



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIEROS EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DEL  
ESPECTRO RADIOELÉCTRICO CON ANCHOS DE BANDA  
INSTANTÁNEOS DE 44MHz PARA LA BANDA DE 10kHz A 6GHz”**

**AUTORES: CALDERÓN VILLALVA, DIEGO FABIÁN;  
REINOSO ENRIQUEZ, MARGARITA MONSERRATE**

**DIRECTOR: ING. LEÓN VÁSQUEZ, RUBÉN DARÍO**

**SANGOLQUÍ  
2019**

**CERTIFICADO DEL DIRECTOR**

**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 MONITOREO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO CON ANCHOS DE BANDA INSTANTÁNEOS DE 44MH<sub>z</sub> PARA LA BANDA DE 10KH<sub>z</sub> A 6GH<sub>z</sub>"*, fue realizado por el señor Calderón Villalva, Diego Fabián y la señorita Reinoso Enriquez, Margarita Monserate; el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 16 de Julio de 2019.

Firma:



Ing. León Vásquez Rubén Darío

CC: 1801654284

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, *Calderón Villalva, Diego Fabián y Reinoso Enriquez, Margarita Monserrate*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO CON ANCHOS DE BANDA INSTANTÁNEOS DE 44MHz PARA LA BANDA DE 10KHz A 6GHz"**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 10 de Julio de 2019.

Firma:

Calderón Villalva Diego Fabián

CC: 1715359640

Reinoso Enriquez Margarita Monserrate

CC: 1723094718

## AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

### AUTORIZACIÓN

*Nosotros, Calderón Villalva, Diego Fabián y Reinoso Enriquez, Margarita Monserrate, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO CON ANCHOS DE BANDA INSTANTÁNEOS DE 44MHz PARA LA BANDA DE 10KHz A 6GHz", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Sangolquí, 10 de Julio de 2019.

Firma:



Calderón Villalva Diego Fabián

CC: 1715359640



Reinoso Enriquez Margarita Monserrate

CC: 1723094718

## **DEDICATORIA**

Dedico de manera especial este trabajo a mi querida familia y a mi amada esposa, ya que son los responsables de la construcción de mis valores y de mi vida profesional, su apoyo incondicional durante este tiempo hizo que el esfuerzo y la dedicación estén presentes día a día.

**Diego Fabían Calderón Villalva**

Este trabajo está dedicado a mis padres, gracias por el apoyo incondicional, por el gran soporte que han sido a lo largo de mi vida y mi carrera universitaria. Sobre todo, por enseñarme a ser perseverante y ayudarme a cumplir todos mis sueños.

**Margarita Monserrate Reinoso Enriquez**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero dar un agradecimiento a Dios por darme la oportunidad de especializarme en el área de las Telecomunicaciones, la cual permite fortalecer los conocimientos necesarios para aportar a la Institución a la cual me siento orgulloso de pertenecer, que es el Ejército Ecuatoriano.

A mi amada esposa un eterno agradecimiento por ser mi ayuda idónea en todo momento y circunstancia, con sus palabras de aliento y motivación que día a día supo dedicarme para salir adelante y no desmayar durante el camino.

Además, un agradecimiento muy sentido a todo el personal de docentes del Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE que fueron parte de mi formación como profesional, con sus sabios conocimientos hicieron posible este sueño que al principio parecía un futuro muy lejano, pero con paciencia y dedicación se llegó hasta el final de esta etapa. Adicional un agradecimiento especial al Ing. Rubén León, Ing. Alexis Tinoco y al Ing. Hector Moya, que con sus conocimientos y experiencias supieron guiarnos durante la ejecución de éste trabajo.

Por el momento finaliza una etapa, pero se abren nuevos caminos y nuevos objetivos por cumplir, para seguir aportando al bienestar del país con la misma dedicación y entrega que caracteriza al soldado ecuatoriano.

**Diego Fabían Calderón Villalva**

Tengo tanto que agradecer que estas líneas no me serán suficientes. En primer lugar, quiero agradecer a mi madre; Lily, gracias por ser más que mi mamá, mi amiga, por los momentos de risas, de enojos y sobre todo por aguantarme cuando ni yo me tolero. A mi padre, Vicente, gracias por siempre inculcarme el amor por el deporte, por siempre ponerme al límite cuando de aprender se trata, incluso ahora que no estás presente me sigues enseñando mucho de la vida. Gracias a los dos por siempre permitirme ser real, por aconsejarme, por permitirme tomar mis propias decisiones y ayudarme siempre a volar. Gracias por recordarme que, aunque pase el tiempo, aún soy bailarina, no hay palabras para expresar mi gratitud por siempre incentivarme a continuar en ese mundo que tanto amo.

A toda mi familia: mis tías, tíos, primas, primos y abuelitos, gracias por sus palabras de aliento. De manera especial, gracias Mamita Maggi por siempre estar pendiente de nosotras (mi mami y yo), por toda la dedicación que nos ha puesto, por los desayunos y almuerzos que con tanto cariño nos prepara siempre.

Gracias a mis amigos del colegio, del ballet, de la vida; gracias a todos por el ánimo, por recordarme que jamás estamos solos en este mundo. Unas gracias de forma muy especial a mis amigos de la universidad con quienes compartimos amanecidas, risas, enojos, preocupación, paseos y miles de aventuras. Nada de este proceso habría sido igual sin ustedes.

Gracias Diego, compañero no solo de este trabajo investigación, sino de muchos trabajos realizados a lo largo de la universidad. Muchas gracias por todo el apoyo, por ser un gran amigo. Gracias por los consejos, la risa y por todo lo que hemos compartido.

Finalmente, pero no menos importante, quiero agradecer a todos mis ingenieros quienes me brindaron sus enseñanzas, no solo sobre la carrera, sino de vida, por motivarme a ser mejor

persona, por mostrarme que con esfuerzo se pueden conseguir grandes cosas. Gracias a mi director de trabajo de titulación, Ing. Rubén León, por todo lo aprendido en este proceso. Gracias al Ing. Alexis Tinoco por ayudarnos en varios temas de este trabajo. Ing. Héctor Moya, muchas gracias por su importante soporte en la realización de este trabajo, su apoyo y ayuda fue fundamental.

Gracias a todas y todos quienes han formado parte de esta travesía, he aprendido mucho de ustedes y espero continuar teniéndolos en mi vida.

**Margarita Monserrate Reinoso Enriquez**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....</b>	<b><i>i</i></b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b><i>ii</i></b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b><i>iii</i></b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b><i>iv</i></b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b><i>v</i></b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b><i>viii</i></b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b><i>xii</i></b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b><i>xiv</i></b>
<b>LISTADO DE ABREVIATURAS .....</b>	<b><i>xv</i></b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b><i>xvi</i></b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b><i>xvii</i></b>
 <b>CAPÍTULO I</b>	
<b>GENERALIDADES</b>	
1.1. Antecedentes.....	<b>1</b>
1.2. Justificación e Importancia.....	<b>2</b>
1.3. Alcance .....	<b>2</b>
1.4. Objetivos.....	<b>3</b>
1.4.1. Objetivo General .....	<b>3</b>
1.4.2. Objetivos Específicos .....	<b>3</b>
 <b>CAPÍTULO II</b>	
<b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	
2.1. Espectro radioeléctrico.....	<b>5</b>

2.2. Guerra Electrónica .....	<b>6</b>
2.2.1. Antecedentes .....	6
2.2.2. Concepto y clasificación .....	8
2.2.3. Inteligencia de señales (SIGINT).....	10
2.3. Receptores .....	<b>11</b>
2.3.1. Receptor de cristal.....	12
2.3.2. Receptor superheterodino.....	13
2.3.3. Receptores digitales.....	14
2.4. Probabilidad de Interceptación .....	<b>15</b>
2.5. Señales pasabanda.....	<b>17</b>
2.5.1. Representación de las señales pasabanda.....	20

### **CAPÍTULO III**

#### **ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS**

3.1. Antenas .....	<b>24</b>
3.1.1. Antena OmniLOG 70600 .....	24
3.1.2. Antena Discone omnidireccional del sistema TCI.....	25
3.1.3. Parámetros S de la Antena Discone .....	26
3.2. Receptor Digital SiganHound BB60C .....	<b>30</b>

### **CAPÍTULO IV**

#### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO**

4.1. Entorno de aplicación.....	<b>34</b>
4.2. Requisitos de desarrollo de Windows para desarrollar la API .....	<b>35</b>
4.3. Funcionamiento .....	<b>35</b>
4.3.1. Abrir el dispositivo.....	36
4.3.2. Configurar el dispositivo.....	36
4.3.3. Iniciar el dispositivo .....	38
4.3.4. Tomar datos del dispositivo .....	39

4.3.5. Abortar el modo actual .....	x
4.3.5. Abortar el modo actual .....	39
4.3.6. Cerrar el dispositivo .....	39
4.4. Diagrama de Clases.....	40
4.5 Interfaz de la Aplicación.....	41

**CAPÍTULO V**

**PRUEBAS Y RESULTADOS**

5.1. Pruebas y resultados preeliminares .....	45
5.2. Pruebas finales con antena Discone .....	47
5.3. Análisis comparativo con el Sistema Arturo .....	50

**CAPÍTULO VI**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1. Conclusiones.....	52
6.2. Recomendaciones.....	53
6.3. Trabajos futuros.....	54

<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>55</b>
---------------------------	-----------

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Clasificación de la Guerra Electrónica. ....	9
<b>Figura 2</b> Clasificación de la inteligencia de señales.....	11
<b>Figura 3</b> Elementos de un receptor de cristal .....	12
<b>Figura 4</b> Diagrama de bloques del receptor superheterodino.....	14
<b>Figura 5</b> Diagrama de bloques del receptor digital .....	15
<b>Figura 6</b> Representación de Fourier de una señal pasabanda. ....	19
<b>Figura 7</b> Tasa de muestreo mínima para una señal pasabanda.....	19
<b>Figura 8</b> Proceso para obtener la envolvente compleja.....	21
<b>Figura 9</b> Esquema para derivar los componentes de fase y cuadratura de una señal pasabanda ..	23
<b>Figura 10</b> Antena OmniLOG 70600 .....	25
<b>Figura 11</b> Antena COMPACT V/UHF 9-ELM DFMON del sistema TCI .....	26
<b>Figura 12</b> Antena Discone.....	27
<b>Figura 13</b> Extracción del cable de la antena Discone .....	27
<b>Figura 14</b> Analizador vectorial Anritsu MS2036A.....	28
<b>Figura 15</b> Medición de parámetros S de la antena Discone.....	28
<b>Figura 16</b> Resultados de la medición de parámetros S. ....	29
<b>Figura 17</b> Antena dipolo de hilo largo .....	30
<b>Figura 18</b> Receptor digital BB60C.....	30
<b>Figura 19</b> Vista frontal del BB60C. ....	31
<b>Figura 20</b> Parte posterior del BB60C.....	31
<b>Figura 21</b> Cable Y para conexión.....	32
<b>Figura 22</b> Diagrama de bloques del sistema de monitoreo. ....	34
<b>Figura 23</b> Diagrama de clases .....	40
<b>Figura 24</b> Interfaz de la aplicación.....	41
<b>Figura 25</b> Pruebas de Campo con la antena OmniLOG 70600.....	45
<b>Figura 26</b> Frecuencia central 100 MHz con Span de 27 MHz.....	46
<b>Figura 27</b> Realización de pruebas con la Antena Discone del Sistema TCI.....	47

	xiii
<b>Figura 28</b> Frecuencia central 560 MHz con Span de 44 MHz.....	48
<b>Figura 29</b> Frecuencia central 662 MHz con Span de 20 MHz.....	49
<b>Figura 30</b> Frecuencia central 795 MHz con Span de 27 MHz.....	50

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b> <i>Bandas de frecuencia</i> .....	5
<b>Tabla 2</b> <i>Tipos de interceptación</i> .....	16
<b>Tabla 3</b> <i>Características de la antena OmniLOG 70600</i> .....	24
<b>Tabla 4</b> <i>Características del receptor digital BB60C</i> .....	32
<b>Tabla 5</b> <i>Unidades que se utilizan en cada función</i> .....	38
<b>Tabla 6</b> <i>Descripción de las clases del programa.</i> .....	40
<b>Tabla 7</b> <i>Descripción de los bloques de la Interfaz Gráfica</i> .....	42
<b>Tabla 8</b> <i>Descripción del Panel de Configuración</i> .....	42
<b>Tabla 9</b> <i>Diferencias entre el Sistema Arturo y el sistema implementado</i> .....	51

**LISTADO DE ABREVIATURAS**

<b>UIT</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
<b>ARCOTEL</b>	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
<b>VLF</b>	Very Low Frequency
<b>LF</b>	Low Frequency
<b>MF</b>	Medium Frequency
<b>HF</b>	High Frequency
<b>VHF</b>	Very High Frequency
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>SHF</b>	Super High Frequency
<b>EHF</b>	Extremely High Frequency
<b>EW</b>	Electronic Warfare
<b>ESM</b>	Electronic Support Measures
<b>ECM</b>	Electronic Counter Measures
<b>ECCM</b>	Electronic Counter-Counter Measures
<b>ES</b>	Electronic Support
<b>EA</b>	Electronic Attack
<b>EP</b>	Electronic Protection
<b>SIGINT</b>	Signal Intelligence
<b>COMINT</b>	Communications Intelligence
<b>ELINT</b>	Electronic Intelligence
<b>CYBINT</b>	Cyber Intelligence
<b>RADINT</b>	Radar Intelligence
<b>TELINT</b>	Telemetry Intelligence
<b>MASINT</b>	Measurement and Signature Intelligence
<b>ACINT</b>	Acoustic Intelligence
<b>NUCINT</b>	Nuclear Intelligence
<b>ADC</b>	Analog/Digital Converter
<b>POI</b>	Probability of Intercept
<b>RBW</b>	Resolution Bandwidth
<b>VBW</b>	Video Bandwidth
<b>GMREC</b>	Grupo de Monitoreo y Reconocimiento Electrónico Conjunto
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>IF</b>	Intermediate Frequency
<b>RF</b>	Radio Frequency

## RESUMEN

La defensa nacional, en su afán de preservar la soberanía de la Patria, desarrolla una serie de tácticas y técnicas que permiten controlar la estabilidad de la nación y tenerla preparada para cualquier tipo de amenaza que se presente. La evolución de la defensa nacional a lo largo de la historia ha permitido que se desarrollen varias ramas para mantener el orden y sobre todo cuidar de la soberanía nacional, entre ellas se encuentra la Guerra Electrónica, que se encarga de degradar o neutralizar las emisiones por parte del enemigo, así como también el control de emisiones propias. El presente trabajo de titulación muestra el desarrollo de un sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico para la banda de 10kHz A 6GHz. Para la implementación de este sistema de monitoreo se utilizó un receptor digital BB60C el cual cuenta con nuevas y mejores prestaciones ya que no solo funciona como un receptor canalizado, sino que también digitaliza las componentes I y Q, de una parte del espectro radioeléctrico canalizado en anchos de banda de 27 MHz, a una alta tasa de muestreo, superando conceptualmente al actual sistema denominado Arturo que posee el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica (AGRUCOMGE). El presente desarrollo se realizó con dos tipos de antenas, la OmniLog 70600 y la antena Discone perteneciente al GMREC, obteniendo resultados satisfactorios en ambos casos.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ESPECTRO RADIOELÉCTRICO**
- **RECEPTOR DIGITAL**
- **SEÑALES PASABANDA**
- **GUERRA ELECTRÓNICA**

## **ABSTRACT**

National defense, in its eagerness to preserve the sovereignty of the country, develops a series of tactics and techniques that allow to control the stability of the nation and have it ready for any type of threat that may arise. The evolution of national defense along the history has allowed the development of several branches to keep order and take care of national sovereignty, among which is the Electronic War, which is responsible for degrading or neutralizing emissions by part of the enemy, as well as the control of own emissions. The present work shows the development of a radio spectrum monitoring system for the 10kHz to 6GHz band. For the implementation of this monitoring system we used a digital receiver BB60C which has new and better features since it not only works as a channeled receiver, it also allows the digitization of the I and Q components at a high sampling rate, surpassing to the current system called Arturo that has the AGRUCOMGE. The tests were performed with two types of antennas, the OmniLog 70600 and the Discone antenna belonging to the GMREC, obtaining satisfactory results in both cases.

### **KEYWORDS:**

- **RADIOELECTRIC SPECTRUM**
- **DIGITAL RECEIVER**
- **BANDPASS SIGNALS**
- **ELECTRONIC WARFARE**

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1. Antecedentes**

La guerra electrónica es un pilar fundamental en la preservación y control de la soberanía de las naciones, al vigilar el espectro electromagnético en apoyo a las operaciones militares. A lo largo de los años la guerra electrónica ha evolucionado a pasos agigantados, integrando varias alternativas para mejorar su calidad y capacidad de interceptación de señales y ataque hacia las mismas; esta evolución ha promovido que cada país se interese por buscar nuevas maneras de mejorar la operabilidad de sus recursos, logrando mayor rentabilidad y utilidad de los mismos.

El Centro de Investigación y Aplicaciones Militares (CICTE) de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, de la mano con otros organismos pertenecientes al Ejército Ecuatoriano como el AGRUCOMGE (Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica) se han preocupado por promover la recuperación y operatividad de varios sistemas de guerra electrónica existentes, permitiendo que estos proyectos cuenten con mejores funcionalidades que permitan al Ejército realizar su trabajo a cabalidad y consecuentemente brindan al Estado Ecuatoriano mejores capacidades de respuesta ante la presencia de ciertos riesgos y amenazas.

Entre otros proyectos que realiza el CICTE, este es uno de los proyectos que le permite a las Fuerzas Armadas, contar con un software y hardware propio encaminado al campo de la Guerra Electrónica, de esta forma se puede brindar información clara y precisa de lo

realizado, para que el personal se encuentre familiarizado con lo que utiliza en sus entrenamientos y posibles enfrentamientos.

## **1.2. Justificación e Importancia**

El presente proyecto es parte del programa desarrollado para la recuperación y operatividad de los sistemas de guerra electrónica existentes en el AGRUCOMGE, el cual va a contribuir con el desarrollo del prototipo industrial de un nuevo sistema de monitoreo de señales radioeléctricas con alta Probabilidad de Interceptación (POI). Este sistema está basado en el Sistema Arturo desarrollado años atrás para el monitoreo del espectro.

Los principales problemas encontrados a la hora de utilizar sistemas que ya existen en el mercado de la Guerra Electrónica son principalmente los altos costos, la falta de soporte, la deficiencia en la transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción. Además, existen varios sistemas que son de tipo propietario, motivo por el cual no se puede obtener mayor información; al contrario de estos sistemas, al desarrollar uno propio, basado en la investigación aplicada e ingeniería inversa se pueden subsanar estos inconvenientes, logrando costos reducidos y garantizando la transferencia de tecnología dentro de todos los procesos de implementación, , fomentando así el incremento de los índices de soberanía tecnología y disminución de la dependencia de empresas extranjeras.

## **1.3. Alcance**

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un prototipo de un sistema de monitoreo de señales radioeléctricas con alta POI para la banda de 10 kHz a 6 GHz, utilizando como base el sistema Arturo, a través de metodologías *Original Equipment*

*Manufacturer* (OEM), de esta forma se tiene como base la API original del receptor digital BB60C para encaminarlo a las características solicitadas para este nuevo sistema.

Todos estos desarrollos están enfocados a fortalecer las capacidades operativas de las Fuerzas Armadas, pues una de sus bondades es incrementar la capacidad de monitoreo y control del espectro radioeléctrico, aspecto que facilita la identificación de posibles amenazas que pongan en riesgo la seguridad de la ciudadanía y soberanía territorial. Para esto se realizará un estudio y análisis de los métodos de detección de señales de RF haciendo efectiva la aplicación de políticas y planes para el desarrollo tecnológico de las tecnologías de información y comunicación en el ámbito de la seguridad nacional, aumentando la eficiencia y la efectividad de respuesta del Ejército Ecuatoriano en situaciones de riesgo que requieran atención inmediata.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Desarrollar el prototipo de un sistema de monitoreo de señales radioeléctricas con anchos de banda instantáneos de 44 MHz para la banda de 10 kHz a 6 GHz con alta POI.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un estudio exhaustivo y analítico del estado del arte en relación al monitoreo de señales radioeléctricas.
- Implementar el sistema de monitoreo en base a la filosofía de empleo del sistema Arturo que dispone el AGRUCOMGE y ponerlo operativo.
- Reducir peso, volumen, costo computacional y precio del sistema.

- Disponer de tecnología basada en la investigación orientada a aplicaciones reales en el ejercicio de la soberanía tecnológica.
- Evaluar los algoritmos y procesos desarrollados en el sistema de monitoreo de señales radioeléctricas, que el CICTE dispone para el efecto.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1. Espectro radioeléctrico

Se denominan ondas radioeléctricas u ondas *hertzianas* al conjunto de ondas electromagnéticas cuya frecuencia se fija generalmente por debajo de 3000 GHz y que se propagan por el espacio sin guía artificial. (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2016)

De acuerdo al Plan Nacional de Frecuencias 2017 otorgado por la ARCOTEL, el espectro radioeléctrico puede dividirse como se muestra en la Tabla 1:

**Tabla 1**  
*Bandas de frecuencia*

<b>Símbolos</b>	<b>Definición</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Uso</b>
(en inglés)			
<b>VLF</b>	Very Low Frequency	3 a 30 kHz	Ayudas a la meteorología, radionavegación
<b>LF</b>	Low Frequency	30 a 300 kHz	Fijo, radionavegación aérea y marítima
<b>MF</b>	Medium Frequency	300 a 3000 kHz	Radiodifusión en AM, radiolocalización.
<b>HF</b>	High Frequency	3 a 30 MHz	Telefonía fija y móvil, comunicación a media y larga distancia
<b>VHF</b>	Very High Frequency	30 a 300 MHz	Enlaces de radio a corta distancia: TV, FM, radioaficionados

<b>UHF</b>	Ultra High Frequency	300 a 3000 MHz	TV abierta, radiolocalización
<b>SHF</b>	Super High Frequency	3 a 30 GHz	Radiodifusión por satélite, radionavegación.
<b>EHF</b>	Extremely High Frequency	30 a 300 GHz	Telefonía fija, radiolocalización, radionavegación.
		300 a 3000 GHz	No atribuida

Fuente: (ARCOTEL, 2017)

## 2.2. Guerra Electrónica

### 2.2.1. Antecedentes

Hoy en día, la guerra electrónica sigue siendo un tema de gran interés para la defensa de la soberanía de las naciones, lo que constituye un factor decisivo para mantener el dominio y control del espectro electromagnético, el cual dentro de la Constitución de la República del Ecuador es considerado como un sector estratégico; de forma que, es el Estado quien se reserva el derecho de su administración, regulación, control y gestión. (ARCOTEL, 2017)

La guerra electrónica se refiere al control del espectro electromagnético en apoyo a las operaciones militares, con capacidad de degradar las comunicaciones y sistemas de armas del adversario, reduciendo su ritmo de combate e incrementando el propio. (Jarpa Martínez, 2013)

Para la defensa del país, es necesario y prioritario que las Fuerzas Armadas orienten gran parte de su esfuerzo a conocer y dominar el ámbito de la guerra electrónica, en sus diversas áreas, de acuerdo al rol de cada una de las Fuerzas, en un trabajo coordinado y conjunto.

Dentro de la ejecución de las operaciones militares se debe establecer un orden de intervención para que las unidades terrestres tomen el control del territorio. En primer lugar, se debe alcanzar el dominio del espacio aéreo, con el fin de eliminar cualquier tipo de amenaza que pueda poner en riesgo a las tropas que se encuentran en tierra. Posteriormente, se debe alcanzar el dominio del espectro electromagnético con el objetivo de asegurar su empleo en beneficio de fuerzas propias. Estas intervenciones tienen el propósito de proteger y asegurar los sistemas de comunicaciones que respaldan los sistemas de mando y control, asegurando que los sistemas de armas cumplan su objetivo sin interferencia por parte de fuerzas opuestas.

La guerra ha evolucionado con el tiempo, en donde se distinguen cinco generaciones, dentro de las cuales se observa el apareamiento de la guerra electrónica:

- Primera Generación: Un campo de batalla formal y ordenado con el uso de las armas de fuego donde se originó una cultura de orden.
- Segunda Generación: Lo primordial de esta generación fue la mecanización de las fuerzas y la gran capacidad de transportar tropas.
- Tercera Generación: Se caracteriza por la sorpresa y la velocidad de los ataques, también es conocida como Guerra relámpago o guerra de maniobra.
- Cuarta Generación: Da inicio a las tácticas militares asimétricas en conjunto con las estrategias no convencionales de combate, que incluyen a la población civil, la política y a la guerra electrónica como un factor muy importante para el empleo de las fuerzas armadas. (Jarpa Martínez, 2013)
- Quinta Generación: También es conocida como “Guerra sin límites” en donde se aprovecha al máximo los medios electrónicos, cibernéticos y de comunicación de

masas para generar pánico en la población con operaciones de carácter psicológico con el objetivo de obtener el dominio de la mente. (Trujillo, 2013)

De igual manera, es trascendental destacar la eficiencia de las actividades de guerra electrónica realizada por las Fuerzas Armadas Ecuatorianas en el Conflicto del Alto Cenepa, sobre todo en el campo del apoyo electrónico, donde se realizaron misiones de interceptación y un análisis minucioso del flujo de comunicaciones por parte del enemigo, proporcionando herramientas de alerta temprana para una exitosa conducción militar en el teatro de operaciones.

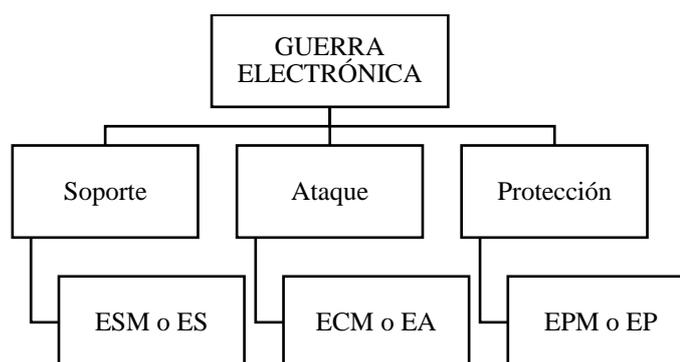
### **2.2.2. Concepto y clasificación**

La guerra electrónica se define como el arte y la ciencia de preservar el uso del espectro electromagnético para uso de fuerzas propias y degradar o neutralizar su explotación por parte del enemigo. Es decir, la guerra electrónica cubre el espectro de radiofrecuencia, el espectro infrarrojo, el espectro óptico y el espectro ultravioleta. (Adamy, 2000).

Dentro de la guerra electrónica, existen tres formas en las que se controla y preserva el espectro electromagnético:

- Análisis del espectro electromagnético para determinar las fuentes que emiten las mismas, realizado con las medidas de apoyo electrónico (conocidas como ESM o ES).
- Acciones para evitar el uso del espectro con las contramedidas electrónicas (ECM o EA).
- Acciones para eludir las contramedidas electrónicas (EPM o EP). (Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica de España, 2009).

Existen dos formas de nombrar los términos pertenecientes a la clasificación de la guerra electrónica: la tradicional, en donde se emplea la nomenclatura: medidas de apoyo electrónico (ESM), contramedidas electrónicas (ECM), contra-contra medidas electrónicas (ECCM); y la moderna, con la nomenclatura: medidas de apoyo (ES), ataque electrónico (EA), medidas de protección (EP), como se ilustra en la Figura 1.



**Figura 1** Clasificación de la Guerra Electrónica.

### **Medidas de Apoyo Electrónico**

Son acciones de guerra electrónica ejecutadas para analizar, monitorear, buscar, localizar, interceptar, analizar, registrar y evaluar la energía electromagnética radiada, con la finalidad de explotar dichas radiaciones en apoyo de las operaciones militares. (Michavila, 1984) Son de naturaleza pasiva.

Las señales recibidas son utilizadas para el conocimiento de la situación del campo de batalla, es decir, la identificación y ubicación de las fuerzas, armas o capacidad electrónica del enemigo.

Las acciones de soporte electrónico son:

- Búsqueda
- Interceptación
- Identificación
- Localización

## **Ataque Electrónico**

Son acciones de guerra electrónica efectuadas para impedir, reducir o perturbar la utilización eficaz del espectro electromagnético por parte del enemigo, negándole el uso de medios electrónicos de comunicaciones y de no comunicaciones. Pueden ser de naturaleza activa o pasiva.

Las acciones de Ataque Electrónico son:

- Perturbación.
- Decepción (engaño)
- Neutralización

## **Protección Electrónica**

Son medidas adoptadas para conseguir el empleo eficaz del espectro electromagnético por parte de las fuerzas propias a pesar de las acciones de guerra electrónica del enemigo.

La Protección Electrónica tiene como objetivo impedir al enemigo:

- Interceptar las emisiones electromagnéticas.
- Localizar los emisores de energía electromagnética.
- Obtener información a través del análisis de guerra electrónica.
- Interferir los sistemas de guerra electrónica.
- Obtener éxito en sus acciones de engaño.

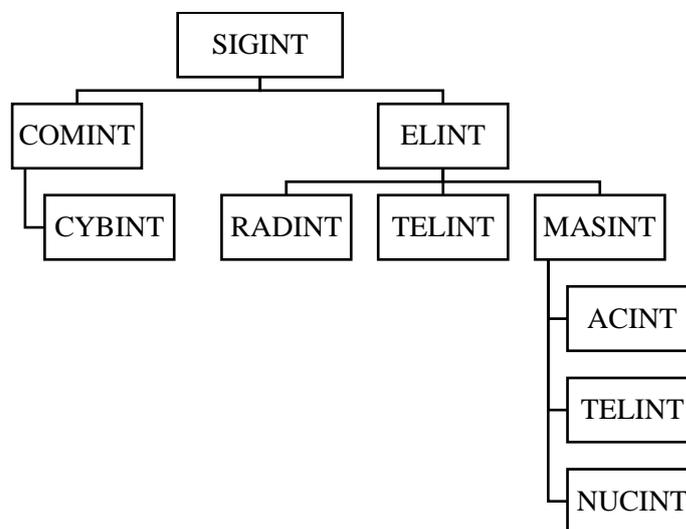
### **2.2.3. Inteligencia de señales (SIGINT)**

La inteligencia de señales corresponde a la obtención de información como resultado de la interceptación de señales. (Prieto del Val, 2014)

De acuerdo al origen de las señales, la SIGINT puede clasificarse en: (Jiménez, 2018).

- Inteligencia de comunicaciones (COMINT): Se trata de la inteligencia obtenida a partir de emisiones electromagnéticas provenientes de equipos y sistemas de tecnologías de la información y comunicaciones hasta 3 GHz.
- Inteligencia electrónica (ELINT): Se trata de la inteligencia obtenida a partir de señales de radar (2 – 18 GHz).

Un resumen más completo se detalla en la Figura 2:



**Figura 2** Clasificación de la inteligencia de señales

### 2.3. Receptores

Un receptor puede definirse como un dispositivo que tiene la capacidad de aceptar y procesar señales captadas por una antena. Existen varios parámetros que permiten evaluar a un receptor, entre los más importantes se encuentran la selectividad y la sensibilidad, mismas que se utilizan para comparar la calidad de radioreceptores. (Tomasi, 2003)

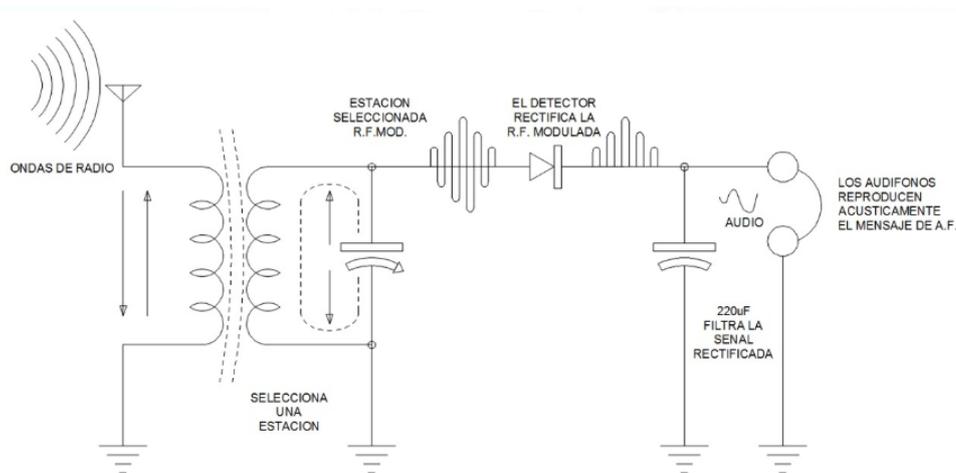
La selectividad se define como la capacidad que tiene el receptor para aceptar una banda de frecuencia y rechazar las demás, esto se logra utilizando circuitos tanque LC y filtros de

crystal de cuarzo para dar paso exclusivo a una banda estrecha de frecuencias, logrando de esta forma discriminar las señales interferentes. (Laster, 1985)

La sensibilidad por su parte, define el nivel mínimo de la señal de RF que puede ser detectada por el receptor. Existen varios elementos que influyen la sensibilidad como el ruido eléctrico generado por los circuitos de la antena, y el ruido propio del receptor que se encuentra en las primeras etapas de RF. (Laster, 1985)

### 2.3.1. Receptor de cristal

A finales del siglo XIX aparece el receptor de cristal, el cual es uno de los receptores más antiguos, simples y de bajo costo; su nombre procede del cristal detector que permite localizar la señal. Entre sus componentes destacan una toma a tierra, antena, selector de estaciones, detector y audífonos de alta impedancia como se observa en la Figura 3.



**Figura 3** Elementos de un receptor de cristal  
Fuente: (Schleher, 1986)

Al ser uno de los receptores más antiguos tiene funciones limitadas, la principal es la detección de pulsos de señales que tienen un bajo ciclo de trabajo; sin embargo, las amenazas clave pueden enmascarse en otras señales. Los mejores detectores tenían una

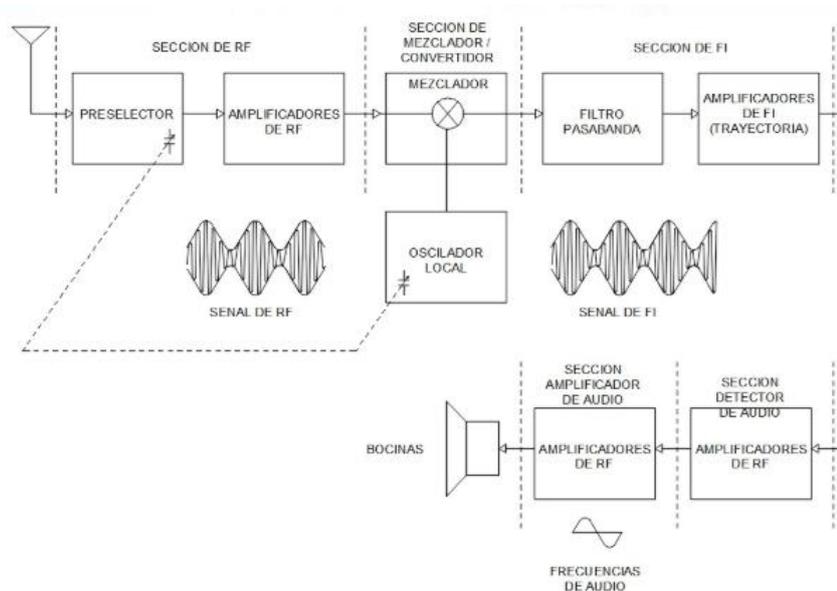
sensibilidad tangencial (SNR igual a 8 dB en video o 4 dB en RF) entre - 50 dBm y -60 dBm, a un ancho de banda de video de 10 MHz (Schleher, 1986).

### **2.3.2. Receptor superheterodino**

El receptor superheterodino fue ideado en el siglo XX, específicamente a principios de los años treinta; este receptor combina la señal de RF de entrada con la señal de un oscilador local para obtener una señal de frecuencia fija e invariable llamada intermedia (IF).

Un receptor superheterodino consta de una etapa de filtrado, un mezclador y un oscilador local para transformar la señal recibida en una frecuencia intermedia baja como se observa en la Figura 4.

El escaneo de receptores superheterodinicos (variando la frecuencia del Oscilador Local) se caracteriza por una alta sensibilidad, una buena resolución de frecuencia, y una excelente selectividad con el uso de preselectores, gracias a esto se obtiene una baja tasa de falsas alarmas, pero la probabilidad para interceptar un pulso simple va a disminuir a menos que se utilicen técnicas especiales de escaneo. (Schleher, 1986)



**Figura 4** Diagrama de bloques del receptor superheterodino.  
Fuente: (Tomasi, 2003)

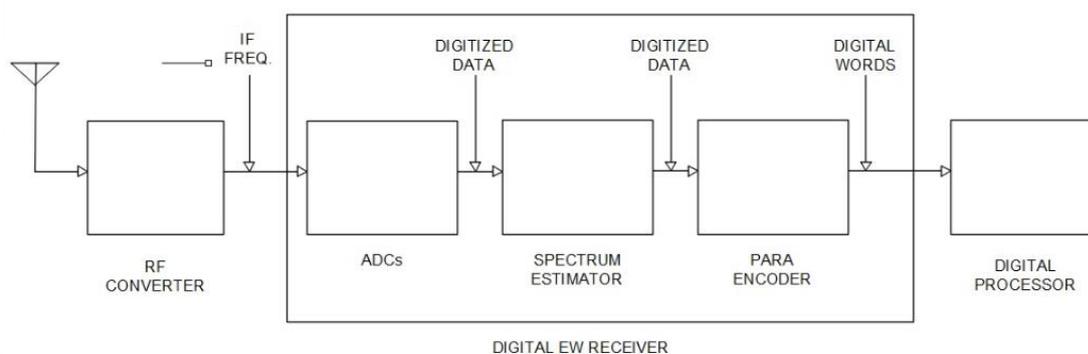
### 2.3.3. Receptores digitales

Con los avances en los convertidores análogo-digital (ADC) y el incremento en la velocidad de procesamiento digital de la señal, las investigaciones y desarrollos tecnológicos se han concentrado en los receptores digitales de EW. En este tipo de receptor, la entrada se convierte a una IF, que luego digitaliza sus componentes en fase I y cuadratura Q. El procesamiento digital de la señal es más robusto porque no hay cambios a la variación de temperatura, variación del nivel de ganancia como en los circuitos analógicos; por lo tanto, se requiere menos calibración. La resolución de frecuencia puede ser muy fina si se pueden aplicar técnicas de estimación de espectro de alta resolución. En muchos esquemas de estimación de espectro, los resultados son comparables con el límite de *Cramer-Rao* en altas relaciones señal-ruido, que el receptor analógico no puede lograr.

Cada vez el receptor digital va mejorando, aumenta su ancho de banda instantáneo de entrada y el procesamiento en tiempo real para producir los resultados deseados como

detectar señales con salto de frecuencia. El criterio de muestreo de *Nyquist* limita el ancho de banda de entrada, por ejemplo, para cubrir el ancho de banda de 1 GHz para datos reales (contraste con datos complejos), el ADC debe operar al menos a 2 Gsamples/s. Debido a la vigorosa investigación en ADC, la velocidad de operación y el número de bits ahora están aumentando a una velocidad sorprendente. El ancho de banda admisible del receptor es directamente proporcional a la frecuencia de muestreo del ADC y el número de bits está directamente relacionado con el rango dinámico. El problema principal en un receptor EW digital es procesar la salida del ADC a una velocidad tan alta como 1 Gsample/s a 8 bits y más aún a 16 bits/muestra. Un posible enfoque es multiplexar la salida de ADC, o utilizar diseños de filtros digitales multirate convencionales. (Tsui, 1995)

En la Figura 5 se puede observar el diagrama de bloques de un receptor digital, apreciando sus principales elementos que le brindan robustez a este tipo de receptores.



**Figura 5** Diagrama de bloques del receptor digital

Fuente: (Schleher, 1986)

## 2.4. Probabilidad de Interceptación

La probabilidad de interceptación (POI) es una característica clave del rendimiento de la vigilancia de EW y sistemas de reconocimiento, se relaciona con la probabilidad de coincidencia de tiempo de dos o más "funciones de ventana" paramétricas, tales como escanear antenas, barrido ágil paso a paso de receptores y emisores de frecuencia.

En los últimos años, se han producido avances significativos en la tecnología, al igual que varios conflictos armados; todo esto ha dictado cambios radicales en los requisitos, *modus operandi* de las fuerzas y otras cuestiones como desarrollos en la teoría detrás de la POI, descripción de la intersección, entre otros.

Los sistemas de recepción de EW brindan reconocimiento de la situación, protección y capacidades ELINT, lo cual permite que los sistemas ESM más recientes ofrezcan una capacidad específica para la identificación de emisores, por lo general a través de la digitalización de amplitud y/o fase de cortísima duración (del orden de decenas de ns). Por todo esto, el ESM es ahora un precursor probable y necesario de ELINT. (Self, 2003)

En la Tabla 2 se muestran los tipos de interceptación más importantes; lo cuales pueden subdividirse en dominios espaciales, de frecuencia y de tiempo.

**Tabla 2**  
*Tipos de interceptación*

	<b>Detalle</b>	<b>Actividad del receptor</b>	<b>Actividad del transmisor</b>	<b>Comentarios</b>
<b>Dominio espacial</b>	Permite escanear el espacio de una manera pseudoaleatoria. Se vuelve más útil cuando se producen cambios de modo (por ejemplo, vigilancia a seguimiento)	Antena de escaneo	Antena de escaneo	Los radares de matrices en fase multifunción hacen que la interceptación sea mucho más difícil
<b>Dominio del tiempo</b>	Incluye aspectos operacionales como el control de emisiones	Haz principal	Interceptación de haz principal o	Receptor de Ancho de banda instantáneo

	(EMCON) lo cual aumenta aún más el tiempo de interceptación. Operaciones en el litoral (cerca de la costa)		lóbulos laterales	estrecho (IBW) que se desliza en un ancho de banda de RF definido en busca de un emisor de amenaza fijo o ágil.
<b>Dominio de la frecuencia</b>	Mayor agilidad en los parámetros de la señal Tx afecta directamente el tiempo para interceptar la señal.	Haz principal	Interceptación de haz principal o lóbulos laterales	Las señales de onda continua modulada de baja potencia (FMCW) afectan directamente el tiempo de interceptación.

Fuente: (Self, 2003)

## 2.5. Señales pasabanda

Considerando una señal  $x(t)$ , cuyo espectro de frecuencia está limitada por:

$$X(j\Omega) = \begin{cases} 0 & |\Omega| \leq \Omega_1 = 2\pi W_1 \\ 0 & |\Omega| \geq \Omega_2 = 2\pi W_2 \end{cases} \quad (1)$$

Donde:  $0 < \Omega_1 < \Omega_2 < \infty$  y la frecuencia central está dada por:  $\Omega_c = (\Omega_1 + \Omega_2)/2$  y su ancho de banda  $W$  en (Hz) es:

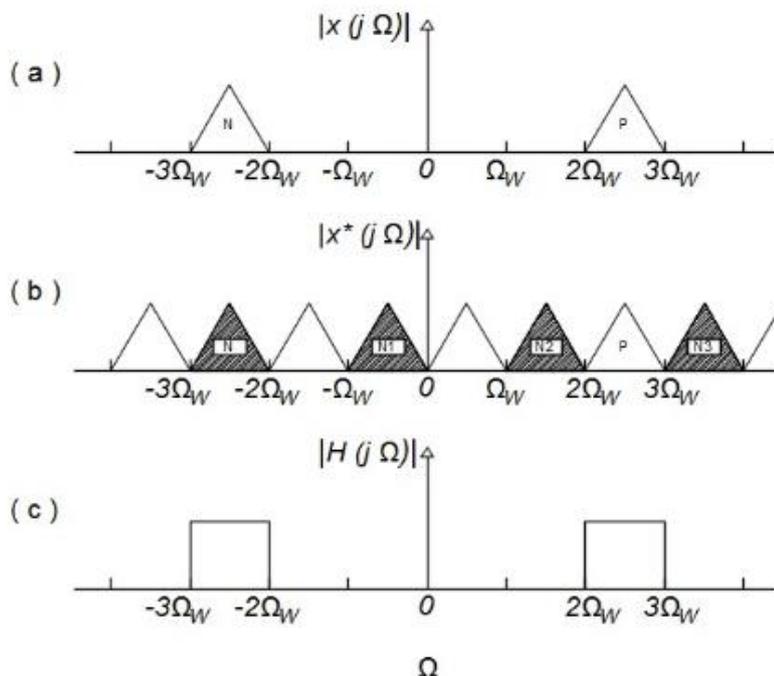
$$W = W_2 - W_1 = \frac{(\Omega_2 - \Omega_1)}{2\pi} = \frac{\Omega_W}{2\pi} \quad (2)$$

Para señales pasabanda  $X(j\Omega)$ , la tasa de muestreo es  $2W_2$  (Hz); pero bajo ciertas condiciones, la señal pasabanda puede ser descrita por  $2W$  (en lugar de  $2W_2$ ) muestras por segundo. De forma que, es posible reconstruir una señal pasabanda  $x(t)$  a partir de las muestras  $x(kT)$  provenientes de la tasa de muestreo  $f_s = T^{-1}$  que se encuentran en el rango: (Jayant & Noll, 1984)

$$2W \leq f_s \leq 4W \quad (3)$$

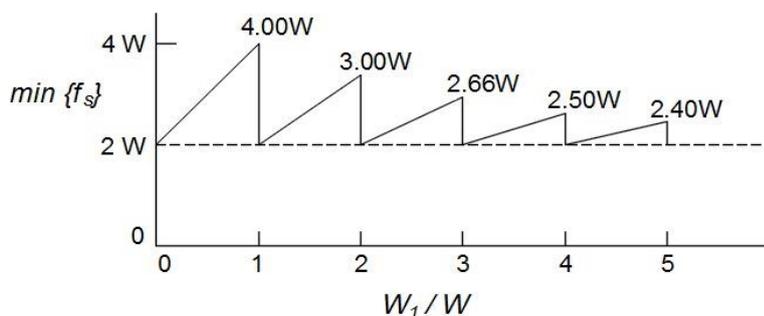
La tasa de  $2W$  puede ser adecuada bajo la condición del entero proveniente de la relación:  $W_1/W$ . Incluso para condiciones donde la  $\min\{f_s\}$  excede  $2W$ , esto estará limitada por  $2W_2$ .

El espectro de señales pasabanda es periódico como se muestra en la Figura 6, y existen ciertas condiciones a seguir para que la extensión periódica no se solape:  $f_s = 2W$ , la segunda repetición del lado derecho de la banda (N2 en la Figura 6) se desplaza justo a la izquierda del espectro positivo P, mientras que la tercera repetición (N3 en la Figura 6) se desplazó a la derecha de P. En este caso no existe solapamiento en ninguna repetición de N y P, lo cual se ha logrado porque se ha considerado un espectro cuyo valor más bajo  $W_1$  es solo un múltiplo entero del ancho de banda  $W$ ; es decir que, una tasa de muestreo de  $2W$  es adecuada si la relación  $W_1/W$  es un número entero exacto  $n = 0, 1, 2, \dots$  (Jayant & Noll, 1984)



**Figura 6** Representación de Fourier de una señal pasabanda.  
 a) Espectro de entrada  $|X(j\Omega)|$ . b) Extensión periódica  $|X^*(j\Omega)|$ .  
 c) Limitación de banda de  $|X^*(j\Omega)|$  para recuperar  $|X(j\Omega)|$ .  
 Fuente: (Jayant & Noll, 1984)

La Figura 7 representa la tasa de muestreo mínima para una señal pasabanda obtenida a partir de la relación  $W_1/W$ . Esta tasa de muestreo estará limitada entre  $2W$  y  $4W$  tal como se mostró en (3). Además, se tiene que los mejores resultados se alcanzan cuando la relación entre  $W_1/W$  es un entero positivo; cuando esta relación no es un entero positivo se necesitan mayores requerimientos de tasa de muestreo, obteniendo los peores casos como son los picos de la Figura 7.



**Figura 7** Tasa de muestreo mínima para una señal pasabanda.  
 Fuente: (Jayant & Noll, 1984)

La tasa de muestreo mínima se obtiene a partir de la ecuación (4):

$$\min\{f_s\} = 2W \frac{1 + W_1/W}{1 + [W_1/W]} \quad (4)$$

En donde:  $[W_1/W]$  representa el mayor entero en  $W_1/W$ .

### 2.5.1. Representación de las señales pasabanda

La representación de señales pasabanda se lo realiza mediante señales en banda base que sean equivalentes para que no exista una pérdida de información. Como ventajas de esta representación se tiene:

- Evaluar el procesamiento de la señal pasabanda como un procesamiento equivalente en banda base.
- Las señales equivalentes permiten obtener la señal moduladora, permitiendo el análisis de la señal.

La señal real pasabanda esta se puede observar en la primera parte de la Figura 8 y está definida por:

$$s(t) = \text{Re}[s_+(t)] = \text{Re}[\tilde{s}(t)e^{j\omega_c t}] \quad (5)$$

El proceso de transformación en el dominio de la frecuencia, empieza con la eliminación de las frecuencias negativas de la señal pasabanda  $s(t)$ , obteniendo una señal compleja denominada pre-envolvente, y está dada por:

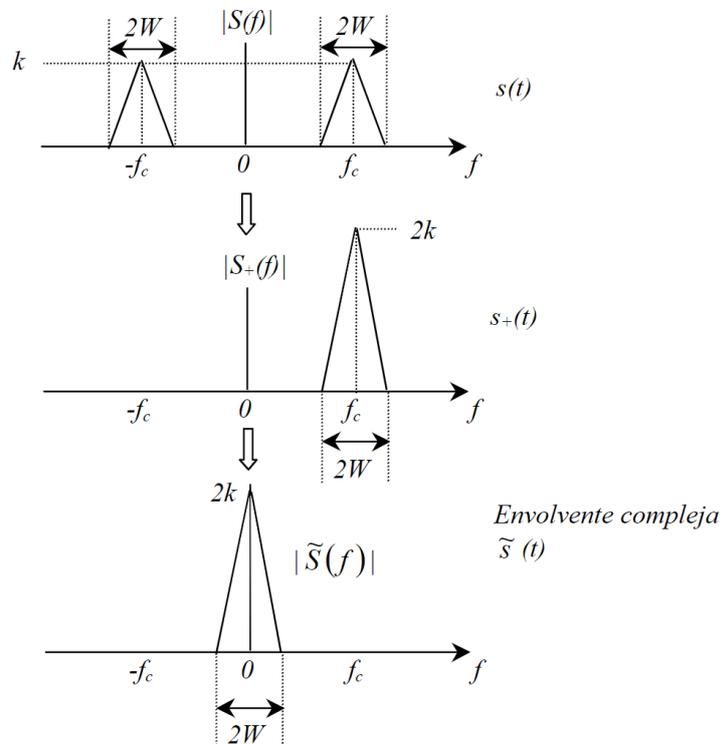
$$s_+(t) = s(t) + j\hat{s}(t) \quad (6)$$

Donde su Transformada de Fourier es:

$$S_+(f) = S(f) + j[-j \text{sgn}(f)]S(f) = [1 + \text{sgn}(f)]S(f) = \begin{cases} 2S(f) & f > 0 \\ S(0) & f = 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Como resultado de mantener la parte positiva de  $s(t)$  se tiene el espectro ilustrado en la

Figura 8.



**Figura 8** Proceso para obtener la envolvente compleja.

Fuente: (Universidad Pública de Navarra)

Una vez obtenida la señal  $s_+(t)$ , se traslada el espectro de la señal  $f_c$  hacia la izquierda y como resultado se obtiene la envolvente compleja como se observa en la Figura 8.

$$\tilde{s}(t) = s_+(t)e^{-j\omega_c t} \quad (8)$$

Donde su transformada de Fourier es:

$$\tilde{S}(f) = S_+(f + f_c) \quad (9)$$

La señal  $\tilde{s}(t)$  se puede descomponer en dos señales reales:

- **Parte real y parte imagiaria**

Esta señal viene dada por:

$$\tilde{s}(t) = s_I(t) + js_Q(t) \quad (10)$$

Donde:

$s_I(t)$  = Componente en fase de  $s(t)$

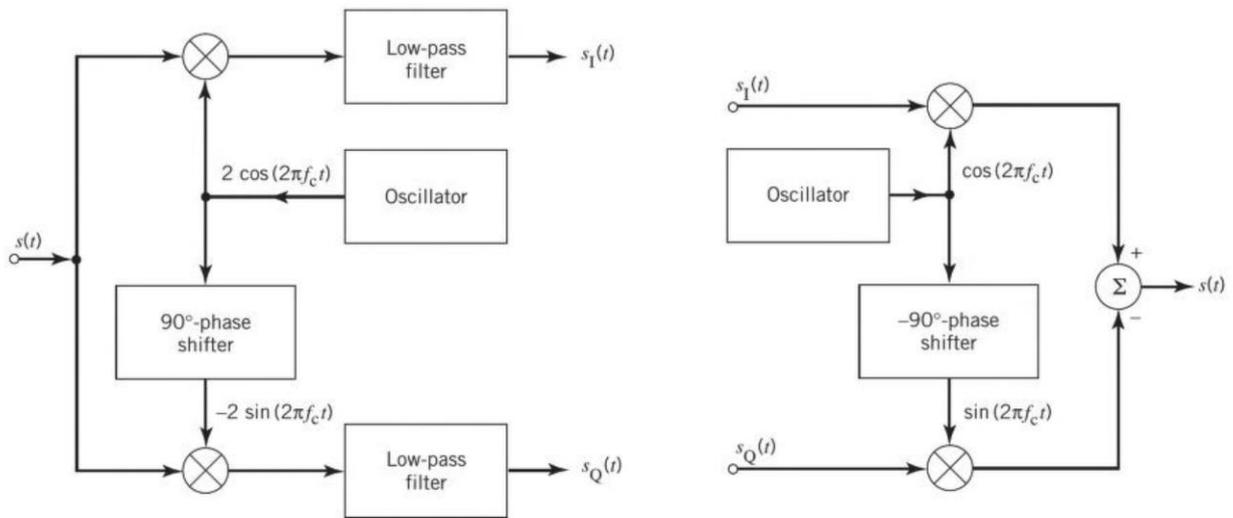
$s_Q(t)$  = Componente en cuadratura de  $s(t)$

Sustituyendo en la ecuación (5) se obtiene una ecuación que permite representar  $s(t)$  en dos señales reales  $s_I(t)$  y  $s_Q(t)$  de  $\tilde{s}(t)$ :

$$s(t) = s_I(t) \cos \omega_c t - s_Q(t) \sin \omega_c t \quad (11)$$

La ecuación (11) describe las componentes en fase y cuadratura de la señal pasabanda; es decir, que los términos que multiplican a sus componentes están desfasados  $90^\circ$ .

La Figura 9 muestra como a partir de una señal pasabanda  $s(t)$  se puede extraer las componentes de fase y cuadratura que son filtros pasa bajos, estos filtros son diseñados de manera idéntica y cada uno con un ancho de banda igual a  $W$ . De igual manera se puede construir  $s(t)$  desde sus componentes  $s_I(t)$  y  $s_Q(t)$ , multiplicando la componente en fase  $s_I(t)$  por  $\cos(2\pi f_c t)$  y la componente en cuadratura  $s_Q(t)$  multiplicando por  $\sin(2\pi f_c t)$ . Cada vez que la frecuencia portadora  $f_c$  sea mayor que un pasa bajos con un ancho de banda  $W$ , la ecuación (11) resultante de un pasabanda se conoce como la forma de onda de una señal pasabanda.



**Figura 9** Esquema para derivar los componentes de fase y cuadratura de una señal pasabanda

Fuente: (Haykin, 2014)

El numeral 2.5, es la base teórica conceptual en la que se fundamenta el receptor digital BB60C a utilizar. El ancho de banda que monitorea instantáneamente es de 27 MHz y tiene la posibilidad de canalizar el espectro de 10 KHz a 6 GHz, en espacios de 27 MHz, únicamente controlando la frecuencia del oscilador local interno (característica denominada Receptor Canalizado). Si bien el objetivo del presente trabajo era obtener 44 MHz instantáneos, sin embargo, el alcance del mismo también exige disponer de una alta POI. Por lo tanto, combinando estas dos características, Receptor Canalizado y Descomposición en I y Q, permite el monitoreo de ventanas del espectro radioeléctrico mayores a 44 MHz, dando como resultado velocidades de monitoreo de 24 GHz/s, con alta POI, como lo analizaremos en los subsiguientes capítulos.

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS

El presente proyecto pretende desarrollar un sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico para la banda de 10 kHz a 6 GHz; para esto se utiliza un receptor digital y dos antenas: la antena OmniLOG 70600 para pruebas iniciales, y la antena DISCONE del Sistema TCI perteneciente al GMREC (Grupo de Monitoreo y Reconocimiento Electrónico Conjunto) para pruebas finales de funcionamiento del sistema de monitoreo. Todos estos elementos se describen en el presente capítulo, mostrando sus componentes, características y detalles técnicos.

#### 3.1. Antenas

##### 3.1.1. Antena OmniLOG 70600

Es una antena omnidireccional de origen alemán que cubre un amplio rango de frecuencias. Sus especificaciones técnicas se detallan en la *Tabla 3*:

**Tabla 3**  
*Características de la antena OmniLOG 70600*

Especificación	Detalle
Tipo	Omnidiraccional isotrópico radial
Rango de frecuencia	680MHz a 6GHz
Impedancia nominal	50 ohmios
Ganancia pico	6.5 dBi
Ganancia promedio	3.5 dBi
VSWR promedio	2.5

Rango de temperatura	-20 ° C a +70 ° C
Dimensiones	173x62x9mm
Peso	54 gr

Fuente: (Gewerbegebiet Aaronia AG II, 2015)



**Figura 10** Antena OmniLOG 70600

Fuente: (Gewerbegebiet Aaronia AG II, 2015)

### 3.1.2. Antena Discone omnidireccional del sistema TCI

La antena COMPACT V/UHF 9-ELM DFMON, está conformada por un arreglo de antenas de 9 elementos, estas son antenas directivas ubicadas alrededor de una antena omnidireccional como se puede observar en la Figura 11.

La antena omnidireccional Discone ubicada en el centro del sistema es la que se utilizará para las pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo ya que esta antena se utiliza para vigilancia, además tiene una alta sensibilidad.



**Figura 11** Antena COMPACT V/UHF 9-ELM DFMON del sistema TCI

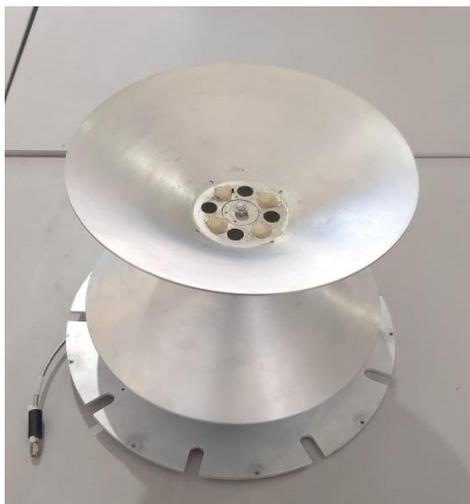
Fuente: (TCI, s.f.)

### 3.1.3. Parámetros S de la Antena Discone

Los parámetros S (*Scattering-Dispersión*) son propiedades utilizadas generalmente en radiofrecuencia (RF) para conocer el comportamiento básico de un dispositivo (en este caso de la antena Discone) sujeto a condiciones lineales en un rango determinado de frecuencia; esto implica que, para su medición, es necesario conocer la frecuencia a la que se van a realizar las mediciones y su impedancia característica. (Colombo, 2012)

Para realizar la medición de los parámetros S de la antena Discone se realizó el siguiente procedimiento:

- Se procede a extraer la antena Discone del conjunto de antenas del sistema TCI, debido a que solo a esta antena se va a realizar la medición de los parámetros como se observa en la Figura 12.



**Figura 12** Antena Discone

- La antena discone tiene un cable que va conectado al sistema de conmutación de antenas (Figura 13), por lo que se procede a sacar dicho cable para conectar un cable directo al analizador vectorial.



**Figura 13** Extracción del cable de la antena Discone

- El analizador vectorial a utilizarse es de la marca Anritsu MS2036A (Figura 14), y antes de realizar la medición, es necesario calibrar el analizador vectorial, así como

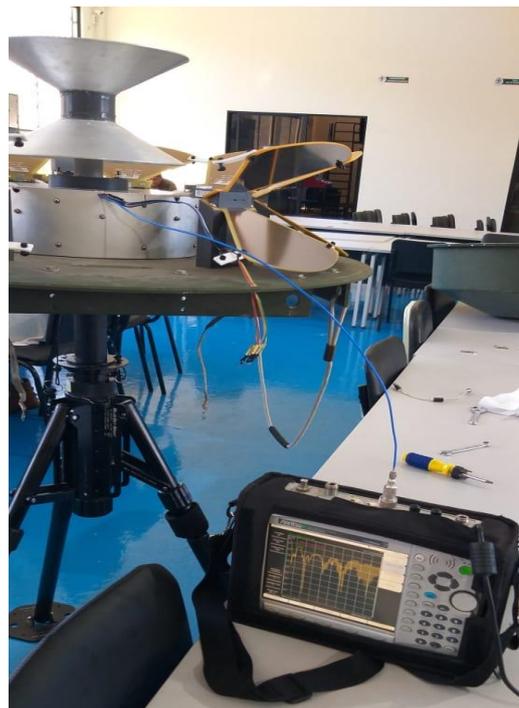
también se debe configurar el plano de referencia, el cual debe estar al final del cable que se conecta en el analizador vectorial, es decir al inicio del conector de la antena.



**Figura 14** Analizador vectorial Anritsu MS2036A.

Fuente: ( Test equipment Solutions, Ltd., 2008)

- Una vez calibrado el analizador vectorial se procede a conectar la antena Discone para las mediciones de los parámetros S como se ilustra en la Figura 15.

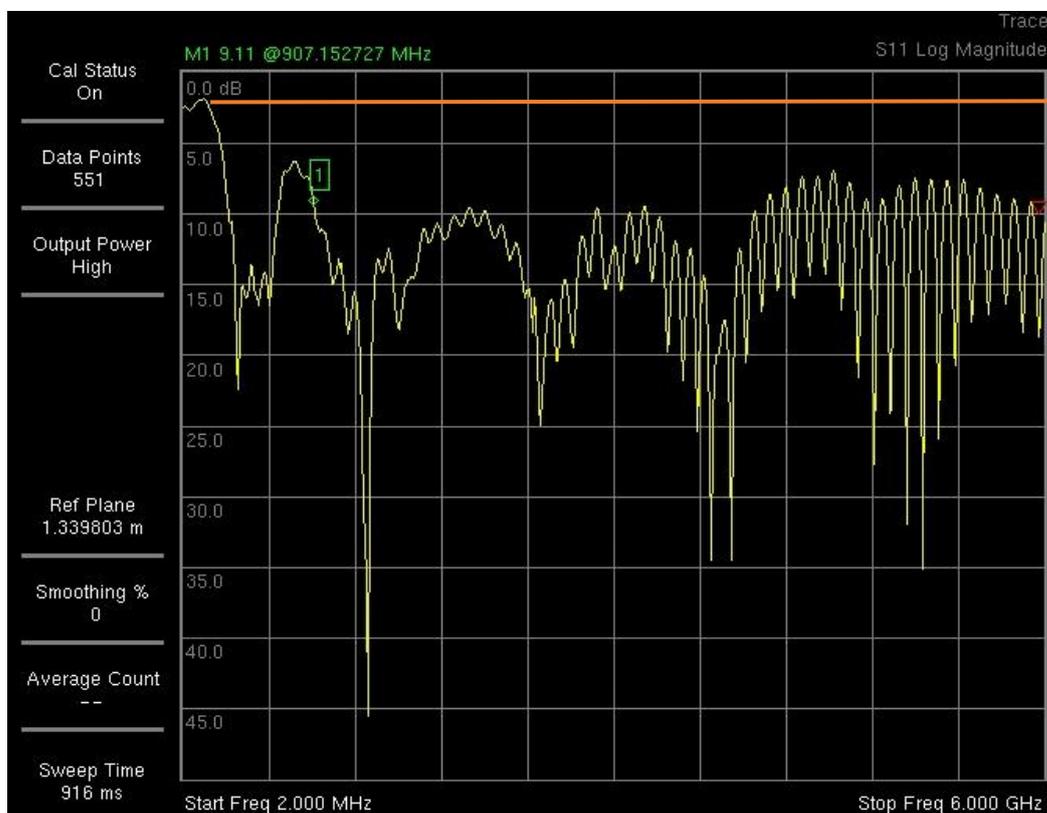


**Figura 15** Medición de parámetros S de la antena Discone.

Uno de los parámetros para definir el ancho de banda es el  $S_{11}$ , el cual permite comparar la potencia reflejada con la potencia aplicada en el puerto 1. Para asegurar el rango de

frecuencias óptimo en el que trabaja la antena, se debe verificar que  $|S_{11}| < -10 \text{ dB}$  (Suárez, Carrol, & Puerto, 2016).

Los resultados obtenidos de la medición de los parámetros S en el analizador vectorial de la antena Discone se observa en la Figura 16, como se mencionó anteriormente, el rango óptimo de la antena debe cumplir que  $|S_{11}| < -10 \text{ dB}$ , pero esto es para el caso de transmisión que es un equivalente a un  $VSWR = 1.925$  (Mini Circuits, 2010), sin embargo para el caso de recepción, que es el caso de estudio de este trabajo, compete los valores menores a  $-3 \text{ dB}$  con un  $VSWR = 5.848$  (Mini Circuits, 2010), que de acuerdo a la Figura 16 el rango de recepción es desde los 30 MHz a 6 GHz en el que trabajaría la antena Discone. Para el caso de frecuencias menores a 30 MHz se utilizaría la antena dipolo de hilo largo (Figura 17) que posee el ejército ecuatoriano, garantizando la operación del sistema con un VSWR aceptable.



**Figura 16** Resultados de la medición de parámetros S.



**Figura 17** Antena dipolo de hilo largo

### 3.2. Receptor Digital SigantHound BB60C

El receptor digital BB60C *Signal Hound* (Figura 18) es un dispositivo de nueva generación que monitorea el espectro radio eléctrico, ya no como los clásicos superheterodinos, sino generando un Ancho de Banda de análisis (normalmente 27 MHz), digitalizando sus componentes I y Q a una alta tasa de muestreo (frecuencia de Nyquist para procesos pasa banda) y aplicando la *Fast Fourier Transform* (FFT), es decir es del tipo *swept-tuned* (canalizado, I-Q). (Signal Hound, Inc., 2019)



**Figura 18** Receptor digital BB60C  
Fuente: (Signal Hound, Inc., 2015)

Este receptor utiliza un oscilador y filtros pasabanda para convertir una parte del espectro de entrada a una frecuencia intermedia (IF), el cual es el principio básico de los

receptores superheterodinos. La gran diferencia de este receptor digital con los superheterodinos es que el ancho de banda de un superheterodino es extremadamente estrecho (del orden de decenas de Hz) por lo que requiere que su oscilador local escanee toda la ventana espectral a ser analizada. La frecuencia intermedia del receptor digital de banda ancha (27 MHz), es digitalizada y aplicada la FFT casi instantáneamente, enviando los resultados a la *PC* via *USB*.

La parte frontal del receptor digital cuenta con una entrada a  $50\Omega$ , la cual no debe exceder los +20dBm o puede ocurrir un daño severo, Figura 19.



**Figura 19** Vista frontal del BB60C.  
Fuente: (Signal Hound, Inc., 2019)

La parte posterior, apreciada en la Figura 20 consta de tres conectores:

- Entrada/Salida de referencia de 10 MHz.
- Conector hembra USB 3.0, usa un cable Y (Figura 21) para conectar el dispositivo al computador.
- Un conector multipropósito BNC.



**Figura 20** Parte posterior del BB60C.  
Fuente: (Signal Hound, Inc., 2019)



**Figura 21** Cable Y para conexión.

En la Tabla 4 se observa las siguientes características del receptor digital BB60C.

**Tabla 4**  
*Características del receptor digital BB60C*

<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
Rango de frecuencia de RF	9 kHz a 6 GHz
Velocidad de barrido	hasta 24 GHz / s ( $\geq 10$ kHz RBW)
Sensibilidad	de -158 dBm a +10 dBm
Ancho de banda de resolución	10 Hz a 10 MHz
Ancho de banda instantáneo	27 MHz
Velocidad de muestreo	80 millones de muestras/s  (40 millones de muestras/s en Fase y 40 millones de muestras/s en Cuadratura)

Fuente: (Signal Hound, Inc., 2015)

Una de las ventajas más representativas de este receptor digital, es la posibilidad de utilizar una API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) para desarrollar aplicaciones propias de acuerdo a las necesidades o requerimientos con un reducido costo comparado con otros existentes en el mercado. La API es capaz de proporcionar un flujo continuo de

muestras de I/Q digital desde el dispositivo, mismo que consiste en pares I/Q de punto flotante de 32 bits intercalados y escalados a mV. Las muestras digitales se corrigen en amplitud proporcionando mediciones precisas. La velocidad de datos I/Q en su nivel más alto es 40MS/s y puede reducirse en un factor de hasta 128 (en potencias de dos). Cada valor de decimación reduce aún más el ancho de banda total de las muestras de I/Q, por lo que la API también proporciona un filtro pasabanda configurable para controlar la banda de paso general de un flujo de datos I/Q determinado. El flujo de datos I/Q también puede sintonizarse a un valor de frecuencia arbitrario. (Signal Hound, Inc., 2019)

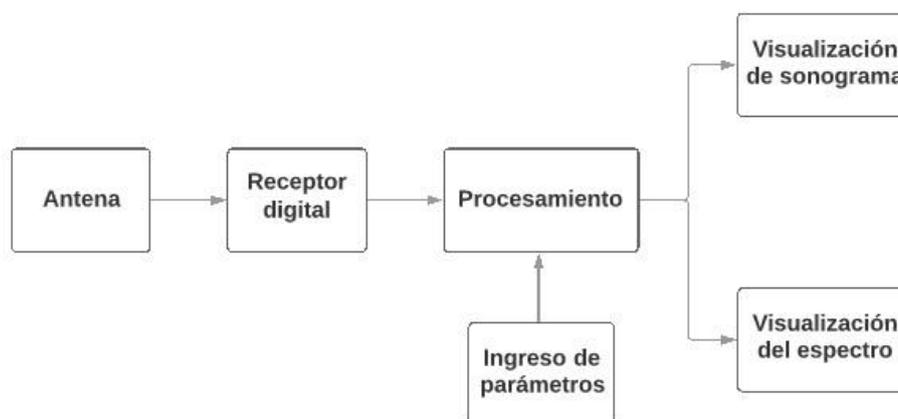
## CAPÍTULO IV

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO

Para la implementación del sistema de monitoreo del espectro radio eléctrico, se utilizó el receptor digital BB60C en conjunto con la antena Discone omnidireccional del sistema TCI del GMREC. El receptor digital monitorea el espectro en la banda de 10kHz a 6GHz. Una de las ventajas de este receptor digital, es que posee código abierto en el que se puede realizar una API (Interfaz de programación de aplicaciones) para desarrollar una aplicación propia.

#### 4.1. Entorno de aplicación

En la Figura 22 se ilustra el diagrama de bloques de nuestro sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico de 10 kHz a 6 GHz utilizando el receptor digital, la antena Discone del sistema TCI y el computador en el que estará instalada la aplicación desarrollada por nosotros, bajo filosofía del sistema Arturo del AGRUCOMGE.



*Figura 22* Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.

Para el desarrollo del aplicativo se utilizó el lenguaje de programación C++, por medio de la plataforma Visual Studio 2019; en donde la comunicación con el equipo BB60C se realiza mediante comandos de C++. La API también es compatible con otros lenguajes como Java, Python, Matlab y Labview.

#### **4.2. Requisitos de desarrollo de Windows para desarrollar la API**

Para el correcto funcionamiento de la API se necesita cumplir con los siguientes requerimientos: (Signal Hound, Inc., 2015)

- Windows 7/8
- Herramientas de desarrollo de Windows C / C ++, de preferencia Visual Studio 2008 o posterior.
- Archivo de cabecera API bb\_api.h.
- Los archivos de la biblioteca API (bb\_api.lib) y la biblioteca dinámica (bb\_api.dll).

#### **4.3. Funcionamiento**

Para el desarrollo de la API se debe tener en cuenta los siguientes pasos que permitirán el correcto funcionamiento del programa:

- 1) Abrir el dispositivo
- 2) Configurar el dispositivo.
- 3) Iniciar el dispositivo
- 4) Tomar datos del dispositivo
- 5) Abortar el modo de operación actual.
- 6) Cerrar el dispositivo.

### 4.3.1. Abrir el dispositivo

Antes de abrir un dispositivo para realizar la programación, se debe verificar que esté conectado físicamente a un puerto USB de la computadora. Posteriormente se visualiza que la luz de encendido del dispositivo esté de color verde, y se procederá abrir el programa.

La función **bbOpenDevice** permite abrir el dispositivo, la cual devuelve un entero indicando que se abrió el dispositivo.

### 4.3.2. Configurar el dispositivo

Una vez abierto el dispositivo se procede a realizar la configuración del equipo, en la que la API proporciona varios modos de configuración y operación. Estas funciones de configuración modifican el estado global del dispositivo, debiendo tener en cuenta que las más relevantes se deben invocar antes de la inicialización del dispositivo para garantizar un correcto funcionamiento.

El modo de operación SWEPT ANALYSIS (Análisis de barrido), es el modo que comúnmente se utiliza en los analizadores de espectro. Mediante el software, se le pide al dispositivo que realice un barrido en el intervalo indicado, en donde los tramos mayores a 20 MHz, es el resultado de unir varios tramos de 20 MHz y concatenar los resultados de cada uno. Sin embargo, para cada 20 MHz el receptor digital monitorea el espectro de 20 MHz casi instantáneamente ya que digitaliza las componentes I y Q del espectro monitoreado y extrae la FFT de esas muestras. La concatenación de FFTs muestra el nivel de potencia en el eje vertical y la frecuencia en el eje horizontal o también llamado bin de frecuencia.

Las instrucciones de configuración que ejecutan el barrido son:

- **bbConfigureAcquisition ()**: configura el detector y escala lineal o logarítmica, de igual forma se puede señalar que los datos mostrados sean un promedio o mantener los valores mínimo y máximo.
- **bbConfigureCenterSpan ()** - Configura el rango de frecuencia operativo, en el que las frecuencias de inicio y final se determinan desde la frecuencia central y el intervalo.

$$Frecuencia\ inicio = frecuencia\ central - \frac{span}{2} \quad (12)$$

$$Frecuencia\ final = frecuencia\ central + \frac{span}{2} \quad (13)$$

- **bbConfigureLevel ()** - Configura el nivel de referencia y atenuación del dispositivo, donde se selecciona que sea de manera automática, de manera que la API usa la referencia dada para elegir la mejor configuración.
- **bbConfigureGain ()**: Configura los amplificadores internos. Para que el dispositivo elija la mejor configuración de ganancia se selecciona la función BB\_AUTO\_GAIN.
- **bbConfigureSweepCoupling ()**: Configura el RBW / VBW / sweep time.

El ancho de banda de resolución o RBW, representa el ancho de banda de la densidad espectral de potencia representada en cada intervalo de frecuencia o bin.

El ancho de banda de video o VBW, se implementa como una ventana rectangular promediando las lecturas de amplitud por cada tramo de frecuencias. Una señal cuya amplitud se modula a una frecuencia mucho más alta que el VBW se mostrará como

promedio, mientras que la modulación de amplitud a una frecuencia más baja se mostrará como un valor mínimo y máximo.

El `sweepTime` es la cantidad de tiempo que el dispositivo dedicará a recopilar datos antes del procesamiento.

- **bbConfigureProcUnits ()** - Configura el procesamiento de VBW, y señala que tipos de unidades se van a utilizar de acuerdo al detalle mostrada en la *Tabla 5*:

**Tabla 5**  
*Unidades que se utilizan en cada función.*

<b>Función</b>	<b>Unidad</b>
BB_LOG	dBm
BB_VOLTAGE	mV
BB_POWER	mW

Fuente: (Signal Hound, Inc., 2015)

#### 4.3.3. Iniciar el dispositivo

El dispositivo tiene dos estados de funcionamiento:

- Estado global.
- Estado operativo/ejecución.

En el estado global se modifican las funciones de configuración, las cuales no afectan de manera inmediata al funcionamiento del dispositivo.

Una vez que se realiza la configuración del estado global de acuerdo a nuestras necesidades, al reiniciar el equipo, el modo de operación global se copia en el estado de ejecución. De esta manera el estado de ejecución es independiente y no sufre cambios a las funciones de configuración.

La función **bbInitiate** se usa para inicializar el dispositivo e ingresar a uno de los modos de operación, cabe indicar que el dispositivo permite estar en un modo de operación a la vez.

#### 4.3.4. Tomar datos del dispositivo

Después de inicializar el dispositivo correctamente, se puede comenzar a tomar datos del dispositivo, el cual adquiere una traza; es en esta parte en donde el receptor digital empieza a determinar las señales dentro del ancho de banda que se configuró de acuerdo a la frecuencia central colocada inicialmente en los parámetros de los datos iniciales.

#### 4.3.5. Abortar el modo actual

Para abortar del funcionamiento del dispositivo se lo realiza mediante la función **bbAbort**. La cual cancela toda operación que se está ejecutando y la vuelve a un estado inactivo.

No es necesario que se le llame explícitamente a la función **bbAbort**, es decir si se intenta iniciar un dispositivo ya activo, la función **bbAbort** es llamada automáticamente, o si se intenta cerrar un dispositivo activo, de igual forma la función **bbAbort** es ejecutada.

#### 4.3.6. Cerrar el dispositivo

Para cerrar completamente el dispositivo o dar por finalizado el uso del programa, se debe llamar a la función **bbCloseDevice**, la cual permite cerrar de forma segura la conexión USB con el dispositivo.

#### 4.4. Diagrama de Clases

La elaboración del programa se realizó mediante clases en Visual Studio 2019 Community, las cuales están distribuidas de acuerdo a las funcionalidades que se requiere como se puede observar en la Figura 23, en función de la filosofía del sistema Arturo.



*Figura 23* Diagrama de clases

Cada clase contiene funciones específicas que se detallan en la Tabla 6:

**Tabla 6**

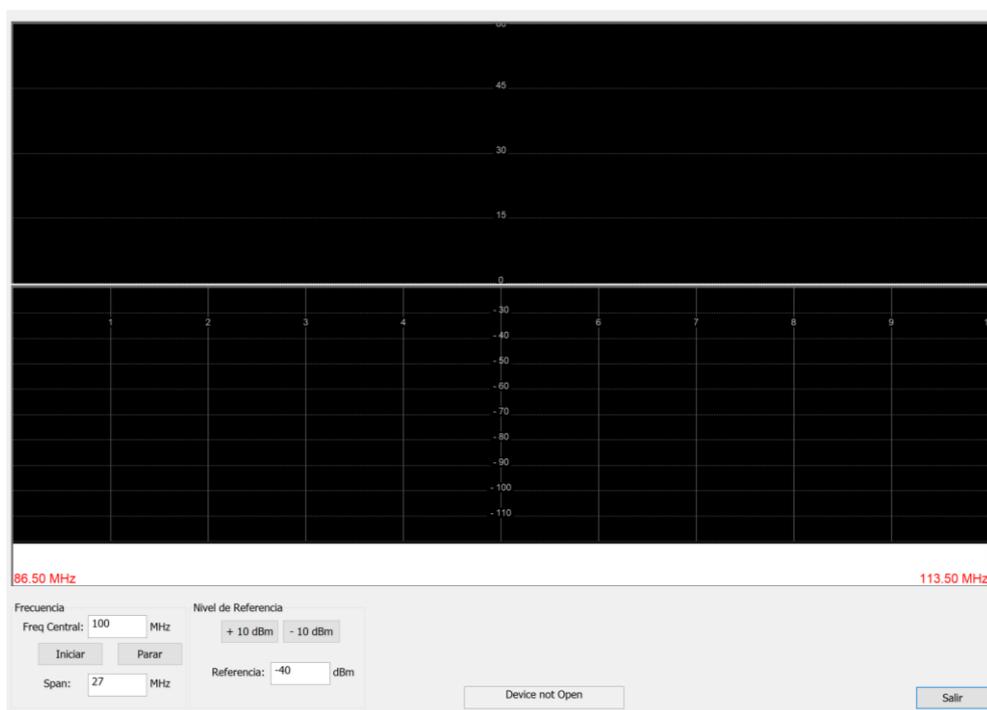
*Descripción de las clases del programa.*

<b>Bloque</b>	<b>Descripción</b>
ArturoBB60C	Define los comportamientos de las clases para la aplicación.
ArturoBB60CDlg	Ejecuta los parámetros del panel de configuración de la aplicación (Frecuencia central, Span, Nivel de Referencia, Salir). Como primer paso verifica que el dispositivo este conectado para poder realizar cualquier operación.
BB60C	En esta clase se configura los 6 pasos para el funcionamiento del dispositivo que son: Abrir el dispositivo, Configurar el dispositivo, Iniciar el dispositivo, Tomar datos del dispositivo, Abortar el modo de operación actual y Cerrar el dispositivo.

Datos	Se detalla las variables con los valores que se inicializará el programa.
Espectro	Grafica el espectro de señales, indicado la frecuencia de inicio y frecuencia final, así como también dibujar la grilla que permite observar el nivel de potencia para referencia de cada señal. Cada vez que se modifica en el panel de configuración, se visualiza inmediatamente en el espectro.
Sonograma	Permite graficar el sonograma de las señales recibidas, editar los colores a ser mostrados.

#### 4.5 Interfaz de la Aplicación

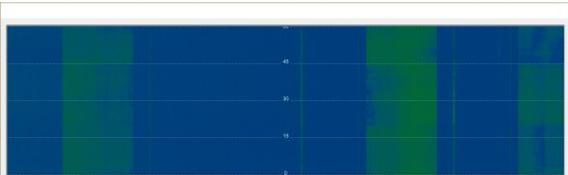
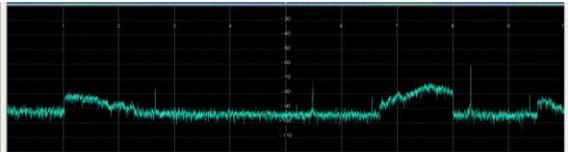
El desarrollo de la interfaz se realizó mediante la Aplicación de Windows Form de Visual Studio, la cual permite diseñar aplicaciones de interfaz gráfica como se observa en la Figura 24.



**Figura 24** Interfaz de la aplicación

La interfaz está compuesta por 3 bloques que son: sonograma, espectro y el panel de configuración. En la Tabla 7 se detalla las funcionalidades de cada bloque:

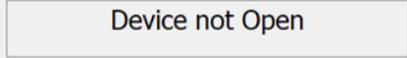
**Tabla 7**  
*Descripción de los bloques de la Interfaz Gráfica*

Bloque	Descripción
<p><b>Sonograma</b></p> 	<p>Permite visualizar las frecuencias en función del tiempo, señala el nivel sonoro con dos colores: azul cuando la señal no está presente y verde cuando existe una señal.</p>
<p><b>Espectro</b></p> 	<p>Permite visualizar el espectro de la señal recibida en tiempo real, la cual está compuesta por una frecuencia inicial, frecuencia final y el nivel de potencia de la señal.</p>
<p><b>Panel de configuración</b></p> 	<p>Se ingresa los parámetros necesarios para realizar el monitoreo que se requiera.</p>

Dentro del panel de configuración existe varios parámetros que se debe tener en cuenta para realizar el monitoreo de las señales radio eléctricas, como se indica en la Tabla 8.

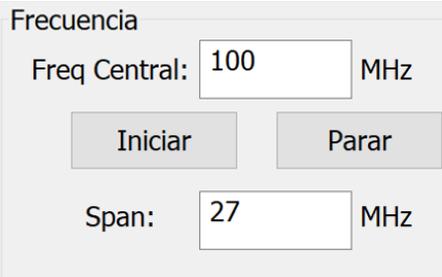
**Tabla 8**  
*Descripción del Panel de Configuración*

Parámetros	Descripción
	<p>En la parte inferior del panel de configuración existe un recuadro, el cual</p>



Device not Open

señala si el dispositivo esta conectado correctamente, caso contrario nos envía un mensaje que el dispositivo no esta conectado.



Frecuencia

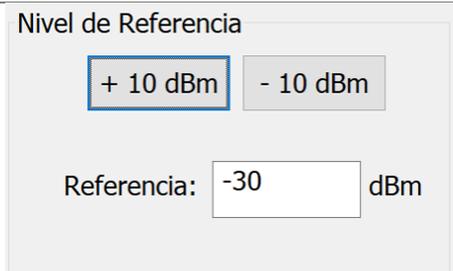
Freq Central: 100 MHz

Iniciar Parar

Span: 27 MHz

En estos parámetros, permite ingresar la frecuencia central y en span que se desee iniciar el monitoreo del espectro.

Existe el botón INICIO y PARAR que sirve para iniciar y para el monitoreo en cualquier instante.



Nivel de Referencia

+ 10 dBm - 10 dBm

Referencia: -30 dBm

La ejecución del monitoreo empieza con -30 dBm, pero existe los botones +10 dBm y -10 dBm, que sirven para observar de una mejor manera la señal recibida.



Salir

El botón SALIR finaliza el monitoreo y sale de la aplicación desvinculando la comunicación con el equipo BB60C.

Con todos los elementos detallados en el Capítulo III y el desarrollo del aplicativo presentado en este capítulo se consigue un sistema de monitoreo del espectro radio eléctrico que cubre la banda de los 10 kHz hasta los 6 GHz con anchos de banda instantáneos de 27 MHz. Además, si se desea un ancho de banda instantáneo mayor a los 27 MHz, el software logra concatenar anchos de banda de 27 MHz hasta lograr el ancho de banda requerido.

Respecto a la POI, dado que nuestro receptor digital tiene ancho de banda instantáneo de 27 MHz y monitorea 24 GHz/s, quiere decir que los 27 MHz los monitorea en 1,125 ms.

Por tanto, la POI de una señal de interés que se encuentre dentro del ancho de banda de 27 MHz monitoreado, es de 100% si la duración de la comunicación en esa portadora es de al menos 1,125 ms (menor o igual a 888 saltos/s en frecuencia para un transmisor del tipo hopping frequency).

## CAPÍTULO V

### PRUEBAS Y RESULTADOS

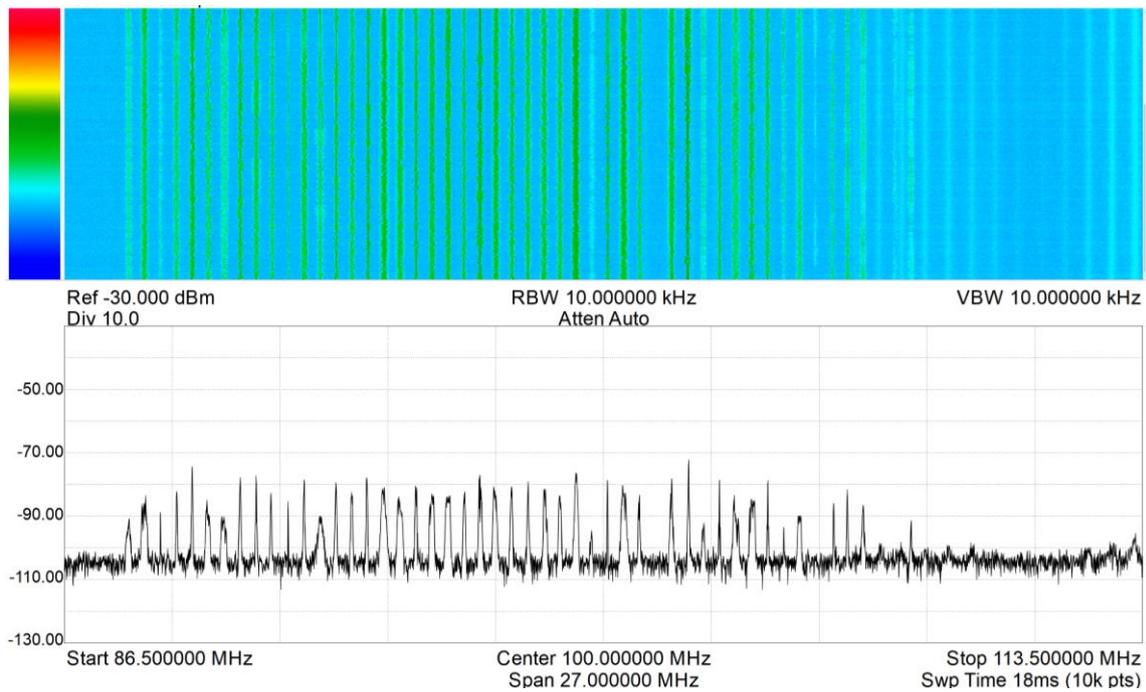
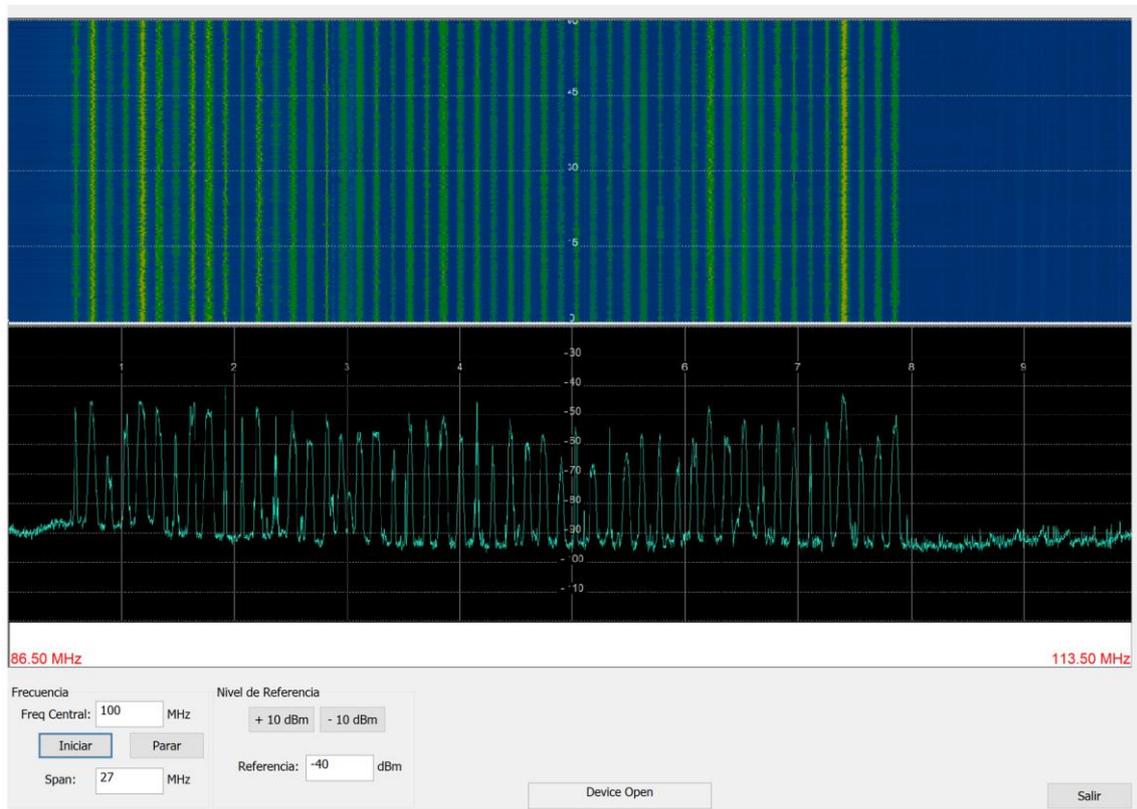
#### 5.1. Pruebas y resultados preliminares

Las pruebas se realizaron con un computador HP Core-i7, el receptor digital *Signal Hound* y la antena *OmniLOG 70600* como se observa en la Figura 25, como pruebas iniciales de la aplicación.



*Figura 25* Pruebas de Campo con la antena OmniLOG 70600

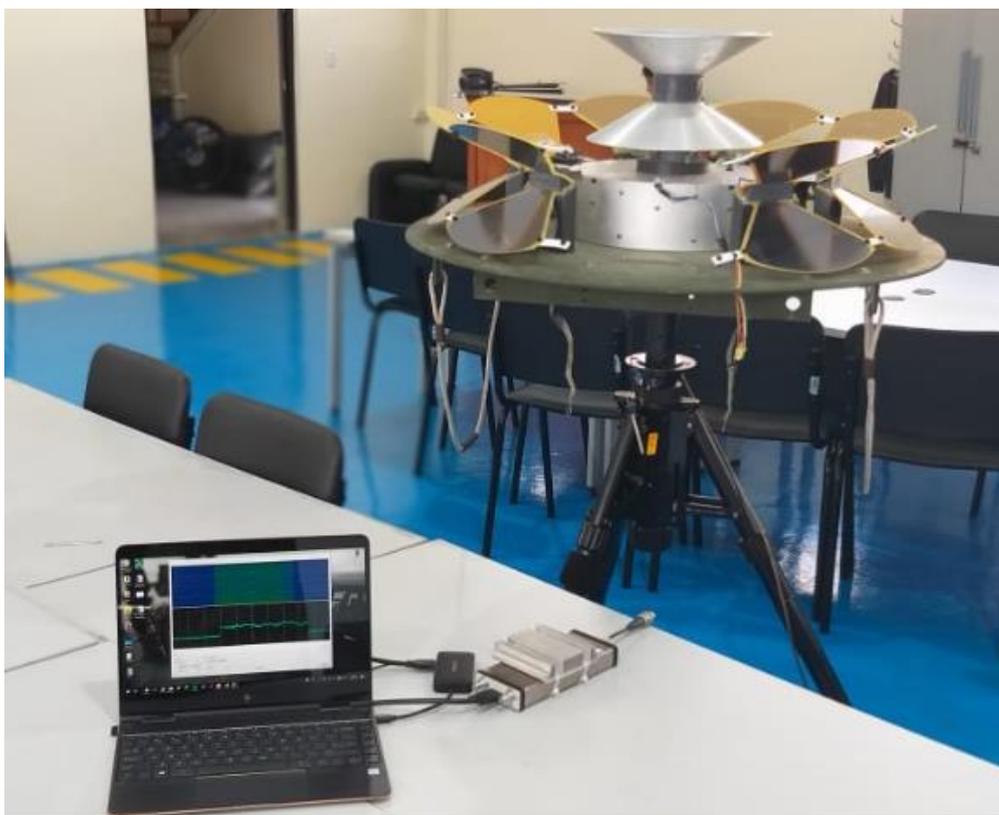
Las pruebas se realizaron monitoreando varios espacios del espectro y con diferente Span, de igual manera se comprobó el mismo monitoreo con el programa Spike de la empresa Signal Hound, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 26.



**Figura 26** Frecuencia central 100 MHz con Span de 27 MHz.  
 Superior: Sistema de monitoreo implementado. Inferior: Software Spike.

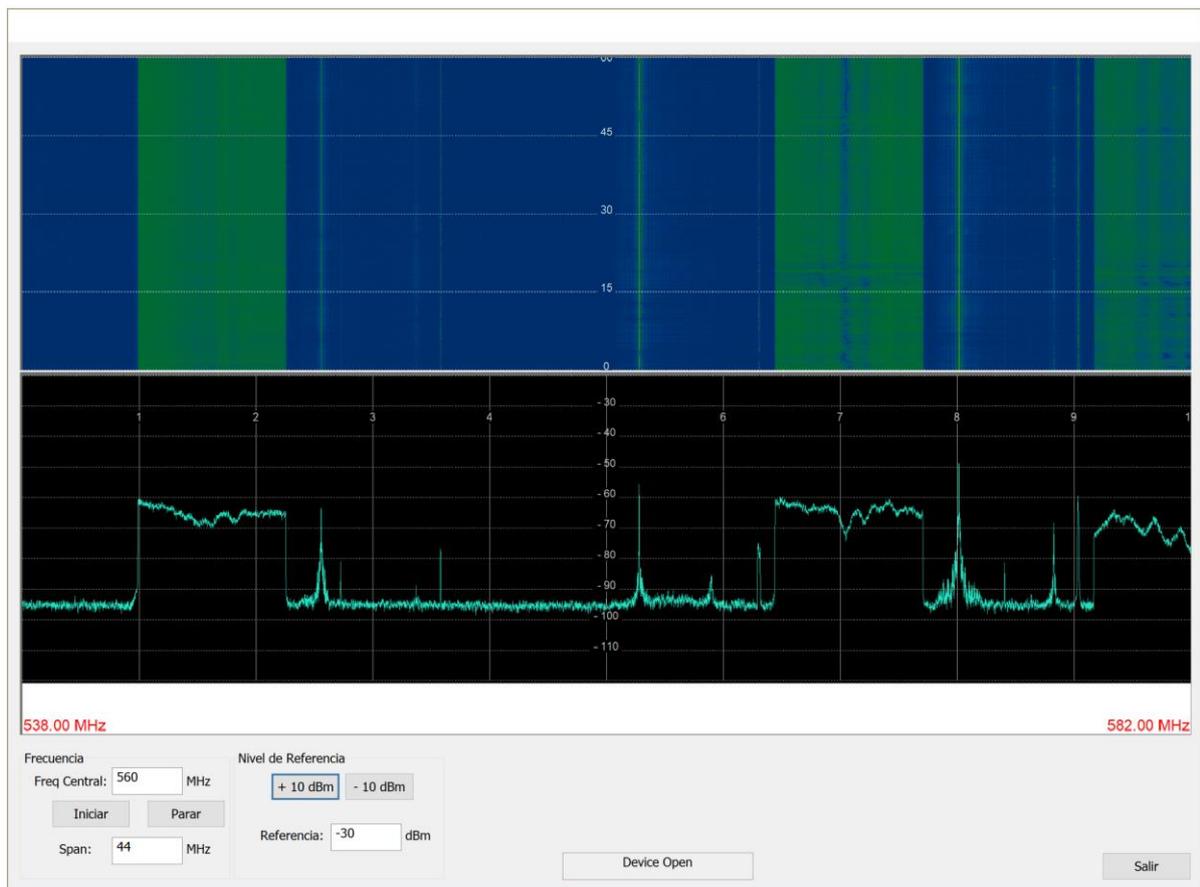
## 5.2. Pruebas finales con antena Discone

Las pruebas finales se realizaron con un computador HP Core-i7, el dispositivo Signal Hound y la antena Discone del sistema TCI como se observa en la Figura 27 :



**Figura 27** Realización de pruebas con la Antena Discone del Sistema TCI

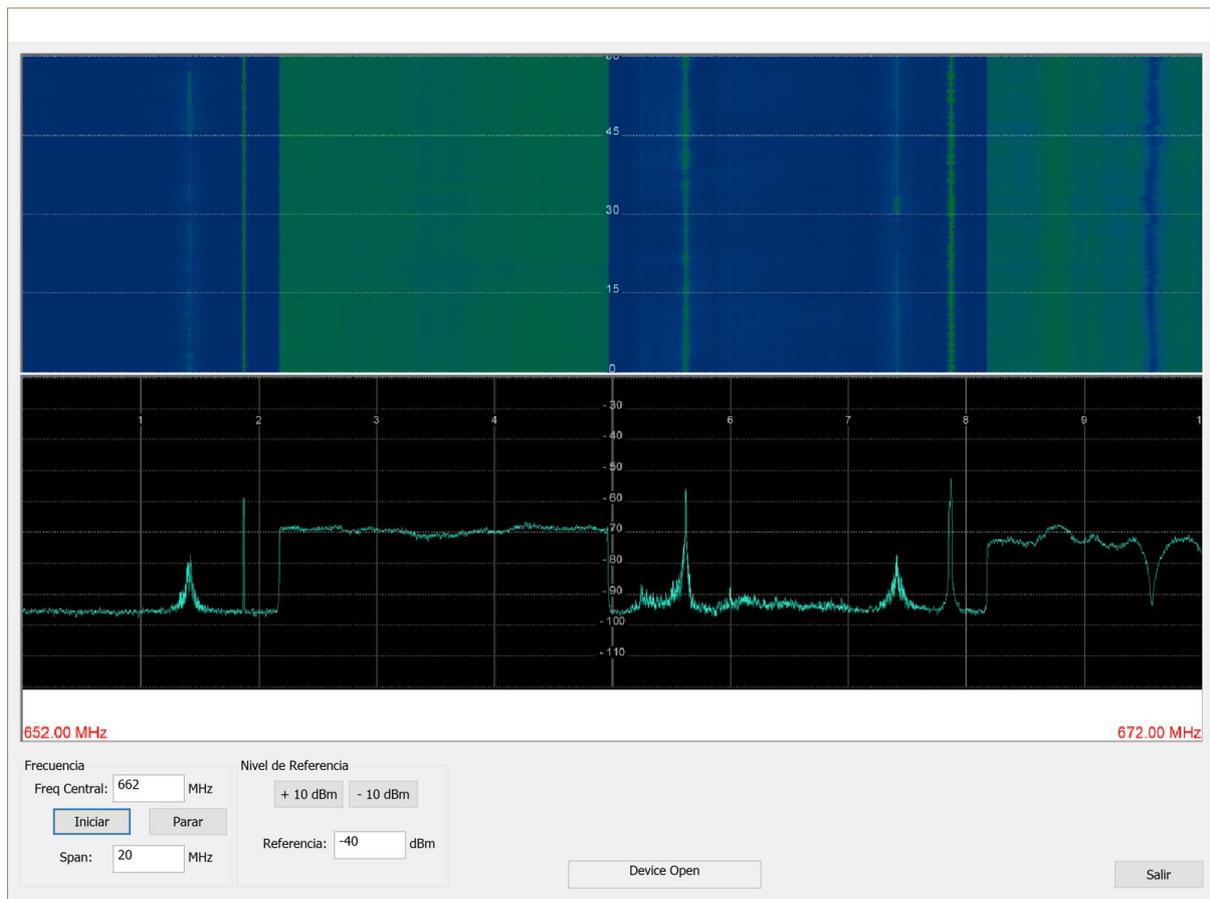
Al utilizar la antena omnidireccional del sistema TCI se realizaron pruebas en varias frecuencias y con diferentes anchos de banda instantáneo, donde se ingresan los parámetros de configuración como se muestra a continuación:



**Figura 28** Frecuencia central 560 MHz con Span de 44 MHz

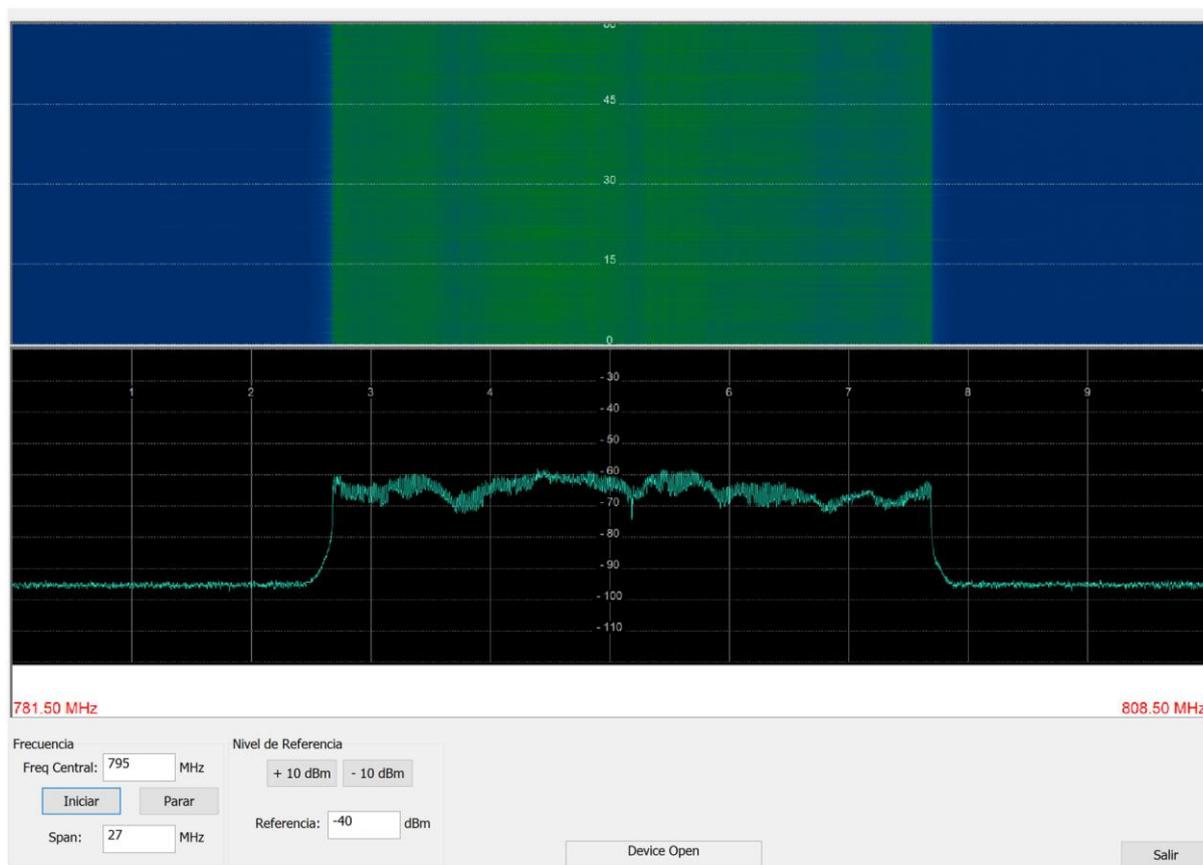
En la Figura 28 se puede visualizar una prueba de monitoreo en donde se ingresa una frecuencia central de 560 MHz y con un ancho de banda de 44 MHz, en donde se explicó anteriormente que para mostrar este ancho de banda, el aplicativo concatena dos anchos de banda instantáneo.

En la Figura 29 se puede observar un monitoreo del espectro radio eléctrico en la banda UHF, en donde se ingresa una frecuencia central de 662 MHz y un ancho de banda instantáneo de 20 MHz, es decir una frecuencia de inicial de 652 MHz y una frecuencia final de 672 MHz. En la parte superior se observa el sonograma en donde se visualiza las frecuencias en función del tiempo para un mejor análisis de las señales presentes en dicha banda.



**Figura 29** Frecuencia central 662 MHz con Span de 20 MHz

En la Figura 30 se puede observar un monitoreo del espectro con una  $f_c = 795$  MHz con un span de 27 MHz, en donde se visualiza las bandas de telefonía móvil.



**Figura 30** Frecuencia central 795 MHz con Span de 27 MHz

### 5.3. Análisis comparativo con el 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 radio eléctrico, el cual ha permitido realizar varias tareas de vigilancia y soporte electrónico dentro de todo lo que compete a guerra electrónica y a la defensa de la soberanía como tal, en lo que enmarca a las Operaciones Militares desarrolladas por el AGRUCOMGE; sin embargo, con el tiempo este sistema ha resultado obsoleto debido a varios factores que influyen en su procesamiento. En la Tabla 9 se establece una serie de parámetros sobre los cuales se compara al sistema Arturo y el sistema de monitoreo implementado en el presente trabajo.

**Tabla 9***Diferencias entre el Sistema Arturo y el sistema implementado.*

<b>Característica</b>	<b>Sistema Arturo</b>	<b>Sistema de monitoreo implementado</b>
<b>Actualización de pantalla</b>	3 veces/s	Se puede lograr hasta 60 veces/s
<b>Resolución de traza</b>	401 puntos	Varía de acuerdo al span (sobrepasa los miles de puntos)
<b>Tiempo de toma de muestra</b>	300 ms	1,125 ms (27 MHz)
<b>Velocidad de barrido</b>	300 MHz/s	24 GHz/s

De esta forma se comprueba que el sistema de monitoreo implementado supera en gran proporción al sistema Arturo gracias a la utilización del receptor digital BB60C que cuenta con varias prestaciones que incluye la digitalización de sus componentes I y Q a una alta tasa de muestreo.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- La interacción lograda entre la antena discone del sistema TCI, el receptor digital BB60C (anchos de banda instantáneos 27 MHz y sin límites de monitoreo dentro de la banda de 9 KHz – 6 GHz) y el software del sistema Arturo, ha permitido dotar a las Fuerzas Armadas de un sistema de inteligencia de señales de nueva generación a un costo que no sobrepasa los 8000 USD dólares de norte américa.
- El sistema de monitoreo logrado permite interactuar en tiempo real y obtener resultados a una tasa de 24GHz/s, lo cual comparado con el sistema Arturo del AGRUCOMGE representa un desempeño superior de 80 veces ya que éste solo permite monitorear a una tasa de 300MHz/s. Además, el sistema de monitoreo implementado no solo permite anchos de banda instantáneos de 27 MHz, sino que permite colocar anchos de banda de acuerdo a las necesidades operativas.
- La visualización de la señal mejora significativamente, ya que se puede actualizar la pantalla hasta 60 veces/s, sobrepasando en 20 veces a las 3 veces/s que actualiza la pantalla el actual sistema Arturo.
- El sistema de monitoreo implementado brinda una mayor sensibilidad, ya que el receptor digital BB60C cuenta con un rango de sensibilidad de -158 dBm a +10 dBm, lo cual ayuda a tener más probabilidad de receptar señales de largas distancias.
- Se logra una mayor resolución, ya que en el actual sistema Arturo cuenta siempre con 401 puntos; mientras que, en el sistema de monitoreo implementado en este

trabajo, el número de puntos incrementa a medida que el span también aumenta, teniendo una relación proporcional pero no lineal.

- El sistema de monitoreo implementado utiliza una traza para la obtención de las señales de RF, dentro del span de búsqueda, ya que si se utilizan más trazas y se procede a sacar un promedio de las mismas es muy probable que se pierdan las señales con salto en frecuencia cuya duración es muy corta, las cuales son de suma importancia dentro de la guerra electrónica.

## **6.2. Recomendaciones**

- Desarrollar la doctrina de empleo del sistema de monitoreo, en base a las nuevas amenazas existentes a la soberanía de nuestro país, esto implica también desarrollar el sistema de transporte sea manual, móvil o transportable, puesto que el peso del sistema no pasa de los 5 Kg que incluye el computador, la antena omnidireccional Discone y el receptor digital BB60C.
- Es importante siempre verificar previamente el correcto funcionamiento de la antena a utilizar a través de la obtención de los parámetros S y otro tipo de pruebas que se pueden realizar para asegurar que el monitoreo se realizará de forma coherente y eficaz.
- Se recomienda al AGRUCOMGE poner en funcionamiento el nuevo sistema de monitoreo implementado, debido a todas las prestaciones que brinda, además de las mejoras significativas con las que cuenta en comparación al actual sistema Arturo.
- Integrar el presente proyecto con el sistema de DF desarrollado en otro proyecto de grado.

- Para futuros trabajos de guerra electrónica recomendamos la utilización de receptores digitales que monitoreen el espectro hasta a 1THz/s y con anchos de banda instantáneos de 160 MHz que se encuentran disponibles en el mercado a partir del 2019.

### **6.3. Trabajos futuros**

- El presente trabajo de titulación permite el monitoreo en tiempo real; a futuro se puede implementar un proceso de grabación de las componentes I y Q que permita un análisis posterior de las señales con más profundidad y detenimiento con el objetivo de demodularlas y decodificarlas.
- El sistema desarrollado se basa en un (01) receptor digital, por lo que un trabajo futuro es agregar receptores, hasta N receptores digitales, al menos 5, para incrementar la POI para señales que estén presentes menos de 1,125 ms, así como aplicar técnicas de alta resolución para determinar el ángulo de arribo en tiempo real. Es claro, que todos los receptores deben estar en fase y para ello el BB60C tiene una referencia externa de 10 MHz para este fin.

## BIBLIOGRAFÍA

- Test equipment Solutions, Ltd., (Abril de 2008). *VNA Master MS2024A/MS2026A and MS2034A/MS2036A*. Obtenido de <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/ANRITSU-MS2036A-Datasheet.pdf>
- Adamy, D. (2000). *EW 101: A First Course in Electronic Warfare*.
- ARCOTEL. (2017). *Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones*. Obtenido de Plan Nacional de Frecuencias 2017: [https://issuu.com/arcotelecuador/docs/pnf-final\\_1\\_](https://issuu.com/arcotelecuador/docs/pnf-final_1_)
- ARCOTEL. (12 de Septiembre de 2017). *Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones ARCOTEL*. Obtenido de Espectro Radioeléctrico: <http://www.arcotel.gob.ec/espectro-radioelectrico-2/>
- Colombo, J. (2012). *Medición de Parámetros de Dispersión "S"*. Obtenido de Análisis y mediciones de los parámetros de dispersión en un cuadripolo o en una red de n puertos: [file:///C:/Users/PC/Downloads/341214887.Par%C3%A1metrosS-FRT-UTN30-04\\_12.pdf](file:///C:/Users/PC/Downloads/341214887.Par%C3%A1metrosS-FRT-UTN30-04_12.pdf)
- Gewerbegebiet Aaronia AG II. (2015). *Aaronia AG*. Obtenido de Ultra Broadband Antenna OmniLOG 70600: <https://www.aaronia.com/products/antennas/OmniLOG-70600-Omni-Directional-Antenna/>
- Haykin, S. (2014). *Digital Communication Systems*.
- Jarpa Martínez, P. (2013). *Guerra Electrónica*. Santiago, Santiago, Chile: Departamento de Investigación y Desarrollo de la Academia Politécnica Militar del Ejército de Chile.
- Jayant , N., & Noll, P. (1984). *Digital coding of waveforms. Principles and Applications to Speech and Video*. Estados Unidos de América: Prentice Hall.
- Jiménez, R. (26 de noviembre de 2018). *Grupo de estudios en seguridad internacional, Universidad de Granada*. Obtenido de Tipos de Inteligencia: <http://www.seguridadinternacional.es/?q=es/print/1536>
- Laster, C. (1985). *Guía del radioaficionado principiante*. Barcelona: Marcombo.
- Michavila, B. (1984). *La guerra electrónica y la electrónica en la guerra*. Madrid: Imprenta del Ministerio de Defensa.
- Mini Circuits. (2010). *Return loss Vs. VSWR*. Obtenido de Return loss Vs. VSWR: <https://www.minicircuits.com/pages/pdfs/dg03-110.pdf>
- Prieto del Val, T. F. (18 de julio de 2014). *Instituto Español de Estudios Estratégicos*. Obtenido de La inteligencia militar, una constante histórica.
- Schleher, C. (1986). *Introduction to Electronic Warfare*. Norwood: Bookcrafters.
- Self, A. (2003). *Probability of intercept*.
- Signal Hound, Inc. (2015). *BB60A and BB60C Application Programming Interface (API). Programmers Reference Manual*. Obtenido de <http://www.signalhound.eu/download/BB60-API-Manual.pdf>

- Signal Hound, Inc. (2015). *BB60C - 6 GHz Real-time Spectrum Analyzer*. Obtenido de BB60C - 6 GHz Real-time Spectrum Analyzer: <https://signalhound.com/about-us/contact-us/>
- Signal Hound, Inc. (2019). *BB60C Spectrum Analyzer User Manual*. Obtenido de <https://signalhound.com/sigdownloads/BB60C/BB60C-User-Manual.pdf>
- Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica de España. (2009). *La Guerra Electrónica en España*. Madrid: Imprenta del Ministerio de Defensa.
- Suárez, C., Carrol, J., & Puerto, G. (Junio de 2016). *Antena Compacta para Aplicaciones en Satélites de Reducido Tamaño*. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v27n3/art18.pdf>
- TCI. (s.f.). *TCI Modelo 641*. Obtenido de Sistema de Monitorización de Espectro Compacto y Geolocalización Híbrida: <https://www.tcibr.com/product/tci-model-641-vhfuhf-df-and-spectrum-monitoring-antenna/>
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Prentice Hall.
- Trujillo, D. (10 de Junio de 2013). *Traduciendo la Realidad*. Obtenido de Guerra de 5<sup>a</sup> Generación; la conquista de las mentes: <http://lugrogeopolitica.blogspot.com/2013/06/guerra-de-5-generacion-la-conquista-de.html>
- Tsui, J. (1995). *Digital Techniques for Wideband Receivers*. Artech House, INC.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2016). *Reglamento de Radiocomunicaciones*. Obtenido de Reglamento de Radiocomunicaciones: <http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.es.301.pdf>
- Universidad Pública de Navarra. (s.f.). *Teoría de la Comunicación*. Obtenido de <https://studylib.es/doc/92248/teor%C3%ADa-de-la-comunicaci%C3%B3n.-se%C3%B1ales-y-sistemas-paso-banda>