



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.

Gutiérrez Bohórquez, Karina Ximena

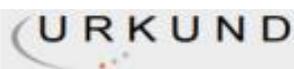
Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

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

M.Sc. León Vásquez, Rubén Darío

26 de agosto de 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TRABAJO KGB REV RL listo .docx (D111726975)
Submitted: 8/27/2021 3:16:00 AM
Submitted By: sixto.reyna@utm.edu.ec
Significance: 7 %

Sources included in the report:

Urkud_Andrade Machado.docx (D54503058)
TG_Bryan_URKUD.docx (D38830064)
urkud_Calderon_Reinoso FINAL-REVISADA.docx (D54457573)
TESIS SANTI URKUND.docx (D98973150)
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/20988/1/T-ESPE-039731.pdf>
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/22397/1/T-ESPE-043750.pdf>
https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-53-2008-OAS-PDF-S.pdf
<https://docplayer.es/62778635-Escuela-politecnica-nacional.html>
https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf
<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/5183/Leodarys%20Sosa%20Brito.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instances where selected sources appear:

39

Firma:



RUBEN DARIO
LEON VASQUEZ

M.Sc. León Vásquez, Rubén Darío

Director

C.C. 1801654284



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **“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”** fue realizado por la señorita **Capt. de Com. Gutiérrez Bohórquez, Karina Ximena** 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 Agosto del 2021

Firma:



firmado electrónicamente por:
**RUBEN DARIO
LEON VASQUEZ**

M.Sc. León Vásquez, Rubén Darío

C.C. 1801654284



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Responsabilidad de autoría

Yo, **Capt. de Com. Gutiérrez Bohórquez, Karina Ximena**, con cédula de ciudadanía n° 1712233715, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“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”** es de mi 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 Agosto del 2021

Firma:

Gutiérrez Bohórquez, Karina Ximena

Capt. de Com.

C.C. 1712233715



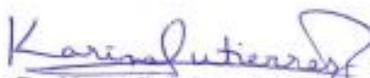
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Autorización de publicación

Yo **Capt. de Com. Gutiérrez Bohórquez, Karina Ximena**, con cédula de ciudadanía n° 1712233715, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“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”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolqui, 26 de Agosto del 2021

Firma:


Gutiérrez Bohórquez, Karina Ximena

Capt. de Com.

C.C. 1712233715

Dedicatoria

Este trabajo de titulación está dedicado a Dios, mi querida madre celestial, y a mi hermosa familia, incluyendo mis abuelitos y mi hermanita, que me guían desde el Cielo.

Mi abuelito Lucio, quien con su fortaleza espiritual le enseñó a mi padre los valores y principios, que lo formaron como un excelente ser humano; mi padre, quien con su buen ejemplo me enseñó las virtudes de la honestidad y del trabajo.

Mi madre, quien con su buen ejemplo me enseñó las virtudes de la solidaridad y de la empatía; mi tía Rocy, quien me contagia su optimismo al encontrar el lado amable de cualquier situación.

Mi hermanita Viviana, quien me motiva a tener confianza en mí misma y luchar por todos mis objetivos y a mi mascota Capuchino, que siempre me recuerda con su leal compañía, que la naturaleza es el regalo más maravilloso que Dios nos ha dado, y que por lo mismo debemos cuidarla día a día.

Karina Ximena Gutiérrez Bohórquez

Agradecimiento

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Institución en la cual he adquirido no solo conocimientos profesionales, sino también en la cual he crecido como ser humano, al superar cada etapa de mi formación profesional al lado de mis compañeros y con la valiosa orientación de mis profesores del Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Al Glorioso Ejército Ecuatoriano, Institución de la cual orgullosamente formo parte, y que me otorgó el privilegio de estudiar una carrera adicional.

A mis tutores de tesis M.Sc. Rubén León, Ph.D. Alexis Tinoco, Ing. Héctor Moya por su guía, apoyo y tantos conocimientos impartidos con generosidad, por amor a la educación, a la ciencia y al desarrollo del país.

A mi Mayor Manolo Paredes y a mi Mayor Pablo Albán, por su motivación y guía al realizar mis prácticas en el Centro de Investigación de Aplicaciones Militares (CICTE), para así llegar a entender la gran importancia del desarrollo tecnológico para la defensa del Ecuador.

Al Sr. Sgop. de TRP. Nicolás Pinto, Sr. Sgos. de A. Aníbal Andrango, y Sr. Cbos. ESP. Walter Lara; por sus valiosas contribuciones en los diseños mecánicos y pruebas operativas, indispensables para complementar la operación electrónica del sistema de guerra electrónica pasiva empleado en el proyecto.

Karina Ximena Gutiérrez Bohórquez

Contenido

Análisis de Urkund	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de tablas	12
Índice de figuras	13
Listado de Abreviaturas	16
Resumen	21
Abstract	22
Capítulo I	23
Introducción	23
Antecedentes	23
Planteamiento del Problema	24
Justificación	24
Objetivos	26
Objetivo General	26
Objetivos Específicos	26
Alcance	27
Capítulo II	28
Fundamentos Teóricos	28
Origen de las Radiocomunicaciones	28
Radiocomunicaciones	31

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT	31
ARCOTEL	32
Espectro Radioeléctrico	32
Ondas de Radio.....	33
Banda de frecuencia VHF.....	34
Banda de frecuencia UHF	34
Propagación de ondas de radio en VHF / UHF	35
Guerra de Información	36
Guerra Electrónica	38
Guerra Electrónica Pasiva	39
Guerra Electrónica en el campo de la Radiodifusión.....	40
Medidas de Apoyo de Guerra Electrónica.....	40
Búsqueda Electrónica	40
Identificación	41
Localización Electrónica.....	42
Contramedidas Electrónicas	42
Contramedidas Electrónicas Duras.....	42
Contra - Contramedidas Electrónicas.....	43
Probabilidad de Interceptación	43
Tecnología para la detección rápida del espectro de RF de banda ancha	44
Ángulo de Arribo	46
Direction Finding (Búsqueda de Dirección)	47
Línea de base	49
Distancia de la línea de base	50
Probabilidad de Error Circular.....	51
El nuevo estado del arte	52

	10
Defensa de objetivos móviles.....	52
DARPA.....	54
Capítulo III	56
Análisis y Descripción de los Equipos	56
Receptor digital de RF BB60C.....	57
Análisis de barrido.....	58
Análisis de espectro en tiempo real.....	58
Arquitectura del Receptor de RF BB60C.....	59
Switch de RF de 8 puertos.....	61
Motor de pasos.....	64
Parámetros de los motores de pasos:.....	64
Driver del motor de pasos	66
Board I/O de 8 puertos	67
Base de antenas	69
Antena Log-Periódica	70
Antena Sectorial Industrial	72
Plato reflector parabólico	74
Alimentación central.....	74
Antena Espiral	76
Trípode.....	77
Computador.....	79
Acoplamientos mecánicos	80
Router TP-LINK.....	83
NUC	84
Fuente de Poder	84
Generador de Señales.....	85

Capítulo IV	87
Desarrollo del Sistema y Pruebas	87
Implementación de la Plataforma de Pruebas.....	87
Procedimiento para realizar las pruebas	88
Obtención del Ángulo de Arribo.....	90
Pruebas con el Primer Sistema de Recepción	91
Recepción de Señales Radioeléctricas en el Primer Sistema.....	93
Algoritmo para obtener el AoA del Primer Sistema de Recepción	94
Interfaz utilizada para obtener el AoA.....	94
Sistema Arturo.....	96
Resultados del Primer Sistema de Recepción	96
Pruebas con el Segundo Sistema de Recepción	99
Recepción de Señales Radioeléctricas en el Segundo Sistema.....	100
Algoritmo para obtener el AoA del Segundo Sistema de Recepción	101
Procedimiento para utilizar la Tabla de relación de potencias	102
Resultados del Segundo Sistema de Recepción	103
Capítulo V	107
Conclusiones y recomendaciones	107
Conclusiones.....	107
Recomendaciones.....	110
Trabajos futuros	111
Referencias	113
Anexos.....	119

Índice de tablas

Tabla 1.	<i>Guerra de la información: ¿qué hay de nuevo y qué es efectivo?</i>	37
Tabla 2.	<i>Equivalencias de términos Español / Inglés</i>	44
Tabla 3.	<i>FI utilizada para cada rango de frecuencias RF</i>	60
Tabla 4.	<i>Especificaciones técnicas del Receptor de RF BB60C</i>	61
Tabla 5.	<i>Especificaciones técnicas del switch HMC321ALP4E</i>	63
Tabla 6.	<i>Especificaciones técnicas del módulo GPIO</i>	69
Tabla 7.	<i>Especificaciones técnicas de la antena TDJ-0727DSAN10</i>	72
Tabla 8.	<i>Especificaciones técnicas de la antena tipo domo PE51058</i>	73
Tabla 9.	<i>Frecuencias que fueron probadas el primer día</i>	91
Tabla 10.	<i>Frecuencias que fueron probadas el segundo día</i>	92
Tabla 11.	<i>Frecuencias que fueron probadas el tercer día</i>	92
Tabla 12.	<i>Frecuencias probadas en la segunda plataforma</i>	99
Tabla 13.	<i>Comparación entre las dos plataformas de pruebas implementadas</i> ...	106

Índice de figuras

Figura 1. <i>Aparato usado por Hertz para producir ondas de radio</i>	29
Figura 2. <i>Aparato usado por Hertz para descubrir ondas de radio</i>	29
Figura 3. <i>Onda electromagnética polarizada plana</i>	33
Figura 4. <i>Trayectorias de Propagación</i>	33
Figura 5. <i>Las reflexiones de onda ocasionan distorsión por trayectoria múltiple</i>	35
Figura 6. <i>Difracción en VHF / UHF</i>	35
Figura 7. <i>Ejemplo de una línea de rumbo</i>	48
Figura 8. <i>Ejemplo de un corte general</i>	48
Figura 9. <i>Ejemplo de una posición fija</i>	49
Figura 10. <i>Línea de base cóncava</i>	50
Figura 11. <i>Línea de base convexa</i>	49
Figura 12. <i>Distancia de línea de base</i>	50
Figura 13. <i>Probabilidad de Error Circular</i>	51
Figura 14. <i>Relaciones entre: Diversidad, Barajado y Redundancia</i>	53
Figura 15. <i>Receptor de RF BB60C</i>	57
Figura 16. <i>Arquitectura del Receptor de RF BB60C</i>	60
Figura 17. <i>Switch de RF de 8 puertos y su diagrama funcional</i>	62
Figura 18. <i>Tabla de verdad para obtener la salida del puerto RFC</i>	63
Figura 19. <i>Esquema de un motor de pasos bipolar de dos fases</i>	64
Figura 20. <i>Motor de pasos 86HS8040A4J</i>	66
Figura 21. <i>Diagrama de conexión</i>	66
Figura 22. <i>Driver HY-DIV268N-5A</i>	67
Figura 23. <i>Board I/O de 8 puertos y su interfaz como puerto USB</i>	68

	14
Figura 24. <i>Base de antenas metálica</i>	70
Figura 25. <i>Antena Log Periódica</i>	71
Figura 26. <i>Antena tipo domo PE51058</i>	73
Figura 27. <i>Plato parabólico de Antenna Research y Geometría de la antena</i>	75
Figura 28. <i>Antena Espiral de Antenna Research CBS-218-40</i>	77
Figura 29. <i>Trípodes BlueSky Mast</i>	78
Figura 30. <i>Especificaciones técnicas del computador</i>	79
Figura 31. <i>Acoplamiento del motor de pasos al trípode</i>	81
Figura 32. <i>Diseño de la pieza realizada en SolidWorks</i>	81
Figura 33. <i>Acoplamiento de la base de antenas al motor de pasos</i>	82
Figura 34. <i>Impresión en 3D del acoplamiento de la antena espiral</i>	82
Figura 35. <i>Estándares Wi-Fi y respectivas velocidades de transmisión</i>	83
Figura 36. <i>Router AC750 Archer C20</i>	83
Figura 37. <i>NUC colocado en la bandeja porta-elementos</i>	84
Figura 38. <i>Fuente de Poder</i>	85
Figura 39. <i>Generador de Señales Agilent E4438C</i>	86
Figura 40. <i>Primera plataforma de pruebas implementada</i>	87
Figura 41. <i>Diagrama de conexión de los elementos del primer sistema de recepción</i> ...	88
Figura 42. <i>Verificación de los dispositivos conectados a la red del router TP-LINK</i>	89
Figura 43. <i>Conexión al NUC mediante VNC Viewer</i>	89
Figura 44. <i>Interfaz del programa para la frecuencia de 975 MHz</i>	93
Figura 45. <i>Interfaz del programa para la frecuencia de 1025 MHz</i>	95
Figura 46. <i>Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 425 MHz</i>	97
Figura 47. <i>Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 975 MHz</i>	97
Figura 48. <i>Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 1025 MHz</i>	98

Figura 49. <i>Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 1575 MHz</i>	98
Figura 50. <i>Segunda plataforma de pruebas implementada</i>	100
Figura 51. <i>Tabla de relación de potencias para la frecuencia de 2 GHz</i>	102
Figura 52. <i>Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 200 MHz</i>	103
Figura 53. <i>Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 750 MHz</i>	104
Figura 54. <i>Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 1250 MHz</i>	104
Figura 55. <i>Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 1750 MHz</i>	105

Listado de Abreviaturas

ADC (del inglés, analog-to-digital converter)	convertidor de analógico a digital
AGRUCOMGE	Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica
AoA (del inglés, angle of arrival)	ángulo de arribo
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
BLOS (del inglés, beyond line of sight)	ondas espaciales
CAD (del inglés, computer-aided design)	diseño asistido por computadora
CBS	del inglés, Cavity Backed Spirals
CICTE	Centro de Investigación de Aplicaciones Militares
C2W (del inglés, Command-and-Control Warfare)	guerra de mando y control
C3I2	Estructura de comando, control, comunicaciones, inteligencia e informática
CNN (del inglés, Cable News Network)	Red de Noticias por Cable
C.M.E.	Contramedidas electrónicas
C.C.M.E.	Contra - Contramedidas electrónicas
CEP (del inglés, circular error probability)	probabilidad de error circular
COMINT (del inglés, COMMunications INTelligence)	Inteligencia de Comunicaciones
CW (del inglés, continuous wave)	onda continua
CS (del inglés, compressed-sampling)	muestreo comprimido
QAIC (del inglés, quadrature analog-to-information converter)	

convertidor en cuadratura de analógico a información

DARPA del inglés, Defense Advanced Research Projects Agency

2D dos dimensiones

3D tres dimensiones

dB decibel

DBS del inglés, direct broadcast satellite

DC (del inglés, Direct Current) corriente continua

DES del inglés, Data Encryption Standard

DF (del inglés, Direction Finding) Búsqueda de Dirección

DoD-USA del inglés, Department of Defense of the United States of America

DUT (del inglés, device under test) dispositivo bajo prueba

ECM del inglés, Electronic Counter Measures

ECCM del inglés, Electronic Counter - Counter Measures

ELINT (del inglés, ELectronic INTelligence) Inteligencia Electrónica

ERI del inglés, Electronics Resurgence Initiative

ESM del inglés, Electronic Support Measures

EW (del inglés, Electronic Warfare) Guerra Electrónica

EIW (del inglés, Economic Information Warfare) guerra de información económica

F/B del inglés, Front/Back Ratio relación frente / espalda

FI	frecuencia intermedia	
FPGA (del inglés, Field Programmable Gate Array)	matriz de puertas lógicas programable	
FFT (del inglés, Fast Fourier Transform)	Transformada Rápida de Fourier	
5G	quinta generación de tecnologías móviles	
G.E.	Guerra Electrónica	
GMREC	Grupo de Monitoreo y Reconocimiento Electrónico Conjunto	
GPIO	del inglés, general-purpose input/output	
HF (del inglés, High Frequency)	Frecuencia Alta	
IBW (del inglés, Intelligence-based Warfare)	guerra basada en inteligencia	
IDE (del inglés, Integrated Development Environment)	entorno de desarrollo integrado	
IEEE	del inglés, Institute of Electrical and Electronics Engineers	
IP (del inglés, Internet Protocol)	Protocolo de Internet	
I / Q	del inglés, In-Phase (I) and Quadrature (Q)	
ITU-R	Sector de Radiocomunicaciones de la UIT	
ITU-T	Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT	
ITU-D	Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones de la UIT	
LED (del inglés, light-emitting diode)	diodo emisor de luz	
LOB (del inglés, line of bearing)	línea de rumbo	

LOS (del inglés, line of sight)	línea de vista
LHCP	del inglés, Left Hand Circular Polarized
LPDA	del inglés, log-periodic dipole-array
Me-TV	del inglés, Memorable Entertainment Television
ML	del inglés, Machine Learning
MTD (del inglés, Moving Target Defense)	defensa de objetivo en movimiento
NUC	del inglés, Next Unit of Computing
OEM	del inglés, Original Equipment Manufacturer
OL	oscilador local
PKE	del inglés, public key encryption
POI (del inglés, Probability of Intercept)	probabilidad de interceptación
PSYW (del inglés, PSYchological Warfare)	guerra psicológica
QFN	del inglés, Quad Flat No-Lead
RBW (del inglés, resolution bandwidth)	resolución de ancho de banda
RF	radiofrecuencia
RHCP	del inglés, Right Hand Circular Polarized
Rx	Recepción
SHF (del inglés, Super High Frequency)	Frecuencia Super Alta
SSH	del inglés, Secure SHell

SSID	del inglés, Service Set Identifier	
SIGINT (del inglés, SIGnal INTelligence)		Inteligencia de Señales
TTL	del inglés, Transistor-transistor logic	
Tx	Transmisión	
U.F.A.-ESPE	Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"	
UHF (del inglés, Ultra High Frequency)		Frecuencia Ultra Alta
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones	
USB	del inglés, Universal Serial Bus	
VHF (del inglés, Very High Frequency)		Frecuencia Muy Alta
VM (del inglés, virtual machine)		máquina virtual
VNC	del inglés, Virtual Network Computing	
V.S.W.R	del inglés, Voltage Standing Wave Ratio	Relación de onda estacionaria
Wi-Fi (del inglés, Wireless-Fidelity)		Internet inalámbrica

Resumen

El proyecto presentado tiene por objetivo desarrollar un sistema de monitorización de señales radioeléctricas con alta probabilidad de interceptación (POI, del inglés Probability of Intercept) superior al 90% integrado con un sistema de localización de señales radioeléctricas a través del estudio y análisis de técnicas de determinación del ángulo de arribo (AoA, del inglés Angle of Arrival) para la banda de V/UHF (del inglés, Very/Ultra High Frequency), utilizando la filosofía del sistema Arturo [5, 12], haciendo uso de metodologías OEM (del inglés, Original Equipment Manufacturer) [14, 49], enfocadas a incrementar las capacidades operativas de las Fuerzas Armadas del Ecuador. Este sistema permitirá fortalecer el control del espectro radioeléctrico de posibles amenazas, que pongan en riesgo la seguridad de la ciudadanía y soberanía territorial, para lo cual se ejecutarán las siguientes actividades generales:

- a) Inicialmente, se realizará un estudio y análisis del estado del arte sobre algunos métodos de monitorización y determinación del AoA.
- c) A partir de la información recabada, se verificarán las aplicaciones específicas con base en los requerimientos inicialmente impuestos; que incluyen: detección, identificación, reconocimiento, seguimiento, discriminación y ubicación del objetivo.
- e) Finalmente, toda la tecnología desarrollada será evaluada experimentalmente con los sistemas de vigilancia y reconocimiento que se encuentran disponibles en el CICTE y los que pusieron a disposición mis tutores.

Palabras Clave:

- **GUERRA ELECTRÓNICA**
- **POI (PROBABILIDAD DE INTERCEPTACIÓN)**
- **AoA (ÁNGULO DE ARRIBO)**

Abstract

The project to be executed aims to develop a radio signal monitoring system with a high POI (probability of intercept) greater than 90%, integrated with a radio signal location system through the study and analysis of techniques for determining the AoA (angle of arrival) for the V/UHF band, using the philosophy of the Arturo system [5, 12], by using OEM (Original Equipment Manufacturer) methodologies [14, 49], focused on increasing the operational capabilities of the Armed Forces of Ecuador. This system will make it possible to strengthen the control of the radio-electric spectrum from possible risks that may endanger the safety of citizens and territorial sovereignty, for which the following general activities will be carried out:

- a) Initially, a study and analysis of the state of the art will be carried out on some methods of monitoring and determining AoA.
- c) Based on the information collected, the specific applications will be verified based on the initially imposed requirements; which include: detection, identification, recognition, tracking, discrimination and target location.
- e) Finally, all the technology developed will be evaluated experimentally using the surveillance and recognition systems that are available at the CICTE and those that were made available by my tutors.

Key words:

- **ELECTRONIC WARFARE**
- **POI (PROBABILITY OF INTERCEPT)**
- **AoA (ANGLE OF ARRIVAL)**

Capítulo I

Introducción

Este capítulo realiza una descripción de los principales conceptos que permitirán entender más claramente al trabajo de investigación titulado: “Desarrollo de un sistema de inteligencia de señales que integre la monitorización del espectro radioeléctrico y la obtención del ángulo de arribo de señales de interés para la banda V/UHF”.

Antecedentes

El combate electrónico tiene como objetivo apoyar el despliegue y el empleo de los sistemas de armas propios, mediante la monitorización del espectro radioeléctrico utilizado para un posterior ataque a la red de comunicaciones del enemigo, interfiriendo así con su sistema de mando y control directa e indirectamente, convirtiendo al espectro radioeléctrico en un campo de batalla primordial en cualquier tipo de conflicto. (Sempere, 2006, pág. 223)

La Guerra Electrónica (G.E.) es una maniobra llevada a cabo de manera técnica, es decir; necesita de talento humano capacitado en las diferentes tecnologías disponibles en nuestras Fuerzas Armadas, para estar en condiciones de realizar G.E. pasiva y activa eficientemente.

La G.E. es una maniobra constante porque se trabaja recopilando información sobre las capacidades del enemigo en tiempos de paz, para así poder utilizar toda esta inteligencia en tiempos de guerra y estar en condiciones de defender nuestro sistema de mando y control, mientras se perjudica al del enemigo.

Con el desarrollo de un sistema de inteligencia de señales que integre la monitorización del espectro radioeléctrico y la obtención del AoA de señales de interés

para la banda V/UHF, se pretende fortalecer una de las principales capacidades de la G.E., la misma que requiere de medios para: detectar, identificar y localizar posibles amenazas. En este caso la posible amenaza está representada por sistemas de comunicaciones enemigos que ocupen las bandas V/UHF.

Planteamiento del Problema

La tecnología ha intentado resolver los problemas esenciales de la misión militar, que son: poder de destrucción, protección, movilidad, mando y control, comunicaciones y apoyo logístico. (Sempere, 2006, pág. 36)

El mando y control requiere de medios de: observación, recopilación, y análisis de la información; para lograr determinar con precisión, y anticipación la ubicación del enemigo, y el estado del mismo; para así tomar decisiones exitosas respecto de las acciones a seguir por parte de fuerzas propias. (Sempere, 2006, pág. 37)

El AGRUCOMGE a través de la Compañía de Guerra Electrónica, la misma que se encuentra bajo mando operacional del Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas, cumple actividades de G.E. pasiva y activa en coordinación con el Grupo de Monitoreo y Reconocimiento Electrónico Conjunto (GMREC).

Este trabajo fue concebido para apoyar las operaciones militares de la Compañía de Guerra Electrónica, ya que la misma no cuenta con un sistema de inteligencia de señales para la banda V/UHF de última generación.

Justificación

El presente proyecto busca desarrollar un sistema de inteligencia de señales que integre la monitorización del espectro radioeléctrico y la obtención del AoA de señales de

interés para la banda V/UHF, con anchos de banda instantáneos de al menos 27 MHz y POI superior al 90% para el AGRUCOMGE.

Los principales inconvenientes que se presentan a la hora de usar sistemas ya existentes en el mercado de G.E. son:

- i) Los altos costos y alta reserva (propietarios de la industria de la defensa mundial) de los sistemas existentes,
- ii) La falta de soporte en mediano y largo plazo,
- iii) Deficiencia en la transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción,
- iv) La necesidad de obtener permisos de exportación de gobiernos extranjeros como el *DoD-USA* (del inglés, Department of Defense of the United States of America).

Contrariamente, los sistemas que se desarrollan en base a la investigación aplicada e ingeniería inversa subsanan estos inconvenientes con costos muy reducidos, se tiene la garantía de una transferencia de tecnología real dentro de todos los procesos de implementación y generación de masa crítica para la investigación aplicada, con fines de seguridad y defensa.

Por lo tanto, la monitorización del espectro radioeléctrico y la búsqueda del AoA efectiva, a través de la investigación y del propio desarrollo pueden ser solventadas generando como resultado mejores herramientas de guerra activa que sobre todo son parte intrínseca y propietaria del sistema general de vigilancia y seguridad.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema de inteligencia de señales que integre monitorización del espectro radioeléctrico y la obtención del AoA de señales de interés para la banda V/UHF, con anchos de banda instantáneos de al menos 27 MHz y POI superior al 90% para el AGRUCOMGE del Ejército Ecuatoriano.

Objetivos Específicos

Realizar el estudio y análisis del estado del arte en relación a las técnicas de monitorización de señales radioeléctricas y a la determinación del AoA.

Desarrollar técnicas y algoritmos que permitan determinar las señales radioeléctricas en la banda de V/UHF, así como la determinación del AoA de las señales presentes, enfocadas a fin de incrementar la capacidad de respuesta de los sistemas de seguridad y vigilancia pública.

Coordinar con el grupo que desarrolle el sistema de monitorización y detección de múltiples señales, para obtener la información del objetivo a ser ubicado, cumpliendo con todas las fases del sistema, es decir: detección, identificación, reconocimiento, seguimiento, discriminación y ubicación del objetivo.

Evaluar los algoritmos y procesos desarrollados en el sistema de monitorización y AoA de señales radioeléctricas en el CICTE, que dispone de las herramientas necesarias para tal fin.

Evaluar experimentalmente las técnicas desarrolladas en los sistemas de monitorización y localización de señales radioeléctricas, utilizando los medios disponibles y poder extender los resultados a bandas de frecuencias superiores.

Alcance

Este proyecto de investigación que se pretende entregar al CICTE tiene como objetivo el diseño y desarrollo de un sistema de inteligencia de señales para la banda V/UHF, con el fin de contribuir al fortalecimiento operacional de la Compañía de Guerra Electrónica del AGRUCOMGE.

La Compañía de Guerra Electrónica está conformada por tres pelotones: Seguridad Electromagnética, Goniometría y Bloqueo Electrónico. Este proyecto fortalecerá directamente las funciones de interceptación y de radio localización; que son algunas de las tareas claves designadas al pelotón de Seguridad Electromagnética.

Este primer capítulo brinda una reseña introductoria, la misma que incluye: antecedentes, problema, justificación de la investigación, objetivos y alcance del trabajo.

El siguiente capítulo, describe los fundamentos teóricos necesarios para facilitar la comprensión y desarrollo del proyecto con mayor claridad y eficiencia.

Capítulo II

Fundamentos Teóricos

En este capítulo se describe la teoría fundamental sobre las radiocomunicaciones y la gestión del espectro radioeléctrico; se detallan los conceptos de guerra de la información, la misma que incluye a la G.E., la cual emplea diferentes sistemas de inteligencia de señales.

Origen de las Radiocomunicaciones

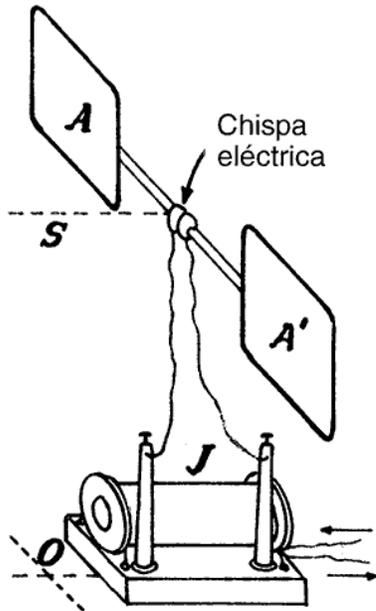
La tecnología empleada en los sistemas de comunicación actuales, se originó en 1873 con la publicación del Tratado de Electricidad y Magnetismo, escrito por el científico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), en el cual se establece la teoría sobre la propagación de las ondas electromagnéticas. (Harris Corporation, 1998, pág. 1)

En 1888, el científico alemán Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) descubrió las ondas de radio mediante una serie de experimentos. Utilizando una bobina de inducción conectada a dos láminas de cobre A y A', las dos esferas metálicas de latón separadas por un pequeño espacio de aire, adquirieron un potencial eléctrico diferente; tal que en un momento dado se produjo una descarga eléctrica.

Conforme se ilustra en la Figura 1, este era un circuito oscilante que producía descargas a la frecuencia de resonancia y según la Teoría de Maxwell cada oscilación produciría una onda electromagnética que se propagaría a la velocidad de la luz. (González, 2009)

Figura 1.

Aparato usado por Hertz para producir ondas de radio

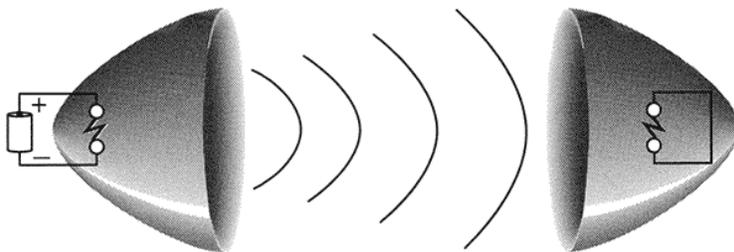


Nota: Tomado de (González, 2009).

En otro experimento, ilustrado en la Figura 2, Hertz utilizó espejos parabólicos para concentrar y enfocar las ondas en el transmisor y receptor, mediante estos experimentos demostró que estas ondas eran de origen electromagnético y que su velocidad era aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s.

Figura 2.

Aparato usado por Hertz para descubrir ondas de radio



Nota: Tomado de (González, 2009).

Guglielmo Marconi (1874-1937) fue un investigador italiano quien demostró la transmisión de las ondas de radio a larga distancia. En 1901 logró la transmisión de una señal telegráfica a través del océano Atlántico desde Cornwall, Inglaterra hasta Newfoundland, Canadá.

En 1909, Marconi fue galardonado conjuntamente con el alemán Carl Ferdinand Braun (1850-1918), con el Premio Nobel de Física, en reconocimiento a sus contribuciones al desarrollo de la telegrafía inalámbrica. (Onion, Sullivan, & Mullen, 2010)

Edward Appleton (1892-1965) fue un físico británico que recibió el Premio Nobel de Física en 1947 por sus investigaciones de la física de la atmósfera superior. (Harris Corporation, 1998, pág. 2)

Cuando se logró enviar señales de radio a través del Atlántico a principios del siglo XX, varios físicos asumieron que las ondas de radio se reflejaban en una capa de la atmósfera, y en 1924 Appleton finalmente estableció la existencia de la ionósfera.

Con el objetivo de lograr la radiodifusión alrededor del mundo, continuó realizando experimentos y en 1926 descubrió una capa atmosférica adicional, localizada a 150 millas sobre el nivel del suelo, la misma que recibió el nombre de: capa Appleton, en su honor; la cual refleja ondas cortas alrededor de la tierra, adicionalmente descubrió que las manchas solares son potentes emisores para este tipo de ondas.

Sir Robert Watson-Watt (1892-1973) fue un ingeniero y físico escocés, quien se apoyó en los descubrimientos de Appleton, para desarrollar el primer sistema de defensa basado en radares. (Nobel Lectures, Physics 1942-1962, 1964)

En el campo militar, durante la segunda guerra mundial, las radios que operaban en el rango de frecuencias denominado HF (del inglés, High Frequency), se convirtieron en el principal medio de comunicaciones para los comandantes de aire, mar y tierra.

También se utilizó por primera vez la tecnología de radares, como parte del sistema defensivo. (Harris Corporation, 1998, pág. 2)

El conocimiento de radiocomunicaciones sigue construyéndose de generación en generación, lo cual ha permitido llegar a adelantos científicos tanto en el campo civil como en el militar.

Radiocomunicaciones

Dentro del espectro radioeléctrico se asignan bandas de frecuencia para servicios de telecomunicaciones específicos como son: aviación, marítimo, militar, gubernamental, radiodifusión y radioaficionados. Las frecuencias son asignadas por tratados internacionales y por autorización de instituciones nacionales. (Harris Corporation, 1998, pág. 7)

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) está compuesta por tres organismos: Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R), Sector de Normalización de las Telecomunicaciones (UIT-T) y Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones (UIT-D).

La misión de la ITU-R es garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz, económica y sin interferencias del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los que utilizan órbitas de satélites, así como la de realizar estudios y adoptar recomendaciones en materia de radiocomunicaciones.

La misión se sitúa en el marco más amplio del objeto de la UIT, que se define en el Artículo 1 de su Constitución, y consiste especialmente en "mantener y ampliar la

cooperación internacional entre todos sus Estados Miembros para el mejoramiento y el empleo racional de todo tipo de telecomunicaciones". (UIT)

ARCOTEL

En nuestro país la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) es la encargada de regular el uso del espectro radioeléctrico y los servicios de telecomunicaciones con la finalidad de garantizar el derecho de acceso a servicios de calidad, convergentes, con precios y tarifas equitativas; gestionar los recursos inherentes a las telecomunicaciones, mediante su asignación transparente, equitativa, eficiente y ambientalmente sostenible; controlar el uso del espectro radioeléctrico, y la prestación de servicios de telecomunicaciones con calidad, universalidad, accesibilidad, continuidad, seguridad en las comunicaciones y protección de datos personales. (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones)

Espectro Radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es la parte del espectro electromagnético que va desde 1 Hz a 3 THz. Las ondas electromagnéticas en este rango de frecuencia, llamadas ondas de radio, se han vuelto ampliamente utilizadas en la tecnología moderna, principalmente en las telecomunicaciones. (U.S. Department of Transportation, 2017)

El espectro radioeléctrico tiene una importancia creciente para el desarrollo social y económico de un país y es considerado por la Constitución de la República del Ecuador como un sector estratégico, por lo tanto, el Estado se reserva el derecho de su administración, regulación, control y gestión.

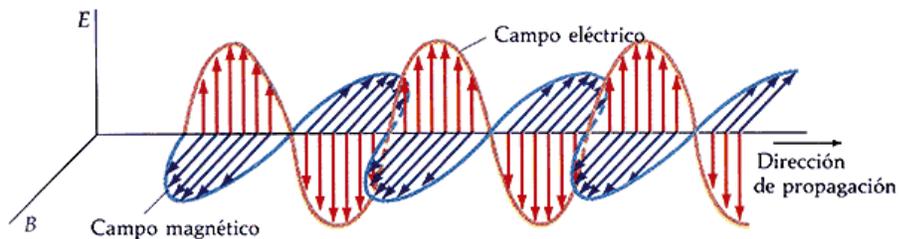
La legislación de telecomunicaciones ecuatoriana lo define como un recurso natural limitado, perteneciente al dominio público del Estado, inalienable e imprescriptible. (Espectro Radioeléctrico, 2021)

Ondas de Radio

Una onda de radio es una onda electromagnética, ilustrada en la Figura 3; la misma que puede transportar información, al ser modulada en: amplitud, frecuencia, fase, o una combinación de las anteriores.

Figura 3.

Onda electromagnética polarizada plana

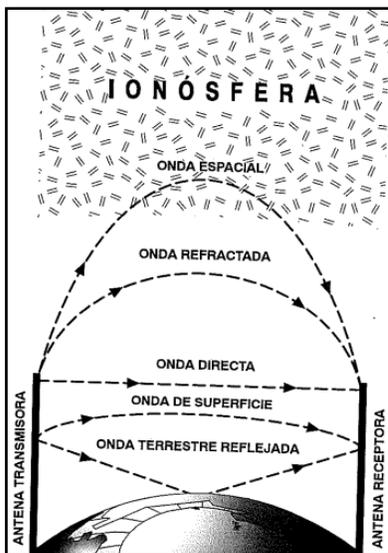


Nota: Tomado de (González, 2009).

La clasificación de las ondas terrestres: ondas de superficie, ondas directas y ondas terrestres reflejadas, se puede observar en la Figura 4.

Figura 4.

Trayectorias de Propagación



Nota: Tomado de (Harris Corporation, 1998, pág. 18).

Las ondas directas, se las llama también ondas de línea de vista (LOS, del inglés line of sight), en este caso es mandatorio que las antenas transmisora y receptora se vean entre sí. (Harris Corporation, 1998, pág. 10)

Las ondas espaciales permiten las comunicaciones sin necesidad de tener línea de vista (BLOS, del inglés beyond line of sight). (Harris Corporation, 1998, pág. 11)

Banda de frecuencia VHF

La banda llamada VHF (del inglés, Very High Frequency) abarca el rango de frecuencias desde 30 a 300 MHz. Sus longitudes de onda varían desde 10 m en la parte baja hasta 1 m en la parte alta. Esto produce que el tamaño de las antenas sea menor en relación al tamaño de las mismas utilizadas para radios que operan en HF. (Harris Corporation, 2000, pág. 7)

Las radios VHF disponen de un mayor ancho de banda que HF, lo que ha permitido mejorar la eficiencia de los esquemas de codificación y encriptación. (Harris Corporation, 2000, pág. 2)

Banda de frecuencia UHF

La banda denominada UHF (del inglés, Ultra High Frequency) contiene las frecuencias desde 300 a 3.000 MHz. Sus longitudes de onda varían desde 1 m en la parte baja hasta pocos cm en la parte alta. (Harris Corporation, 2000, pág. 9)

Esto produce que el tamaño de las antenas sea menor en relación al tamaño de las mismas utilizadas para radios que operan en VHF, razón por la cual se utiliza esta tecnología en aviones supersónicos de combate. (Harris Corporation, 2000, pág. 3)

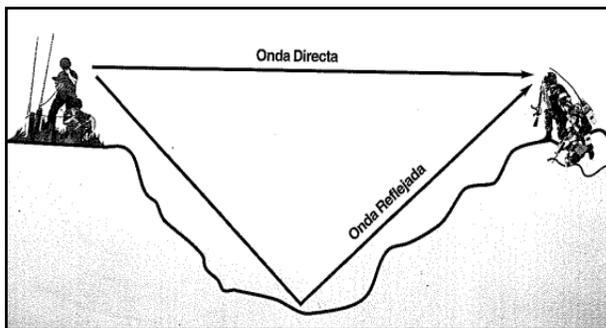
Propagación de ondas de radio en VHF / UHF

Las antenas de transmisión y recepción de las radios que utilizan estos rangos de frecuencias, requieren de una trayectoria despejada, es decir deben tener línea de vista. La propagación de las ondas de radio en VHF / UHF es afectada por la topografía local del área y por las condiciones de la atmósfera.

La distorsión por trayectoria múltiple, representada en la Figura 5, se produce cuando las ondas llegan al receptor, procedentes de varias trayectorias. La difracción de las ondas, se puede observar en la Figura 6; la misma tiene lugar cuando las ondas se doblan alrededor de bordes agudos. (Harris Corporation, 2000, pág. 31)

Figura 5.

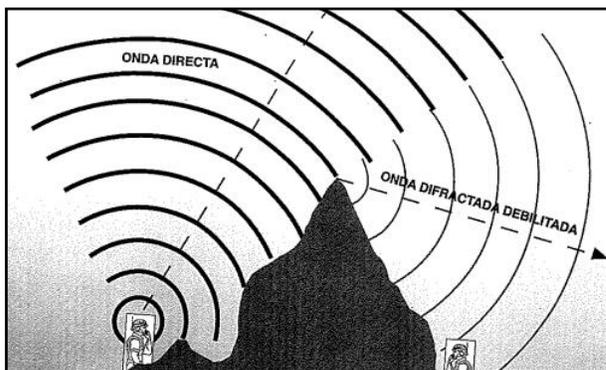
Las reflexiones de onda ocasionan distorsión por trayectoria múltiple



Nota: Tomado de (Harris Corporation, 2000, pág. 26).

Figura 6.

Difracción en VHF / UHF



Nota: Tomado de (Harris Corporation, 2000, pág. 25).

Guerra de Información

La información y las tecnologías de la información se han convertido en un asunto de importancia mundial, y en base a esta premisa, los conflictos internacionales también se respaldan en alto grado en los sistemas de información.

Se estima que todas las formas de conflicto por el control y el dominio de información de seguridad nacional en un futuro próximo relegarán a las demás formas de combate.

Actualmente se pueden distinguir siete tipos de guerras de información: guerra de mando y control (C2W, del inglés command-and-control warfare), guerra basada en inteligencia (IBW, del inglés intelligence-based warfare), guerra electrónica (EW, del inglés electronic warfare), guerra psicológica (PSYW, del inglés psychological warfare), guerra de hackers, guerra de información económica (EIW, del inglés economic information warfare), y guerra cibernética. (Libicki, 1995, pág. 7)

Los aspectos críticos de la guerra de información son la negación (o distorsión) de la información y su contraparte, la protección de la misma. (Libicki, 1995, pág. 8)

Aunque la guerra de información frecuentemente se considera como un concepto nuevo, algunas de sus formas son más nuevas que otras, ya que han aflorado recientemente, mientras otras han sido modificadas por las tecnologías de la información. (Libicki, 1995, pág. 6)

En la Tabla 1 se presenta la clasificación detallada de los tipos de guerra de información, cuándo aparecieron y su eficacia actual.

Tabla 1.

Guerra de la información: ¿qué hay de nuevo y qué es efectivo?

FORMA	SUBTIPO	¿ES NUEVO?	EFICACIA
C2W	ANTI-CABEZA	El objetivo son los sistemas de mando, en lugar de los Comandantes.	Nuevas tecnologías de dispersión y replicación para proteger a los centros de mando del mañana.
	ANTI-CUELLO	Los enlaces de comunicación ahora proliferan en todo el espectro y el teatro de operaciones.	Nuevas tecnologías (redundancia, codificación de errores eficiente) permiten operaciones con flujos de bits reducidos.
	IBW	Mientras más barato sea el silicio, más se puede introducir en un sistema.	Estados Unidos construirá el primer sistema de sistemas de búsqueda.
EW	ANTI-RADAR	Alrededor desde la segunda guerra mundial.	Generadores y recolectores dispersos sobrevivirán mejor.
	ANTI-COMUNICACIONES	Alrededor desde la segunda guerra mundial.	Espectro ensanchado, salto de frecuencia y antenas direccionales mantienen las comunicaciones.
	CRIPTOGRAFÍA	La creación de códigos digitales ahora es más fácil.	Nuevas tecnologías de creación de códigos (DES, PKE) favorecen a los creadores de códigos sobre los descifradores de códigos.
PSYW	ANTI-VOLUNTAD	No	La propaganda debe adaptarse primero a CNN, luego a Me-TV.
	ANTI-TROPA	No	Las técnicas de propaganda deben adaptarse a DBS y Me-TV.
	ANTI-COMANDANTE	No	El cálculo básico del engaño seguirá siendo difícil.
HACKER WARFARE		Sí	Las sociedades se están volviendo potencialmente más vulnerables, pero una buena gestión interna puede asegurar a los sistemas.
EIW	BLOQUEO ECONÓMICO	Sí	Muy pocos países dependen todavía de los flujos de información de gran ancho de banda.
	TECNOIMPERIALISMO	Desde 1970	El comercio y la guerra implican competencia, pero el comercio no es guerra.
CY-BER	INFO-TERRORISMO	La ropa sucia es ropa sucia, ya sea en papel o en archivos de computadora.	La amenaza puede ser una buena razón para aplicar leyes de privacidad estrictas.
	SEMANTICO	Sí	Muy pronto para saberlo.
WARFARE	SIMULAWARFARE	Acercándose a la realidad virtual	Si ambos bandos son lo suficientemente civilizados para simular una guerra ¿lucharían?
	GIBSONWARFARE	Sí	Material de la ciencia ficción

Nota: Tomado de (Libicki, 1995, pág. 87).

Guerra Electrónica

En los conflictos modernos, la G.E. constituye un factor multiplicador en la Potencia de Combate de una Fuerza, por lo que obtener ventaja en el campo electrónico es fundamental en la búsqueda del éxito en toda operación militar.

Las características del Campo de Batalla Moderno, imponen la participación cada vez más intensa de la G.E. en las operaciones militares terrestres, aéreas y navales.

Para estar en capacidad de obtener, mantener y explotar esta ventaja, es necesario, primero un análisis del escenario desde una perspectiva multidimensional, considerando:

- Frente
- Profundidad
- Espacio Aéreo
- Espectro electromagnético
- Procesamiento y Transferencia de información

La Fuerza Terrestre, por lo tanto debe estructurar las áreas funcionales, necesarias para cubrir estas dimensiones, considerando como mínimo:

- Operaciones
- Apoyo de Fuego
- Defensa antiaérea
- Guerra Electrónica
- Apoyo Logístico - Administrativo

El proceso que permite realizar el enlace entre estas áreas funcionales se denomina: estructura de comando, control, comunicaciones, inteligencia e informática

(C3I2). Este permitirá una coordinada, rápida y precisa toma de decisiones. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 15)

La Guerra Electrónica se clasifica de la siguiente forma: (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 3)

Por el uso de la energía electromagnética:

- G.E. pasiva
- G.E. activa

Por el campo de aplicación:

- Campo de la radiodifusión
- Campo de la electro - óptica

Por el aspecto operacional:

- Medidas de Apoyo de G.E. (M.A.G.E.)
- Contramedidas Electrónicas (C.M.E.)
- Contra - Contramedidas Electrónicas (C.C.M.E.)

Este proyecto se clasifica por el uso de la energía electromagnética como: G.E. pasiva; por el campo de aplicación como: radiodifusión y por el aspecto operacional como: Medidas de Apoyo de G.E. (M.A.G.E.).

Guerra Electrónica Pasiva

Es la actividad que permite obtener información del enemigo a través de la investigación y análisis del uso del espectro electromagnético por su parte, caracterizándose por no emitir radiaciones durante estas actividades. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 3)

Guerra Electrónica en el campo de la Radiodifusión

El propósito es la neutralización y aplicación de las acciones en las frecuencias empleadas para los enlaces por radio, en las diversas bandas que cubren los equipos militares y en ocasiones los equipos civiles. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 4)

Medidas de Apoyo de Guerra Electrónica

Son todas aquellas acciones que no involucran emisiones electromagnéticas propias y cuyo objetivo es captar las que ejecuta el enemigo, para explotarlas en apoyo a nuestras operaciones militares.

Existen actividades similares del nivel estratégico, que se denominan Inteligencia de Señales (SIGINT, del inglés SIGnal INTelligence), clasificadas en: Inteligencia Electrónica (ELINT, del inglés ELectronic INTelligence) e Inteligencia de Comunicaciones (COMINT, del inglés COMmunications INTelligence).

Las M.A.G.E. abarcan las siguientes acciones:

- Búsqueda Electrónica
- Interceptación Electrónica
- Localización Electrónica
- Análisis y Evaluación
- Registro y Diseminación

Búsqueda Electrónica

Es una operación de búsqueda en el espectro electromagnético, con receptores manuales o automáticos, que procura detectar la existencia de irradiaciones desconocidas o sospechosas. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 7)

La búsqueda es el primer paso en el ciclo de las M.A.G.E. y se orienta a examinar el espectro de frecuencias y a la identificación de blancos electrónicos hostiles.

Estos blancos operan normalmente en las bandas de HF y VHF, en redes de radio de campaña; UHF, en redes multicanal y de control de tráfico aéreo y SHF (del inglés, Super High Frequency) en redes de defensa aérea, radares de vigilancia y seguimiento. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 6)

El concepto doctrinario de Búsqueda Electrónica es análogo al concepto técnico de Identificación.

Identificación

La ELINT se dedica específicamente a señales de radar, guiado y navegación (comúnmente ubicadas en la banda de 1 a 18 GHz). (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 5)

La Identificación es un parámetro técnico que en ELINT incluye:

- a) frecuencia de la portadora
- b) ancho de banda
- c) ancho del pulso
- d) frecuencia de la repetición de los pulsos

La COMINT se ocupa de las emisiones generadas por los equipos de comunicaciones y de transmisión de datos. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 5)

La Identificación es un parámetro técnico que en COMINT abarca:

- a) frecuencia de la portadora
- b) ancho de banda
- c) tipo de modulación, en caso de ser posible de determinar.

Localización Electrónica

Es la actividad que trata de determinar el lugar donde se origina la emisión electromagnética, utilizando aparatos como el radiogoniómetro o el radar. El principal objetivo de esta actividad es localizar los emisores asociados al sistema de mando y control y a los sistemas de armas del enemigo, lo que permitirá incidir negativamente en el resultado de sus operaciones, al neutralizar estos medios. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 7)

El concepto doctrinario de Localización Electrónica es análogo al concepto técnico de Ubicación.

Contramedidas Electrónicas

Las C.M.E. son todas aquellas acciones de G.E. cuyo propósito es evitar, anular o reducir el uso efectivo que el enemigo puede hacer del espectro electromagnético. Las actividades de C.M.E. requieren de una inteligencia actualizada sobre el equipamiento electrónico del enemigo. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 7)

Contramedidas Electrónicas Duras

Se conoce de esta manera a las medidas que se adoptan y complementan con las técnicas y métodos de las M.A.G.E. en cuanto a la localización y determinación de los emisores enemigos.

Con esta información se dirige hacia el origen de su radiación, utilizando la señal como guía para atacar y destruir los radares o sistemas de comunicaciones y armas, con el empleo de armamento convencional, ya sea de aviación, artillería o misiles. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 11)

Contra - Contramedidas Electrónicas

Las C.C.M.E. son las acciones de G.E. que tienen el propósito de neutralizar a las M.A.G.E. y C.M.E. aplicadas por el enemigo. (Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, pág. 11)

Probabilidad de Interceptación

La Probabilidad de Interceptación (POI, del inglés Probability of Intercept), es un factor clave en el desempeño de los equipos de vigilancia y reconocimiento de G.E.

La interceptación se relaciona con la probabilidad de coincidencia temporal de dos o más ventanas paramétricas (por ejemplo: antenas de escaneo, receptores de barrido, receptores paso a paso), donde se requiere alineación o coincidencia, antes de que pueda ocurrir la detección. (Self, 2007)

La probabilidad de que una señal determinada sea detectada y procesada, o la POI, es función tanto de la señal como del sistema de recepción. El sistema ideal debería interceptar cualquier señal emitida dentro del rango máximo en función de los factores de atenuación del espacio libre, de la sensibilidad del sistema y del terreno.

Un sistema ideal, con POI igual a la unidad; debería disponer de: alta sensibilidad, baja probabilidad de falsas alarmas, amplio ancho de banda de RF, cobertura de antena de 360°, y gran capacidad de procesamiento. El diseño de un sistema de interceptación compensa estos diversos factores. (Park, 1989, pág. 33)

La POI es la probabilidad conjunta de tres probabilidades independientes:

- a) probabilidad de que el receptor esté sintonizado con la frecuencia portadora del emisor

- b) probabilidad de que la antena de la estación ESM (del inglés, Electronic Support Measures) se encuentre apuntando hacia el emisor enemigo
- c) probabilidad de que la antena del emisor enemigo se encuentre apuntando hacia la estación ESM

En una situación de comunicación práctica, la antena tanto del emisor como del receptor suele ser una antena omnidireccional. En esta situación, se eliminarían la segunda y la tercera probabilidad. (Wiley, 1982)

Debido a que parte fundamental de la investigación realizada fue apoyada en materiales en inglés, se realiza la siguiente aclaración, en la Tabla 2.

Tabla 2.

Equivalencias de términos Español / Inglés

Español	Siglas	Inglés término anterior	Siglas	Inglés término reciente	Siglas
Medidas de Apoyo de G.E.	M.A.G.E.	Electronic Support Measures	ESM	Electronic Support	ES
Contramidas electrónicas	C.M.E.	Electronic Counter Measures	ECM	Electronic Attack	EA
Contra - Contramidas electrónicas	C.C.M.E.	Electronic Counter - Counter Measures	ECCM	Electronic Protection	EP

Tecnología para la detección rápida del espectro de RF de banda ancha

Para escanear el espectro de 1 GHz con un analizador de espectros superheterodino (es decir de barrido), cada contenedor se escanea secuencialmente barriendo el oscilador local (OL) que controla el convertidor descendente I / Q (del inglés, In-Phase / Quadrature). Este enfoque tiene una compensación intrínseca entre el intervalo, el ancho de banda de resolución (RBW, del inglés resolution bandwidth) y el tiempo de escaneo, por lo tanto, es un enfoque lento; lo cual genera gran consumo de

energía y el riesgo de no capturar la dinámica del espectro. (Yazicigil, Haque, Wright, & Kinget, 2016, pág. 1033)

Una solución alternativa es construir un sensor de espectro de múltiples ramas paralelas, una para cada contenedor; para así capturar instantáneamente un ancho de banda del espectro de interés. Este enfoque es rápido pero consume mucha energía y no es práctico en términos de complejidad del hardware. (Yazicigil, Haque, Wright, & Kinget, 2016, pág. 1033)

El tiempo de escaneo en los analizadores de espectro superheterodinos se puede reducir, extendiéndolo a una arquitectura de múltiples ramas. Sin embargo, para un primer orden, el consumo de energía permanece constante para ambas realizaciones, ya que existe una compensación fija entre el tiempo de escaneo y el consumo de energía. (Yazicigil, y otros, 2015)

La representación de valor compleja $CS (I + jQ)$ de un proceso pasa banda de valor real ofrece un enfoque innovador para la detección cuasi-instantánea de interferencias en un ancho de banda del espectro de interés, de manera energéticamente eficiente.

Dado que esta representación compleja $(I + jQ)$, permite muestrear a una velocidad definida por el ancho de banda de la información de banda base de la señal en lugar del ancho de banda instantáneo del espectro, también permite una compresión de 6,3 veces en la frecuencia de muestreo agregada en contraste con las arquitecturas tradicionales del tipo Nyquist. (Yazicigil, Haque, Wright, & Kinget, 2016, pág. 1033)

Un desafío importante de estos sistemas es que el número de ramas necesarias para una detección exitosa es proporcional al número de interferencias; una opción podría ser aumentar el ancho de banda de procesamiento, para detectar más interferencias; pero

esto aumentaría la complejidad del hardware y el consumo de energía sería excesivo.

(Yazicigil, Haque, Wright, & Kinget, 2016, pág. 1035)

Las arquitecturas de muestreo comprimido (CS, del inglés compressed sampling) son muy adecuadas para la detección rápida de interferencias en un ancho de banda amplio, por lo tanto el sistema pasabanda CS-QAIC (del inglés, quadrature analog-to-information converter) es energéticamente más eficiente que el enfoque tradicional, basado en la tasa de Nyquist.

El teorema de muestreo tradicional de Shannon / Nyquist requiere muestreo uniforme de la señal al doble de la frecuencia máxima de interés, mientras que el CS es el doble del ancho de banda de los procesos pasa bajos In-Phase (I) y Quadrature (Q).

Ángulo de Arribo

El ángulo de arribo (AoA, del inglés angle of arrival) es la determinación de un ángulo azimutal (desde 0° hasta 360°) con el cual se puede determinar con cierta precisión la ubicación de emisiones de señales electromagnéticas.

El parámetro AoA es uno de los más complejos de obtener, ya que para su medición requiere de una gran cantidad de antenas y receptores, los cuales deben estar emparejados, ya sea en amplitud o en fase.

El azimut α es determinado como el parámetro necesario e indispensable para la determinación de la dirección de llegada en un sistema de DF (del inglés, Direction Finding), establecido en una superficie fija; mientras que para plataformas móviles, es necesario determinar un ángulo de elevación ϵ . (Andrade & Machado, 2019, pág. 15)

Direction Finding (Búsqueda de Dirección)

DF tiene la capacidad de localizar la posición de una transmisión de radio enemiga utilizando un arreglo de antenas, las mismas que comparan las intensidades de señal, utilizando varias técnicas programables.

Dentro del campo de los radares, la implementación de estas técnicas permite usar las ondas electromagnéticas para realizar la detección y medición de parámetros tales como: distancia, altitud, dirección y velocidad.

Los requerimientos de un sistema de DF incluyen: (Andrade & Machado, 2019, págs. 12-13)

- a) exactitud
- b) sensibilidad
- c) alta velocidad de escaneo
- d) inmunidad a señales disruptivas

Conceptualmente un sistema de DF se puede conformar por los siguientes elementos: (Andrade & Machado, 2019, pág. 14)

- a) antena o arreglo de antenas
- b) convertidor DF
- c) bloque de evaluación
- d) bloque de visualización

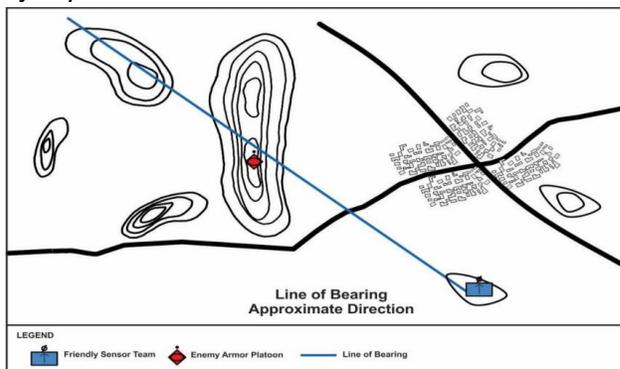
DF proporciona líneas de rumbo (LOB, del inglés lines of bearing), cortes y posiciones fijas para localizar transmisores. Un LOB es un solo azimut aproximado de un sensor, que proporciona el azimut aproximado al transmisor.

Un corte son dos azimuts aproximados que proporcionan la ubicación general de un transmisor, al determinar dónde se cruzan dos LOB. Una posición fija son tres o más azimuts aproximados que proporcionan una ubicación mediante un método de triangulación.

Un corte o una posición fija pueden usar azimuts aproximados de un sensor que recibe la señal varias veces desde diferentes ubicaciones o desde diferentes sensores. (Headquarters, 2019, pág. 40) Las figuras 7, 8 y 9 ilustran un LOB, un corte y una posición fija, respectivamente.

Figura 7.

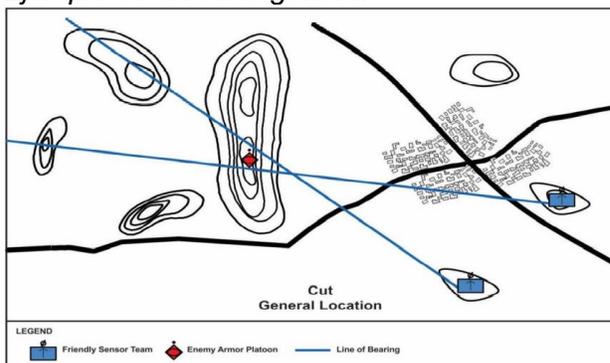
Ejemplo de una línea de rumbo



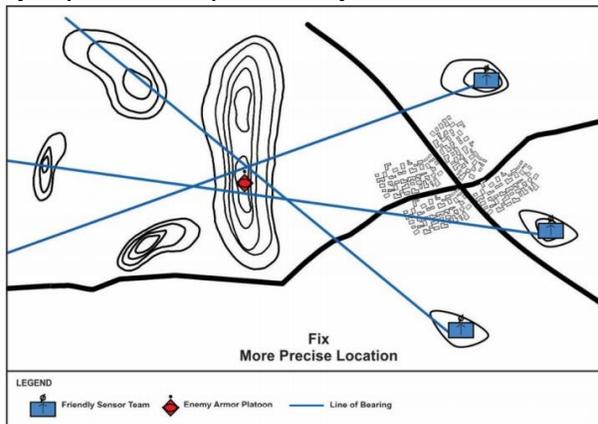
Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, pág. 41).

Figura 8.

Ejemplo de un corte general



Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, pág. 41).

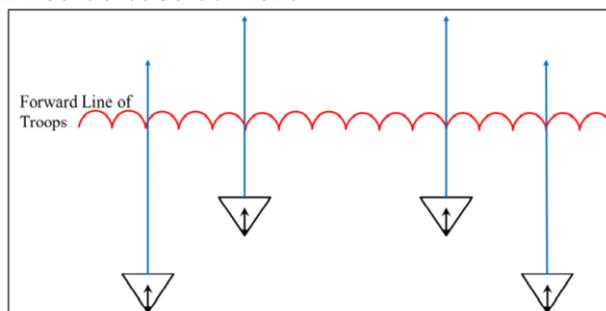
Figura 9.*Ejemplo de una posición fija*

Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, pág. 42).

Línea de base

El establecimiento de una línea de base de radiogoniometría es cuestión de colocar los equipos de radiogoniometría de modo que sean posibles buenos ángulos de orientación para la triangulación del objetivo.

Hay dos tipos de configuraciones de líneas base que se utilizan para establecer una red de radiogoniometría: convexa y cóncava. Las líneas de base convexas de DF, como la de la Figura 10 proporcionan ángulos de azimut razonables en un frente amplio.

Figura 10.*Línea de base convexa*

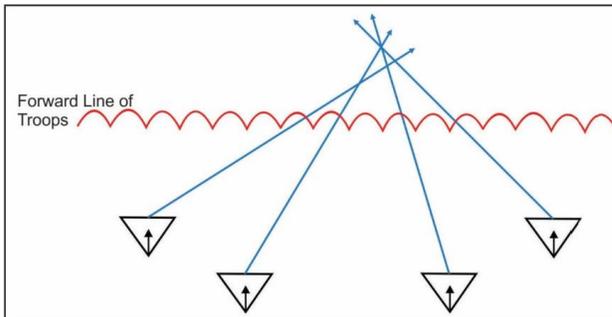
Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, pág. 43).

Se utilizan líneas de base cóncavas cuando la ubicación supuesta del objetivo se encuentra en un área frontal compacta pero profunda, como la de la Figura 11.

(Headquarters, 2019, pág. 42)

Figura 11.

Línea de base cóncava



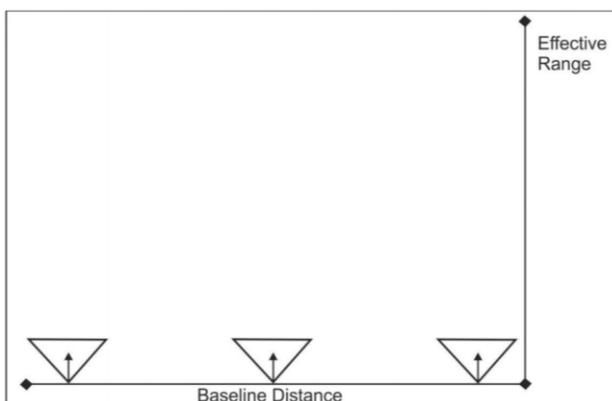
Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, pág. 43).

Distancia de la línea de base

Como regla general, la profundidad a la que una red de radiogoniometría puede localizar eficazmente las antenas transmisoras enemigas es igual a la distancia total de la línea de base que une los dos sitios de DF más externos, representada en la Figura 12.

Figura 12.

Distancia de línea de base



Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, pág. 44).

Al establecer una línea de base táctica de DF se toma en cuenta: la misión, el enemigo, el terreno, las tropas, el clima y los civiles en el campo de batalla.

Los comandantes con el asesoramiento del oficial especialista en G.E. determinan las mejores áreas disponibles para ubicar al equipo de DF en el área de operaciones. (Headquarters, 2019, pág. 43)

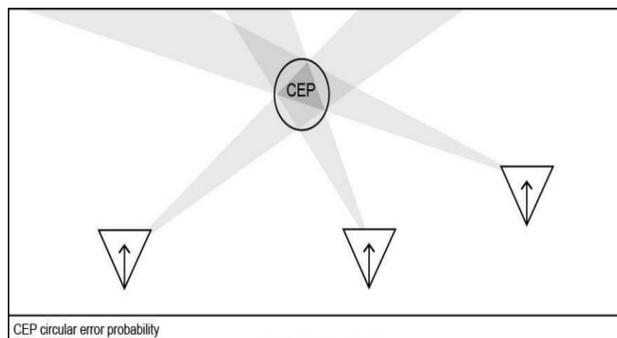
Probabilidad de Error Circular

Debido a los efectos del clima y al terreno, el ángulo de la señal del objetivo varía al llegar. Para las misiones de radiogoniometría, cuanto más lejos esté el receptor del transmisor, mayor será el error asociado con el ángulo de interceptación.

Cuando se trazan los LOB de tres o más estaciones receptoras en un mapa, se genera un área triangular de superposición, donde los LOB se cruzan para formar un punto fijo. La probabilidad de error circular (CEP, del inglés circular error probability) se visualiza en la Figura 13. Un CEP es el círculo dibujado con un radio que cubre todos los puntos del triángulo y representa la posible ubicación del transmisor.

Figura 13.

Probabilidad de Error Circular



Nota: Tomado de (Headquarters, 2019, pág. 45).

El nuevo estado del arte

Los entornos de señales complejos y congestionados dificultan: localizar, identificar e interferir a los sistemas de comunicaciones enemigos. Las técnicas modernas de ML (del inglés, Machine Learning) para aumentar la capacidad cognitiva en los sistemas de G.E. incluyen: reconocimiento de objetivos, toma de decisiones inteligente y aprendizaje autónomo.

Los ejércitos modernos están evolucionando de sistemas tradicionales hacia enfoques innovadores, que responden a las nuevas amenazas utilizando ML. De esta manera, en lugar de depender de una base de datos fija, los sistemas aprenden (Friedrich, 2021, pág. 8), lo cual será objeto de un futuro trabajo, cuando el CICTE disponga de los receptores digitales (I-Q) que al momento se encuentran aún en la ejecución del respectivo contrato, el que inició en septiembre del 2019.

Defensa de objetivos móviles

Como contribución a una posible moderna doctrina de G.E., se presenta un análisis del estado del arte sobre lo que han dado por denominar MTD (del inglés, Moving Target Defense). Estrictamente hablando, MTD se diferencia del engaño en que no proporciona intencionalmente información falsa para engañar a un atacante; pero el engaño y el MTD pueden conducir a un resultado similar: confundir al atacante y alterar su proceso de toma de decisiones. (Cho, y otros, 2020, pág. 3)

Un sistema MTD en ejecución puede tener diferentes elementos móviles; por ejemplo: dirección IP (del inglés, Internet Protocol), puerto, sistema operativo, VM (del inglés, virtual machine), y aplicaciones, a lo largo del tiempo; y sus cambios pueden darse en un intervalo de tiempo fijo regulado o al recibir una alerta de detección de intrusos.

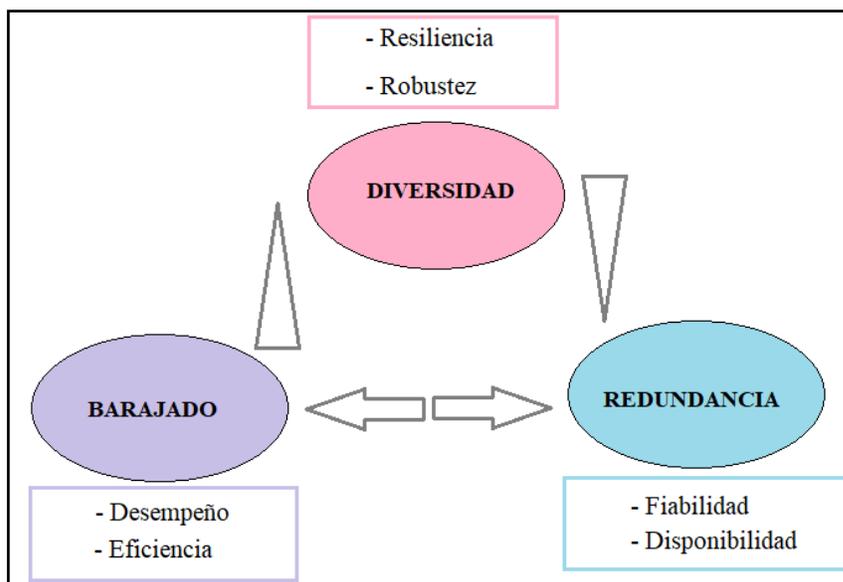
La efectividad de la defensa que se puede lograr mediante el engaño defensivo es de naturaleza limitada, porque el engaño puede ser descubierto por el atacante y en este caso; el sistema podría activar MTD para protegerse, sin violaciones de seguridad. (Cho, y otros, 2020, pág. 6)

Simultáneamente, MTD puede cooperar con otros mecanismos de defensa en la detección de intrusiones, para neutralizar a los atacantes potenciales o proporcionar nuevos patrones de ataque observados durante la etapa de reconocimiento del ataque.

Regular el intervalo de tiempo para realizar una operación de MTD tiene un impacto significativo y los tres tipos de técnicas de MTD: barajado, diversidad y redundancia, deben considerarse en combinación para mejorar sustancialmente la seguridad del sistema, conforme se ilustra en la Figura 14.

Figura 14.

Relaciones entre: Diversidad, Barajado y Redundancia



Nota: Tomado de (Cho, y otros, 2020, pág. 8).

Si un MTD implementado no se ejecuta de manera adaptativa e inteligente en función de un nivel de vulnerabilidades de seguridad detectadas, es posible que no se cumplan los objetivos requeridos del sistema, como minimizar el costo de defensa y mantener un cierto nivel de seguridad del sistema. (Cho, y otros, 2020, págs. 7-8)

DARPA

DARPA (del inglés, Defense Advanced Research Projects Agency) incluye miembros académicos, corporativos y gubernamentales, cuyo objetivo es innovar los sistemas de defensa de los Estados Unidos.

ERI (del inglés, Electronics Resurgence Initiative), forma parte de DARPA; y tiene como fin combinar lo más avanzado de la tecnología militar y comercial disponible para diseñar nuevos sistemas, utilizando módulos y enfoques de diseño que permitan, por ejemplo: la combinación de bloques de IP reutilizables optimizados, circuitos multicapa de señal mixta, etc. (Sinclair & Walker, 2021)

Las investigaciones de ERI actualmente se centran en:

- aumentar la densidad y la eficiencia del procesamiento de la información
- acelerar la innovación en hardware de inteligencia artificial
- superar los límites de rendimiento de la electrónica 2D (dos dimensiones)
- mitigar los crecientes costos del diseño electrónico
- superar las amenazas de seguridad en todo el ciclo de vida del hardware
- revolucionar las comunicaciones 5G (quinta generación de tecnologías móviles). (Defense Advanced Research Projects Agency, 2021)

En países avanzados, como Estados Unidos, se invierten muchos recursos y talento humano, para la investigación en defensa, y los resultados han sido fructíferos para el campo militar, y la población en general.

Análogamente en el Ecuador, el CICTE es el centro de investigación y desarrollo de tecnología para la defensa, donde se conjugan esfuerzos civiles y militares, para con recursos reducidos; desarrollar prototipos para fortalecer la seguridad nacional, lo cual genera bienestar para toda la ciudadanía, de ahí el valor agregado de esta investigación y de futuras investigaciones que se lleven a cabo en este Centro.

En este capítulo se ha hecho referencia a conceptos básicos del área de Telecomunicaciones, tales como el origen de las radiocomunicaciones, y la gestión del espectro radioeléctrico; para luego ingresar al campo de la G.E. con temas como: POI, AoA y DF.

La teoría expuesta en este capítulo es la base para la investigación realizada; en el siguiente capítulo se describen los dispositivos electrónicos y mecánicos, utilizados en la implementación del proyecto.

Capítulo III

Análisis y Descripción de los Equipos

El presente proyecto tiene como fin desarrollar un sistema de inteligencia de señales que integre la monitorización del espectro radioeléctrico y la obtención del AoA.

La principal tarea a realizar es extraer los diagramas de irradiación del arreglo de antenas para diferentes bandas espectrales, las cuales serán utilizadas para la determinación del AoA. (Andrade & Machado, 2019)

Tomando como referencia los trabajos desarrollados anteriormente en el CICTE: “Desarrollo de un sistema de DF para la banda de 80 MHz a 2 GHz”, realizada por mi mayor Santiago Andrade y mi mayor Paúl Machado y “Desarrollo de un sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 44 MHz para la banda de 10 kHz a 6 GHz”, realizada por mi capitán Diego Calderón y la Ing. Margarita Reinoso; se requieren los siguientes dispositivos para la implementación de este proyecto:

- a) receptor digital de RF BB60C
- b) switch de RF de 8 puertos
- c) motor de pasos
- d) driver del motor de pasos
- e) board I/O de 8 puertos
- f) base de antenas metálica
- g) arreglo de 8 antenas Log-Periódicas de bajísimo costo
- h) arreglo de 4 antenas sectoriales industriales tipo domo
- i) plato reflector parabólico
- j) antena espiral
- k) 2 trípodes

- l) computador con software Visual Studio y VNC Viewer
- m) acoplamientos mecánicos impresos en 3D (tres dimensiones)
- n) router TP-LINK
- o) NUC con software Visual Studio y VNC Server
- p) Fuente de Poder
- q) Generador

Receptor digital de RF BB60C

El BB60C es un analizador de espectros de alta velocidad en tiempo real (estructura I + jQ) que se comunica con el computador a través de un enlace USB (del inglés, universal serial bus) 3.0 de alta velocidad.

Posee 27 MHz de ancho de banda instantáneo, sintoniza frecuencias de 9 kHz a 6 GHz, recopila 80 millones de muestras (40 para I y 40 para Q) por segundo y transmite datos al computador a 140 MB/s (Mega Bytes por segundo), la Figura 15 muestra una fotografía del mismo. (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, pág. 5)

Figura 15.

Receptor de RF BB60C



Nota: Tomado de (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, pág. 5).

El BB60C es un analizador de espectros híbrido superheterodino-FFT (del inglés, Fast Fourier Transform), el mismo que utiliza un oscilador local (OL) y filtros pasabanda para convertir una parte del espectro de entrada a una frecuencia intermedia (FI). La característica de híbrido es utilizada cuando el ancho de banda a monitorizar es mayor que el ancho de banda instantáneo de 27 MHz del BB60C.

Luego, la FFT se envía desde el dispositivo hacia el computador, para su presentación, el BB60C es un analizador de espectros en tiempo real, ya que es capaz de transmitir sin interrupciones la FFT del espectro seleccionado (27MHz), siendo este un requisito fundamental para realizar mediciones y pruebas que requieran de alta POI. (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, pág. 7)

El BB60C ofrece los siguientes modos de operación que serán utilizados en el presente trabajo:

Análisis de barrido

Mediante el software se puede configurar al dispositivo para que realice un solo barrido en el intervalo deseado. Los intervalos mayores a 27 MHz son el resultado de adquirir múltiples parches de 27 MHz y concatenar los resultados del procesamiento FFT en cada uno. Se puede elegir recuperar trazas continuamente o solicitarlas manualmente una a la vez. (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, págs. 7-8)

Análisis de espectro en tiempo real

Uno de los problemas con el modo de barrido estándar es el "tiempo ciego" entre cada trazo, el cual se refiere al tiempo intermedio entre muestras tomadas del espectro. Durante este tiempo, se está procesando la última captura y es posible perderse una detección.

Con el análisis de espectro en tiempo real se pueden capturar todos los eventos posibles, ya que el BB60C es capaz de transmitir continuamente los resultados superpuestos a una tasa de superposición del 50%, cubriendo cada punto de datos con dos FFTs. (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, pág. 8)

Arquitectura del Receptor de RF BB60C

El BB60C es un receptor digital (I, Q) de dos etapas, su arquitectura interna puede observarse en la Figura 16, este dispositivo utiliza dos FI independientes, seleccionadas en función de la frecuencia de entrada de RF. Cada FI tiene un filtro suprime banda (Notch) para reducir las espurias de las señales de entrada en la FI.

Las FI son 2.420 MHz y 1.220 MHz o 1.260 MHz, según el número de serie. (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, pág. 10) El filtro Notch no permite el paso de señales cuyas frecuencias se encuentran comprendidas entre las frecuencias de corte superior e inferior.

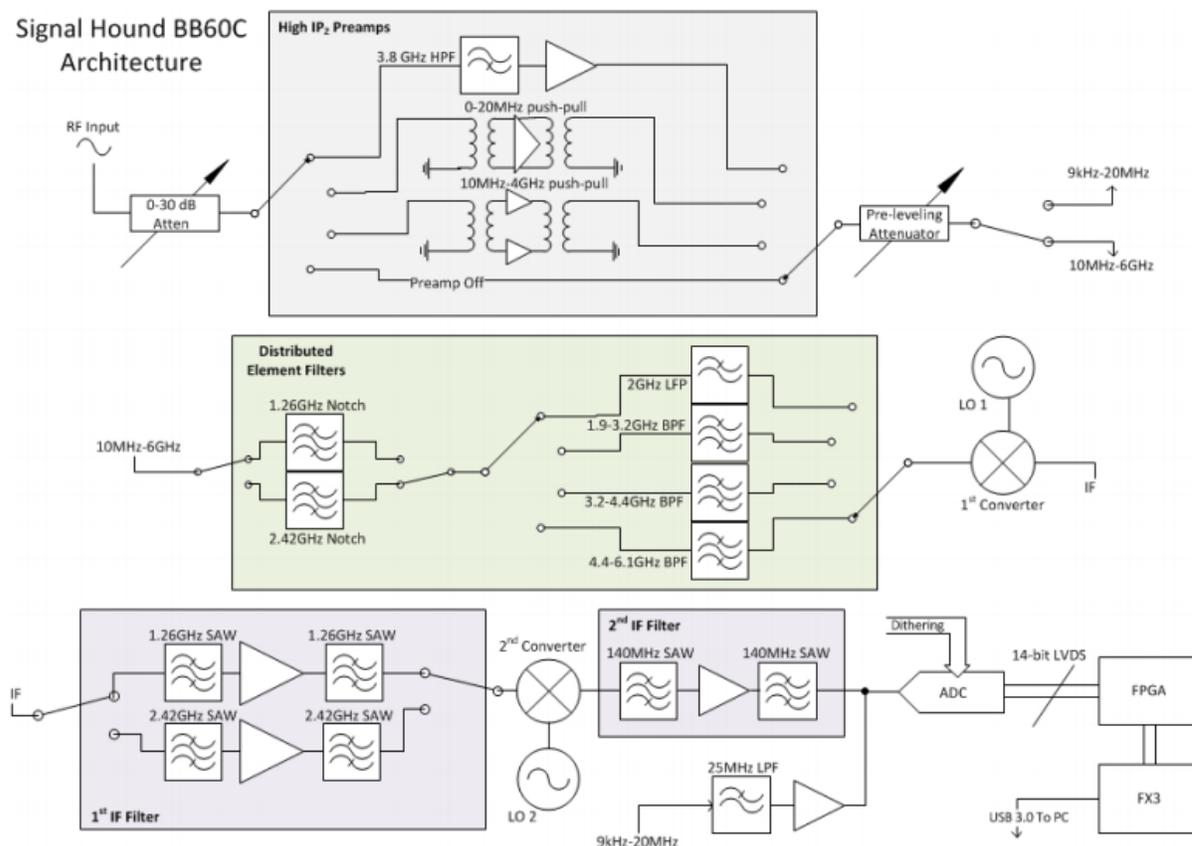
El control de ganancia se logra utilizando el atenuador y el preamplificador de la parte delantera. La interfaz proporciona un adecuado rango dinámico libre de espurias, en cualquier nivel de referencia.

Desde el convertidor analógico digital (ADC, del inglés analog-to-digital converter) de 14 bits, los datos digitalizados de la FI se transfieren a una FPGA (del inglés, Field Programmable Gate Array) donde se empaquetan.

A continuación, las Tablas 3 y 4 indican las FI utilizadas y las especificaciones técnicas del BB60C respectivamente.

Figura 16.

Arquitectura del Receptor de RF BB60C



Nota: Tomado de (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, pág. 10).

Tabla 3.

FI utilizada para cada rango de frecuencias RF

Rango frecuencias RF(MHz)	Valor de FI (MHz)	Rango frecuencias OL (MHz)
10 – 1.890	2.420	2.430 – 4.310
1.890 – 3.150	1.220 (1.260)	3.110 – 4.370 (3.150 – 4.410)
3.150 – 5.110	2.420	5.570 – 7.530
5.110 – 6.000	1.220 (1.260)	6.330 – 7.220 (6.370 – 7.260)

Nota: Tomado de (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, pág. 11).

Tabla 4.*Especificaciones técnicas del Receptor de RF BB60C*

Característica	Valores
Temperatura de funcionamiento	0°C a 65°C
Peso	0,50 kg
Tamaño	219 mm x 81 mm x 30 mm
Energía	puerto USB 3.0 más puerto USB 2.0 o USB 3.0
Control y comunicación	mediante bus serial USB 3.0
Rango de frecuencia	9 kHz a 6 GHz
Transmisión de I/Q digitalizada	250 kHz a 27 MHz de ancho de banda de la FI seleccionable con corrección de amplitud
RBW	10 Hz a 10 MHz
Velocidad de barrido (RBW \geq 10kHz)	24 GHz/s

Nota: Tomado de (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, págs. 14-15).

El controlador periférico Cypress FX3 transmite los datos empaquetados a través del enlace USB 3.0 al computador, donde se procesan 80 millones de muestras ADC de 14 bits por segundo (bps) en un monitoreo de espectro o flujo de datos I/Q. (BB60C Spectrum Analyzer User Manual, 2020, pág. 11)

Switch de RF de 8 puertos

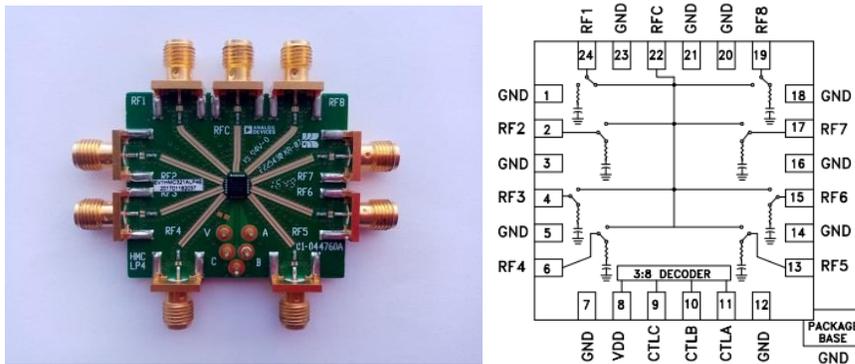
La incorporación de un switch (interruptor, conmutador) de RF en un sistema permite enrutar señales de varios instrumentos a uno o varios dispositivos bajo prueba

(DUT, del inglés device under test), para así poder realizar distintas pruebas, manteniendo la misma configuración.

Para realizar la conmutación de las ocho antenas que forman parte del primer arreglo receptor de antenas (8 log periódicas de bajísimo costo), se utilizó un HMC321ALP4E, que es un conmutador de banda ancha, no reflector, de arseniuro de galio (GaAs) SP8T, conforme se ilustra en la Figura 17.

Figura 17.

Switch de RF de 8 puertos y su diagrama funcional



Nota: Tomado de (Analog Devices, Inc, pág. 1)

Este switch ofrece alto aislamiento y una baja pérdida de inserción, incluye un circuito decodificador binario integrado TTL 3 (del inglés, Transistor-transistor logic), que reduce las líneas de control lógico requeridas a tres y un paquete QFN (del inglés, Quad Flat No-Lead).

El mismo es adecuado para sistemas de 50 ó 75 ohmios (Ω), opera usando un voltaje positivo de control de 0 / + 5 voltios (V) y requiere una polarización fija de + 5 V.

La Tabla 5 proporciona las especificaciones técnicas más importantes de este switch. (Analog Devices, Inc)

Tabla 5.*Especificaciones técnicas del switch HMC321ALP4E*

Característica	Valores
Rango de frecuencia	corriente continua (DC) - 8 GHz
Aislamiento	> 30 decibeles (dB) a 6 GHz
Pérdida de inserción	2,3 dB a 6 GHz
Decodificador TTL 3	8 de suministro positivo integrado
Paquete QFN	24 pines

Nota: Tomado de (Analog Devices, Inc)

Se requieren condensadores de bloqueo de DC en los puertos RFC, RF1, RF2, RF3, RF4, RF5, RF6, RF7 y RF8; y su valor determinará la menor frecuencia de transmisión. (Analog Devices, Inc) La Figura 18 contiene la tabla de verdad del switch HMC321ALP4E, para el control de salida del puerto RFC.

Figura 18.

Tabla de verdad para obtener la salida del puerto RFC

Control Input			Signal Path State
A	B	C	RFC to:
Low	Low	Low	RF1
High	Low	Low	RF2
Low	High	Low	RF3
High	High	Low	RF4
Low	Low	High	RF5
High	Low	High	RF6
Low	High	High	RF7
High	High	High	RF8

Nota: Tomado de (Analog Devices, Inc, pág. 3)

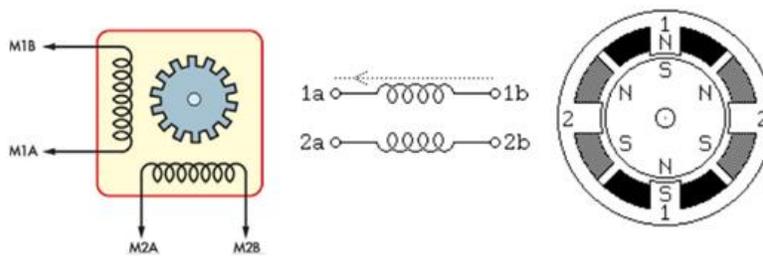
Motor de pasos

El motor de pasos modelo 86HS8040A4J es bipolar, de tipo híbrido y dispone de un ángulo de paso de $1,8^\circ$. El mismo tiene cuatro cables de salida y requiere de un cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento.

Un motor híbrido combina las cualidades de los motores de Imán Permanente y de Reluctancia Variable, por lo tanto dispone de un alto par de retén, y excelentes par de sostenimiento y par dinámico. A continuación un esquema es presentado en la Figura 19.

Figura 19.

Esquema de un motor de pasos bipolar de dos fases



Nota: Tomado de (Canto Quintal, pág. 18)

Parámetros de los motores de pasos:

Ángulo de paso.- Es el avance angular que se produce en el motor por cada impulso de excitación.

Número de pasos por vuelta.- Es la cantidad de pasos que ha de efectuar el rotor para realizar una revolución completa:

$$NP = 360^\circ / \alpha$$

$$NP = 360^\circ / 1,8^\circ = 200 \text{ pasos}$$

Donde NP es el número de pasos por revolución y α es el ángulo de paso.

Si el motor es movido en micro-pasos, por ejemplo con una división entre 10, entonces el motor se movería a $0,18^\circ$ por paso y daría 2.000 pasos por revolución.

$$NP = 360^\circ / \alpha'$$

$$NP = 360^\circ / 0,18^\circ = 2.000 \text{ pasos}$$

Frecuencia de paso máximo.- Se define como el máximo número de pasos por segundo.

Momento de inercia del rotor.- Es su momento de inercia asociado, el mismo que se expresa en g/cm^2 .

Par dinámico de trabajo.- Es el momento máximo que el motor es capaz de desarrollar sin perder paso, expresado en mN/m .

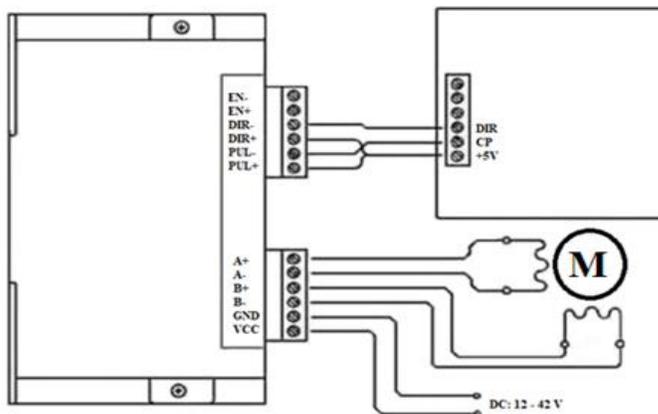
Par de mantenimiento.- Es el par requerido para desviar, en régimen de excitación, un paso el rotor, cuando la posición anterior es estable. Es mayor que el par dinámico y actúa como freno para mantener el rotor en una posición estable, expresado en mN/m .

Par de detención.- Es un par de freno debido a la acción del rotor cuando los devanados del estator están desactivados, expresado en mN/m . (Canto Quintal, págs. 34-36)

La Figura 20 muestra una fotografía del motor de pasos utilizado en las dos plataformas de pruebas que se implementarán, para llevar a cabo la experimentación.

Figura 20.*Motor de pasos 86HS8040A4J***Driver del motor de pasos**

El driver basado en el chip TB6600 es un módulo controlador del motor de pasos de tipo bipolar que permite varios modos micro-paso (1,1/2, 1/4, 1/8, 1/16). Es compatible con motores de 12 V a 48 V DC, tiene protección contra: sobre voltaje, bajo voltaje, sobre corriente y cortocircuito. (Villegas, www.electropro.pe, 2017, pág. 1) Se puede observar un diagrama de conexión del driver en la Figura 21.

Figura 21.*Diagrama de conexión*

Nota: Tomado de (Analog Driver Model TB6600 Data Sheet, 2018)

Un sistema típico consiste de: driver, controlador, motor de pasos y fuente de alimentación. En la Figura 22, se indica la configuración del interruptor de control de corriente y la subdivisión de los pasos.

Figura 22.

Driver HY-DIV268N-5A



Nota: Tomado de (Villegas, www.electropro.pe, 2017, pág. 2)

Board I/O de 8 puertos

El módulo GPIO (del inglés, general-purpose input/output) USB de 8 canales de Numato Lab proporciona una interfaz que aparece como un puerto serial en el sistema operativo, para operarlo se necesita de un emulador de terminal serial tal como: HyperTerminal, Serial Port Terminal, Teraterm, PuTTY, etc. ó un lenguaje de programación tal como: C, C ++, Python, Perl, etc.

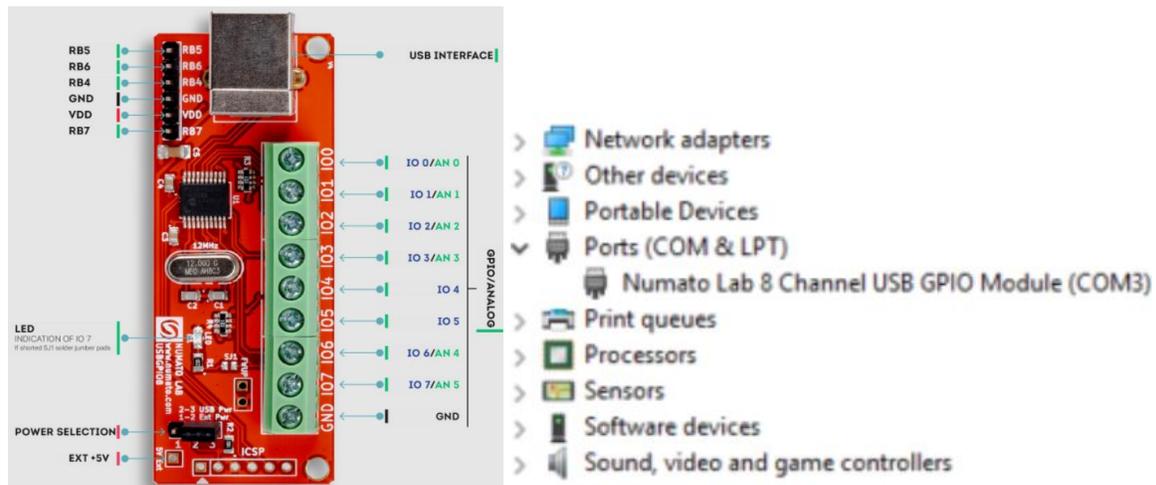
Este módulo dispone de 8 GPIOs estándar de 5 V DC multiplexados con 6 entradas analógicas, las mismas que pueden utilizarse para leer cantidades analógicas con la ayuda de los sensores apropiados. (Numato Lab, 2016)

Este dispositivo, cuya fotografía se muestra en la Figura 23; va a utilizarse para el control de las tres líneas digitales del switch de RF. Para su operación, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Conectar el dispositivo a un puerto USB del computador.
2. Instalar el driver del dispositivo; solo es necesario para Windows.
3. Abrir el puerto del dispositivo, mediante el emulador de terminal serial.
4. Ingresar comandos.
5. Opcionalmente, escribir un código para automatizar la tarea.

Figura 23.

Board I/O de 8 puertos y su interfaz como puerto USB



Nota: Tomado de (Numato Lab)

Cuando se conecta al computador, el módulo aparece como un puerto serial en el Administrador de dispositivos de Windows. La Tabla 6 detalla las especificaciones técnicas de este dispositivo.

Tabla 6.*Especificaciones técnicas del módulo GPIO*

Característica	Valores
Número de GPIOs	8 (IO ₀ – IO ₇)
Número de entradas analógicas	6
Fuente de alimentación del circuito digital	5 V DC
Corriente máxima consumida por el circuito digital	95 mA
Resolución del ADC	10 bits

Nota: Recuperado de (Numato Lab, 2016)

PuTTY es una aplicación flexible que amplía la funcionalidad de un computador con Windows, ya que permite a los usuarios comunicarse con máquinas Linux o Unix a través del protocolo SSH (del inglés, Secure SHell). La seguridad está garantizada por la capacidad de PuTTY para cifrar completamente la transmisión de los datos.

Se pueden transferir archivos y los comandos se pueden ejecutar en la máquina remota a través de la interfaz de la aplicación. PuTTY también permite a los usuarios monitorear los puertos seriales de la computadora remota y los dispositivos conectados. (Electronic Team, Inc., 2019)

Base de antenas

La base metálica tiene forma de hexadecágono (polígono regular de 16 lados), su apotema mide aproximadamente 47 cm y fue fabricada en platina de 1 pulgada, con una base de tubo galvanizado de dos pulgadas. La misma se acopla al eje del motor de pasos mediante una base elaborada en plástico en impresión de 3D.

La Figura 24 presenta una fotografía de la base de antenas utilizada en el proyecto.

Figura 24.*Base de antenas metálica***Antena Log-Periódica**

La antena Log-Periódica surgió del trabajo inicial de V. H. Rumsey, J. D. Dyson, R. H. DuHamel y D. E. Isbell en la Universidad de Illinois, en 1957. La ventaja principal de estas antenas es que tienen relaciones de ancho de banda de 10:1 o mayores.

La relación de ancho de banda es el cociente de la frecuencia máxima entre la mínima de operación satisfactoria de una antena. Las antenas log-periódicas pueden ser unidireccionales o bidireccionales, y tienen una ganancia directiva de baja a moderada.

Un conjunto básico log-periódico de dipolos, consiste en varios dipolos de distinta longitud y distancia, que se alimentan de una sola fuente en el extremo pequeño; la línea de transmisión está en zigzag entre los puntos de alimentación de pares adyacentes de dipolos. (Tomasi, 2003, pág. 396)

Los extremos de los dipolos están en una línea recta y el ángulo que forman se denomina α . En un diseño típico: $T = 0,7$ y $\alpha = 30^\circ$. La impedancia de entrada de la antena varía en forma periódica cuando se grafica en función del logaritmo de la frecuencia, por lo cual es llamada: "log - periódica". (Tomasi, 2003, pág. 397)

Las longitudes de los dipolos y su distancia se relacionan en tal forma que los elementos adyacentes tienen una relación constante entre sí, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$1 / T = R_n / R_{n-1} = L_n / L_{n-1}$$

Donde:

R = distancia entre dipolos (pulgadas)

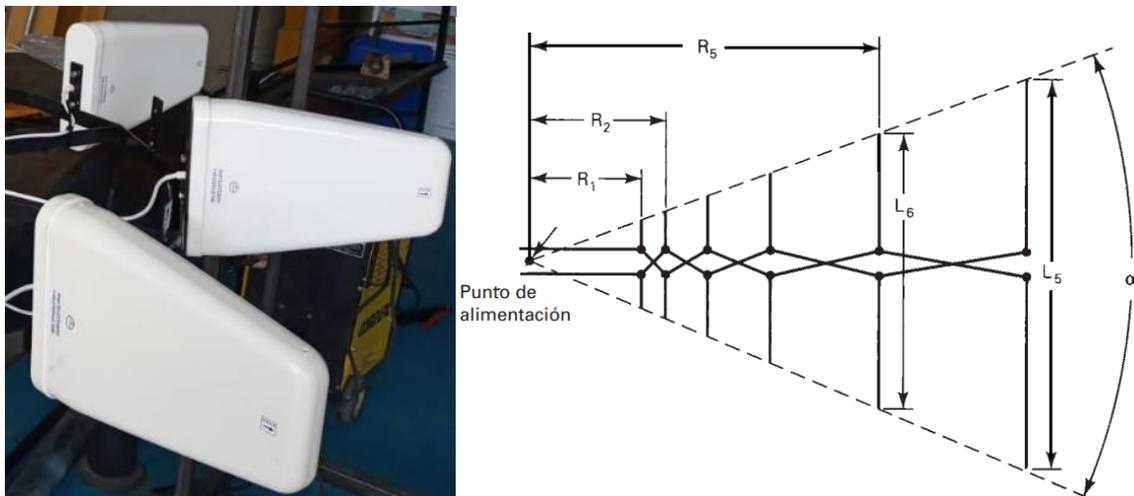
L = longitud del dipolo (pulgadas)

T = relación de diseño (número menor que 1)

Una fotografía y un gráfico de esta antena se presentan en la Figura 25.

Figura 25.

Antena Log Periódica



Nota: Gráfico tomado de (Tomasi, 2003, pág. 396)

En este proyecto se utilizarán, en primer lugar, ocho antenas Log-Periódicas modelo TDJ-0727DSAN10, de bajísimo costo, las mismas que supuestamente, según especificaciones de fábrica, tienen una ganancia de 10 dBi (decibelios de ganancia sobre

un radiador isotrópico) y operan en el rango de frecuencia de 698 a 2.700 MHz, para transmisión. La Tabla 7 indica las especificaciones de fábrica de esta antena.

Tabla 7.

Especificaciones técnicas de la antena TDJ-0727DSAN10

Característica	Valores
Rango de Frecuencia	698 a 2.700 MHz
Peso	0,80 kg
Tamaño	290 mm x 210 mm x 65 mm
Potencia máxima	100 Vatios (W)
Ganancia	10 dBi
Ancho de Haz Horizontal	90° / 70°
Ancho de Haz Vertical	60° / 55°
F/B (del inglés, Front / Back Ratio)	18 dB
V.S.W.R (del inglés, Voltage Standing Wave Ratio)	≤ 2,0
Polarización	Vertical
Impedancia nominal	50 Ω

Nota: Recuperado de (LPDA Outdoor GSM 3G 4G Directional Log Periodic Antenna)

Antena Sectorial Industrial

La antena tipo domo modelo PE51058 de Pasternack es una antena direccional multibanda, que tiene una alta ganancia nominal. La misma utiliza un conector N hembra y está clasificada para una entrada de 100 W.

En este proyecto se utilizará también un arreglo receptor de antenas formado por cuatro antenas tipo domo PE51058. La figura 26 presenta una fotografía del exterior y del interior de esta antena.

Figura 26.*Antena tipo domo PE51058*

La Tabla 8 indica las especificaciones técnicas de la antena tipo domo PE51058, las mismas que se emplearán para la segunda parte de la experimentación del proyecto.

Tabla 8.*Especificaciones técnicas de la antena tipo domo PE51058*

Característica	Valores
Rango de Frecuencia	800 MHz a 3 GHz
Peso	0,30 kg
Diámetro	205 mm
Altura	96 mm
Potencia máxima	100 W
Ganancia	6 - 9 dBi
Ancho de Haz Horizontal	90°
Ancho de Haz Vertical	40°
V.S.W.R	≤ 2:1
Polarización	Lineal
Impedancia nominal	50 Ω

Nota: Recuperado de (Pasternack Enterprises)

Plato reflector parabólico

El plato reflector parabólico de Antenna Research tiene tres ejes de soporte del foco para incorporar la antena primaria.

Las antenas de reflector parabólico proporcionan ganancias y directividades altas, por esta razón son muy usadas en los enlaces de comunicaciones por radio y satélite. Una antena parabólica tiene dos partes principales: un plato reflector parabólico y el elemento activo, llamado mecanismo de alimentación.

El mecanismo de alimentación encierra la antena primaria, la misma que irradia ondas electromagnéticas hacia el reflector parabólico, dispositivo pasivo que refleja la energía que le llega del mecanismo de alimentación. (Tomasi, 2003, pág. 401)

Las antenas parabólicas se clasifican de acuerdo a su alimentación en: Central, Cónica y Cassegrain.

Por las imperfecciones dimensionales sólo se refleja en el paraboloide del 50 al 75% de la energía que emite el mecanismo de alimentación. Adicionalmente la antena primaria en una antena real no es una fuente puntual, sino que ocupa un área finita; la cual obstruye un área pequeña en el centro del plato, formando una zona de sombra. Estas imperfecciones causan que la eficiencia normal de una antena parabólica sea aproximadamente del 55%. (Tomasi, 2003, pág. 404)

Alimentación central

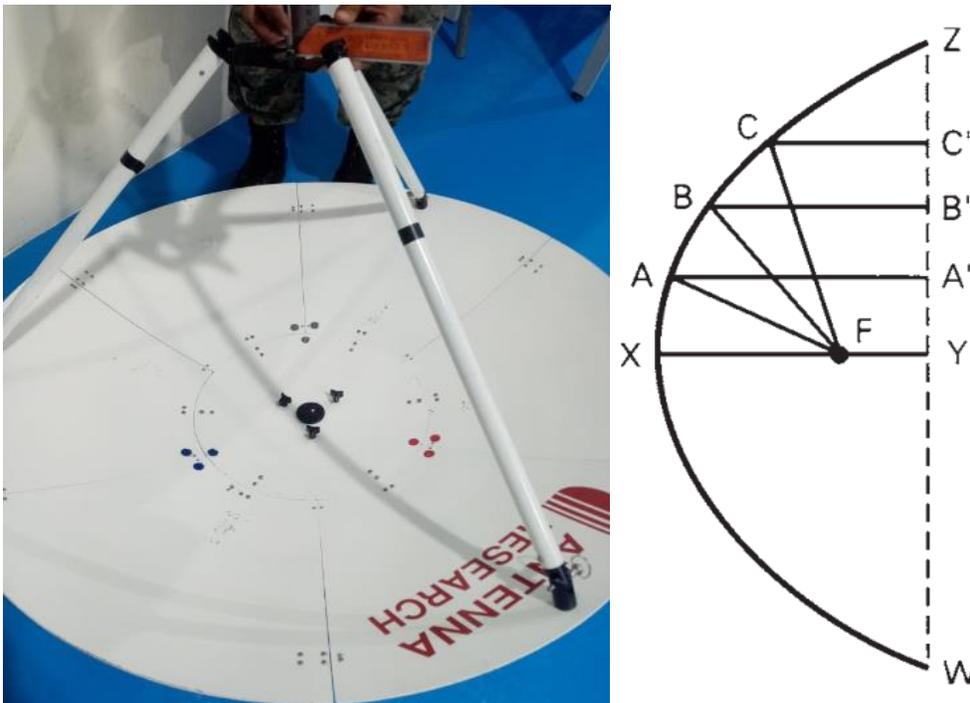
La antena primaria (antena espiral de gran ancho de banda) se coloca en el foco y la energía irradiada hacia el reflector parabólico se refleja hacia afuera, en forma de un haz concentrado. La energía que no es reflejada por el reflector parabólico se reparte en todas las direcciones.

Al colocar un pequeño reflector esférico adicional, se redirigen estas emisiones hacia el reflector parabólico; pero la ventaja que se alcanza, se anula en parte debido a su propio efecto de sombra, y su eficiencia sólo es un poco mejor que cuando no se agrega el pequeño reflector esférico adicional. (Tomasi, 2003, pág. 406)

La Figura 27 muestra una fotografía del plato reflector parabólico y un gráfico de la geometría de la parábola.

Figura 27.

Plato parabólico de Antenna Research y Geometría de la antena



Nota: Geometría de la antena tomada de (Tomasi, 2003, pág. 403)

Se cumple la siguiente relación en una parábola:

$$FA + AA' = FB + BB' = FC + CC' = k$$

Donde:

F = foco de la parábola

XY = eje focal

FX = distancia focal de la parábola

k = longitud constante

WZ = longitud de la directriz

Antena Espiral

La antena primaria considerada para la alimentación del plato reflector parabólico, en el primer set de pruebas será una antena tipo espiral CBS (del inglés, Cavity Backed Spiral).

Una antena espiral es un tipo de antena de RF y microondas, cuya forma consiste en una espiral de dos o más brazos, y se clasifican como antenas independientes de la frecuencia. La ventaja principal de estas antenas es que tienen relaciones de ancho de banda de 30:1 o mayores.

Existen diferentes tipos de antenas espirales, según el tipo de espiral que las formen: espirales de Arquímedes, cuadráticas, logarítmicas, etc. (Zabala Ignacio, 2019)

Características:

- Antena plana de cavidad
- Gran ancho de banda
- Polarización circular
- Baja ganancia
- Máxima directividad perpendicular al plano
- Lóbulos anchos

Parámetros:

- Radio total de la espiral, parámetro relacionado a la frecuencia inferior
- Forma de alimentación, parámetro relacionado a la frecuencia superior
- Número de vueltas
- Limitada por el diseño de la cavidad trasera

Figura 28.

Antena Espiral de Antenna Research CBS-218-40



Una fotografía de la antena espiral modelo CBS-218-40 se presenta en la Figura 28, esta antena tiene un V.S.W.R. $\leq 2:1$, potencia máxima de 4 W, polarización circular: RHCP (del inglés, Right Hand Circular Polarized) o LHCP (del inglés, Left Hand Circular Polarized) y utiliza un conector SMA hembra. (Antenna Research, pág. 76)

Trípode

En la Figura 29 se muestran fotografías de los trípodes utilizados en el proyecto, sujetando la base de antenas metálicas, utilizada en el primer set de pruebas experimentales y sustentando al sistema transmisor, que emplea el plato reflector parabólico más la alimentación focal.

Por recomendación del manual de usuario, se recomienda inspeccionar el sitio antes de la colocación del trípode, para verificar las siguientes condiciones: (BlueSky Mast, Inc., 2010, pág. 38)

1. No haya cables aéreos ni líneas eléctricas.
2. No haya líneas eléctricas enterradas ni municiones sin detonar.
3. El suelo sea capaz de sostener las estacas del trípode.

Para nivelar el trípode se utilizan los dos niveles de burbuja en la parte superior del mismo. Cuando las burbujas de aire en ambos niveles estén centradas entre las marcas de nivel en el medio de cada nivel de burbuja, el trípode está correctamente nivelado. (BlueSky Mast, Inc., 2010, pág. 39)

Figura 29.

Trípodes BlueSky Mast



Nota: Nivelación tomada de (BlueSky Mast, Inc., 2010, pág. 39)

Computador

Los requerimientos del computador para poder utilizar el Software Spike satisfactoriamente son los siguientes:

Sistemas operativos:

- Windows 7/8/10: 64 y 32 bits (recomendado 64 bits)
- Ubuntu Linux 18.04: 64 bits

Requerimientos mínimos del sistema:

- Procesador: Intel dual/quad core i-series de 3^{ra} generación o más nuevos
- 8 GB de RAM - 1 GB para el software BB60
- Compatibilidad nativa con USB 3.0 (BB60C Spectrum Analyzer User Manual,

2020, pág. 6)

Figura 30.

Especificaciones técnicas del computador

Device specifications

Inspiron 5591 2n1

Device name	DESKTOP-ED49MUT
Processor	Intel(R) Core(TM) i7-1065G7 CPU @ 1.30GHz 1.50 GHz
Installed RAM	16.0 GB (15.8 GB usable)
Device ID	7DF7814C-9F89-4122-AFC6-D6BAE6C53608
Product ID	00325-96726-39480-AAOEM
System type	64-bit operating system, x64-based processor
Pen and touch	Touch support with 10 touch points

Copy

Rename this PC

Windows specifications

Edition	Windows 10 Home
Version	20H2
Installed on	6/4/2021

Para el Proyecto se utilizará un computador, con las características técnicas detalladas en la impresión de pantalla de la Figura 30.

Adicionalmente se ha instalado el Software Microsoft Visual Studio, que es un IDE (del inglés, Integrated Development Environment) para Windows y macOS, compatible con múltiples lenguajes de programación y entornos de desarrollo web.

VNC (del inglés, Virtual Network Computing) es un sistema de uso compartido de pantalla multiplataforma creado para controlar de forma remota a otro computador, este sistema permite que un usuario remoto utilice la pantalla, el teclado y el mouse de un computador, desde un dispositivo secundario.

VNC funciona en un modelo cliente / servidor, donde el componente de servidor VNC debe estar instalado en el computador remoto y el componente de cliente VNC debe estar instalado en el dispositivo desde el cual se va a ejercer el control.

Cuando el servidor y el cliente están conectados, el servidor transmite una copia de su pantalla al cliente, para permitirle visualizar la pantalla del computador remoto y operarlo a distancia también. (RealVNC Limited, 2021)

Acoplamiento mecánicos

El proceso de impresión 3D, consiste en producir objetos a través de la adición de material en capas, las mismas que corresponden a las sucesivas secciones transversales de un modelo 3D. Los plásticos y las aleaciones de metal son los materiales más usados, pero se puede utilizar desde hormigón hasta tejido vivo. (Autodesk Inc., 2020)

El diseño de los prototipos de acoplamiento mecánicos utilizados en este proyecto, fue hecho en el Software SolidWorks y las respectivas impresiones 3D se realizaron en plástico.

SolidWorks es un software para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado para el sistema operativo de Microsoft Windows. Este programa permite modelar piezas y obtener planos técnicos; funciona en base a las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD (del inglés, computer-aided design).

La Figura 31 presenta las fotografías de la impresión en 3D utilizada para sujetar el motor de pasos al trípode.

Figura 31.

Acoplamiento del motor de pasos al trípode



La Figura 32 presenta el diseño del acoplamiento de la base de antenas al motor.

Figura 32.

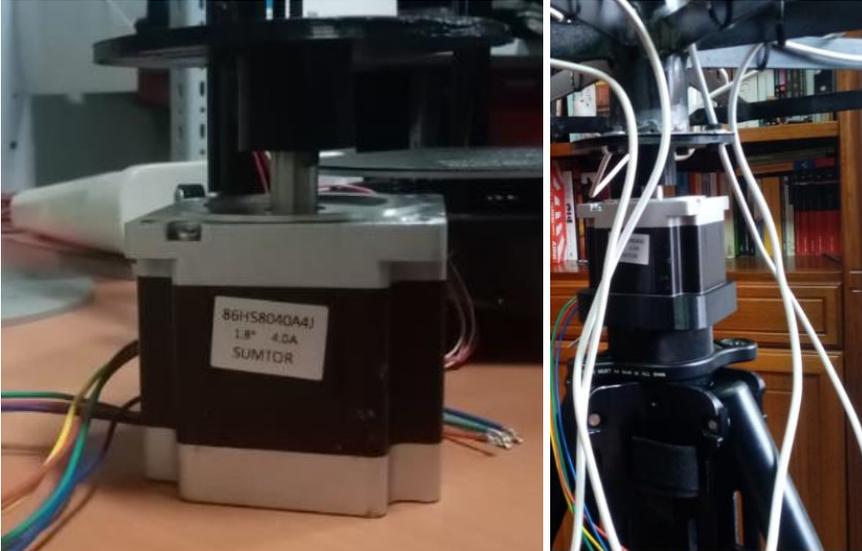
Diseño de la pieza realizada en SolidWorks



La Figura 33 presenta las fotografías de la impresión en 3D del acoplamiento de la base de antenas al motor.

Figura 33.

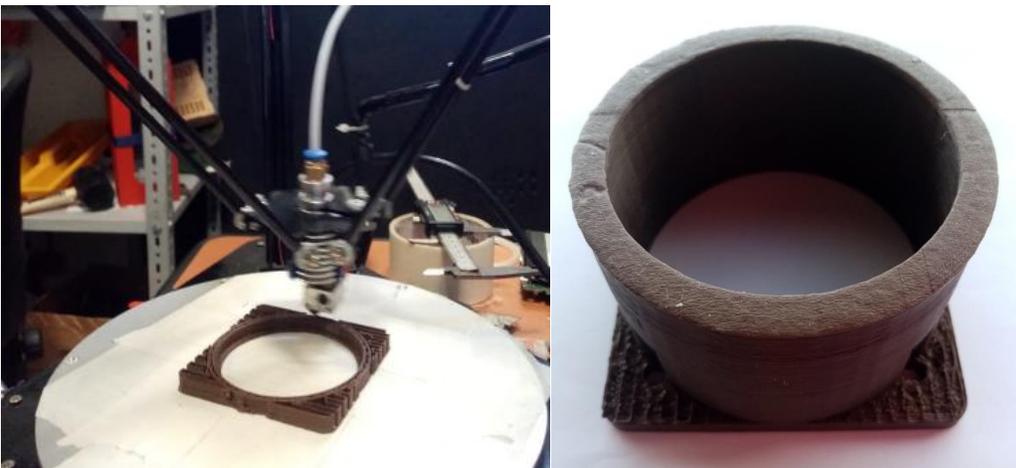
Acoplamiento de la base de antenas al motor de pasos



La Figura 34 presenta las fotografías de la impresión en 3D del acoplamiento de la antena espiral con el plato reflector parabólico.

Figura 34.

Impresión en 3D del acoplamiento de la antena espiral



Router TP-LINK

El router (enrutador) AC750 Archer C20 ofrece conexión Wireless-Fidelity (Wi-Fi) confiable en las bandas de: 2,4 GHz (300 Mbps) y de 5 GHz (433 Mbps). Este dispositivo brinda conectividad mediante dos antenas y permite que la red pueda ser configurada y administrada mediante una aplicación intuitiva. (TP-Link Corporation, 2021)

La Figura 35 presenta las velocidades de transmisión del router TP-LINK de acuerdo al estándar IEEE definido (del inglés, Institute of Electrical and Electronics Engineers) y en la Figura 36 se puede observar una fotografía del dispositivo.

Figura 35.

Estándares Wi-Fi y respectivas velocidades de transmisión

802.11ac	5GHz	433Mbps
802.11n	2.4GHz	300Mbps

Nota: Tomado de (TP-Link Corporation, 2021)

Figura 36.

Router AC750 Archer C20



Nota: Tomado de (TP-Link Corporation, 2021)

NUC

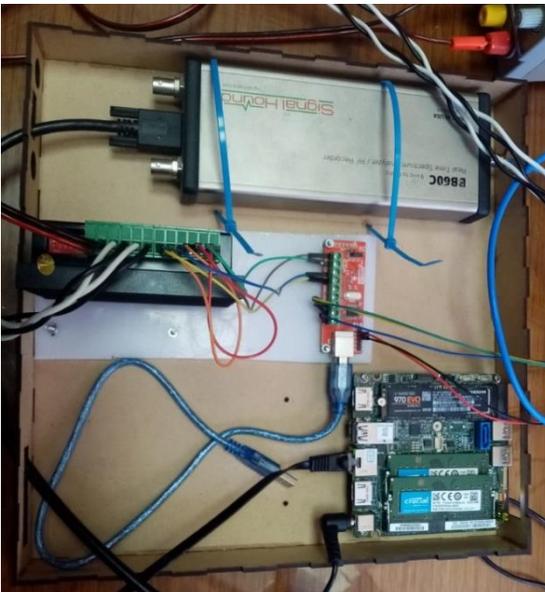
Debido a su reducido tamaño un NUC (del inglés, Next Unit of Computing) no ofrece unidad óptica preinstalada ni sistema operativo de Windows, por lo cual es necesario adquirir una copia de la licencia del sistema operativo cargada en una flash.

Su mayor ventaja es que a pesar de su peso liviano, puede llegar a ofrecer igual capacidad de procesamiento que un computador de escritorio y su mayor desventaja es la limitada cantidad de puertos que puede contener. (Stobing, 2016)

En la Figura 37 se puede observar la bandeja que portará: el NUC, el driver del motor, el GPIO, el receptor BB60C, y el switch de RF; la misma fue realizada en impresión de corte y grabado láser sobre madera.

Figura 37.

NUC colocado en la bandeja porta-elementos



Fuente de Poder

La Fuente de Poder B&K Precision modelo 1761 dispone de triple salida DC y tiene una pantalla tipo LED (del inglés, light-emitting diode) dual de cuatro dígitos.

Esta fuente se utilizará para alimentar al motor de pasos, mediante uno de los suministros A ó B, ubicados a la izquierda y derecha del suministro central, el mismo que dispone de un rango de voltaje de salida de 2 a 6,5 V. La Figura 38 presenta una fotografía del dispositivo.

El rango de voltaje de salida de los suministros A y B es de 0 a 35 V y su rango de límite de corriente de salida es de 0,1 a 3 A. (B&K Precision Corp., 2005, pág. 8)

Figura 38.

Fuente de Poder



Generador de Señales

El generador Agilent E4438C es capaz de generar señales de RF de 250 kHz a 3,0 GHz. (Agilent Technologies, 2014, pág. 2) La Figura 39 presenta una fotografía del equipo. Este equipo ofrece tres modos de funcionamiento:

- CW (del inglés, continuous wave)
- Señal barrida
- Modulación analógica

Figura 39.

Generador de Señales Agilent E4438C



En este capítulo se ofreció una descripción resumida de todos los dispositivos electrónicos y mecánicos, que conjuntamente con el software apropiado serán utilizados para la implementación de los sistemas a ser probados.

En el siguiente capítulo se detallarán las dos plataformas a ser implementadas, para de acuerdo a los resultados obtenidos, realizar un análisis sobre la eficiencia de los sistemas de DF implementados con los diferentes tipos de antenas utilizadas.

Capítulo IV

Desarrollo del Sistema y Pruebas

En este capítulo se presentan los resultados preliminares y finales obtenidos en las pruebas realizadas con el sistema de M.A.G.E. propuesto, que utiliza como base el Software Arturo desarrollado por la ESPE en 1996 para el conflicto del CENEPa.

Al final del proyecto se adjuntan como anexos, el código realizado en Visual Studio para la lectura del patrón de radiación del sistema de recepción (Moya, 2021) del arreglo de las ocho antenas de bajísimo costo, en primer lugar y del arreglo de las cuatro antenas industriales, en segundo lugar; más el protocolo de pruebas recomendado.

Implementación de la Plataforma de Pruebas

La Figura 40 presenta una fotografía de la implementación del primer sistema de recepción y transmisión en el estadio de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” (U.F.A. – ESPE).

Figura 40.

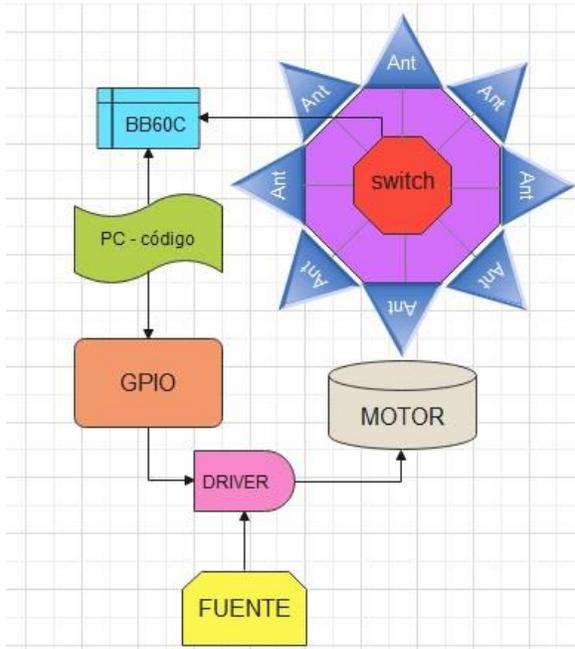
Primera plataforma de pruebas implementada



La Figura 41 muestra un diagrama del primer sistema de recepción conformado por las ocho antenas LPDA.

Figura 41.

Diagrama de conexión de los elementos del primer sistema de recepción



Procedimiento para realizar las pruebas

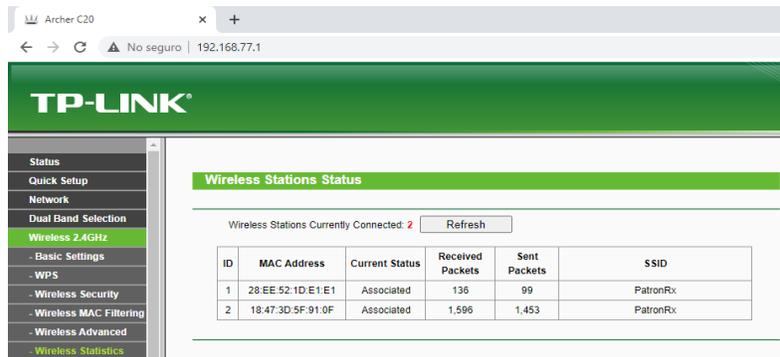
1. Energizar al router TP-LINK y prenderlo.
2. Conectar el computador a la red del router TP-LINK, llamada PatronRx.
3. Energizar al NUC y esperar que se enganche a la red PatronRx.

La Figura 42 presenta la página web de TP-LINK, donde se muestra la dirección MAC, el estado actual, los paquetes recibidos, los paquetes enviados y el SSID (del inglés, Service Set Identifier) de cada estación conectada.

La Figura 43 es una captura de pantalla de la interfaz de VNC Viewer, en el momento de la conexión con la estación remota, en este caso, el NUC que se encuentra en el sistema de recepción.

Figura 42.

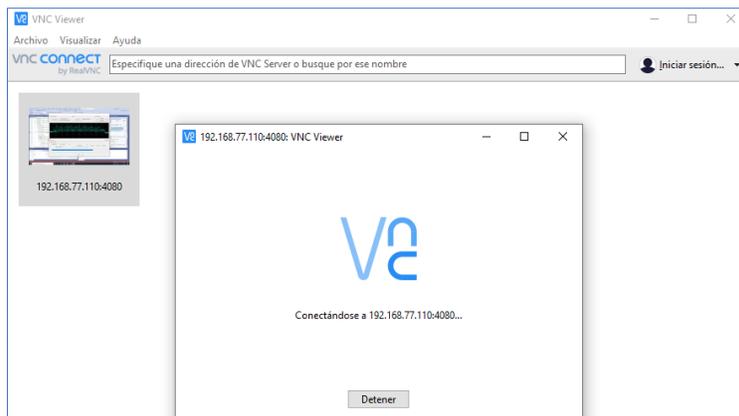
Verificación de los dispositivos conectados a la red del router TP-LINK



4. Conectarse desde el computador al NUC, utilizando el software VNC Viewer.

Figura 43.

Conexión al NUC mediante VNC Viewer



5. Energizar el motor de pasos.
6. Mediante la conexión remota, ejecutar el programa que se encuentra cargado en el NUC.
7. Desde la interfaz programada en Visual Studio (Moya, 2021) probar el correcto funcionamiento del receptor BB60C y del motor de pasos.
8. En el sistema transmisor (representando al sistema de mando y control enemigo), energizar el generador y colocar la frecuencia designada.

El primer sistema de recepción está conformado por un arreglo circular de ocho antenas LPDA (del inglés, log-periodic dipole-array) de bajísimo costo, con una cobertura de 45° cada una; con el fin de realizar la monitorización del espectro radioeléctrico en los 360°.

Adicionalmente para esta primera parte de la experimentación, el sistema de transmisión estuvo conformado por el plato reflector parabólico, utilizando como alimentación primaria a la antena espiral CBS-218-40.

Para la implementación del sistema de monitorización, se utilizó el receptor BB60C, el mismo que posee código abierto, lo cual permitió desarrollar una aplicación propuesta en la tesis “Desarrollo de un sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 44 MHz para la banda de 10 kHz a 6 GHz” y es mediante esta aplicación que se realizó el barrido en los rangos de frecuencia requeridos para este proyecto.

El sistema de DF propuesto, se fundamenta en la obtención de la potencia recibida por cada una de las ocho antenas, utilizando: el receptor BB60C, un switch de RF de alta velocidad de conmutación y un board I/O de 8 puertos.

El AoA se calculará considerando los lóbulos de radiación de cada una de las antenas del sistema de recepción, para obtener los mismos se acopló la base de antenas a un motor de pasos, el mismo que gira 200 pasos por revolución.

Obtención del Ángulo de Arribo

En cada paso el receptor BB60C capta ocho vectores, correspondientes a los niveles de potencia recibidos, para procesar los vectores de cada una de las ocho antenas, se ha utilizado el algoritmo propuesto en la tesis “Desarrollo de un sistema de DF para la banda de 80 MHz a 2 GHz”.

El mismo que determina qué antena recibió el mayor nivel de la señal monitorizada, en este caso, se obtiene el AoA con una cobertura de 45° y para alcanzar mayor precisión, se comparan los niveles de señal de las antenas que se encuentran a la derecha y a la izquierda de la antena, que recibió el nivel más alto de potencia.

Al determinar la antena adyacente con mayor potencia, se procede a realizar la relación entre las dos potencias recibidas, para diseñar una tabla, en la cual se presenta el AoA. (Andrade & Machado, 2019, págs. 67-69)

Pruebas con el Primer Sistema de Recepción

Después de verificar el protocolo para la plataforma de pruebas, se generaron señales de RF en las frecuencias que se presentan en las Tablas 9, 10 y 11.

Tabla 9.

Frecuencias que fueron probadas el primer día

ORD.	F_inicial [MHz]	F_final [MHz]	F_central [MHz]
1	80	150	115
2	150	200	175
3	200	250	225
4	250	300	275
5	300	350	325
6	350	400	375
7	400	450	425
8	450	500	475
9	500	550	525
10	550	600	575
11	600	650	625
12	650	700	675
13	700	750	725

Tabla 10.*Frecuencias que fueron probadas el segundo día*

ORD.	F_inicial [MHz]	F_final [MHz]	F_central [MHz]
14	750	800	775
15	800	850	825
16	850	900	875
17	900	950	925
18	950	1000	975
19	1000	1050	1025
20	1050	1100	1075
21	1100	1150	1125
22	1150	1200	1175
23	1200	1250	1225
24	1250	1300	1275
25	1300	1350	1325
26	1350	1400	1375

Tabla 11.*Frecuencias que fueron probadas el tercer día*

ORD.	F_inicial [MHz]	F_final [MHz]	F_central [MHz]
27	1400	1450	1425
28	1450	1500	1475
29	1500	1550	1525
30	1550	1600	1575
31	1600	1650	1625
32	1650	1700	1675
33	1700	1750	1725
34	1750	1800	1775
35	1800	1850	1825
36	1850	1900	1875
37	1900	1950	1925
38	1950	2000	1975

Luego de realizar las pruebas para cada una de las 38 frecuencias centrales propuestas, con un span de 200 kHz, se obtuvieron 38 tablas; cada una formada por 200 filas (número de pasos por revolución) y 8 columnas (número de antenas del sistema de recepción).

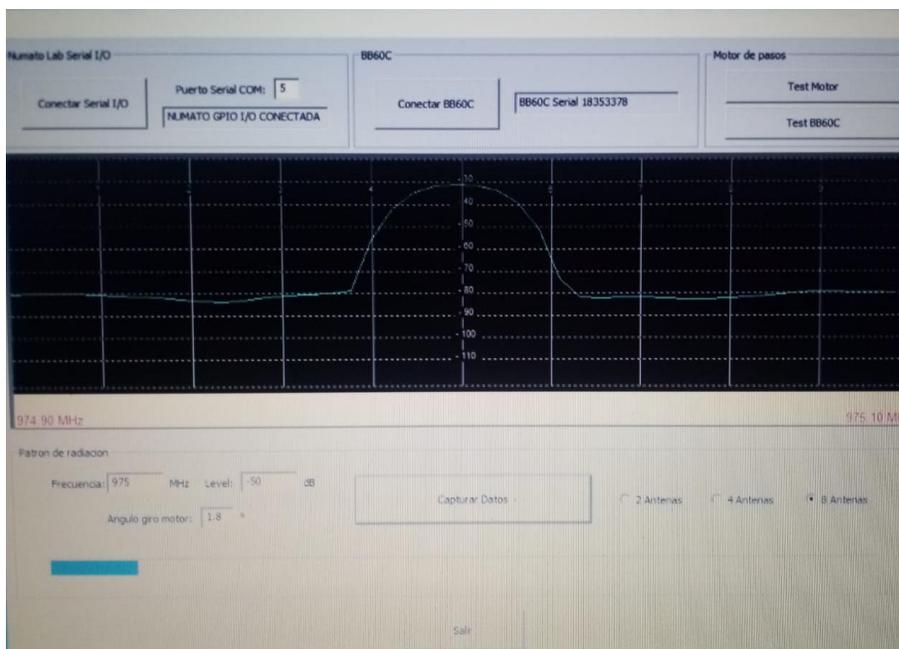
Recepción de Señales Radioeléctricas en el Primer Sistema

Idealmente los patrones de radiación de las ocho antenas receptoras, determinarían la distribución de potencia recibida para 360° con un intervalo de 1,8°; lo cual permitiría visualizar los niveles de potencia para determinar el AoA de una señal.

Las mediciones de la potencia de recepción comenzaron alineando la antena N.1 frente a la antena transmisora, por tal razón en los resultados del diagrama de radiación se debería obtener la mayor potencia de recepción cuando la antena se encuentra frente a frente con la antena transmisora.

Figura 44.

Interfaz del programa para la frecuencia de 975 MHz



La Figura 44 muestra la lectura de las mediciones de la primera plataforma de pruebas para la frecuencia de 975 MHz.

Algoritmo para obtener el AoA del Primer Sistema de Recepción

Luego de realizar la conmutación de las ocho antenas y de comparar las potencias recibidas por cada una, la antena que mayor potencia ha captado, es denominada “Antena Central”. (Andrade & Machado, 2019, pág. 85)

La Antena Central tiene una cobertura de 45°, al ser necesario determinar con mayor precisión el AoA, se procede a comparar las potencias obtenidas por las antenas ubicadas a los lados de la Antena Central, para verificar la que ha recibido mayor potencia, ya sea la del lado derecho o la del lado izquierdo de la Antena Central.

Una vez determinada la antena adyacente que mayor potencia ha recibido, se puede determinar la relación entre las potencias recibidas, para obtener así el AoA; al producir una tabla de relación de potencias. (Andrade & Machado, 2019, pág. 86)

Para encontrar la relación de potencias primero se cambia las unidades a [mW] y luego se divide el valor de la antena adyacente para el valor de la Antena Central, y se obtiene de esta manera un valor adimensional. (Andrade & Machado, 2019, pág. 87)

La precisión se alcanza al considerar que las antenas mantienen la misma relación de una señal generada desde un mismo punto independientemente de la distancia y de la frecuencia del generador de señales. (Andrade & Machado, 2019, pág. 89)

Interfaz utilizada para obtener el AoA

La interfaz utilizada está compuesta por dos bloques: espectro y panel de configuración (Moya, 2021). El primer bloque permite visualizar el espectro de la señal recibida en tiempo real, el mismo está compuesto por: frecuencia inicial y frecuencia final,

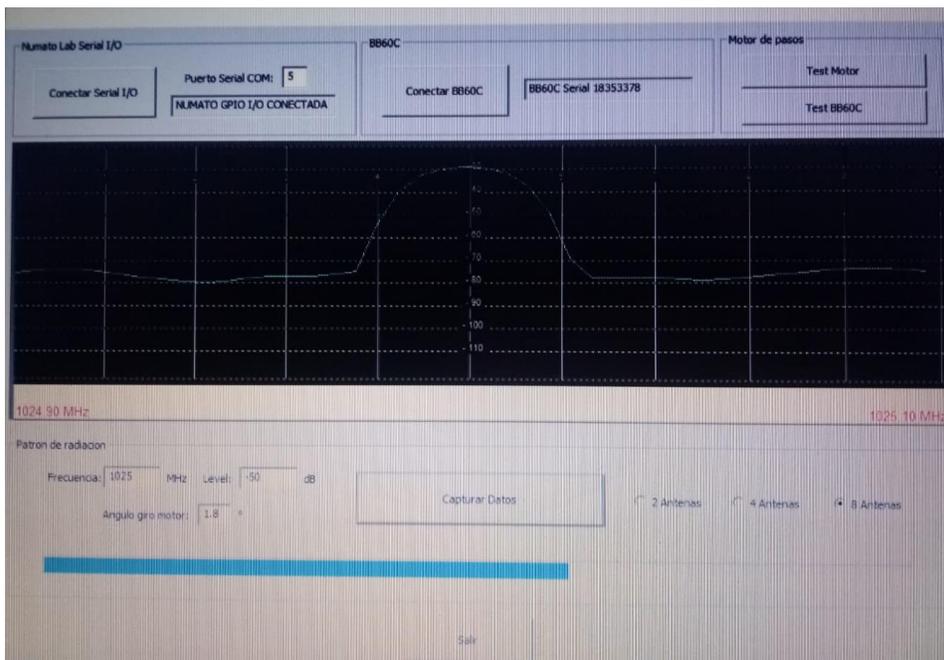
las mismas que están ubicadas a los márgenes de la ventana cuadriculada; y el nivel de potencia de la señal, el mismo que se puede observar en el eje vertical central.

El segundo bloque permite el ingreso de los parámetros requeridos para realizar la monitorización. (Calderón Villalva & Reinoso Enríquez, 2019, pág. 42) Como se observa en la Figura N. 45, permite el ingreso de: Frecuencia central en MHz, Nivel (Level) en dB, Ángulo de giro del motor de pasos en grados, y Número de antenas del arreglo: dos, cuatro u ocho.

Al hacer clic en Capturar Datos, el receptor BB60C empieza a operar y se puede observar el respectivo avance de la toma de medidas en la barra azul inferior.

Figura 45.

Interfaz del programa para la frecuencia de 1025 MHz



Dado que el receptor BB60C tiene un ancho de banda instantáneo de 27 MHz, la POI de una señal de interés que se encuentre dentro de este ancho de banda, es del

100%, si la duración de la comunicación en esa portadora es de al menos 1,125 ms. (Calderón Villalva & Reinoso Enríquez, 2019, pág. 44)

Sistema Arturo

El sistema Arturo dispone de un software desarrollado en el CICTE – ESPE en 1996, mediante un contrato con la Honorable Junta de Defensa Nacional para el monitoreo del espectro radioeléctrico, el cual ha permitido realizar tareas de vigilancia y soporte electrónico dentro del ámbito de competencia de la G.E. y la defensa de la soberanía como tal, en lo que enmarca a las Operaciones Militares desarrolladas por el AGRUCOMGE. (Calderón Villalva & Reinoso Enríquez, 2019, pág. 50)

El sistema de monitoreo implementado supera al sistema Arturo debido a la utilización del receptor BB60C, el mismo que cuenta con varias especificaciones técnicas, que incluye la digitalización de sus componentes I y Q a una alta tasa de muestreo. (Calderón Villalva & Reinoso Enríquez, 2019, pág. 51).

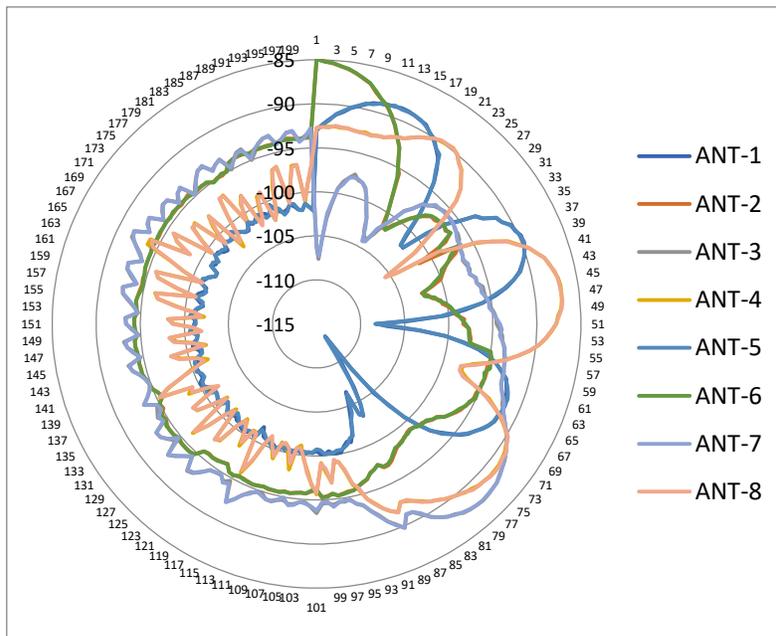
Resultados del Primer Sistema de Recepción

En las Figuras 46, 47, 48 y 49 presentadas a continuación, se han graficado los lóbulos de irradiación obtenidos en algunas de las pruebas realizadas en la primera plataforma.

Los gráficos fueron realizados en las hojas de cálculo de Microsoft Excel, utilizando la opción Insertar Gráfico Radial y tomando en consideración los valores máximos y mínimos de las mediciones de potencia para las distintas frecuencias generadas.

Figura 46.

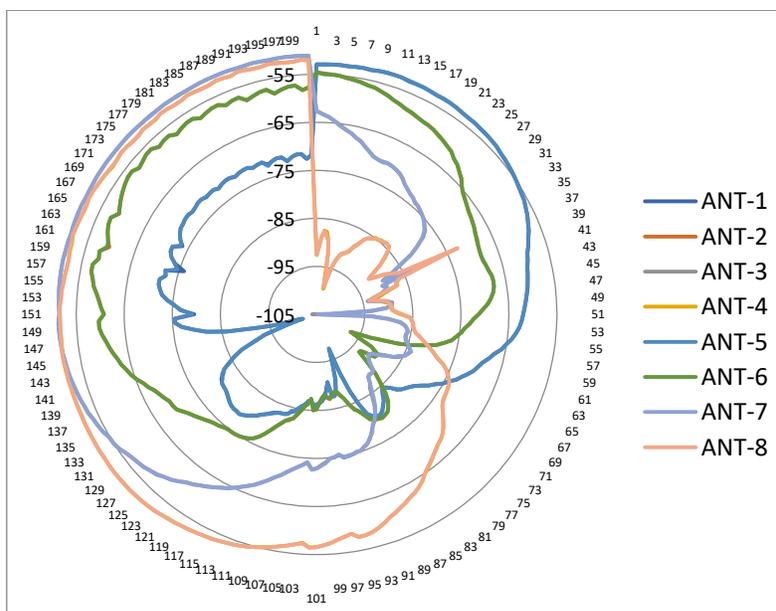
Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 425 MHz



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

Figura 47.

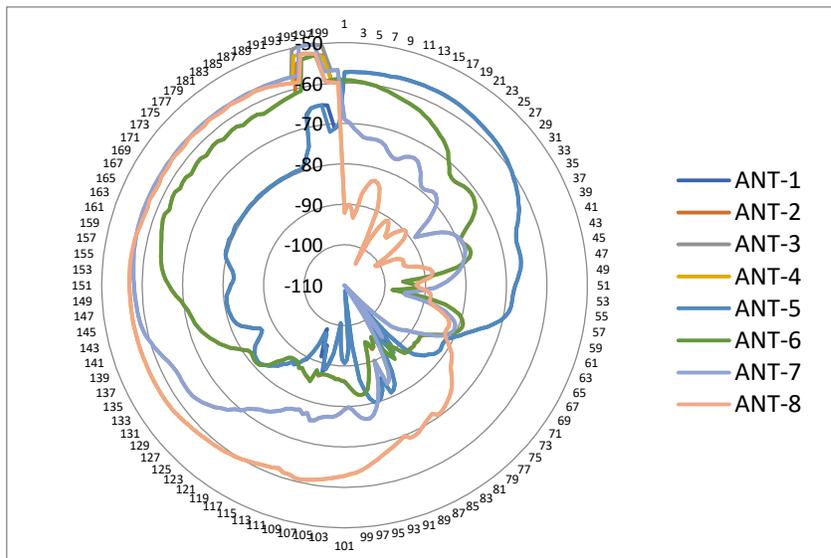
Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 975 MHz



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

Figura 48.

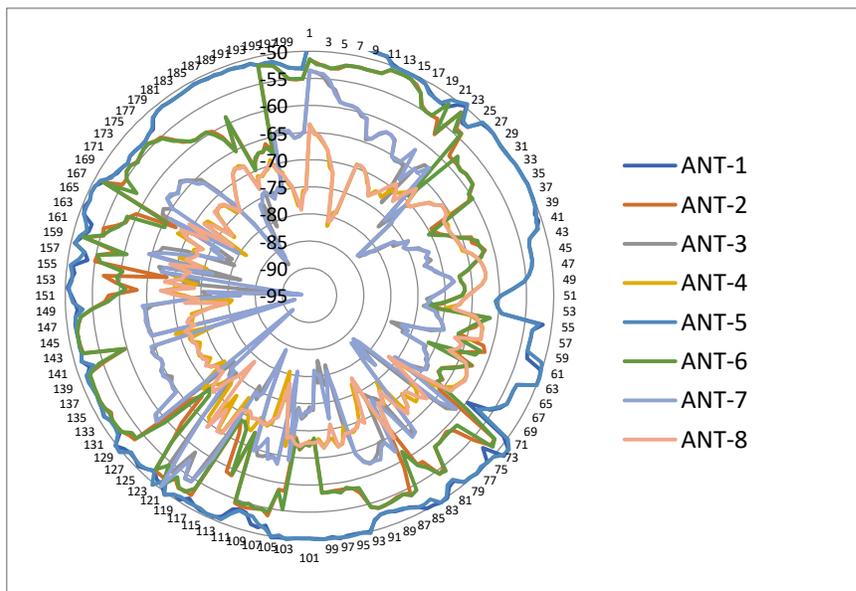
Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 1.025 MHz



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

Figura 49.

Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 1.575 MHz



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

Después de analizar los gráficos correspondientes a las 38 pruebas realizadas, se concluye que las antenas LPDA utilizadas en este arreglo de recepción no son las más adecuadas para alcanzar el objetivo planteado.

Por este motivo, se implementó una segunda plataforma de pruebas, utilizando otros tipos de antenas, cuyas especificaciones técnicas permitan alcanzar el objetivo del proyecto de investigación.

Pruebas con el Segundo Sistema de Recepción

Después de verificar el protocolo para la plataforma de pruebas, se generaron señales de RF en las frecuencias que se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12.

Frecuencias probadas en la segunda plataforma

ORD.	F_central [MHz]
1	150
2	200
3	500
4	750
5	1250
6	1750
7	2000

Luego de realizar las pruebas para cada una de las 7 frecuencias centrales propuestas, con un span de 200 kHz, se obtuvieron 7 tablas; cada una formada por 400 filas (número de pasos por revolución) y 4 columnas (número de antenas del sistema de recepción).

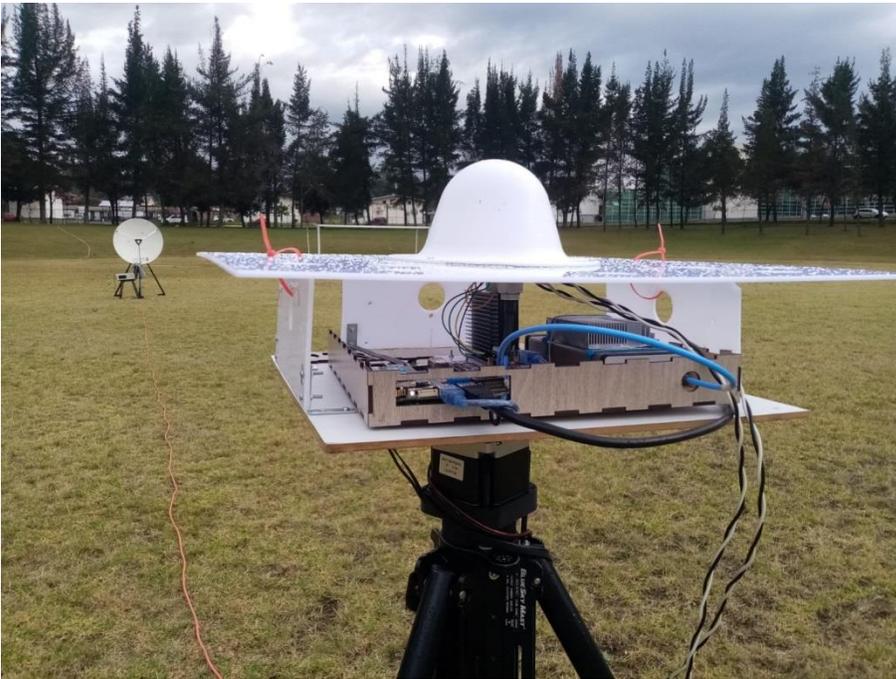
Recepción de Señales Radioeléctricas en el Segundo Sistema

Idealmente los patrones de radiación de las cuatro antenas receptoras, determinarían la distribución de potencia recibida para 360° con un intervalo de $0,9^\circ$; lo cual permitiría visualizar los niveles de potencia para determinar el AoA de una señal.

Las mediciones de la potencia de recepción comenzaron alineando la antena N.1 frente a la antena transmisora, por tal razón en los resultados del diagrama de radiación se debería obtener la mayor potencia de recepción cuando la antena se encuentra frente a frente con la antena transmisora.

Figura 50.

Segunda plataforma de pruebas implementada



La Figura 50 presenta una fotografía de la segunda plataforma de pruebas implementada. El segundo sistema de recepción está conformado por un arreglo cuadrangular de cuatro antenas industriales tipo domo, con una cobertura de 90° cada una; con el fin de realizar la monitorización del espectro radioeléctrico en los 360° .

Adicionalmente para esta segunda parte de la experimentación, el sistema de transmisión estuvo conformado por el plato reflector parabólico, utilizando como alimentación primaria a la antena LPDA.

Se debe considerar que los equipos utilizados y el protocolo de medición son idénticos a los de la primera plataforma de pruebas; con el intercambio exclusivamente de las antenas LPDA por las antenas industriales en el sistema de recepción y de la antena espiral por una antena LPDA en el sistema transmisor.

Algoritmo para obtener el AoA del Segundo Sistema de Recepción

Luego de realizar la conmutación de las cuatro antenas y de comparar las potencias recibidas por cada una, la antena que mayor potencia ha captado, es denominada "Antena Central". (Andrade & Machado, 2019, pág. 85)

La Antena Central tiene una cobertura de 90°, al ser necesario determinar con mayor precisión el AoA, se procede a comparar las potencias obtenidas por las antenas ubicadas a los lados de la Antena Central, para verificar la que ha recibido mayor potencia, ya sea la del lado derecho o la del lado izquierdo de la Antena Central.

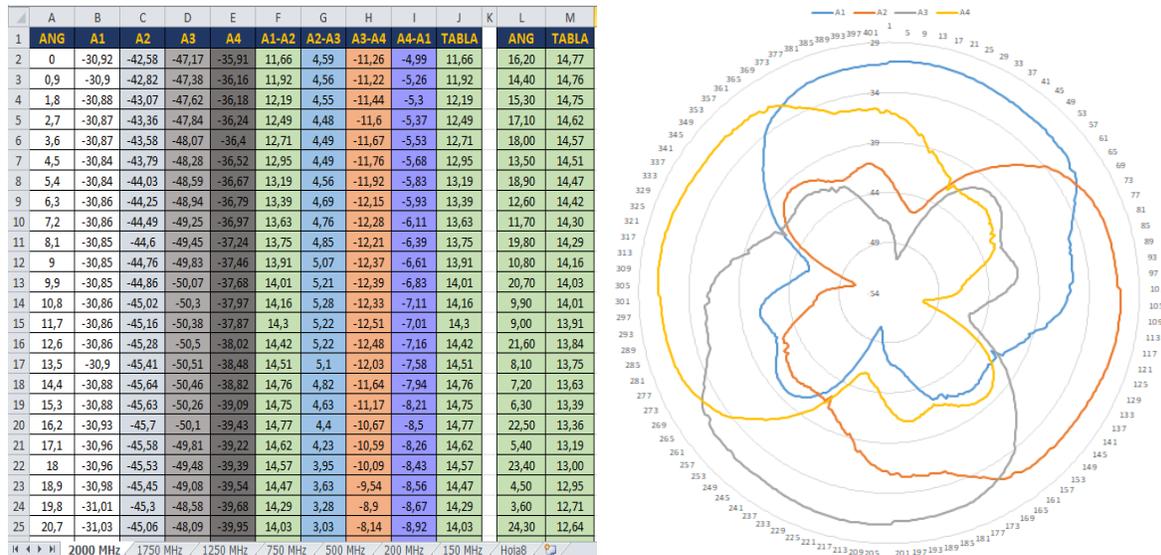
Una vez determinada la antena adyacente que mayor potencia ha recibido, se puede determinar la relación entre las potencias recibidas, para obtener así el AoA; al producir una tabla de relación de potencias. (Andrade & Machado, 2019, pág. 86)

Para generar la tabla de relación de potencias, se resta (en dBm) el valor recibido por la antena adyacente del valor recibido por la Antena Central y de esta manera se procede con el resto de mediciones de este par de antenas y luego así sucesivamente con los siguientes pares de antenas.

De esta tabla de relación de potencias, se puede obtener el AoA de la frecuencia solicitada. Se pueden observar los lóbulos de irradiación y la respectiva tabla generada para 2 GHz en la Figura 51.

Figura 51.

Tabla de relación de potencias y lóbulos de irradiación con 2 GHz



Procedimiento para utilizar la Tabla de relación de potencias

1. Se pide calcular DF de una frecuencia (2 GHz, en este caso).
2. Se toman las lecturas de la potencia con 2 GHz para las antenas 1, 2, 3 y 4.
3. Se ordenan las 4 medidas de potencia recibidas de mayor a menor.
4. La antenna que reciba la mayor potencia (Antena Central), define el cuadrante por donde viene la señal. En este caso es la antenna 1 (lóbulo de irradiación azul).
5. El segundo valor más alto, define a la antenna adyacente.
6. Restamos el valor de la potencia de la antenna adyacente del valor de la potencia de la Antena Central.

7. Este valor lo comparamos con la columna M (TABLA) y en la columna L (ANG), obtenemos un ángulo, el mismo que es el AoA requerido.

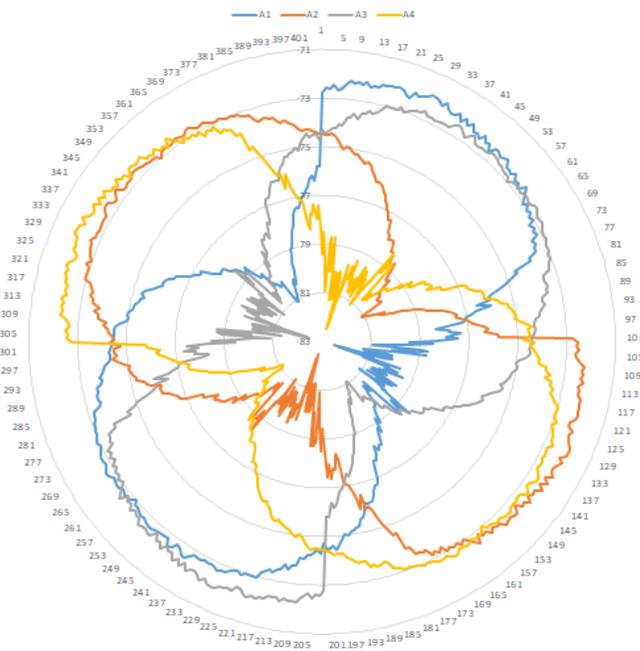
Resultados del Segundo Sistema de Recepción

A continuación en las Figuras 52, 53, 54 y 55 se presentan los lóbulos de irradiación obtenidos en algunas pruebas realizadas en la segunda plataforma.

Después de analizar los gráficos correspondientes a las 7 pruebas realizadas, se concluye que las antenas industriales tipo domo utilizadas en este arreglo de recepción son muy adecuadas para alcanzar el objetivo planteado.

Figura 52.

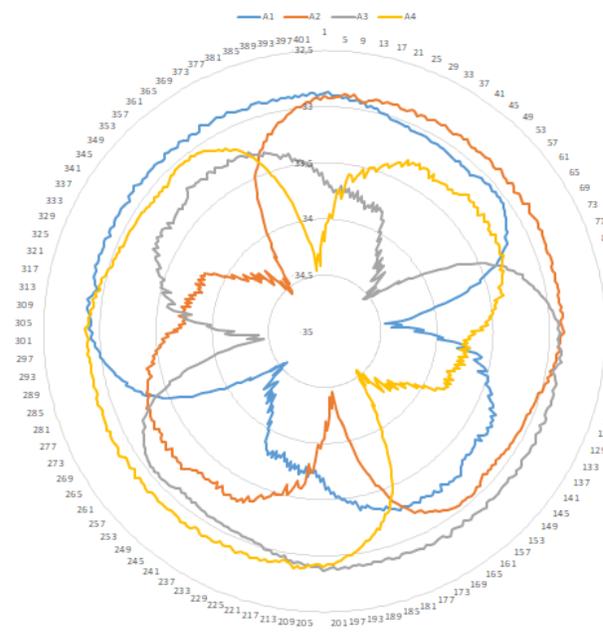
Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 200 MHz



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

Figura 53.

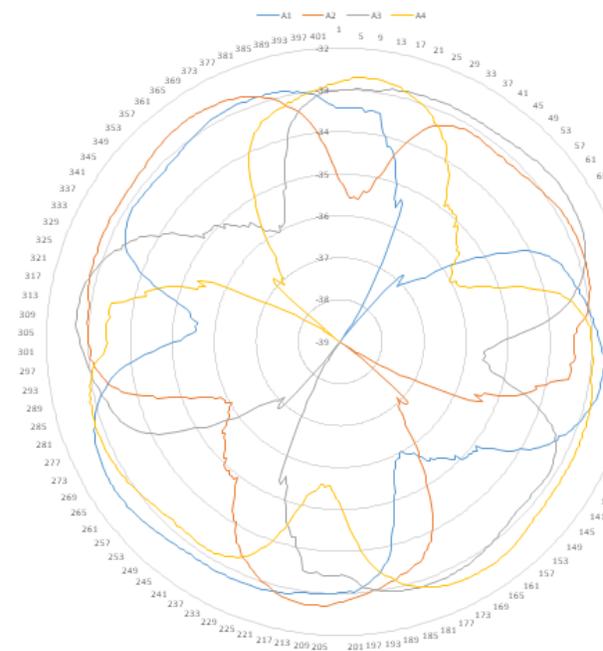
Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 750 MHz



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

Figura 54.

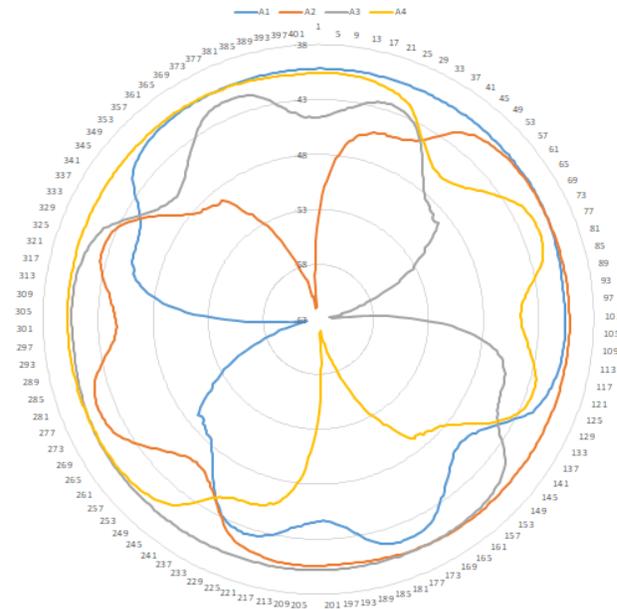
Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 1.250 MHz



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

Figura 55.

Lóbulos de irradiación obtenidos para la frecuencia de 1.750 MHz



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel

En la Tabla 13 se resumen los resultados de la experimentación, al realizar una comparación objetiva de los hallazgos preliminares (obtenidos con la primera plataforma de pruebas) versus los hallazgos finales (obtenidos con la segunda plataforma de pruebas).

Los resultados iniciales no fueron favorables, ya que los lóbulos de irradiación no permitieron determinar el AoA, pero al cambiar de antenas, tanto en el sistema de Recepción (Rx) como en el sistema de Transmisión (Tx) se obtuvieron resultados exitosos.

Tabla 13.

Comparación entre las dos plataformas de pruebas implementadas

Característica	Primera Plataforma	Segunda Plataforma
Tipo de arreglo de Rx	Circular	Cuadrangular
Número de Antenas de Rx	8	4
Tipo de Antenas de Rx	LPDA	Industrial
Tipo de Antenas de Tx	Espiral	LPDA
Determinación del AoA	NO	SI

Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que la ventana para mostrar el AoA en el Software Arturo ha sido agregada, para que operativamente pueda ser utilizada por el oficial analista de G.E. (Moya, 2021)

En este capítulo se describió el trabajo práctico realizado en el proyecto, después de implementar dos plataformas de pruebas, en las cuales, la primera no funcionó adecuadamente y la segunda dio resultados exitosos.

El próximo capítulo tratará sobre las conclusiones y recomendaciones extraídas al finalizar el proceso de investigación, implementación y experimentación llevado a cabo.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Al combinar el trabajo de titulación “Desarrollo de un sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 44 MHz para la banda de 10 kHz a 6 GHz” con el trabajo de titulación “Desarrollo de un sistema de DF para la banda de 80 MHz a 2 GHz”, y complementar con la investigación realizada en este proyecto, se logró diseñar e implementar un sistema de inteligencia de señales, el mismo que integra la monitorización del espectro radioeléctrico y la obtención del AoA de señales para la banda V/UHF.

Se aplicaron los conocimientos presentados en el trabajo de titulación “Desarrollo de un sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 44 MHz para la banda de 10 kHz a 6 GHz” para llevar a cabo la monitorización del espectro radioeléctrico en la banda V/UHF.

Se aplicaron los conocimientos presentados en el trabajo de titulación “Desarrollo de un sistema de DF para la banda de 80 MHz a 2 GHz” para obtener el AoA de las señales de interés.

Al combinar los dos proyectos de investigación mencionados anteriormente, y complementarlos con la investigación realizada en este proyecto, se logró el diseño y la implementación de un sistema de inteligencia de señales que integra la monitorización del espectro radioeléctrico y la obtención del AoA de señales de interés para la banda V/UHF.

Se realizó el estudio, análisis y síntesis del estado del arte sobre las técnicas de monitorización de señales radioeléctricas y la determinación del AoA, lo cual permitió

desarrollar una técnica efectiva y un algoritmo eficiente para estimar el AoA de las señales radioeléctricas en la banda de V/UHF.

Se realizaron coordinaciones con el grupo de estudiantes que están desarrollando un sistema de monitorización y detección de múltiples señales, para compartir: información, códigos del programa, y lecciones aprendidas al implementar las plataformas de pruebas.

Se evaluaron los algoritmos y procesos desarrollados en el sistema de monitorización y AoA de señales radioeléctricas con la utilización de algunos dispositivos disponibles en el CICTE más algunos equipos facilitados por mis tutores.

Se realizaron pruebas en el estadio de la U.F.A – ESPE para evaluar experimentalmente las técnicas desarrolladas en los sistemas de monitorización y localización de señales radioeléctricas, utilizando los medios disponibles en el CICTE más algunos elementos facilitados por mis tutores.

No se obtuvieron resultados satisfactorios al realizar las pruebas de campo con el arreglo conformado por ocho antenas LPDA de bajísimo costo, ya que los lóbulos de radiación no permitieron obtener el AoA.

Se alcanzaron resultados exitosos al realizar las pruebas de campo con el arreglo conformado por cuatro antenas industriales tipo domo, ya que las mismas sí tienen especificaciones técnicas adecuadas para estimar el AoA.

En las pruebas de campo, la variación fue dada por: los arreglos receptores de antenas, ya que los demás equipos, códigos, algoritmos, y el protocolo de medición se mantuvieron para el primer y el segundo set de pruebas.

Para implementar este proyecto de G.E. se requirió la colaboración de especialistas en otros campos como son: mecánica y redes, ya que la ciencia se genera sobre ciencia y el aporte de estos campos del conocimiento fue imprescindible, para alcanzar los objetivos propuestos para este proyecto.

Este proyecto se clasifica por el uso de la energía electromagnética como: G.E. pasiva; por el campo de aplicación como: radiodifusión y por el aspecto operacional como: M.A.G.E. Como estación de M.A.G.E. abarca las acciones de: Búsqueda Electrónica y Localización Electrónica.

La Búsqueda Electrónica se ejecuta al realizar la búsqueda del espectro electromagnético (procesando $I + jQ$), mientras se procura detectar la existencia de irradiaciones desconocidas o sospechosas; y la Localización Electrónica se efectúa al intentar determinar la ubicación (AoA) desde donde se origina la emisión electromagnética enemiga.

En base a la investigación realizada sobre: sistemas de monitorización y algoritmos para hallar el AoA de señales radioeléctricas; se implementaron dos plataformas de pruebas; y después de llevar a cabo la experimentación, se concluyó que únicamente la segunda plataforma puede considerarse como un prototipo para un sistema de DF eficiente.

En ambas plataformas de pruebas, la programación y los equipos utilizados fueron los mismos, lo que causó la gran diferencia fue en sí la calidad de las antenas del arreglo de recepción.

Para aplicaciones de DF se necesita contar con sistemas que brinden: exactitud, sensibilidad, alta velocidad de escaneo, e inmunidad a señales disruptivas; utilizando el

receptor digital BB60C y las antenas apropiadas en el sistema de recepción, el prototipo de DF cumplió con estos requerimientos.

Recomendaciones

Al realizar proyectos de investigación en el CICTE, el objetivo primordial es alcanzar la soberanía tecnológica para la defensa y seguridad en nuestro país; motivo por el cual es indispensable que las autoridades brinden las facilidades para que el CICTE pueda adquirir los elementos utilizados en el mismo, ya que la mayoría de dispositivos fueron facilitados por mis tutores.

Los proyectos tecnológicos exitosos llevados a cabo en el CICTE conllevan un beneficio a nivel nacional, los mismos se sustentan en el esfuerzo de personal civil y militar, profesores y estudiantes; motivo por el cual es fructífero fomentar: pasantías, prácticas pre-profesionales y proyectos de investigación en la línea de investigación de Soberanía e Integridad Territorial en el CICTE.

Las pruebas realizadas con las dos plataformas se demoraron aproximadamente tres semanas, en vista de que se trataron diferentes metodologías para obtener mejores resultados; especialmente con la primera plataforma; por este motivo se recomienda planificar un período de tiempo suficiente para experimentar con los prototipos de DF.

Al realizar pruebas con los prototipos en el hangar del CICTE no se presentaron inconvenientes con la red, pero al trasladar los prototipos al estadio; fue más funcional utilizar un cable de red en lugar de una red inalámbrica, para realizar el control remoto del sistema de recepción más eficientemente.

Es necesario realizar las pruebas de los sistemas en un espacio amplio y abierto, para así, evitar el efecto de campo cercano y que tampoco se produzcan reflexiones en las ondas radioeléctricas.

Se sugiere revisar los pronósticos del clima antes de empezar las pruebas, para que las condiciones de: temperatura, precipitaciones y viento no vayan a afectar los resultados de las pruebas.

Tomar en consideración el Protocolo para la plataforma de pruebas del Anexo, para realizar la experimentación de manera más productiva.

Trabajos futuros

Al implementar una segunda estación M.A.G.E. con las mismas características, se puede obtener un corte, el mismo que requiere de dos azimuts aproximados, para proporcionar la ubicación general de un transmisor.

Al implementar una tercera estación M.A.G.E. con las mismas características, se puede obtener una posición fija, la misma que se halla al contar con tres o más azimuts aproximados, así se proporciona una ubicación mediante un método de triangulación.

Este proyecto requiere de menor presupuesto que el necesario para adquirir una estación M.A.G.E. en el extranjero, una vez que se ha verificado su funcionamiento y resultados, se recomienda continuar con esta investigación, para mejorar la implementación mecánica del mismo, considerando los requerimientos de estándar militar; para que pueda utilizarse en operaciones militares reales.

Ya que nuestro país tiene una geografía diversa, sería importante realizar futuras investigaciones, utilizando sistemas parecidos en diferentes tipos de terreno: selvático, desértico, costero, montañoso; para así conocer las frecuencias óptimas y el grado de desempeño del sistema propuesto, de acuerdo al lugar donde vayan a emplearse las estaciones.

Utilizando diferentes tipos de antenas, se pueden realizar prototipos de sistemas de DF para captar diferentes tipos de señales, tales como: señales de GPS, o señales de control de drones.

Utilizando este sistema en una futura investigación, e implementando las modificaciones requeridas, se podría obtener un sistema que permita monitorización e interceptación de señales de interés en el campo de la seguridad y defensa.

Desarrollar un sistema de DF utilizando las técnicas de interferometría correlativa, una vez la ESPE haya adquirido los dispositivos BB60C y los accesorios necesarios, cuyo contrato aún se encuentra en ejecución.

Referencias

- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (s.f.). Recuperado el 24 de Mayo de 2021, de <https://www.gob.ec/arcotel>
- Agilent Technologies. (Diciembre de 2014). *User's Guide Agilent Technologies E4428C/38C ESG Signal Generators*. Obtenido de <https://www.keysight.com/zz/en/assets/9018-01484/user-manuals/9018-01484.pdf?success=true>
- Analog Devices, Inc. (s.f.). *DataSheet HMC321ALP4E*. Obtenido de <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc321a.pdf>
- Analog Driver Model TB6600 Data Sheet*. (22 de Enero de 2018). Recuperado el 7 de Julio de 2021, de https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/TB6600_data_sheet.pdf
- Andrade, S., & Machado, P. (2019). DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DF PARA LA BANDA DE 80 MHz – 2 GHz. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Antenna Research. (s.f.). *Spiral Antennas*. Obtenido de <http://pdf.searchdatasheet.com/e6407327/ara-inc.com/CBS-218%2FA.html>
- Autodesk Inc. (2020). *IMPRESIÓN 3D*. Obtenido de <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>
- B&K Precision Corp. (2005). *Instruction Manual BK Precision MODELS: 1760A & 1761*. Obtenido de https://www.cedesa.com.mx/pdf/bkprecision/bk-precision-1760A-1761_user_manual.pdf

BB60C Spectrum Analyzer User Manual. (2020). Battle Ground, WA: Signal Hound.

BlueSky Mast, Inc. (2010). *BlueSky Mast Standard Series Users Manual*. Obtenido de <https://clallamares.org/library/BlueSky-User-Manual.pdf>

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. (25 de Febrero de 2013). *Kulturkampf*. *Encyclopedia Britannica*. Recuperado el 6 de Junio de 2021, de <https://www.britannica.com/event/Kulturkampf>

Calderón Villalva, D. F., & Reinoso Enríquez, M. M. (2019). DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO CON ANCHOS DE BANDA INSTANTÁNEOS DE 44 MHz PARA LA BANDA DE 10 kHz A 6 GHz. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Canto Quintal, C. E. (s.f.). *Motores de paso o Steppers Motors*. Recuperado el 10 de Julio de 2021, de http://galia.fc.uaslp.mx/~cantocar/microcontroladores/SLIDES_8051_PDF/21_MOTOR.PDF

Cho, J.-H., Sharma, D. P., Alavizadeh, H., Yoon, S., Ben-Asher, N., Moore, T. J., . . . Nelson, F. F. (2020). Toward Proactive, Adaptive Defense: A Survey on Moving Target Defense. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS, VOL. X, NO. X*.

DEFENSE ADVANCED RESEARCH PROJECTS AGENCY. (28 de Junio de 2021). *DARPA Electronics Resurgence Initiative*. Obtenido de <https://www.darpa.mil/work-with-us/electronics-resurgence-initiative>

Electronic Team, Inc. (13 de Noviembre de 2019). *PuTTY Alternative. Advanced Serial Port Terminal para Windows OS*. Obtenido de <https://www.virtual-serial-port.org/es/articles/putty-alternative/>

Espectro Radioeléctrico. (24 de Mayo de 2021). Obtenido de <http://www.arcotel.gob.ec/espectro-radioelectrico-3/>

Friedrich, N. (2021). *New Developments in EW and Signals Intelligence*. Santa Rosa, California: Keysight Technologies.

González, A. (28 de Abril de 2009). *Descubrimiento de las ondas de Radio: la confirmación de la Teoría Electromagnética*. Recuperado el 2 de Mayo de 2021, de <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/10/posts/descubrimiento-de-las-ondas-de-radio-la-confirmacin-de-la-teora-electromagntica-10186>

Harris Corporation. (1998). *Comunicaciones de Radio en la Era Digital. Volumen Uno: Tecnología HF*. Estados Unidos de América.

Harris Corporation. (2000). *Comunicaciones de Radio en la Era Digital. Volumen Dos: Tecnología VHF/UHF*. Estados Unidos de América.

Headquarters, D. o. (2019). *ELECTRONIC WARFARE TECHNIQUES*.

Libicki, M. (1995). *What Is Information Warfare?* Washington D.C.

LPDA Outdoor GSM 3G 4G Directional Log Periodic Antenna. (s.f.). Obtenido de <https://onlineshop.im/goods/60766268308>

(s.f.). *Manual de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano*.

Moya, H. (2021). *Sistema (Hardware y Software) para la determinación del lóbulo de irradiación de una antena utilizando el BB60C*. Quito.

Nobel Lectures, Physics 1942-1962. (1964). Recuperado el 6 de Mayo de 2021, de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1947/appleton/biographical/>

Numato Lab. (31 de Enero de 2016). *8 Channel USB GPIO Module With Analog Inputs*. Obtenido de <https://numato.com/docs/8-channel-usb-gpio-module-with-analog-inputs/>

Numato Lab. (s.f.). *8 Channel USB GPIO Module With Analog Inputs*. Obtenido de <https://numato.com/product/8-channel-usb-gpio-module-with-analog-inputs/>

Onion, A., Sullivan, M., & Mullen, M. (9 de Febrero de 2010). *First radio transmission sent across the Atlantic Ocean*. Recuperado el 4 de Mayo de 2021, de <https://www.history.com/this-day-in-history/marconi-sends-first-atlantic-wireless-transmission>

Ortiz, J. (1988). *Mathematical Study for Predicting the POI for Airborne Radar*. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

Park, S. C. (1989). *Computer-Aided Mathematical Analysis of POI for Ground-Based Communication Intercept System*. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

Pasternack Enterprises. (s.f.). *PE51058 Dome style Antenna*. Obtenido de <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE51058.pdf>

RealVNC Limited. (2021). *All you need to know about VNC remote access technology*. Obtenido de <https://discover.realvnc.com/what-is-vnc-remote-access-technology>

Schwoerer, B. F. (1975). *POI in Electronic Countermeasures Receivers*. Monterey, California: Naval Postgraduate School.

Self, A. (1 de Julio de 2007). Probability of Intercept. *Journal of Electronic Defense*.

- Sempere, C. M. (2006). *Tecnología de la defensa. Análisis de la situación española*. Madrid: Instituto Universitario "General Gutiérrez Mellado" de Investigación sobre la Paz, la Seguridad y la Defensa.
- Sinclair, B., & Walker, K. (2021). Manufacturing Miniature PCBs for Mixed-Signal. *Benchmark Lark Technology*.
- Stobing, C. (21 de Septiembre de 2016). *What is a NUC PC, and Should You Get One?* Obtenido de <https://www.howtogeek.com/231978/htg-explains-what-is-a-nuc-pc-and-should-you-get-one/>
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. México: Prentice Hall.
- TP-Link Corporation. (2021). *WiFi Routers Archer C20*. Obtenido de <https://www.tp-link.com/us/home-networking/wifi-router/archer-c20/#specifications>
- U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. (21 de Septiembre de 2017). *What is Radio Spectrum?* Obtenido de <https://www.transportation.gov/pnt/what-radio-spectrum>
- UIT. (s.f.). *Misión del Sector de Radiocomunicaciones de la UIT*. Recuperado el 05 de Mayo de 2021, de <https://www.itu.int/es/ITU-R/information/Pages/mission-statement.aspx>
- USB-TG124A Tracking Generator User Manual*. (2019). Battle Ground, WA: Signal Hound.
- USB-TG44A Tracking Generator User Manual*. (2019). Battle Ground, WA: Signal Hound.
- Villegas, E. E. (30 de Octubre de 2017). *www.electropro.pe*. Recuperado el 07 de Julio de 2021
- Wiley, R. (1982). *Electronic Intelligence - The Analysis of Radar Signals*. Artech House.

Yazicigil, R. T., Haque, T., Whalen, M. R., Yuan, J., Wright, J., & Kinget, P. (2015). Wideband rapid interferer detector exploiting compressed sampling with a quadrature analog-to-information converter. *IEEE*, 3047-3064.

Yazicigil, R. T., Haque, T., Wright, J., & Kinget, P. R. (2016). Band-Pass Compressive Sampling As an Enabling Technology for Rapid Wideband RF Spectrum Sensing. *IEEE*.

Zabala Ignacio, I. (9 de Marzo de 2019). *Introducción a las radiocomunicaciones. Antena espiral*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=0RKdhljbIY4>

Anexos