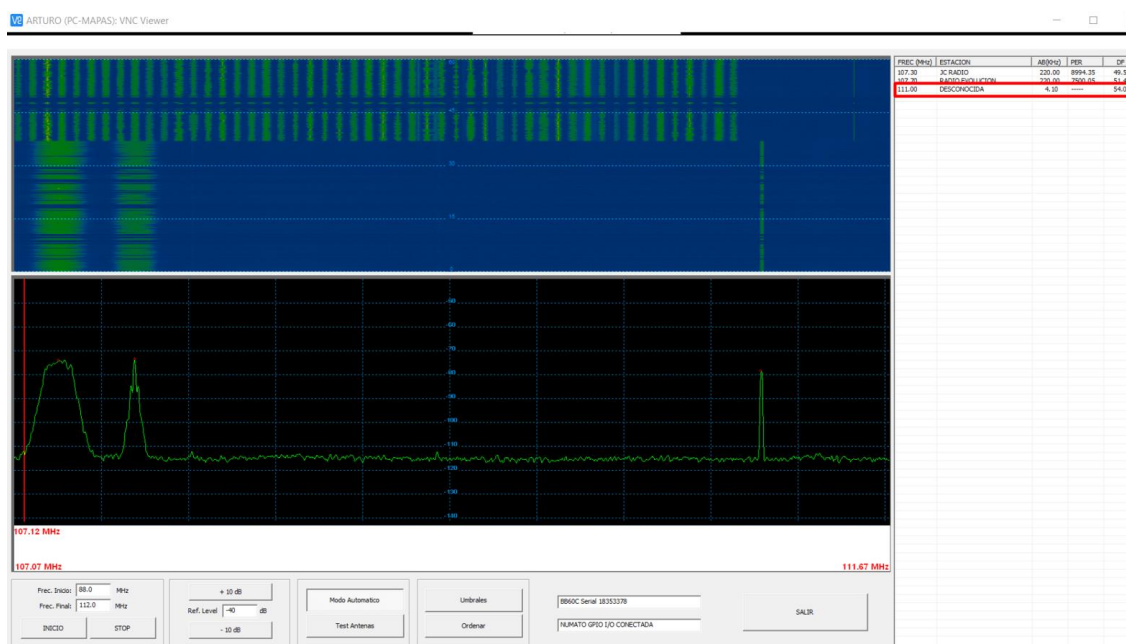


Al realizar el monitoreo en el rango FM se tuvo que alejar un poco del rango para encontrar con mayor facilidad la señal ya que a pesar de ser una versión mejorada del

algoritmo original del sistema Arturo, aún se puede aumentar su precisión. En la Figura 56 se observa la frecuencia 111 MHz con el nombre de estación Desconocida ya que no se la conoce dentro de la base de datos del rango de frecuencias FM y se tiene también su ángulo de 54° .

Figura 56

Señal en la frecuencia de 111 MHz



En la Figura 57 se puede observar graficamente la frecuencia de 400 MHz monitoreada con el sistema, así como en la lista de frecuencias se tiene su nombre como Desconocida con ancho de banda de 4.53 MHz y su ángulo de 29.7° , además hay que tener en cuenta que para observar esta información se debe mantener activado el botón Modo Automático, que también permite visualizar un punto rojo (punto máximo de portadora) en la señal graficada en la interfaz.

Figura 57

Señal en la frecuencia de 400 MHz

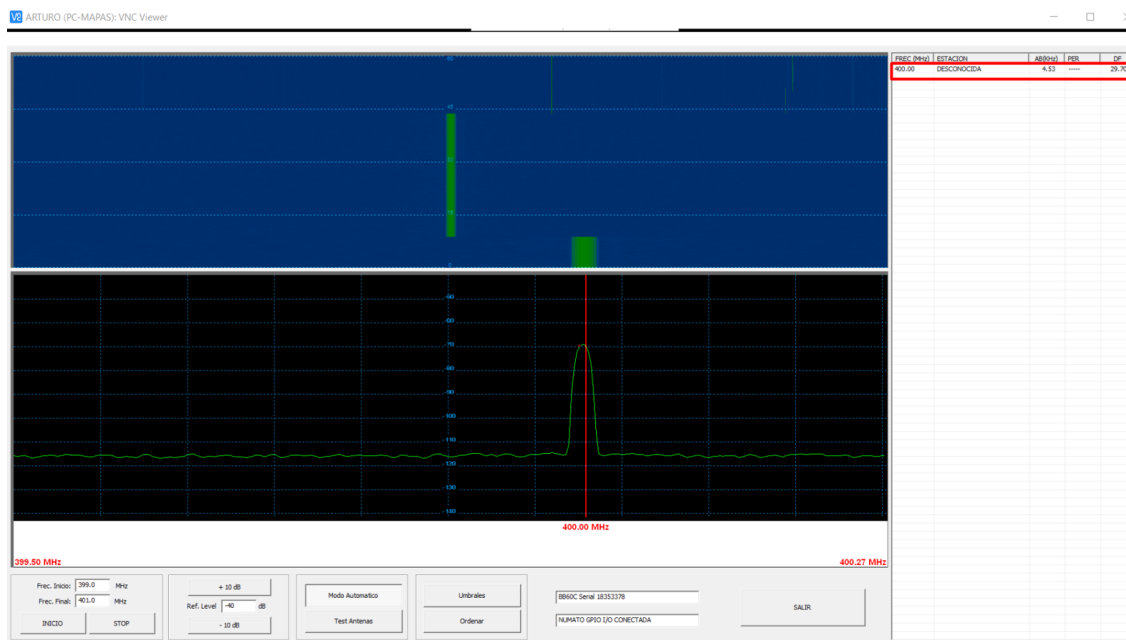


Figura 58

Señal en la frecuencia de 400 MHz con umbrales de inicio y fin de la portadora

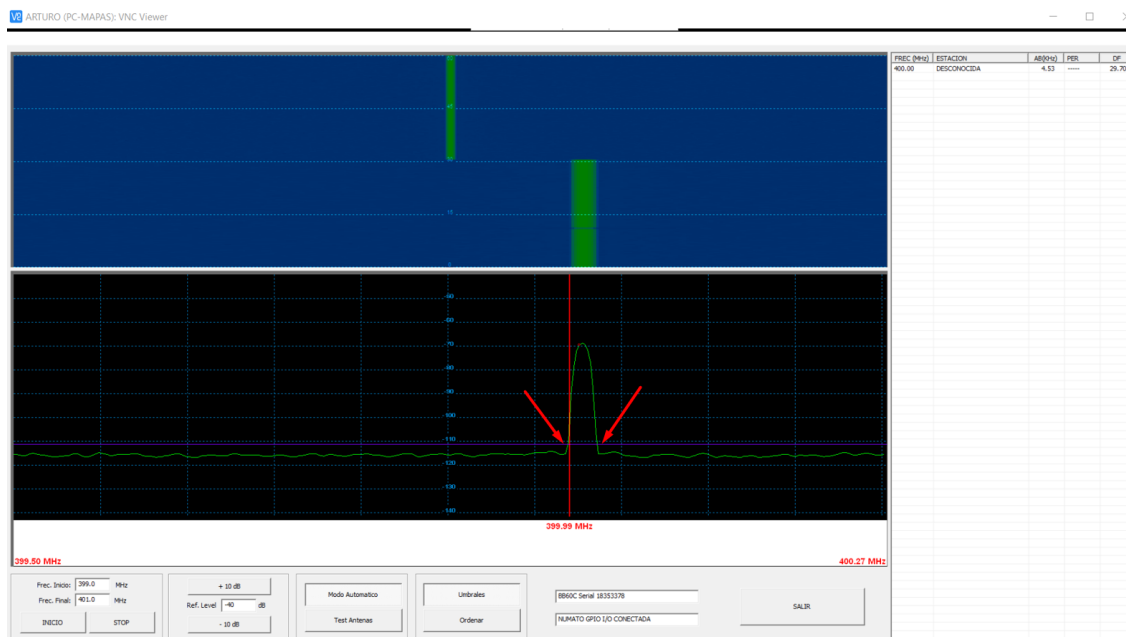
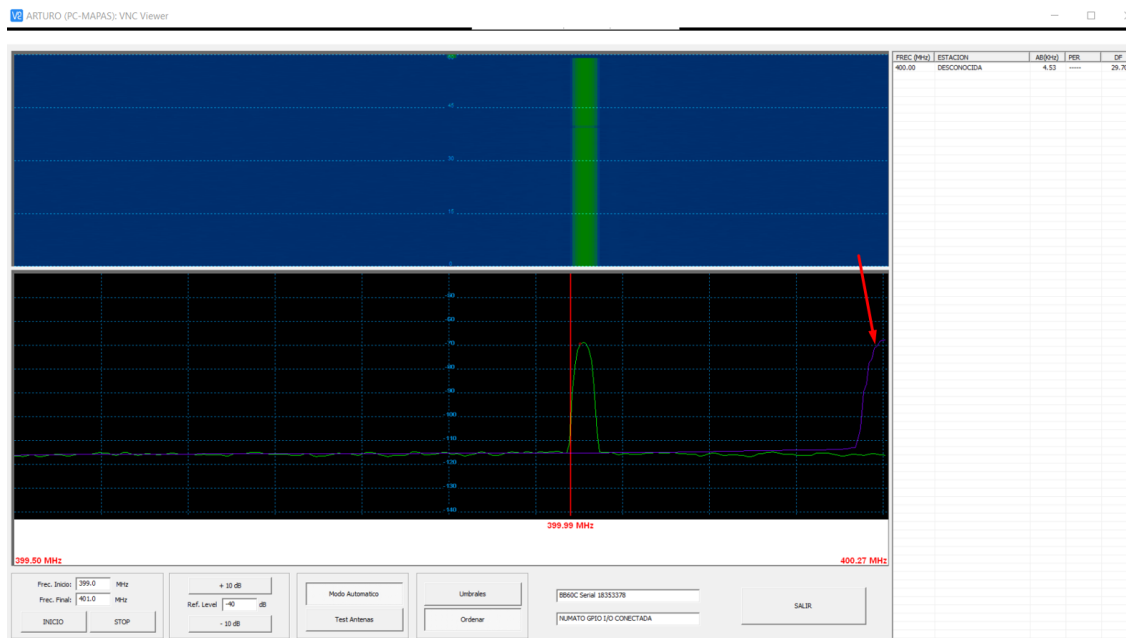


Figura 59

Señal en la frecuencia de 400 MHz con vector ordenado de menor a mayor valor



En este capítulo se presentaron los resultados visuales en la interfaz del sistema Arturo mejorado con la función Procesar_Trace al receptor distintas frecuencias en el prototipo transportable.

En el siguiente capítulo se detallan las conclusiones obtenidas al implementar el trabajo de investigación, además de recomendaciones y futuros trabajos que se recomiendan realizar.

CAPITULO VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

La recuperación progresiva de los sistemas de guerra electrónica del AGRUCOMGE ha permitido insertar tecnología de última generación como el caso del receptor digital BB60C de Signal Hound y de tecnología desarrollada en los laboratorios del CICTE como las antenas log periódicas que junto al sistema Arturo mejorado se incluye funciones que permitieron automatizar los procesos para optimizar la toma de decisiones.

El estudio teórico y analítico de trabajos previos mencionados en la bibliografía del presente trabajo permiten continuar las etapas de investigación e innovación, con etapas de automatización en la programación del sistema, desarrollando un prototipo transportable de monitoreo de señales en la banda de 100 KHz a 6.0 GHz y determinación del AoA en la banda del arreglo circular de cuatro antenas log periódicas. Se continua en la investigación para disponer de nuevos arreglos de antenas para determinar el AoA que cubran la banda debajo de 300 MHz.

Se incorporó al sistema Arturo, la capacidad de determinar automáticamente las características de portadoras y ancho de banda, de cada una de las señales presentes en el espectro radioeléctrico de interés. El sistema entrega al operador de guerra electrónica una tabla en la que se muestra la frecuencia de la portadora, el ancho de banda estimado y el ángulo de arribo de las señales presentes, base fundamental que sin duda será parte de un orden de batalla electrónico para el análisis correspondiente.

El desarrollo del arreglo circular de antenas log periódicas (microstrip) en los laboratorios del CICTE permite obtener las características físicas deseadas para aplicarlo en el sistema Arturo y lograr detectar automáticamente el rango de frecuencias que se han establecido en el trabajo.

Las técnicas avanzadas de procesamiento digital permiten tener una mejora en el sistema Arturo pues al implementar el algoritmo Procesar_Trace descrito se logra automatizar la detección de la frecuencia de portadora y su ancho de banda de las señales presentes en el teatro de operaciones para saber en tiempo cuasi real que frecuencias se encuentra transmitiendo el enemigo.

El sistema Arturo ha ido mejorando a través de los años para garantizar un menor tiempo de procesamiento computacional y ofrecer la oportunidad de obtener el análisis de los datos de manera automática, segura, efectiva y eficaz para tomar acciones que permitan al usuario encontrar la frecuencia que está usando el enemigo.

El prototipo del sistema transportable ofrece bajo peso, volumen y precio comparado a otros equipos importados, ya que es tecnología desarrollada en laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y programas con lenguaje híbrido que facilitan las mejoras continuas para la contribución del desarrollo de las unidades de Guerra Electrónica para el Ejército Ecuatoriano.

Las pruebas realizadas fueron desarrolladas dentro de la Universidad, en el sector del estadio, las mismas que permitieron obtener los patrones de radiación del arreglo circular de antenas log periódicas para su posterior procesamiento.

Las pruebas en tiempo real fueron realizadas en el mismo espacio y bajo las mismas condiciones para poner en ejecución la función Procesar_Trace introducida en

el programa Arturo y verificar la detección automática de diferentes frecuencias y sus anchos de banda.

Recomendaciones

Se recomienda realizar una capacitación previa del uso del Sistema Arturo, que permitirá comprender el funcionamiento del mismo y esto ampliará la visión de los nuevos investigadores para optimizar las funciones existentes o desarrollar nuevas propuestas.

Se recomienda utilizar material rígido y liviano para la estructura del prototipo transportable, ya que permite ser maniobrable, estético a la vista y seguro para que pueda contener todos los equipos requeridos para el monitoreo del espectro y encontrar automáticamente la frecuencia y el ancho de banda que está usando el enemigo.

Se recomienda realizar la programación de funciones extras del sistema en un software matemático como Matlab para hacer el análisis matemático con más facilidad para luego realizar el cambio de lenguaje a C++ y adaptarlo al sistema Arturo.

Para cualquier otro arreglo de antenas se recomienda hacer el mismo proceso presentado, realizar la toma de datos y formar el patrón de radiación que servirá como base de datos para comparar con la recepción de señales en tiempo real en el campo y obtener la aproximación del ángulo de arribo.

Se recomienda que la ejecución de pruebas operativas sea realizada de manera real considerando el espacio, obstáculos, condiciones meteorológicas y demás factores que puedan ocasionar cierta variabilidad de los aspectos estudiados en el desarrollo del presente trabajo.

Se recomienda incluir mayor cantidad de proyectos sobre temas de seguridad y guerra electrónica en la planificación presupuestaria anual de las unidades militares, de

tal forma, que la adquisición de materiales y equipos adecuados sea factible para materializar los proyectos de investigación, realizar la instalación y entregar los sistemas a las unidades interesadas en este tipo de desarrollo tecnológico.

El CICTE ha desplegado innumerables proyectos en beneficio de la comunidad universitaria, sociedad y Fuerzas Armadas permitiendo el desarrollo integral de estudiantes, profesionales e investigadores, por lo que, se recomienda motivar la participación del talento humano civil y militar para la creación de ciencia y tecnología.

Trabajos Futuros

El sistema Arturo tiene un gran potencial de crecimiento por su bajo costo en comparación a otros existentes, por lo que una propuesta de trabajo futuro es compactar este prototipo de tal forma que ocupe el menor espacio posible y se pueda convertir en un sistema móvil (ManPad) que permita transportarlo con más facilidad tanto el sistema con todos los equipos, como las antenas para la recepción en tiempo cuasi real. Cabe recalcar que para esto se recomienda que sea un tipo diferente de antena como un arreglo circular de antenas espirales que ocupan menos espacio (Oñate, 2020) (Pérez, 2020).

Actualmente se ha usado un receptor BB60C, por lo que un trabajo futuro es agregar receptores (al menos uno) para implementar algoritmos AoA utilizando interferometría correlativa. Igualmente, desarrollar varios puestos de monitoreo para realizar triangulación y determinar la ubicación de los emisores de la señal radioeléctricas, además de incrementar la POI.

Una estación de guerra electrónica que cumple con las funciones presentadas en este trabajo al ser adquiridas en otro país tendría un costo muy elevado, sin embargo, en un trabajo futuro se puede implementar mayor cantidad de sistemas como el desarrollado en esta investigación e incluir más funciones con inteligencia artificial (Machine Learning

ML y Deep Learning DL) que permitan continuar cumpliendo los objetivos planteados para la defensa de la soberanía territorial.

Acrónimos

- AGRUCOMGE: Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica
- AI: Inteligencia Artificial
- AoA: Ángulo de Ataque o Ángulo de Arribo
- CEP: Probabilidad de Error Circular
- CICTE: Centro de Investigación de Aplicaciones Militares
- COMINT: Inteligencia de comunicaciones
- COTS: Componentes comerciales de estantería
- DF: Búsqueda de Dirección
- ELINT: Inteligencia Telemétrica
- FPGA: Arreglos de compuertas lógicas programables en sitio
- GPIO: Entrada/Salida de Propósito General
- HDD: Disco Duro
- I+D+i: Investigar, desarrollar e Innovar
- LPDA: Arreglo de Dipolos Log-Periódica
- LO: Oscilador Local
- ML: Aprendizaje Automático
- NUC: Próxima Unidad de Computación
- OEM: Fabricante Original de Equipo
- POI: Probabilidad de Interceptación
- RF: Radiofrecuencia
- SIGINT: Inteligencia de Señales
- SOSA: Arquitectura de Sistemas Abiertos de Sensores
- SSD: Disco de Estado Sólido

Referencias

- Agilent, T. (2019). *Agilent E4438C ESG Vector Signal Generator*. Agilent. Obtenido de <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-01039/data-sheets/5988-4039.pdf>
- Aguirre, D., Acevedo, M., & Gomez, S. (2019). 2D DOA Estimation of quasi-stationary signals for uniform circular arrays via a Khatri-Rao subspace approach. *IEEE International Autumn Meeting on Power, 6*. doi:10.1109/ROPEC48299.2019.9057096
- Álvarez, C. (2016). Espectro radioeléctrico, derechos humanos y competencia. *Revista del Centro de Estudios Constitucionales*, 101-135.
- Ames, B. (2005). Digital receivers power a new generation of electronic warfare. *Military Aerospace Electronics*. Obtenido de <https://www.militaryaerospace.com/communications/article/16708169/digital-receivers-power-a-new-generation-of-electronic-warfare>
- Andrade, S., & Machado, P. (2019). *Desarrollo de un sistema de DF para la banda de 80 MHz - 2 MHz (Tesis de Pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20988>
- BK Precision, E. T. (2021). *Final Test*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2021, de <https://www.finaltest.com.mx/B-K-Precision-1761-p/1761.htm>
- BlueSky Mast, I. (2010). *One Mast. Infinite Configuratios*. Odessa: BlueSky Mast Inc. Obtenido de <https://clallamares.org/library/BlueSky-User-Manual.pdf>
- Calderón, D., & Reinoso, M. (2019). *Desarrollo de un sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 44MHz para la banda de*

10KHz a 6GHz. Sangolquí. Obtenido de
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20817>

Calderón, D., Lara, F., León, R., Moya, H., Paredes, M., Reinoso, M., & Tinoco-S, A. (2021). Arturo System: A Miracle from 1996 to 2021 for Electronic Support Warfare in Ecuadorian Army. *2021 IEEE URUCON* (págs. 26-30). Montevideo: 2021 IEEE URUCON. doi:10.1109/URUCON53396.2021.9647166

Contreras, S. (2021). *Desarrollo de un Sistema de Monitorización del Espectro Radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160 MHz para la banda de 100 kHz a 20 GHz, utilizando el receptor digital SM200B. (Tesis de Pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/23987>

Electrónica, S. (26 de septiembre de 2021). HY-DIV268N-5A. Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://www.sigmaelectronica.net/producto/hy-div268n-5a/>

Electronilab. (s.f.). *Motor Paso a Paso*. Bogotá. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/motor-paso-a-paso-nema-17-25-oz-in-200-pasosvuelta/>

Fley, E. (2014). *Diseño y construcción de un prototipo de antena parabólica y su control automático de orientación para actividades de investigación y experimentación de la carrera de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería*. Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/1454>

Friedrich, N. (2021). AI and Machine Learning redefine the EW Landscape. *Microwave Journal*, 22.

- Gutiérrez, K. (2021). *Desarrollo de un sistema de inteligencia de señales que integre monitorización del espectro radioeléctrico y la obtención del ángulo de arribo de señales de interés para la banda V/UHF (Tesis de pregrado)*. Sangolquí. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25712>
- Haykin, S. (2014). *Digital Communication Systems*. Estados Unidos: Wiley.
- Headquarters, D. o. (2019). *Electronic Warfare Techniques*. Washington: Army Techniques Publication. Obtenido de <https://armypubs.army.mil/>
- Hosking, R. (Junio de 2021). SOSA and VITA: Working Together for Next-Gen Defense Systems. *Microwave Journal*, 22.
- Hound, S. (2021). *BB60C Real-Time Spectrum Analyzer and RF Recorder 9kHz a 6.0 GHz*. Signal Hound. Estados Unidos : Signal Hound. Obtenido de file:///D:/desk/BB60C_sellsheet-Spring-2021.pdf
- Intel, C. (s.f.). *Mini PCs, componentes y computadoras portátiles Intel NUC*. (I. Corporation, Editor) Recuperado el 26 de Septiembre de 2021, de <https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/details/nuc.html>
- Lara, F., León, R., Moya, H., Tinoco, A., Loor, L., & Egüez, G. (2022). Signal Intelligence: Automatic Detection of the Characteristics of Radioelectric Signals Present in the Monitoring of an Instantaneous Bandwidth of 27 MHz (White paper por publicar).
- Microsoft. (26 de septiembre de 2021). *Microsoft*. (Microsoft, Ed.) Obtenido de <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/>
- Mini-Circuits, Inc. (s.f.). *50ΩSP4T Pin Diode, TTL Driver, 10 to 2500 MHz*. Brooklyn: Mini-Circuits.com. Recuperado el 2021, de <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/170285/MINI/ZSDR-425.html>

- Morales, C. (2020). *Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas del tipo log-periódicas impresas para la banda de 2.4 GHz y 5.8 GHz. (Tesis de Pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/21675>
- Moya, H. (2021). *Sistema (Hardware y Software) para la determinación del lóbulo de irradiación de una antena utilizando el BB60C. Reporte Interno*. Sangolquí.
- Naranjo, C. (s.f.). *Determinación de los Puntos de Inicio y Fin de palabras aisladas, basadas en la suma normalizada del contenido energético y la Tasa de cruzamiento*.
- Numato Lab, S. (26 de Septiembre de 2021). Módulo GPIO USB de 8 canales con entradas analógicas. Bangalore, India. Obtenido de <https://numato.com/product/8-channel-usb-gpio-module-with-analog-inputs/>
- Oñate, A. (2020). *Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas impresas para la banda de UHF. (Tesis de pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/21762>
- Ordoñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. (ACTA, Ed.) *Manual formativo de ACTA, 2012(62)*, 17-31.
- Pentek. (Junio de 2021). New Developments in EW and Signals Intelligence. (M. Journal, Ed.) *Microwave Journal*, 22.
- Pentek, I. (Junio de 2021). Pentek Challenges SWaP Constraints with Rugged Small Form Factor Sentinel 26 GHz RF Recorder. *Microwave Journal*, 22.

- Pérez, D. (2020). *Desarrollo de un arreglo de antenas de monitoreo y DF para la banda de 80Mhz – 2Ghz en apoyo a las operaciones militares del agrupamiento de comunicaciones y guerra electrónica*. Sangolquí. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/22643>
- Poisel, R. (2012). *Electronic Warfare Target Location Methods*. Norwood: Artech House.
- Poisel, R. (2014). *Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems*. Norwood, Estados Unidos : Artech House.
- REALVNC. (de 2021). *REALVNC*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2021, de <https://www.realvnc.com/es/connect/download/viewer/>
- Smith, P. (Abril de 2020). Russian Electronic Warfare. *American Security Project*, 1-11.
- Smith, P. (s.f.). Russian Electronic .
- TP-LINK, C. L. (26 de Septiembre de 2021). Rotuer WiFi Doble Banda AC750. *Rotuer WiFi Doble Banda AC750*. (Tp-link, Ed.) Quito , Pichincha , Ecuador . Obtenido de <https://www.tp-link.com/ec/home-networking/wifi-router/archer-c20/#overview>
- Vaccaro, D. (1993). *Electronic Warfare Receiving Systems*. Boston: Artech House.
- Zamora, R. (2012). *Característica de impedancia y radiación de antenas Log-Periódicas de Dipolos en V*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Obtenido de <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/1656>

Anexos