



**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 DF PARA LA BANDA DE  
80 MHz – 2 GHz.**

**AUTORES:**

**ANDRADE BURBANO, SANTIAGO ROBERTO**

**MACHADO SOTO, PAÚL FERNANDO**

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

**SANGOLQUÍ**

**2019**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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 DF PARA LA BANDA DE 80MHz - 2GHz**" fue realizado por los señores **Andrade Burbano, Santiago Roberto** y **Machado Soto, Paúl Fernando** 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 sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de julio del 2019

**Ing. León Vásquez Rubén Darío**  
C.C:1801654284



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Andrade Burbano, Santiago Roberto* y *Machado Soto, Paúl Fernando*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Desarrollo de un Sistema de DF para la banda de 80MHz – 2GHz* 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, 19 de julio del 2019

**Andrade Burbano Santiago Roberto**  
C.C. 1002510533

**Machado Soto Paúl Fernando**  
C.C 0603798968



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN**

*Nosotros, Andrade Burbano, Santiago Roberto y Machado Soto, Paúl Fernando autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Desarrollo de un Sistema de DF para la banda de 80MHz – 2GHz en el Repositorio Institucional**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Sangolquí, 19 de julio del 2019

**Andrade Burbano Santiago Roberto**  
C.C. 1002510533

**Machado Soto Paúl Fernando**  
C.C 0603798968

## DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a Dios,  
ya que gracias a él he logrado concluir mis objetivos.

A mis padres, porque ellos siempre estuvieron  
a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos  
para hacer de mí una persona y un profesional.

A mis hijos porque siempre han sido mi razón  
de seguir adelante y lucha por un futuro mejor.

Y en si toda mi familia ya que gracias a ellos de una u otra manera  
han contribuido para el logro de mis objetivos.

*Para ustedes con mucho cariño.*

***Santiago Andrade***

## **DEDICATORIA**

Este sueño cumplido lo quiero dedicar en primer lugar a Dios, quien ha sido la guía de mi vida con sus bendiciones, enseñanzas, sabiduría y me ha dado la salud para alcanzar este objetivo.

A mis padres que siempre me han apoyado con sus consejos en mi vida y en mis estudios para lograr mis metas profesionales, siendo un soporte fundamental y un ejemplo de superación.

A mi esposa Priscila por su paciencia durante estos últimos cinco años, ya que su apoyo en los largos días de trabajo y noches de estudio me han permitido continuar y finalizar esta meta profesional.

A mis hijos, quienes con su amor y compañía han sido mi inspiración ya que todos los días renuevan mi espíritu para mejorar y seguir adelante.

*Para ustedes con mucho cariño.*

***Paúl Machado***

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que hacen el CICTE, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a todo el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Ing. Rubén León, al Ing. Alex Tinoco y al Ing. Héctor Moya, principales colaboradores durante todo este proceso, quienes con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitieron el desarrollo de este trabajo.

*Gracias a todos de corazón*

*Santiago Andrade*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por todas las bendiciones recibidas en mi vida profesional y en el crecimiento de mi familia, lo que me ha permitido alcanzar este gran objetivo.

Al Ing. Rubén León y al Ing. Alexis Tinoco por el apoyo, el tiempo, la guía y la paciencia, en el desarrollo de este proyecto de investigación.

Al Ing. Héctor Moya por su tiempo y conocimientos compartidos para desarrollar e implementar el presente proyecto de investigación.

A mi familia por su apoyo incondicional durante el transcurso de esta carrera profesional.

Al Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Ejército que nos abrió las puertas para incrementar nuestros conocimientos y nos ha dado las facilidades para desarrollar este proyecto de investigación.

A todos los directivos, docentes, compañeros y amigos de la universidad que han sido parte de mi educación profesional durante estos años y que de una u otra manera han permitido alcanzar este objetivo.

*Gracias a todos de corazón.*

***Paúl Machado***



**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACION .....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>vi</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación e Importancia .....	2
1.2. Alcance del Proyecto.....	3
1.3. Objetivos....	4

1.3.1. General.....	4
1.3.2. Específicos.....	4
1.4. Resumen de Contenidos.....	5
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. Guerra Electrónica. ....	7
2.1.1. Clasificación y Características de Guerra Electrónica. ....	8
2.2. Detección e Identificación de Señales.....	10
2.3. Señales Electromagnéticas en Aplicaciones Militares. ....	10
2.3.1. Ondas Electromagnéticas. ....	10
2.3.1. Comunicaciones militares .....	11
2.4. DF ( <i>Direction Finding</i> ).....	12
2.4.1. Requerimientos de un Sistema DF. ....	13
2.4.2. Elementos o componentes de un Sistema DF.....	14
2.5. El Ángulo de Arribo (AoA). ....	15
2.5.1. Técnicas de Medición del Ángulo de Arribo. ....	16
2.6. Algoritmos de "High Resolution".....	19
2.6.1. Métodos de Estimación basados en Espectro Espacial. ....	21
2.6.2. Métodos Basados en Sub-Espacio.....	25
2.7. Receptores.....	34

2.7.1. Receptor Sintonizado.....	34
2.7.2. Receptor Superheterodino. ....	35
2.7.3. Receptor Digital.....	37
2.8. Digitalización de Señales Pasabandas.....	39
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>43</b>
<b>3. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN (DF) DE SEÑALES RADIOELÉCTRICAS.....</b>	<b>43</b>
3.1. Diseño.....	43
3.2. Descripción del Arreglo circular de nueve antenas direccionales.....	45
3.3. Parámetros S de la antena direccional.....	45
3.3.1. Obtención de parámetros <b>S</b> .....	46
3.4. Descripción del receptor digital. ....	50
3.5. Operación del Receptor Digital BB60C y Arreglo Circular de Antenas. ....	52
3.6. Simulación de las características de la antena.....	58
3.7. Conmutación del arreglo circular de antenas. ....	62
3.8. Comunicación con el Signal Hound BB60C.....	66
3.8.1. Requisitos de la PC para que opere el SDK: .....	67
3.9. Obtención del Ángulo de Arribo .....	67
3.10. Entorno de programación.....	69
3.10.1. Lenguaje C++.....	69

3.10.2. Microsoft Visual Studio ® .....	70
3.11. Diseño de Software.....	71
3.11.1. Clases principales.....	71
3.11.2. Interfaz gráfica.....	73
3.12. Pruebas del Sistema.....	73
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>80</b>
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>80</b>
4.1. Recepción de Señales Radioeléctricas.....	80
4.2. Comportamiento del arreglo de antenas.....	83
4.3. Ángulo de Arribo .....	85
4.4. Pruebas de Uso con la interfaz gráfica.....	90
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>91</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>91</b>
5.1. Conclusiones .....	91
5.2. Recomendaciones.....	93
5.3. Trabajos Futuros.....	94
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>96</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Tabla de Relación de Ondas Estacionarias (SWR, Standing wave ratio)</i> .....	49
<b>Tabla 2</b> <i>Especificaciones técnicas del Signal Hound BB60C.</i> .....	51
<b>Tabla 3</b> <i>Código de programación para conmutación de antenas direccionales.</i> .....	65
<b>Tabla 4</b> <i>Descripción y funcionalidad de las clases utilizadas.</i> .....	72
<b>Tabla 5</b> <i>Resultados de pruebas en campo.</i> .....	75
<b>Tabla 6</b> <i>Tiempo de ejecución de acuerdo al número de trazas.</i> .....	84
<b>Tabla 7</b> <i>Relación de la antena con mayor radiación y su antena vecina derecha.</i> .....	87
<b>Tabla 8</b> <i>Relación de la antena con mayor radiación y su antena vecina izquierda.</i> .....	88
<b>Tabla 9</b> <i>Ángulo de arribo en varios puntos.</i> .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i><b>Figura 1</b></i> Clasificación de la Guerra Electrónica. ....	9
<i><b>Figura 2</b></i> Propagación de ondas en el espacio.....	11
<i><b>Figura 3</b></i> Componentes de un sistema de DF.....	14
<i><b>Figura 4</b></i> Ángulo de arribo de señales de radio.....	15
<i><b>Figura 5</b></i> Ángulos de un sistema DF.....	16
<i><b>Figura 6</b></i> Técnica de DF a través de magnitud del lóbulo de radiación.....	17
<i><b>Figura 7</b></i> Interferómetro con 3 elementos.....	18
<i><b>Figura 8</b></i> Correlación mediante evaluación.....	19
<i><b>Figura 9</b></i> Arreglo de M elementos con D señales de recepción.....	20
<i><b>Figura 10</b></i> Estructura el haz clásico (Beamforming).....	21
<i><b>Figura 11</b></i> Construcción de 3 doublets.....	31
<i><b>Figura 12</b></i> Diagrama de bloques de un receptor sintonizado.....	34
<i><b>Figura 13</b></i> Diagrama de bloques de un receptor Superheterodino.....	35
<i><b>Figura 14</b></i> Arquitectura del Receptor Digital Canalizado.....	37
<i><b>Figura 15</b></i> Receptor Digital de Guerra electrónica controlado por eventos.....	38
<i><b>Figura 16</b></i> Representación de Fourier de una señal pasabanda.....	40
<i><b>Figura 17</b></i> Frecuencia de muestreo mínima para una señal de pasabanda.....	41
<i><b>Figura 18</b></i> Diagrama del diseño propuesto del sistema de DF.....	44

<b>Figura 19</b> Arreglo de 9 antenas direccionales. ....	45
<b>Figura 20</b> Red de dos puertos. ....	46
<b>Figura 21</b> Analizador Vectorial ANRITSU. ....	47
<b>Figura 22</b> Medición de parámetros S sin Domo. ....	47
<b>Figura 23</b> Medición de parámetros S con Domo. ....	48
<b>Figura 24</b> Analizador de espectro Signal Hound BB60C. ....	51
<b>Figura 25</b> Software Spike. ....	52
<b>Figura 26</b> Arreglo de Antenas circulares TCI. ....	53
<b>Figura 27</b> Sistema mecánico de rotación 0° a 360°. ....	54
<b>Figura 28</b> Arduino UNO. ....	55
<b>Figura 29</b> Dispositivo de medición de potencia de la señal recibida. ....	56
<b>Figura 30</b> Antena con Polarización Vertical. ....	56
<b>Figura 31</b> Antena con Polarización Vertical. ....	56
<b>Figura 32</b> Diagrama de Irradiación mediante Polarización Horizontal. ....	57
<b>Figura 33</b> Diagrama de Irradiación mediante Polarización Vertical. ....	57
<b>Figura 34</b> Modelo de antena simulado en el programa HFSS. ....	58
<b>Figura 35</b> Coeficiente de reflexión de la antena simulada en el programa HFSS. ....	59
<b>Figura 36</b> Patrón de radiación en 3D a 1GHz en el programa HFSS. ....	60
<b>Figura 37</b> Polarización horizontal con el prototipo y simulación con el software HFSS. ....	61
<b>Figura 38</b> Polarización vertical con el prototipo y simulación con el software HFSS. ....	61

<b>Figura 39</b>	Ancho de haz en Polarización horizontal. ....	61
<b>Figura 40</b>	Ancho de haz en Polarización vertical.....	62
<b>Figura 41</b>	Tarjeta SP8T de 8 entradas. ....	63
<b>Figura 42</b>	Módulo GPIO USB.....	64
<b>Figura 43</b>	Distribución de las antenas para la cobertura de 360°.....	68
<b>Figura 44</b>	Entorno Visual Studio 2015.....	71
<b>Figura 45</b>	Espectro de señal y espectrograma. ....	72
<b>Figura 46</b>	Pruebas prácticas en campo abierto.....	74
<b>Figura 47</b>	Resultados de prácticas realizados en campo abierto. ....	75
<b>Figura 48</b>	Prueba del DF con frecuencia 1GHz y azimut 90°.....	76
<b>Figura 49</b>	Prueba del DF con frecuencia 1GHz y azimut 180°.....	76
<b>Figura 50</b>	Prueba del DF con frecuencia 1GHz y azimut 270°.....	77
<b>Figura 51</b>	Prueba con 96.9MHz, Span 27MHz. ....	78
<b>Figura 52</b>	Resultado de 310° al transmisor de la emisora 96.9MHz.....	78
<b>Figura 53</b>	Azimut ejemplificado en la carta. ....	79
<b>Figura 54</b>	Ancho de haz en los diagramas de irradiación con Polarización Horizontal.....	81
<b>Figura 55</b>	Ancho de haz en los diagramas de irradiación con Polarización Vertical.....	82
<b>Figura 56</b>	Relación entre la antena central con sus antenas vecinas. ....	86



## RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolla un sistema de localización de señales radioeléctricas basado en el análisis de las técnicas de determinación del ángulo de arribo para encontrar la dirección (*Direction Finding* - DF) de arribo de una señal radioeléctrica de interés en la banda entre los 80 MHz hasta los 2 GHz, orientado al sector de la seguridad nacional, permitiendo a su vez una eficiente y efectiva respuesta de las unidades del Ejército. A través de este proyecto de investigación se pretende apoyar las operaciones militares de vigilancia y reconocimiento del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica (AGRUCOMGE). Inicialmente se realizará un estudio y análisis del estado del arte en relación a las metodologías existentes para la determinación del ángulo de arribo en la banda de 80 MHz a 2GHz. Posteriormente, se pretende integrar otras aplicaciones específicas de carácter militar para disponer de un sistema de detección, identificación, reconocimiento, seguimiento, discriminación y ubicación de un objetivo de interés en tiempo real. Con la finalidad de evaluar experimentalmente el sistema desarrollado, se utilizarán los recursos tecnológicos que se tiene a disponibilidad en el Centro de Investigación y Aplicaciones Militares (CICTE).

### **PALABRAS CLAVES:**

- **DIRECTION FINDING**
- **ANGULO DE ARRIBO**
- **GUERRA ELECTRÓNICA**
- **RECEPTORES DIGITALES**

## **ABSTRACT**

In the present project, a radioelectric signal localization system is developed based on the analysis of arrival angle determination techniques to find the direction (Direction Finding - DF) of arrival of a radio signal of interest in the band between  $80\text{MHz}$ . up to  $2\text{GHz}$ , oriented to the national security sector, allowing in turn an efficient and effective response from Army units. Through this research project it is intended to support the military operations of surveillance and recognition of the Communications and Electronic Warfare Grouping (AGRUCOMGE). Initially, a study and analysis of the state of the art will be carried out in relation to the existing methodologies for the determination of the arrival angle in the  $80\text{ MHz}$  to  $2\text{ GHz}$  band. Subsequently, it is intended to integrate other specific military applications to have a system of detection, identification, recognition, monitoring, discrimination and location of an objective of interest in real time. In order to experimentally evaluate the developed system, the technological resources available to the Military Research and Applications Center (CICTE) will be used.

### **KEY WORDS:**

- **DIRECTION FINDING**
- **ANGLE OF ARRIVAL**
- **ELECTRONIC WARFARE**
- **DIGITAL RECEIVERS**

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo nos permite visualizar la necesidad que posee el AGRUCOMGE (Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica) del Ejército Ecuatoriano de modernizar los sistemas de monitoreo, localización y determinación del AoA (Ángulo de Arribo), que fueron desarrollados por la Escuela Politécnica del Ejército en el año de 1995 por estudiantes y profesores de la Facultad de Ingeniería Electrónica, integrando un analizador de espectro superheterodino, adquirido por el CICTE (Centro de Investigaciones de Aplicaciones Militares de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE) a través del cual se monitorea el espectro radioeléctrico con el apoyo de un software propio denominado ARTURO, así como un subsistema de DF norteamericano TechComm. Como parte de este proyecto, se pretende incorporar al nuevo sistema, un moderno subsistema para la determinación del ángulo de arribo para la banda de  $80 \text{ MHz} - 2 \text{ GHz}$ .

El AGRUCOMGE en el desarrollo de las operaciones militares en el campo de las comunicaciones presenta la necesidad operativa y táctica de identificar, monitorear y determinar la ubicación y posicionamiento geográfico de las señales radioeléctricas emitidas dentro y fuera de nuestro territorio nacional, por grupos ilegales.

El CICTE en su calidad de centro de investigación y desarrollo de tecnologías para las Fuerzas Armadas y establecido como entidad de investigación de tecnologías para la defensa, gestión de proyectos de aplicación tecnológica y asesoramiento técnico especializado, permite

aportar a la actualización de los equipos y mejora de las capacidades tácticas y operativas de las Unidades Militares del Ejército, y para ello vio la necesidad de adquirir un receptor digital (no del tipo superheterodino, sino más bien canalizado) que permite análisis espectral en tiempo real vía USB a una laptop o computadora.

El receptor digital “Signal Hound BB60C” es ideal para realizar mediciones confiables y rápidas, ya sea para monitoreo de espectro, mediciones de RF y de microondas, búsqueda de interferencias, pruebas de EMC (Contramedidas Electrónicas) o mediciones de red inalámbrica y WiFi.

### **1.1. Justificación e Importancia**

El proyecto busca diseñar un sistema que permita localizar señales radioeléctricas mediante la determinación de su ángulo de arribo (AoA) para recuperar, modernizar y operativizar los sistemas existentes en el AGRUCOMGE; cumpliendo con todas las etapas de desarrollo de un proceso coherente de I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación).

Los principales inconvenientes que se presentan a la hora de usar sistemas ya existentes en el mercado de Guerra Electrónica son:

- Los altos costos económicos y alta reserva (propietarios de la industria de la defensa mundial) de los sistemas existentes,
- La carencia de soporte técnico,
- Baja o ninguna transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción,
- Premura y dificultad en obtener permisos de exportación de gobiernos extranjeros.

Contrariamente, el desarrollo en base a la investigación aplicada e ingeniería inversa pueden solventar estos inconvenientes a costos bajos y a su vez 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 búsqueda del AoA y la radio localización efectiva a través de la investigación y propio desarrollo pueden ser solventados dando como resultado mejores herramientas de guerra activa que sobre todo deben ser parte intrínseca y propietaria del sistema general de vigilancia y seguridad de un Estado.

Finalmente, el sistema a ser implementado implica desarrollar técnicas y algoritmos endógenos para determinar el AoA específico, en coordinación con el grupo de monitoreo (otro proyecto de grado desarrollado paralelamente), detección e identificación de las señales, para determinar la localización de señales radioeléctricas en la banda de 80MHz hasta los 2GHz de un objetivo específico dentro de múltiples objetivos.

## **1.2. Alcance del Proyecto**

El presente proyecto pretende brindar al AGRUCOMGE un sistema que permita determinar el ángulo de arribo de una señal radioeléctrica la cual puede ser emitida por un transmisor en algún lugar geográfico y que para nuestras tropas su localización sea desconocida. De la misma manera, se apoyará con el desarrollo de un software que facilitará el manejo del sistema al personal militar facilitando la observación, identificación y la localización de origen de la emisión de la señal radioeléctrica.

Es necesario acotar que el software desarrollado se fundamenta en el software ARTURO que ha venido siendo actualizado desde 1996 y se caracteriza por la facilidad de ser actualizado o a su vez rediseñado en función de la doctrina de empleo.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Desarrollar un sistema de localización de señales radioeléctricas a través del estudio y análisis de técnicas de determinación del ángulo de arribo (AoA) en la banda de 80MHz hasta 2GHz, para el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica (AGRUCOMGE) del Ejército Ecuatoriano, enfocado a incrementar la capacidad de respuesta de los sistemas de seguridad y vigilancia públicos.

#### **1.3.2. Específicos**

- Realizar el estudio y análisis del estado del arte en relación a las técnicas de determinación del ángulo de arribo (AoA).
- Desarrollar técnicas y algoritmos que permitan determinar el ángulo de arribo (AoA), enfocadas a localizar señales de radioeléctricas en la banda de 80MHz hasta los 2GHz 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 monitoreo, detección e identificación de múltiples señales, para obtener la información del objetivo que requiere ser ubicado, cumpliendo

con todas las fases del sistema, es decir; detección, identificación, reconocimiento, seguimiento, discriminación y ubicación del objetivo.

- Evaluar experimentalmente las técnicas desarrolladas para la localización de señales radioeléctricas utilizando los medios disponibles y poder extender los resultados a bandas de frecuencias superiores.

#### **1.4. Resumen de Contenidos**

El proyecto de investigación realizado consta de 5 capítulos organizados de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presenta el proyecto desarrollado, detallando la introducción, justificación e importancia, el alcance esperado y objetivos.

En el segundo capítulo contiene el fundamento teórico referente a una pequeña introducción al campo de la Guerra Electrónica, la detección de señales, los sistemas de DF (requerimientos y componentes), así como los algoritmos de las técnicas de medición del ángulo de arribo.

En el tercer capítulo se establece las consideraciones de diseño para la elaboración del prototipo para el sistema de localización de señales radioeléctricas (DF).

En el cuarto capítulo se describen las pruebas realizadas, de la misma forma se presentan resultados con sus respectivos algoritmos y procesos para cada una de las etapas descritas en el capítulo tres.

Por último, en el capítulo cinco se desarrollarán las conclusiones y recomendaciones que se evidenciaron durante el análisis de los resultados y el transcurso del proyecto de investigación a

través de las mediciones obtenidas de las pruebas que fueron realizadas, y posteriores trabajos a desarrollarse en el futuro.



## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Guerra Electrónica.

La Guerra Electrónica EW (*Electronic Warfare*) tuvo sus inicios cuando crearon un buscador de dirección (*Direction Finder*) de radio para obtener la posición del enemigo. Posteriormente, se crearon radares para la detección y localización de objetos hostiles contribuyendo de manera efectiva a las armas de artillería para realizar su defensa aérea (García & Castaño).

En la actualidad, la tecnología electrónica juega un rol muy importante en todas las operaciones militares ya que nos permite explotar, reducir o impedir el uso del espectro electromagnético en el campo de batalla con la finalidad de someter al adversario y a la vez utilizar el uso del espectro en beneficio propio.

A su vez los distintos equipos de comunicaciones que se utilicen en las operaciones militares deben garantizar la seguridad de las mismas con la característica que debe ser en tiempo real en todos los niveles y modalidades de combate.

Las técnicas y tecnologías que conducen a la construcción de dispositivos capaces de controlar electrónicamente un sistema de armas y al desarrollo de contramedidas, tienen el nombre de "guerra electrónica", (Neri, 1991).

Al final de las operaciones de guerra electrónica se mantendrá el control del espacio electromagnético, de las principales áreas de incidencia de la amenaza, el monitoreo permanente

de todo tráfico de comunicaciones y señales que permitan obtener información de interés y quedar en condiciones de ejecutar operaciones militares con medios técnicos.

### **2.1.1. Clasificación y Características de Guerra Electrónica.**

Los sistemas de Guerra Electrónica son utilizados por las fuerzas militares para proteger los recursos militares de las amenazas enemigas y este campo está básicamente establecido en tres aspectos:

- *Medidas de soporte electrónico (ESM)*: recopilan información sobre el entorno electrónico.
- *Contra medidas electrónicas (ECM)*: perturban los sistemas electrónicos del enemigo.
- *Contra contra medidas electrónicas (ECCM)*: protegen los equipos de las ECM.

Tomando en cuenta la irradiación de energía, el primer aspecto es considerado un sistema de Guerra Electrónica pasiva mientras que el segundo es considerado de guerra electrónica activa en vista de la presencia de emisión de energía para el jamming de equipos o sistemas enemigos (Ligña & Yaselga, 2011).

Los sistemas de interceptación de EW se pueden dividir en las siguientes categorías, tal como se muestra en la Figura 1:

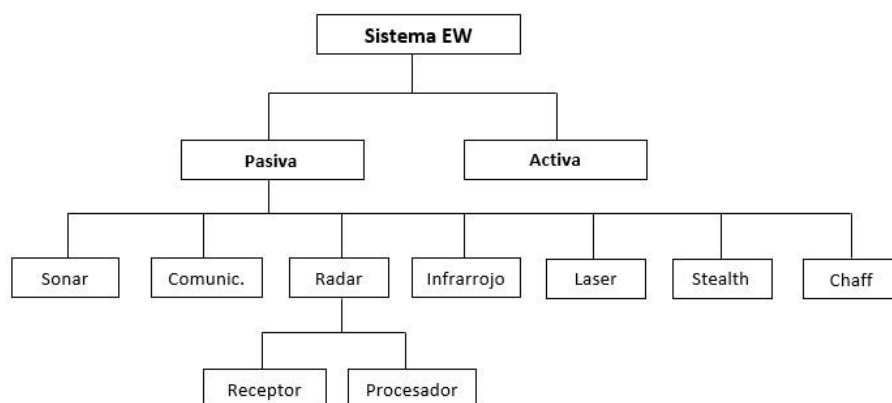
*Sistemas de detección acústica*: se usan para detectar las señales del sonar enemigo y del ruido del movimiento de la nave, se detectan a frecuencias menores a 30 kHz.

*Los receptores de interceptación de comunicaciones:* muy utilizados para la detección de la frecuencia de operación del enemigo, gran porcentaje de los mismos están diseñados para la interceptación de las comunicaciones satelitales.

*Receptores de interceptación de radar:* se utilizan para la detección de señales de radares enemigos, generalmente operan en el rango de 2 GHz a los 18 GHz y están diseñados para recibir señales pulsadas.

*Receptores de interceptación infrarrojo:* se utilizan para detectar la cabeza de un misil atacante, estos sistemas operan en el infrarrojo lejano cercano (longitud de onda de 3 a 15  $\mu m$ ).

*Los receptores de interceptación láser:* se utilizan para detectar señales láser, que se utilizan para guiar sistemas de armas.



**Figura 1** Clasificación de la Guerra Electrónica.  
Fuente: (Tsui, Digital Techniques for Wideband Receivers, 1995)

## 2.2. Detección e Identificación de Señales.

Las Fuerzas Armadas tienen a disposición varios sistemas de armas que cumplen diferentes funciones que ayudan a implementar la defensa y ataque electrónico, para evitar pérdidas de medios propios y para desgastar las fuerzas y medios del enemigo.

Uno de los objetivos de la utilización de las señales es para transmitir señales de mando y control a las unidades operativas, maniobrar durante el combate utilizando varios sistemas, así como también para obtener la ubicación y seguimiento de objetivos aéreos, terrestres o marítimos.

## 2.3. Señales Electromagnéticas en Aplicaciones Militares.

### 2.3.1. Ondas Electromagnéticas.

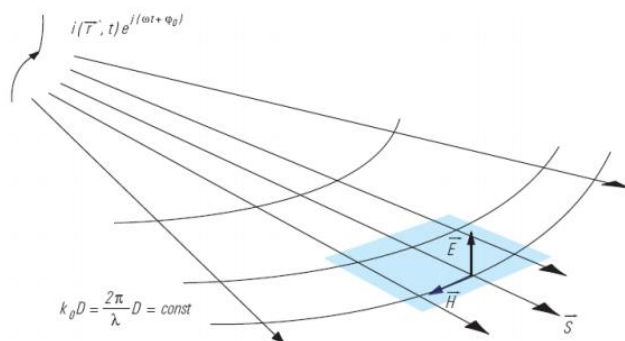
El vector densidad de radiación más conocido como Vector de Poyting define que los campos eléctrico y magnético son ortogonales, en fase uno con relación del otro, y a su vez perpendiculares respecto a la dirección de propagación de la onda. Se determina a través de la Ecuación ( 1 ) y que se ilustra en la Figura 2 (González Sánchez, 2007):

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \vec{e}_0 \frac{|\vec{E}|^2}{Z_0} \quad \text{Ecuación ( 1 )}$$

donde:

$|\vec{E}|$  = valor efectivo de la intensidad del Campo Eléctrico.

$Z_0$  = Impedancia característica en el espacio libre. ( $120 \pi \Omega$ ; o por  $\vec{e}_0 \frac{2\pi}{\lambda}$ )



**Figura 2** Propagación de ondas en el espacio.  
Fuente: (González Sánchez, 2007)

### 2.3.1. Comunicaciones militares

El Arma de Comunicaciones en el Ejército Ecuatoriano ha evolucionado y ha sobrepasado muchos inconvenientes; es así que haciendo una breve reseña histórica podemos encontrar su origen recordando a nuestros aborígenes con los conocidos Chasquis y su capacidad en la invención de mil artificios como medios de comunicaciones, ya sea utilizando el fuego y el humo como señales ópticas, valiéndose de bocinas, tambores y troncos huecos como señales acústicas, o empleando a los atléticos chasquis que fueron los mensajeros del imperio incaico. El mando militar consciente de la importancia de las comunicaciones en las operaciones militares ha realizado la adquisición de equipos de última generación complementando con la capacitación del personal cuya misión es instalar, operar y mantener los sistemas generales de comunicaciones del Ejército.

El arma de comunicaciones ha llegado a convertirse en lo que representa hoy “ARMA DEL MANDO” indispensable para el éxito en la conducción de las operaciones militares a todo nivel de forma competente, leal y llena de virtudes con su trabajo silencioso y honrado en beneficio de la institución.

Con el paso del tiempo, los medios y sistemas de comunicaciones se van actualizando y debido al tiempo y vigencia tecnológica de su equipamiento, su rendimiento disminuye sustancialmente. La vertiginosa evolución tecnológica que vivimos en esta era digital nos ofrece importantes adelantos científicos en este campo, condición que facilita una modernización y consecuentemente la eficiencia y eficacia de la denominada arma del mando

Las comunicaciones militares son una base fundamental en la estructura militar, y constituyen un apoyo primordial en la conducción de la defensa, cimiento y columna de la seguridad y desarrollo de toda nación.

#### **2.4. DF (*Direction Finding*).**

El DF (*Direction Finding*) tiene la capacidad de aportar a localizar la posición de una transmisión de radio enemiga usando antenas rotadas mecánicamente que comparan las intensidades de señal utilizando varias técnicas programables.

Dentro de lo que confiere a radares, la implementación de estas técnicas permite usar las ondas electromagnéticas para realizar la detección y medición de parámetros como distancia, altitud, dirección y velocidad de cualquier tipo de barco, avión, vehículo o tropas que se encuentren fijos o en movimiento.

El uso de dispositivos electrónicos permite proporcionar datos al puesto de mando de varias armas letales como la guía de misiles, inhibidores de señales, vehículos y aeronaves no tripulados u otros dispositivos que reciben órdenes impuestas o manejadas bajo el control de los operadores.

Las señales permiten realizar maniobras con un control adecuado del espacio aéreo utilizando sistemas de misiles aire-aire, tierra-aire, mar-aire, etc. Podemos utilizar sistemas de armas aerotransportadas, aviones de ataque para incursiones en territorio enemigo o sistemas de artillería antiaérea.

En lo concerniente a maniobras marítimas son empleadas para realizar la protección del tráfico marítimo y la protección de las costas ante un potencial ataque en mar abierto.

La explotación del espectro electromagnético es fundamental para el empleo de las tropas de infantería, unidades blindadas, artillería, ingeniería y abastecimientos logísticos e inclusive las aeronaves de la Aviación del Ejército, ya que podemos brindarles seguridad y control de sus operaciones en su área de operaciones.

#### **2.4.1. Requerimientos de un Sistema DF.**

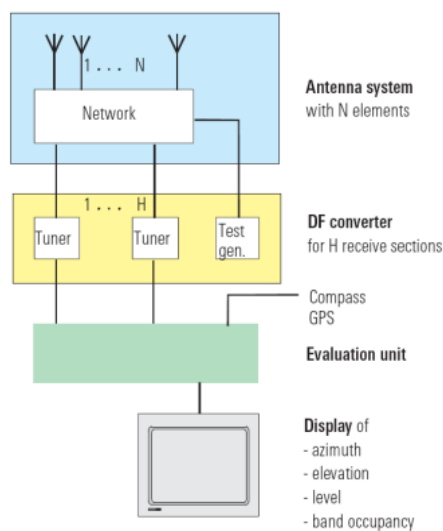
Se puede acotar los siguientes requerimientos como los más principales:

- Exactitud.
- Sensibilidad.
- Alta velocidad de escaneo.
- Inmunidad a señales disruptivas.

### 2.4.2. Elementos o componentes de un Sistema DF.

Conceptualmente un sistema de DF se puede conformar por los siguientes elementos, como se ilustra en la Figura 3:

- Antena o Arreglo de antenas.
- Convertidor DF (Receptores Sintonizados).
- Bloque de evaluación.
- Bloque de visualización.



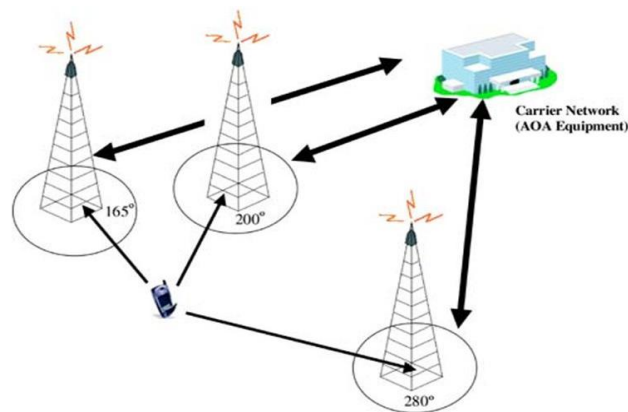
**Figura 3** Componentes de un sistema de DF.

Fuente: (González Sánchez, 2007)



## 2.5. El Ángulo de Arribo (AoA).

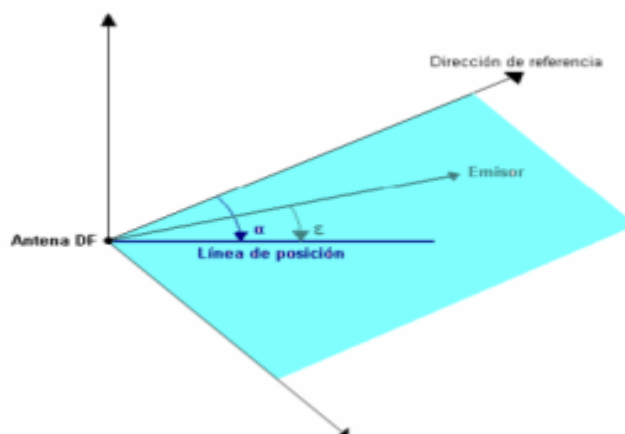
El ángulo de arribo es la determinación de un ángulo azimutal (desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$ ) con el cual se puede determinar con cierta precisión la ubicación exacta de emisiones de señales electromagnéticas como se observa en la Figura 4.



**Figura 4** Ángulo de arribo de señales de radio.  
Fuente : (ESPOL, s.f.)

El parámetro AoA es también el más difícil de medir, requiere una gran cantidad de antenas y receptores además de los circuitos de medición necesarios. Todas estas antenas y receptores deben estar emparejados, ya sea en amplitud o en fase.

Como se observa en la Figura 5, el azimut  $\alpha$  es determinado como el parámetro necesario e indispensable para la determinación de la dirección de llegada en un sistema de DF, establecido en una superficie fija mientras que para plataformas móviles es necesario la determinación del ángulo de elevación  $\epsilon$ .



**Figura 5** Ángulos de un sistema DF.

Fuente: (González Flores , 2004)

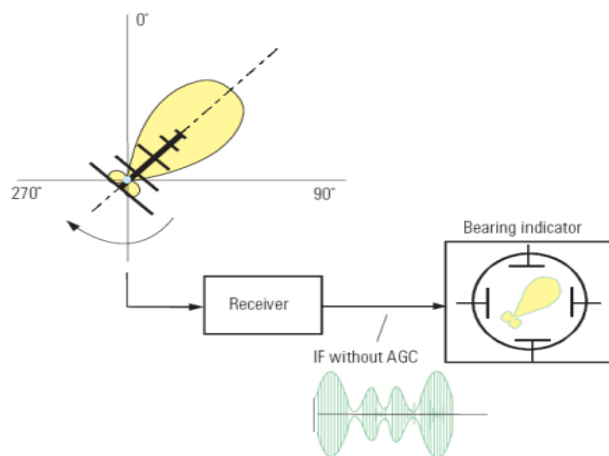
Con respecto a la determinación del AoA se ha experimentado efectivamente con la utilización de arreglos de antenas, los cuales proporcionan una determinada potencia por cada uno de los elementos del arreglo.

### 2.5.1. Técnicas de Medición del Ángulo de Arribo.

Existen diferentes enfoques para medir en Guerra Electrónica el AOA, pero la configuración más simple es organizar las antenas en un arreglo lineal, en donde cada antena existirá un receptor digital que digitalizará la entrada de la señal de Radiofrecuencia (RF). Este arreglo tiene dos dimensiones: tiempo y espacio. Cada receptor genera una serie temporal y en cualquier momento la señal es recibida de todos los sensores ubicados en el espacio. La señal de cada sensor se procesa para calcular el AoA.

### 2.5.1.1. Magnitud del Lóbulo de Radiación.

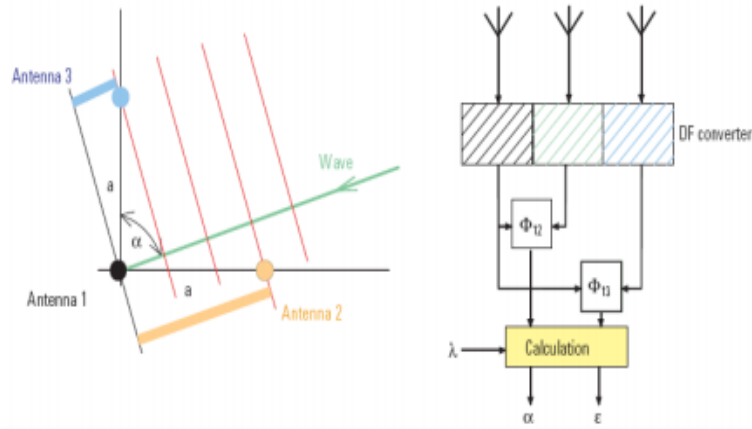
Este método de DF consiste en realizar la evaluación del valor de voltaje recibido mediante la utilización de una antena direccional la cual está girando mecánicamente con referencia de la dirección que proporciona la onda. A través de la aplicación de este método de DF se puede determinar que la dirección de la señal se deriva de la presencia del voltaje recibido en función del respectivo ángulo de la antena por el cual rota permitiendo que el patrón de radiación sea producido por el voltaje recibido, como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6** Técnica de DF a través de magnitud del lóbulo de radiación.  
Fuente: (González Sánchez, 2007)

### 2.5.1.2. Interferometría Correlativa.

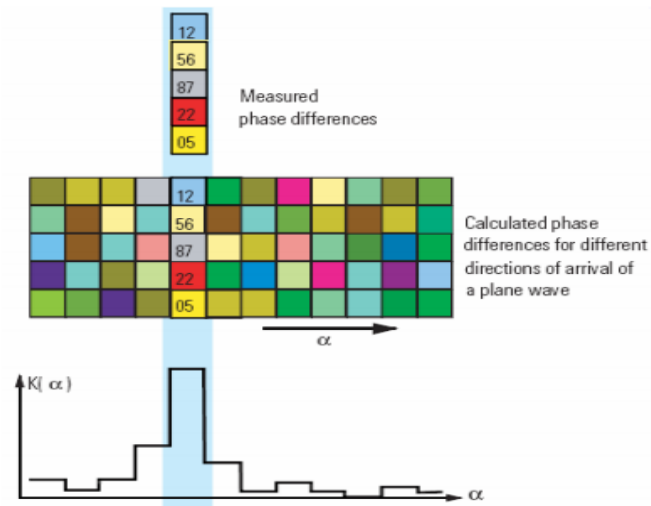
Se fundamenta en la determinación de la diferencia de fase de las señales recibidas por los sensores de un arreglo de antena. Estas diferencias de fase y geometría espacial de los sensores permiten determinar el ángulo de incidencia de la onda, conforme se ilustra en la Figura 7.



**Figura 7** Interferómetro con 3 elementos.

Fuente: (González Sánchez, 2007)

En la Figura 8 se puede observar la representación de un arreglo de 5 elementos, donde en la matriz cada columna de datos inferior está representada mediante un ángulo de onda  $\alpha$  y este a su vez forma un vector de la comparación realizada. La matriz de la parte superior presenta las medidas de fase tomadas que representará el vector de medida. La determinación de la dirección de incidencia viene calculada en razón de que cada columna de la matriz de referencia (inferior) va a estar correlacionada con el vector de media multiplicando y sumando los vectores elemento por elemento, dando la función de correlación  $K(\alpha)$  donde se puede evidenciar que alcanza su máximo en la coincidencia entre el vector de medida y el de comparación. (González Sánchez, 2007).



**Figura 8** Correlación mediante evaluación.  
Fuente: (González Sánchez, 2007)

## 2.6. Algoritmos de "High Resolution".

La finalidad de estos métodos es definir la función que nos permita determinar la información del ángulo de arribo respecto a máximos de potencia de las señales recibidas por el arreglo de antenas; esta función es conocida como Función Pseudo-Espectro  $P(\theta)$  (García Yáñez M. A., 2013).

En la Figura 9 se puede observar una cantidad de  $D$  señales las mismas que poseen diferentes ángulos de arribo y las cuales ingresan a un sistema de arreglo de  $M$  antenas y en donde cada señal que es recibida  $x_m(k)$  posee ruido gaussiano.

Finalmente, la salida está representada por:

$$y(k) = \bar{w}^T x(k), \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde:

$$\bar{w} = [w_1 w_2 \dots w_M]^T \quad \text{Ecuación ( 3)}$$

$$\bar{x}(k) = [\bar{a}(\theta_1) \bar{a}(\theta_2) \dots \bar{a}(\theta_D)]\bar{s}(k) + \bar{n}(k) \quad \text{Ecuación ( 4)}$$

Siendo:

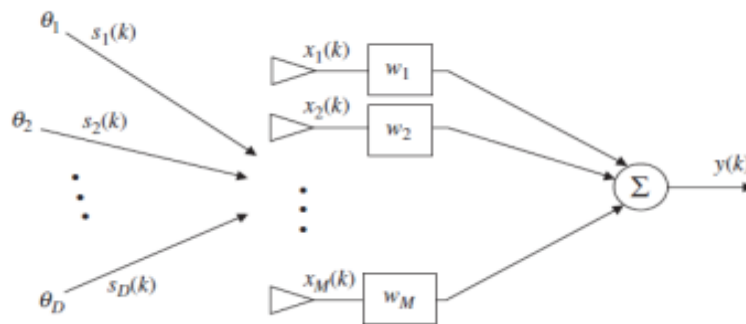
$\bar{s}(k)$  el vector de señales incidentes monocromáticas en un tiempo  $k$ .

$\bar{a}(\theta_1)$  el vector del arreglo para determinación del ángulo de arribo  $\theta_1$ .

$\bar{n}$  el vector de ruido por cada antena con características de promedio cero y varianza  $\sigma^2$ .

$\bar{w}$  el vector de pesos.

$\bar{z}^T$  es la transpuesta de la matriz  $\bar{z}$ .



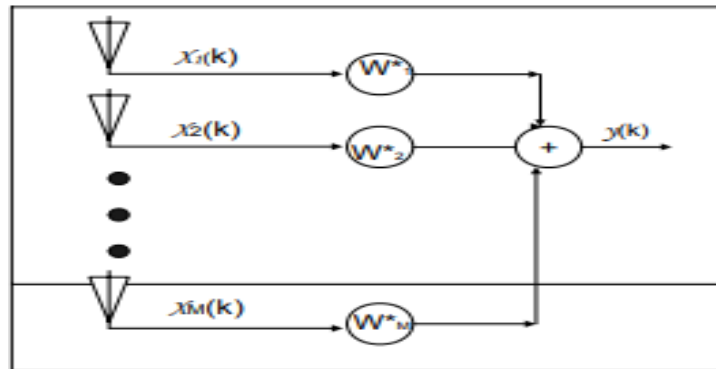
**Figura 9** Arreglo de M elementos con D señales de recepción.  
Fuente: (García Yáñez M. A., 2013)

### 2.6.1. Métodos de Estimación basados en Espectro Espacial.

Este tipo de métodos fundamentan su trabajo en dos fases, la primera calculando la densidad espectral de potencia de las señales que son recibidas por el arreglo de antenas, y en la segunda fase a través de la determinación de los puntos máximos que realice la estimación espectral (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008).

#### 2.6.1.1. Método Delay and Sum (DS).

Este método se caracteriza por la conformación clásica del haz mediante el procedimiento de Fourier. La estructura de este conformador de haz denominado Beamformer presenta una salida que es la combinación lineal de las señales recibidas por el arreglo de antenas, ilustrada en la Figura 10.



**Figura 10** Estructura el haz clásico (Beamforming).

Fuente: (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008)

La salida del sistema viene expresada por:  $y(k) = W^*X(t)$ , mientras que la densidad espectral de la potencia de salida del haz clásico viene expresada por las siguientes ecuaciones:

$$P_{DS} = E|y(t)|^2 \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$P_{DS} = E|W^* \cdot x(t)|^2 \quad \text{Ecuación ( 6)}$$

$$P_{DS} = W^* \cdot E|x^*(t) \cdot x(t)| \cdot W \quad \text{Ecuación ( 7)}$$

$$P_{DS} = W^* \cdot R_{xx} \cdot W \quad \text{Ecuación ( 8)}$$

La matriz de correlación  $R_{xx} = E|x^*(t) \cdot x(t)|$ , posee toda la información sobre la respuesta del arreglo y las señales que inciden al mismo.

En el caso que una señal arriba al arreglo con un ángulo  $\theta_0$  la densidad espectral de la potencia se representa como:

$$P(\theta_0) = E\{|W^* (A(\theta_0) \cdot S(t) + N(t)x(t))|^2\} \quad \text{Ecuación ( 9)}$$

$$P(\theta_0) = (|W^* \cdot a(\theta_0)|^2)(\sigma_s^2 + \sigma_n^2) \quad \text{Ecuación ( 10)}$$

donde:

$\sigma_s^2$  y  $\sigma_n^2$  son la potencia de la señal y del ruido respectivamente.

$a(\theta_0)$  es el vector director en referencia a la dirección de llegada  $\theta_0$ .

$N(t)$  es el vector de ruido.



### 2.6.1.2. Método de Capón o de Mínima Varianza

Denominado método de Respuesta sin Distorsión de Mínima Varianza y considerado una alternativa a la estimación de máxima Verosimilitud que presenta la señal que arriba al arreglo, en base a su potencia. Su principal objetivo es solventar los problemas que presenta el método de Atraso y Suma debido a la utilización de grados de libertad en la función de apuntalamiento del haz en la dirección de la señal escogida y creando nulos con los grados de libertad restantes en dirección de las señales no deseadas (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008).

Utilizando el método de Capón la determinación de la densidad espectral de potencia de un arreglo en función de la dirección de llegada está definida por la siguiente ecuación:

$$P = W^+ \cdot R_{xx} \cdot W \rightarrow P_{Cap}(\theta) = \frac{1}{\underline{a}^+(\theta) \cdot R_{xx}^{-1} \cdot \underline{a}(\theta)} ; \quad \text{con } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \quad \text{Ecuación ( 11)}$$

Mientras que la dirección de llegada se obtendrá a partir de la localización de los picos descritos en la curva proporcionada por la Ecuación ( 11 ).

$$\hat{\theta} = \text{argmax} P_{CAPON}(\theta) \quad \text{Ecuación ( 12)}$$

Finalmente se puede acotar que el método Capón establece que la densidad espectral de potencia obtenida  $P_{Cap}(\theta)$  corresponde a la estimación de la máxima verosimilitud que presenta una señal incidente en función de su potencia.

### 2.6.1.3. Método de Predicción Lineal.

El método de predicción lineal presenta como principal objetivo el de minimizar el error cuadrático medio de predicción que presenta entre la señal de transmisión por el m-ésimo elemento del arreglo de antena y la señal actual, en conclusión, el de encontrar el vector de pesos  $\underline{W}$  que minimice el *Error de Predicción Cuadrático Medio* (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008).

La densidad espectral de potencia viene definida por:

$$P(\theta) = \frac{\underline{u}_1^* \cdot R_{xx}^{-1} \cdot \underline{u}_1}{|\underline{u}_1 \cdot R_{xx}^{-1} \cdot \underline{a}(\theta)|^2} \quad \underline{u}_1 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad \text{Ecuación ( 13)}$$

### 2.6.1.4. Método de Estimación Máxima Entropía.

Para el desarrollo de este método es necesario maximizar la función de entropía y viene dado por: (García Yáñez M. Á., 2012)

$$H(s) = \int_{-fN}^{fN} \ln S(f) * df \quad \text{Ecuación ( 14)}$$

donde:

$fN$  es la frecuencia de Nyquist

$$H(P) = \int_{-fN}^{fN} \ln P_{ME}(\theta) * d\theta \quad \text{Ecuación ( 15)}$$

Aplicando la restricción a la integral:

$$R_{ij} = \int_{2\pi}^0 P_{ME}(\theta) * \cos(2\pi * \varphi_{ij}(\theta)) * d\theta \quad \text{Ecuación ( 16)}$$

donde:

$\varphi_{ij}$  = atraso entre sensor j e i

$R_{ij}$  = correlación entre sensor j e i

$$\hat{W} = \min H(w) = \min \int_0^{2\pi} \ln(W^T * q(\theta)) * d\theta \quad \text{Ecuación ( 17)}$$

$$\underline{q}(\theta) = [1\sqrt{2}\cos(2\pi f\varphi_{12}(\theta)) \dots]^T \quad \text{Ecuación ( 18)}$$

$$P_{ME}(\theta) = \frac{1}{\hat{W}^T * \underline{q}(\theta)} \quad \text{Ecuación ( 19)}$$

## 2.6.2. Métodos Basados en Sub-Espacio.

Estos métodos de estimación se caracterizan por explotar las características de la matriz de autocorrelación de la salida del arreglo de sensores, en los que el espacio barrido por los autovalores de la matriz, se dividen en dos sub-espacios: señal y ruido, los cuales son ortogonales entre ellos.

### 2.6.2.1. Método MUSIC (Multiple Signal Classification).

MUSIC (Método de Clasificación de Múltiples Señales) es considerado un método de alta resolución que se caracteriza por estimar el número de señales incidentes, ángulos de arribo y

puntos fuertes de las formas de onda y se fundamenta esencialmente en el análisis y descomposición de la matriz de las señales que inciden en el sistema; gracias a este método se puede proveer la suficiente información sobre el número de señales incidentes, la dirección de llegada de las señales y el nivel de ruido que presentan (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008).

Para lo cual asumimos que el arreglo está conformado por M sensores y K número de señales que inciden, la señal recibida puede ser expresada a través de la siguiente ecuación:

$$x(t) = \underline{A}(\theta) \cdot S(t) + N(t) \quad \text{Ecuación ( 20)}$$

La expresión  $\underline{a}(\theta_i)$  es el vector director y la agrupación de los mismos se denomina “Array Manifold”

$$\underline{A}(\theta) = [\underline{a}(\theta_0) \quad \underline{a}(\theta_1) \quad \dots \quad \underline{a}(\theta_{k-1})] \quad \text{Ecuación ( 21)}$$

$\underline{S}(t)$  representa el vector de las señales incidentes:

$$\underline{S}(t)^T = [S_0(t) S_1(t) \dots S_{k-1}(t)] \quad \text{Ecuación ( 22)}$$

$\underline{N}(t)$  representa el vector de ruido:

$$\underline{N}(t) = [N_0(t) N_1(t) \dots N_{M-1}(t)] \quad \text{Ecuación ( 23)}$$

Posteriormente se ubican en un espacio M dimensional a los vectores directores como también al vector recibido:

$$R_{xx} = \{X \cdot X^*\} \quad \text{Ecuación ( 24)}$$

$$R_{xx} = A \cdot E\{S \cdot S^*\}A^* + E\{N \cdot N^*\} \quad \text{Ecuación ( 25)}$$

$$R_{xx} = A \cdot R_{SS} \cdot A^* + \sigma_n^2 I \quad \text{Ecuación ( 26)}$$

Para la determinación de los sub-espacios se deberá inicializar encontrando los autovalores asociados mediante la siguiente ecuación:

$$|R_{xx} - \lambda_i I| = 0 \quad \text{Ecuación ( 27)}$$

Reemplazando:

$$|A \cdot R_{SS} \cdot A^* + \sigma_n^2 I - \lambda_i I| = |A \cdot R_{SS} \cdot A^* + (\sigma_n^2 - \lambda_i) I| = 0 \quad \text{Ecuación ( 28)}$$

En el caso que el número de señales incidentes sea menor que el número de elementos en el arreglo, la matriz de autocorrelación tendrá K autovalores diferentes de 0. Por tanto, los M-K autovalores representaran al ruido  $\sigma_n^2$ . Los autovalores de la potencia del ruido no son iguales cuando la matriz de autocorrelación empieza a ser estimada a partir de un conjunto finito de muestras, por lo que los M-K autovectores generan un sub-espacio sin ninguna contribución de señales de una fuente (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008).

Debido a esto la estimación de señales incidentes será necesario asociarlas mediante la utilización de sus autovectores (Para un  $\lambda_i$  existe un autovector  $b_i$ )

$$(R_{xx} - \lambda_i I) \underline{b}_i = 0 \quad \text{Ecuación ( 29)}$$

$$(R_{xx} - \sigma_n^2 I) = \underline{b}_i A R_{SS} A^* \underline{b}_i + \sigma_n^2 I \underline{b}_i - \sigma_n^2 I \underline{b}_i = 0 \quad \text{Ecuación ( 30)}$$

$$A \cdot R_{SS} \cdot A^* \cdot \underline{b}_i = 0 \quad \text{Ecuación ( 31)}$$

Al ser la matriz A de dimensión máxima y  $R_{SS}$  una matriz no singular, obtenemos:

$$A^* \cdot \underline{b}_i = 0 \quad \text{Ecuación ( 32)}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{a}^* (\theta_0) \cdot \underline{b}_i \\ \underline{a}^* (\theta_1) \cdot \underline{b}_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{a}^* (\theta_{k-1}) \cdot \underline{b}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación ( 33)}$$

Luego de este desarrollo podemos definir que se puede establecer los vectores directores en función de las señales que son recibidas, determinando que los autovectores poseen dos sub-espacios ortogonales entre ellos el del ruido y el de la señal.

Al definir el sub-espacio del ruido junto con sus autovectores tenemos:

$$E_n = \{ \underline{b}_K \underline{b}_{K+1} \dots \underline{b}_{M-1} \} \quad \text{Ecuación ( 34)}$$

Cuando el subespacio del ruido es perpendicular a las señales incidentes los ángulos de arribo a una fuente serán nulos a través de:

$$A^*(\theta) \cdot E_n E_n^* \cdot A(\theta) = 0 \quad \text{Ecuación ( 35)}$$

Finalmente se puede estimar la dirección de llegada de una señal incidente a través de la determinación de los picos del espectro espacial:

$$P(\theta) = \frac{1}{\underline{a}^* (\theta) \cdot E_n E_n^* \underline{a}(\theta)} \quad \text{para} \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad \text{Ecuación ( 36)}$$

Este método MUSIC presenta una característica esencial que es la de permitir una separación de los usuarios que se ubican próximos entre sí en momentos en que las fuentes de emisión de las señales no se encuentren correlacionadas, finalmente para encontrar la resolución del sistema se determinará en función de la cantidad de muestras que se utilicen, mientras más cantidad de muestras hayan sido tomadas mejor será el discernimiento entre los espacios ortogonales (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008).

### 2.6.2.2. Método Multidimensional MUSIC.

El presente método nació como una opción de solucionar el problema de multitrayectos, que representa una dificultad en la resolución del algoritmo en vista que provoca una degradación de este.

Por ello se ha concluido que es necesario que las señales coherentes deben ser reunidas en un solo grupo, el cual representará una sola señal a fin de evitar que la matriz de correlación sea singular.

Para la determinación de la densidad espectral de potencia utilizaremos la siguiente expresión:

$$P_{MD-MU}(\underline{\theta}_{mp}) = \min \{ \underline{c}^* \cdot \underline{a}^*(\underline{\theta}_{mp}) \cdot E_n \cdot E_n^* \cdot \underline{a}(\underline{\theta}_{mp}) \} \quad \text{Ecuación (37)}$$

donde:

$\underline{\theta}_{mp} = \theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_{L-1}$  representa los multitrayectos.

$\underline{c} = \left[ 1 \ \frac{c_1}{c_0} \ \frac{c_1}{c_0} \ \dots \ \frac{c_1}{c_0} \right]^T$  ponderación de un vector director.

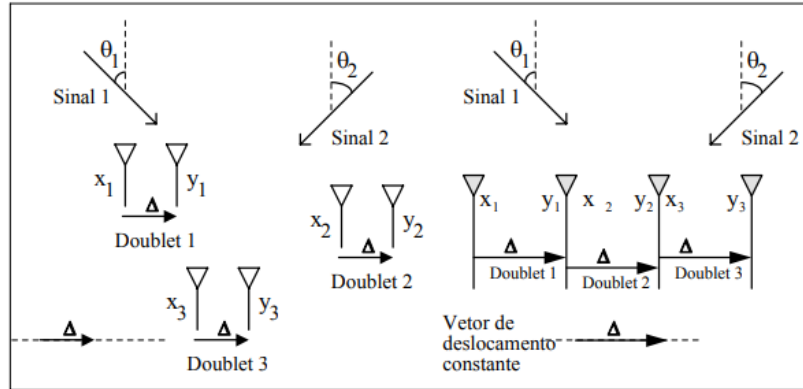
### 2.6.2.3. Método de estimación de parámetros de la señal vía técnica de invariancia al rotacional

#### **ESPRIT** (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique*)

Este método se caracteriza por poseer una capacidad computacional eficiente y bastante robusta en el desarrollo de encontrar la dirección de arribo.

Básicamente forma dos arreglos idénticos con la característica que estos deben formar doublets (par de antenas) y poseer un vector de desplazamiento idéntico  $\Delta$ , es decir el segundo elemento en cada par de antenas debe estar separado por la misma distancia, en la misma dirección relativa al primer elemento. Esto no significa que se deba tener dos o más arreglos separados. Por ejemplo, para determinar un arreglo lineal uniforme de 4 elementos, que se encuentran espaciados por una distancia  $d$ , básicamente puede ser determinado o representado por un conjunto de 3 doublets, como se evidencia en la Figura 11 (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008)





**Figura 11** Construcción de 3 doublets.  
Fuente: (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008)

La determinación de la invariancia tradicional del arreglo de antenas deberá ser constituida a través de dos sub-arreglos el  $Z_x$  y  $Z_y$  los cuales serán idénticos, pero presentarán un desplazamiento representado por el vector  $\Delta$ :

$$x_i(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \underline{a}_i(\theta_k) \cdot S_k(t) + \underline{n}_{xi}(t) \quad \text{Ecuación ( 38)}$$

$$y_i(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \underline{a}_i(\theta_k) \cdot S_k(t) \cdot e^{j2\pi f \frac{\Delta}{\lambda} \text{sen}\theta_k} + \underline{n}_{yi}(t) \quad \text{Ecuación ( 39)}$$

$\theta_k$  representa la dirección de llegada de la k-ésima señal en función del vector  $\Delta$ , y este será quien proporcione la dirección de referencia. En forma matricial tenemos:

$$X(t) = A \cdot S(t) + N_x(t) \quad \text{Ecuación ( 40)}$$

$$Y(t) = A \cdot \Phi \cdot S(t) + N_y(t) \quad \text{Ecuación ( 41)}$$

donde:

$S(t)$  vector con  $K$  señales que inciden.

$\Phi$  matriz diagonal k.k, relaciona las medidas del sub-arreglo  $Z_x$  y  $Z_y$ .

Por tanto, la salida del arreglo que definida por la siguiente matriz:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A \cdot \Phi \end{bmatrix} \cdot S(t) + \begin{bmatrix} N_x(t) \\ N_y(t) \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación ( 42)}$$

$$Z(t) = A \cdot S(t) + N_z(t) \quad \text{Ecuación ( 43)}$$

El sub-espacio comentado anteriormente contiene la salida de los sub-arreglos  $Z_x$  y  $Z_y$ . A través de la salida  $Z_x$  obtenemos el conjunto de valores llamado  $E_x$  mientras que la salida  $Z_y$  el conjunto de vectores  $E_y$ .

Podemos a su vez también definir a través de la matriz de covarianzas el sub-espacio de la señal como se indica a continuación:

$$R_{zz} = E\{\underline{z}(t) \cdot \underline{z}^+(t)\} = \tilde{A} \cdot R_{ss} \cdot \tilde{A}^+ + \sigma^2 I \quad \text{Ecuación ( 44)}$$

Los  $M-K$  menores autovalores son iguales a  $\sigma^2$  y los  $K$  autovectores,  $E_s = [\underline{e}_1, \dots, \underline{e}_k]$  asociados a los  $K$  mayores autovalores son usados para obtener el sub-espacio de la señal. Mientras  $E_x$  y  $E_y$  son dos matrices de dimensión  $M \cdot K$ , con sus columnas formadas por los  $K$  autovectores correspondientes a los  $K$  autovalores de las matrices de correlación de la salida de los arreglos

$R_{xx}$  y  $R_{yy}$ , respectivamente. Como esos dos conjuntos de autovectores barren el mismo espacio de la señal de dimensión  $K$ , entonces esas dos matrices  $E_x$  y  $E_y$  están relacionadas por una única matriz de transformación  $\underline{\Psi}$  (Cerna Muñoz & Morejón Patiño, 2008).

Por tanto:

$$E_x \cdot \underline{\Psi} = E_y \quad \text{Ecuación ( 45)}$$

Una diferente alternativa en la representación de las matrices anteriores y que se mantengan relacionadas con las matrices de los vectores directores  $\underline{A}$  y  $\underline{A}\underline{\Phi}$  a través de una nueva matriz denominada de Transformación no Singular  $\underline{T}$ .

$$\underline{E}_x = \underline{A} \cdot \underline{T} \quad \text{y} \quad \underline{E}_y = \underline{A} \cdot \underline{\Phi} \cdot \underline{T} \quad \text{Ecuación ( 46)}$$

Sustituyendo:

$$\underline{T} \cdot \underline{\Psi} \cdot \underline{T}^{-1} = \underline{\Phi} \quad \text{Ecuación ( 47)}$$

Definiendo:

Autovalores de  $\underline{\Psi}$  = elementos de la diagonal de  $\underline{\Phi}$

Columnas de  $\underline{T}$  son autovalores de  $\underline{\Psi}$

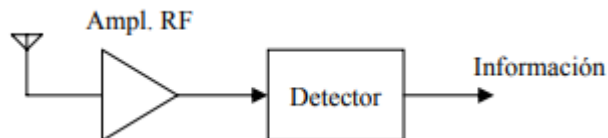
$$\hat{\theta} = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{2\pi f_0 \Delta} \arg(\hat{\Phi}_k) \right) \quad \text{Ecuación ( 48)}$$

## 2.7. Receptores.

Con el fin de detectar y analizar las débiles señales electromagnéticas que se encuentran en el espectro electromagnético es primordial la utilización de un receptor, siendo el receptor superheterodino uno de los más utilizados en décadas pasadas. Este tipo de receptor se caracteriza por convertir la señal de alta frecuencia que se desea estudiar, a una señal con idénticas características, pero de baja frecuencia (Reyes, 2006).

### 2.7.1. Receptor Sintonizado.

Tiene sus inicios a principios del siglo XX, usado muy poco en los receptores actuales. Son receptores que usaban componentes analógicos en sus sintonizadores, como osciladores LC o cristales. Suelen tener un indicador analógico para indicar la frecuencia de recepción (dial), como una aguja o una flecha.

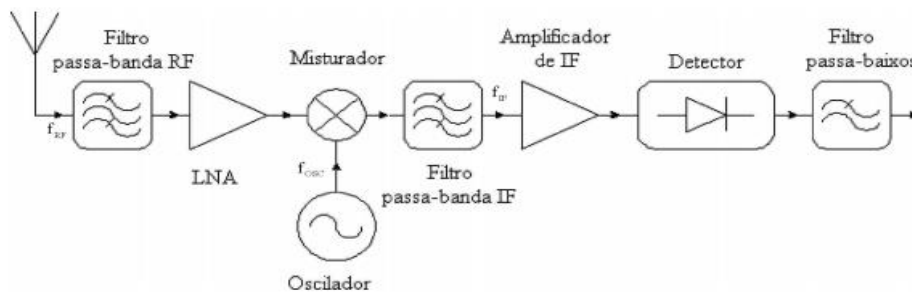


**Figura 12** Diagrama de bloques de un receptor sintonizado.

El momento que una señal es captada por la antena, la antes mencionada posee un valor de amplitud en el orden de los microvoltios, y aquí presentaba la dificultad que el bloque detector, que se observa en la Figura 12, necesita una señal de amplitud de aproximadamente un voltio. Es por ello que el amplificador de RF debía tener una ganancia aproximada de  $10^6$  (120 dB).

### 2.7.2. Receptor Superheterodino.

En general el funcionamiento de un receptor superheterodino, Figura 13, consiste en que la señal de radio frecuencia recibida por la antena es introducida a un filtro pasa banda, que rechaza las señales que están fuera de la banda de frecuencia de interés. Este filtro tiene el objetivo de adaptar las impedancias entre la antena y el amplificador RF de entrada (LNA) (André Thiébaud, 2006):



**Figura 13** Diagrama de bloques de un receptor Superheterodino.  
Fuente: (André Thiébaud, 2006)

La Figura 13, se presenta un diagrama de bloques de la configuración de un receptor superheterodino; el amplificador LNA tiene la principal función de aumentar la sensibilidad del receptor. Posteriormente el bloque llamado mezclador, multiplica la señal RF amplificada de frecuencia  $f_{RF}$  con la señal del oscilador local de frecuencia  $f_{OSC}$ , como se evidencia a través de la siguiente ecuación:

$$A \cos(\omega_{OSC} \cdot t) \cdot B \cos(\omega_{RF} \cdot t) \quad \text{Ecuación ( 49)}$$

$$\frac{AB}{2}[\cos(\omega_{RF} - \omega_{OSC})t - \cos(\omega_{RF} + \omega_{OSC})t] \quad \text{Ecuación ( 50)}$$

A partir de aquí la señal se encuentra en una región denominada FI (Frecuencia Intermedia, la diferencia entre RF y OSC) en donde a través de un filtro pasabanda muy selectivo se realiza la detección de la señal:

$$f_{IF} = f_{RF} - f_{OSC} \quad \text{Ecuación ( 51)}$$

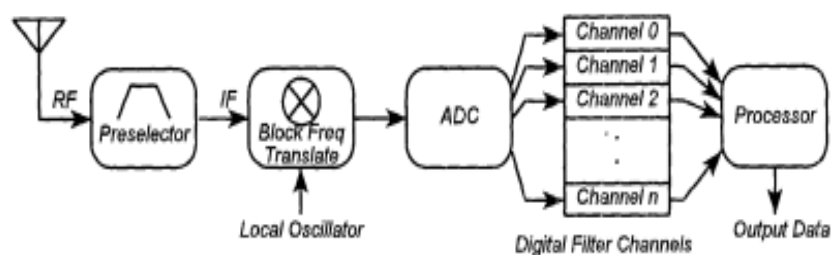
Otro detalle que acotar es que el filtro pasabanda de frecuencia intermedia, facilitará el rechazo de las señales de esta frecuencia, ya que sin este las señales parasitas en la  $f_{image}$  influyen en el mezclador y generan a la salida un producto de modulación de segundo orden de frecuencia igual  $f_{IF}$ .

Finalmente, los bloques del mezclador, el oscilador local y el filtro de IF desplazan el espectro de una señal modulada (RF) para frecuencias más bajas centradas en  $f_{IF}$ , para con ello facilitar la demodulación. La salida del filtro de FI se amplifica antes de aplicar al detector y al filtro de paso bajo (Dennis D, 1993).

Los receptores superheterodinos para guerra electrónica varían la frecuencia del oscilador local (se denomina “Sweep”) para escanear el espectro que se desea vigilar, por lo que la probabilidad de detección de una señal con salto en frecuencia cae abruptamente y no es útil para los escenarios de nueva generación en donde los sistemas de comunicaciones tienen estas características (Reyes, 2006).

### 2.7.3. Receptor Digital.

Los receptores digitales son la base estructural de los modernos sistemas de guerra electrónica (EW) y monitorean una amplia banda de frecuencias para detectar e identificar señales radioeléctricas las cuales pueden ser de fuerzas opuestas como de fuerzas amigas. Los receptores digitales garantizan una alta probabilidad de detección de la señal porque tienen la posibilidad de procesar un cierto ancho de banda de manera quasi instantánea. La implementación de un receptor digital canalizado, en la actualidad, ya no es dificultosa y produce un rendimiento excelente. A continuación, se presenta en la Figura 14 un diagrama de bloques de un receptor digital canalizado.

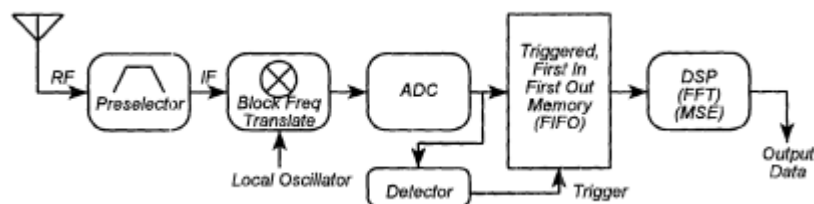


**Figura 14** Arquitectura del Receptor Digital Canalizado.

Fuente: (Kaiser, 2008)

Como se visualiza en la Figura 14 el Bloque de Filtros (Channels) está implementado mediante el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). La FFT transforma la secuencia de tiempo digitalizada (del ADC) en una secuencia de frecuencia digitalizada (que representa la salida de un banco de filtros) (Kaiser, 2008).

El receptor digital es requerido para monitorear, quasi instantáneamente, un ancho de banda amplio para un ciclo de trabajo bajo muy corto (del orden de milisegundos en señales con salto en frecuencia)



**Figura 15** Receptor Digital de Guerra electrónica controlado por eventos.

Fuente: (Kaiser, 2008)

La Figura 15, contiene un diagrama de bloques del receptor digital EW controlado por eventos, el ADC digitaliza la banda de frecuencia a la salida del mixer, y alimenta continuamente a un circuito detector de banda ancha, cuando se detecta un pulso, la salida ADC se encamina a una memoria FIFO (First-In-First-Out), cuando el pulso termina, el ADC ya no registra datos en el FIFO. De esta manera, no se registra el ruido entre los pulsos, esto para el caso de detección de radares como lo es ELINT (Electronic Intelligence).

Para el caso de COMINT (Communication Intelligence), cuyo interés son sistemas de comunicaciones, el procesador ejecuta la FFT de una secuencia temporal de corta duración a la salida del ADC el que utiliza una frecuencia de muestreo acorde al teorema de Nyquist para procesos de naturaleza pasa banda, que es el caso del receptor digital.



## 2.8. Digitalización de Señales Pasabandas.

La discretización en el tiempo de una señal utiliza el método conocido como “muestreo”, tomando en cuenta que la señal original analógica se puede recuperar completamente a partir de sus muestras siempre que la frecuencia de muestreo cumpla con el teorema de Nyquist, es decir que para señales de banda base, la mínima frecuencia de muestreo es igual a dos veces su ancho de banda.

Para las señales pasa banda, objeto del receptor digital, se puede considerar una señal  $x(t)$  que está limitada en el rango

$$X(j\Omega) = \begin{cases} 0, & |\Omega| \leq \Omega_1 = 2\pi W_1 \\ 0, & |\Omega| \geq \Omega_2 = 2\pi W_2 \end{cases} \quad \text{Ecuación ( 52)}$$

donde:

$$0 < \Omega_1 < \Omega_2 < \infty$$

La frecuencia central es :

$$\Omega_c = (\Omega_1 + \Omega_2)/2$$

El ancho de banda es:  $W = W_2 - W_1 = (\Omega_2 - \Omega_1)/2\pi = \Omega_w/2\pi$

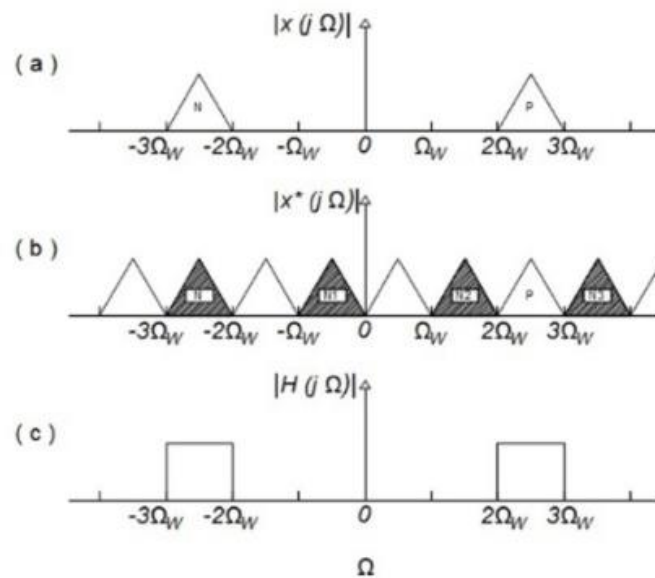
Un típico ejemplo es un receptor digital como el de la Figura 14 o Figura 15, cuya salida del mixer está caracterizado por un ancho de banda  $W$  (denominado ancho de banda instantáneo de análisis),

Una tasa de muestreo de  $2W_2$  (Hz) o mayor parecería adecuada para una señal de banda base (o pasa bajos). Para ser precisos notaremos que es posible reconstruir una señal pasabanda

$x(t)$  de estas muestras  $x(kT)$  provenientes de la tasa de muestreo  $f_s = T^{-1}$  que tienen un valor mínimo específico en el rango (N.S. & Noll, 1984):

$$2W \leq f_s \leq 4W \quad \text{Ecuación ( 53)}$$

La tasa de  $2W$  puede ser adecuada dependiendo de la relación  $W_1/W$ . El muestreo de una señal pasa banda produce un espectro que repite el espectro de la señal original centrados en múltiplos enteros de la frecuencia de muestreo. Una señal pasa banda discretizada cuya relación  $W_1/W$  es un entero, tendrá un espectro conforme la Figura 16.

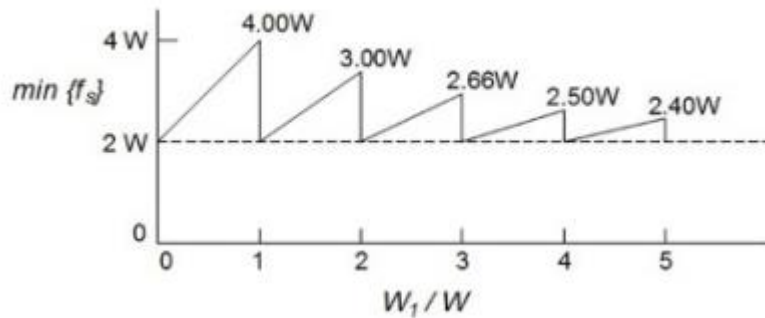


**Figura 16** Representación de Fourier de una señal pasabanda.

Fuente: (N.S. & Noll, 1984)

En general, para  $W_1/W$  no entero, se puede mostrar que se requiere una tasa de muestreo mínima (N.S. & Noll, 1984):

$$\min(f_s) = 2W \frac{1 + W_1/W}{1 + [W_1/W]} \quad \text{Ecuación (54)}$$



**Figura 17** Frecuencia de muestreo mínima para una señal de pasabanda.  
Fuente: (N.S. & Noll, 1984)

La Figura 17 representa los  $\min\{f_s\}$  en función de  $W_1/W$ . Tenga en cuenta que los límites superior e inferior en esta curva son de hecho  $4W$  y  $2W$ , y que el valor mínimo de  $2W$  se alcanza cuando  $W_1$  es un múltiplo entero del ancho de banda  $W$ . Tenga en cuenta que las opciones no enteras de  $W_1/W$  conducen a requisitos de tasa de muestreo más altos; y que, en particular, los valores de  $W_1$  ligeramente menores que  $nW$  conducen a los peores resultados, correspondientes a los picos de la Figura 17. Finalmente, se puede verificar, como se afirmó anteriormente, que todos los valores de  $\min(f_s)$  y la Figura 17 están delimitados por  $2W_2$ .

Las señales pasabanda pueden ser representadas por la envolvente compleja en términos de dos señales de valor real y de naturaleza pasa bajo.

En los sistemas modernos de comunicaciones todas las formas de onda pasabanda son representadas con una envolvente compleja dividiéndose en dos canales: uno llamado canal I (en fase) y otro llamado canal Q (fase en cuadratura).

La salida del mixer de la Figura 14 es un proceso con ancho de banda instantáneo que es procesado por un demodulador IQ, luego I y Q son digitalizadas con una frecuencia de muestreo acorde a la Figura 17. Las señales I y Q discretizadas son procesadas por la transformada rápida de Fourier (FTT). El receptor digital BB60C a utilizar tiene este diseño conceptual con un ancho de banda instantáneo de  $27MHz$ .

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN (DF) DE SEÑALES RADIOELÉCTRICAS.

El objetivo de este capítulo es realizar el diseño de un sistema de DF mediante la utilización de un receptor digital de banda ancha de nueva generación y de un arreglo de antenas para guerra electrónica disponible en el Grupo de Monitoreo y Reconocimiento (GMREC), lo que nos permitirá optimizar los Sistemas de Guerra Electrónica de las Fuerzas Armadas del Ecuador.

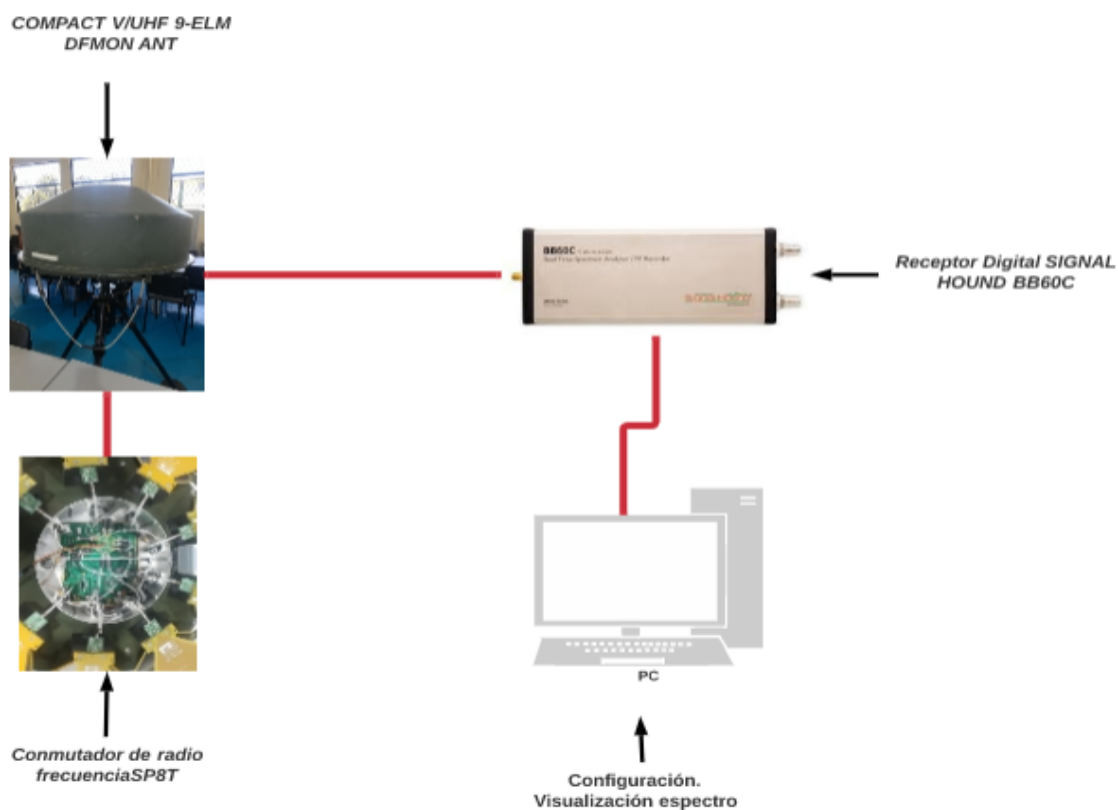
#### 3.1. Diseño.

El sistema propuesto está constituido por los siguientes componentes, disponibles en el CICTE y en otras unidades militares de las Fuerzas Armadas:

- Un Receptor digital de banda ancha capaz de monitorear el espectro radioeléctrico en la banda de  $9\text{ kHz}$  a  $6\text{ GHz}$ , con frecuencias de muestreo de las componentes I y Q de hasta  $40\text{ Msamples/s}$  (Hound, Signal, 2014) .
- Un Arreglo circular de nueve antenas directivas, disponible en el GMREC, con su respectivo “Radome”. Este sistema dispone adicionalmente de una antena discone omnidireccional para la banda de operación de  $30\text{ MHz} - 2\text{ GHz}$
- Conmutador de radio frecuencia de estado sólido SP8T de alta velocidad de conmutación ( $10\text{ ns}$ ) (Patente nº HMC321ALP4E).

- Interface USB entre el receptor digital y un computador.
- Interface USB entre el arreglo circular de antenas y un computador GPIO.
- Software para el procesador de DF y la visualización de resultados en un computador (entorno gráfico).

En la Figura 18 se ilustra el diagrama de bloques del diseño propuesto para el sistema de localización de señales radioeléctricas.



*Figura 18* Diagrama del diseño propuesto del sistema de DF.

### 3.2. Descripción del Arreglo circular de nueve antenas direccionales.

El arreglo de antenas COMPACT V/UHF 9-ELM DFMON ANT fabricada por TCI AN SPX COMPANY consta de nueve antenas direccionales que cubren un rango de  $40^\circ$  cada una y de una antena Discone omnidireccional, las mismas que permitirán la recepción de señales en el rango de los  $80\text{MHz}$  a los  $2\text{GHz}$  con la finalidad de desarrollar el DF de las señales radioeléctricas deseadas.

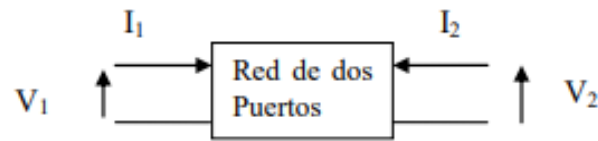


*Figura 19* Arreglo de 9 antenas direccionales.

### 3.3. Parámetros S de la antena direccional.

Los parámetros  $S$  o llamados parámetros de dispersión son los coeficientes de reflexión y transmisión entre la onda incidente y la reflejada. Estos parámetros describen completamente el comportamiento de un dispositivo bajo condiciones lineales en un determinado rango de frecuencia. Cada parámetro es caracterizado por magnitud, ganancias o pérdidas en decibeles y fase (Colombo, 2012).

La descripción de los parámetros se presenta en la Figura 20 :



**Figura 20** Red de dos puertos.

Fuente: (Colombo, 2012)

**S11:** Coeficiente de reflexión a la entrada o coeficiente de reflexión directa.

**S21:** Coeficiente de transmisión directa o ganancia con la tensión directa.

**S22:** Coeficiente de reflexión a la salida o coeficiente de reflexión inversa.

**S12:** Coeficiente de transmisión o ganancia con la tensión inversa.

### 3.3.1. Obtención de parámetros $S$ .

Para la obtención de los parámetros  $S$  de la antena direccional que se utiliza en el presente trabajo de investigación se utilizó el Analizador Vectorial ANRITSU MS2036A ( Figura 21).

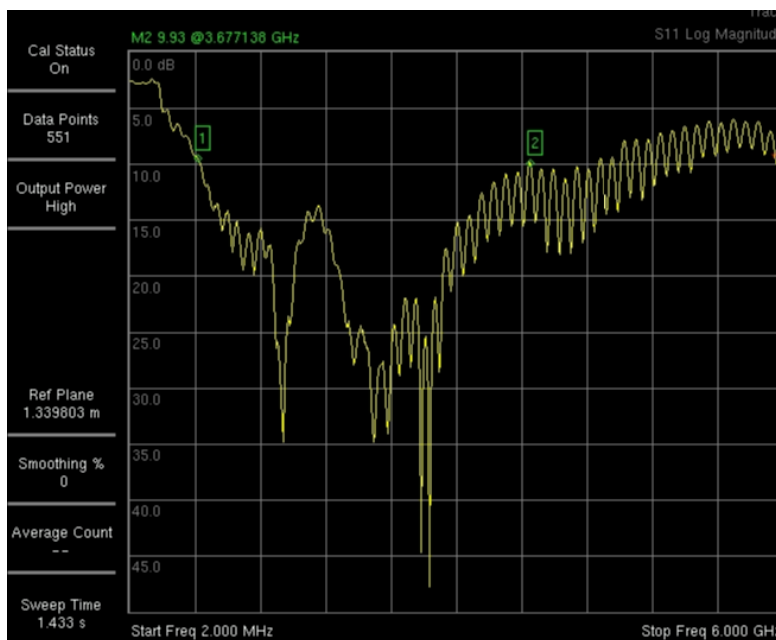
Inicialmente se debe realizar la calibración del analizador ANRITSU mediante la utilización de la llave que posee el equipo. Luego de la calibración se verifica el plano de referencia, el conector del ANRITSU, la conexión a la antena direccional y se procede al registro de datos y la verificación de los parámetros  $S$  de la antena.





**Figura 21** Analizador Vectorial ANRITSU.

En la Figura 22 se observa el parámetro  $S_{11}$  que fue tomado en el domo de cobertura que posee el arreglo de antenas.

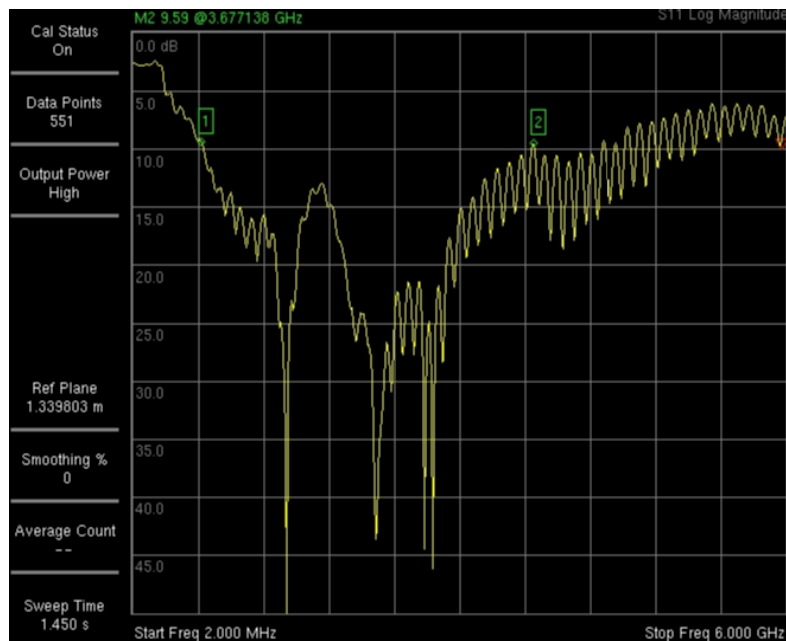


**Figura 22** Medición de parámetros S sin Domo.

Una vez obtenido esta información se puede determinar el ancho de banda de trabajo de la antena, considerando que el parámetro del  $S_{11}$  es recomendable ser bajo los  $-10\text{ dB}$ , obteniendo el rango de frecuencia en donde la antena puede trabajar eficientemente.

En caso de que el parámetro del  $S_{11}$  es muy alto, la energía que arriba a la antena y que se refleja hacia el transmisor, eso implica que la antena transmisora ya no está dentro del ancho de banda necesario, por lo que estaría trabajando fuera del ancho de banda, por ello siempre el  $S_{11}$  tiene un valor alto; cuando el  $S_{11}$  es bajo están dentro de la banda de operación de la antena.

Al realizar la medición se pudo determinar que el rango de recepción de la antena direccional que utilizamos inicia aproximadamente en  $600\text{ MHz}$  hasta los  $3,6\text{ GHz}$  ( Figura 22 y Figura 23).



**Figura 23** Medición de parámetros S con Domo.

En la Figura 23 se observa que el parámetro  $S_{11}$  medido con el domo del arreglo de antena no presenta mayores diferencias, pero alrededor del rango de los 1400 MHz hasta los 2200 MHz se observa una mejor recepción en relación a la que presenta sin el domo ubicado.

Se debe tomar en cuenta que el valor que necesitamos para trabajar en nuestro proyecto inicia en los 80 MHz hasta los 2 GHz, por lo que se debe tomar en cuenta el VSWR (Relación de Ondas Estacionarias, en inglés SWR, Standing Wave Ratio) en nuestro rango de operación. En la prueba realizada ( Figura 23 ) se obtiene un VSWR igual a 2, recibiendo una potencia igual al 89% en relación a la potencia emitida por el transmisor tomando como referencia la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Tabla de Relación de Ondas Estacionarias (SWR, Standing wave ratio)*

<b>ROE</b>	<b>% de Pérdida de Potencia</b>	<b>% de Potencia que sale de la antena</b>
<b>1.0:1</b>	0.0	100.0
<b>1.1:1</b>	0.3	99.7
<b>1.2:1</b>	0.8	99.2
<b>1.3:1</b>	1.7	98.3
<b>1.4:1</b>	2.7	97.3
<b>1.5:1</b>	3.0	97.0
<b>1.6:1</b>	5.0	95.0
<b>1.7:1</b>	6.0	94.0
<b>1.8:1</b>	8.0	92.0
<b>2.0:1</b>	11.0	89.0
<b>2.2:1</b>	14.0	86.0
<b>2.4:1</b>	17.0	83.0
<b>2.6:1</b>	20.0	80.0
<b>3.0:1</b>	25.0	75.0
<b>4.0:1</b>	38.0	62.0
<b>5.0:1</b>	48.0	52.0
<b>6.0:1</b>	55.0	45.0
<b>10.0:1</b>	70.0	30.0

Cabe mencionar que, según el estudio realizado, que también podemos trabajar con nuestro sistema hasta la frecuencia de 6 GHz, si tomamos en cuenta el valor de VSWR igual a 3, ya que este representa al 75% de potencia que sale de la antena de transmisión.

Lo anteriormente analizado es aplicable para transmisores, sin embargo, para receptores un VSWR de 6.0 es aceptable con un costo a pagar en la sensibilidad del receptor, razón por la cual se justifica utilizar este arreglo de antenas directivas desde los 80 MHz hasta los 6 GHz.

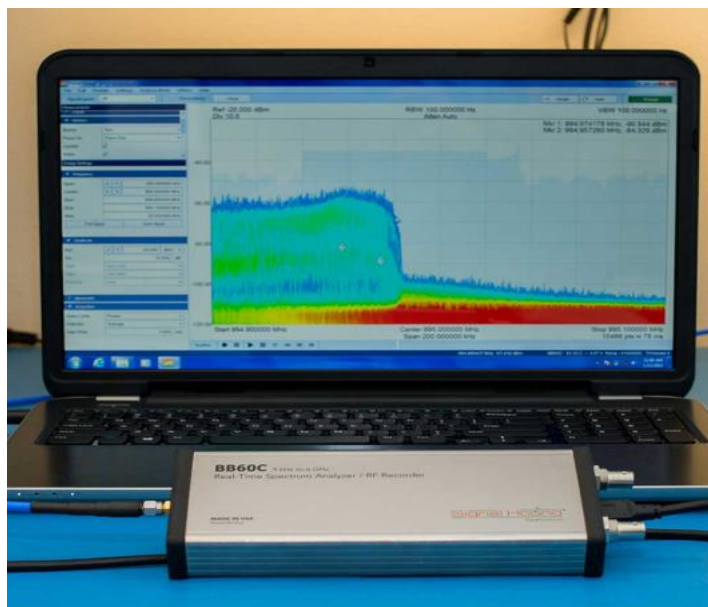
### **3.4. Descripción del receptor digital.**

Nuestro sistema utiliza el equipo “Signal Hound BB60C” ( Figura 24), el cual es un receptor digital en tiempo real I/Q, con interface USB, diseñado bajo la teoría desarrollada en el capítulo II.

Con este receptor se puede monitorear el espectro radioeléctrico desde 9 kHz hasta los 6 GHz, y además posee un grabador de RF con características de un ancho de banda instantáneo de 27 MHz y a su vez con velocidades de barrido de 24 GHz/seg. El Signal Hound BB60C se caracteriza por ser capaz de realizar mediciones confiables y en el menor tiempo posible, ya sea para monitoreo de espectro, mediciones de RF y de microondas, búsqueda de interferencias, pruebas de EMC o mediciones de redes inalámbricas y Wifi (AG A. , 2018). Las especificaciones técnicas resumidas del BB60C se muestran en la Tabla 2 (Hound, Signal, 2014).

**Tabla 2***Especificaciones técnicas del Signal Hound BB60C.*

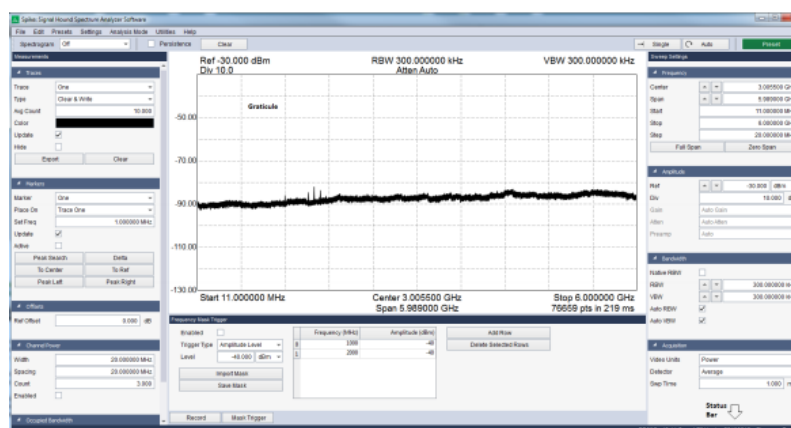
<b>Fabricante</b>	Signal Hound
<b>Descripción</b>	Analizar con capacidad de grabación de espectro en tiempo real
<b>Tipo de analizador</b>	Receptor Digital I/Q
<b>Banda de RF</b>	9 kHz – 6 GHz
<b>Velocidad de barrido</b>	Hasta 24 GHz/s
<b>Resolución de ancho de banda</b>	1 Hz a 3 MHz
<b>Ancho de banda en tiempo real</b>	10 Hz a 10 MHz
<b>Ancho de banda instantáneo</b>	27 MHz
<b>Interfaz</b>	USB



**Figura 24** Analizador de espectro Signal Hound BB60C.  
Fuente: (Inc., 2019)

### 3.5. Operación del Receptor Digital BB60C y Arreglo Circular de Antenas.

Una vez instalados los controladores del BB60C, se puede realizar su operación utilizando la aplicación SPIKE Figura 25, la misma que viene con la compra del propio. Este software presenta varias opciones para configurar y seleccionar el espectro deseado con las características preestablecidas por el fabricante y que el usuario requiere para su manipulación.



*Figura 25* Software Spike.

En nuestro sistema utilizamos un arreglo circular de antenas directivas, para realizar monitorización del espectro en los 360°, la misma que contiene 9 antenas direccionales distribuidas en forma circular con una cobertura de 40° cada una, lo cual se muestra en la Figura 26.

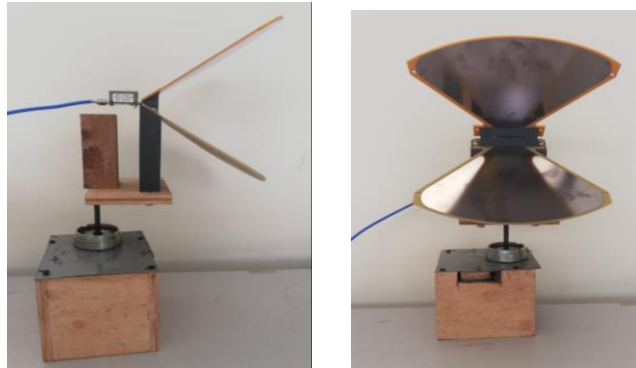


**Figura 26** Arreglo de Antenas circulares TCI.

El sistema de DF propuesto y dado que solo disponemos de un receptor digital, se basa en la determinación de la potencia recibida en cada una de las antenas del arreglo, para ello hacemos uso de un conmutador de radio frecuencia de alta velocidad de conmutación SP8T. La exactitud en la determinación de la dirección de arribo depende del lóbulo de radiación de cada una de las antenas directivas. Sin embargo, todas las antenas que constituyen el arreglo son similares y por tanto obtendremos en campo, el lóbulo de irradiación de una de ellas.

Para obtener el lóbulo de irradiación se elaboró una estructura de madera (Figura 27) para fijar la antena de recepción, la misma que fue acoplada con un motor a pasos que le permite girar en el plano azimutal los  $360^\circ$ . Con la finalidad de medir la potencia recibida por la antena bajo prueba, se generó una señal de RF a partir de un generador de señales en la frecuencia de  $1\text{ GHz}$  y se alimentó a una antena directiva ubicada en el foco de un plato parabólico (Figura 29) para

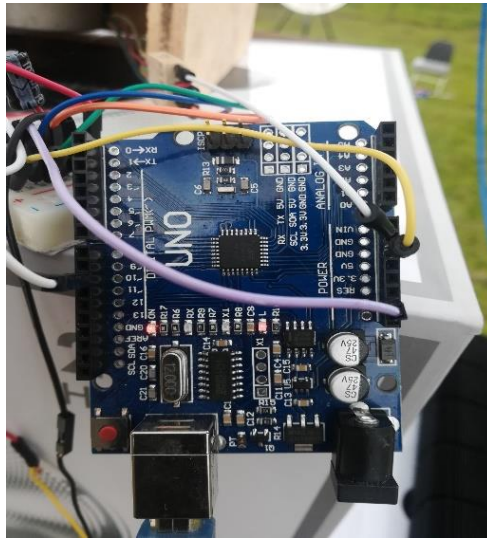
tornarlo al haz de RF mucho más directivo. Igualmente, el plato parabólico permite colocar a la antena directiva para lograr sea polarización horizontal o vertical. La potencia recibida durante el movimiento circular de nuestra antena se determinó con el receptor digital BB60C.



**Figura 27** Sistema mecánico de rotación 0° a 360°.

Para ejecutar la rotación de la antena se utilizó un Microprocesador Arduino UNO (Figura 28) el mismo que fue programado para generar pulsos que exciten el movimiento del eje del motor con un intervalo de 0.5° con cada pulso hasta completar la rotación en los 360°. El microprocesador fue programado para que se realice la rotación de un grado cada cinco segundos con la finalidad de alcanzar a tomar los datos de la potencia recibida.





*Figura 28* Arduino UNO.

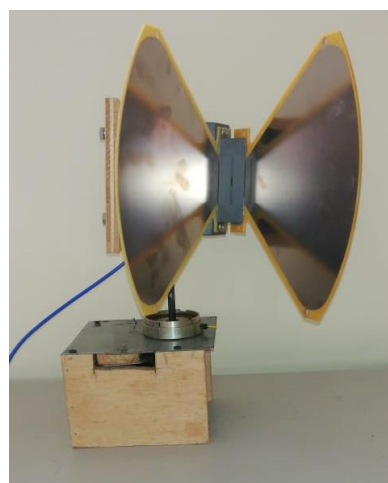
En un espacio abierto se realizó el montaje del generador de señales utilizando una frecuencia de 1 *GHz*, emitida por una antena direccional y el plato parabólico. De la misma forma se instaló nuestro receptor de señales a una distancia de 8 metros del generador de señales (mitigando el efecto de campo cercano) con la finalidad de medir la potencia recibida realizando la rotación de nuestra antena tanto en polarización horizontal como en polarización vertical (Figura 29). Las Figura 30 y Figura 32 ilustran la antena bajo prueba en polarización horizontal y el lóbulo de irradiación obtenido, respectivamente. Las Figura 31 y Figura 33 ilustran la antena bajo prueba en polarización vertical y el lóbulo de irradiación obtenido, respectivamente.



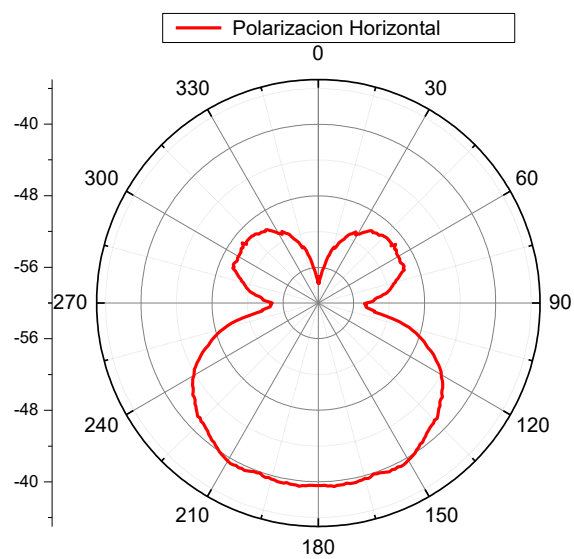
**Figura 29** Dispositivo de medición de potencia de la señal recibida.



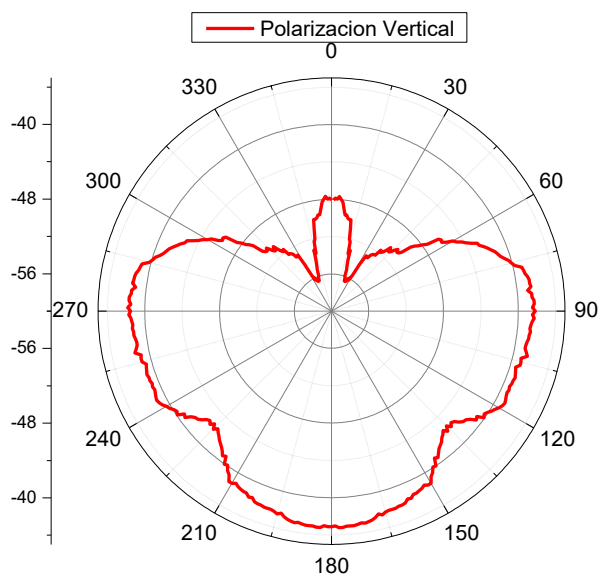
**Figura 30** Antena - Polarización Vertical.



**Figura 31** Antena - Polarización Horizontal.



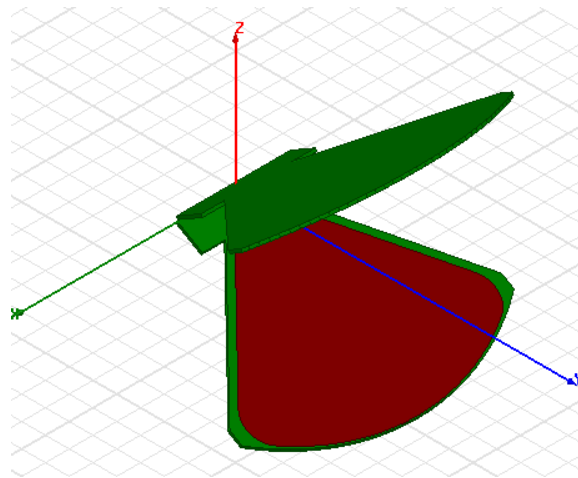
**Figura 32** Diagrama de Irradiación mediante Polarización Horizontal.



**Figura 33** Diagrama de Irradiación mediante Polarización Vertical.

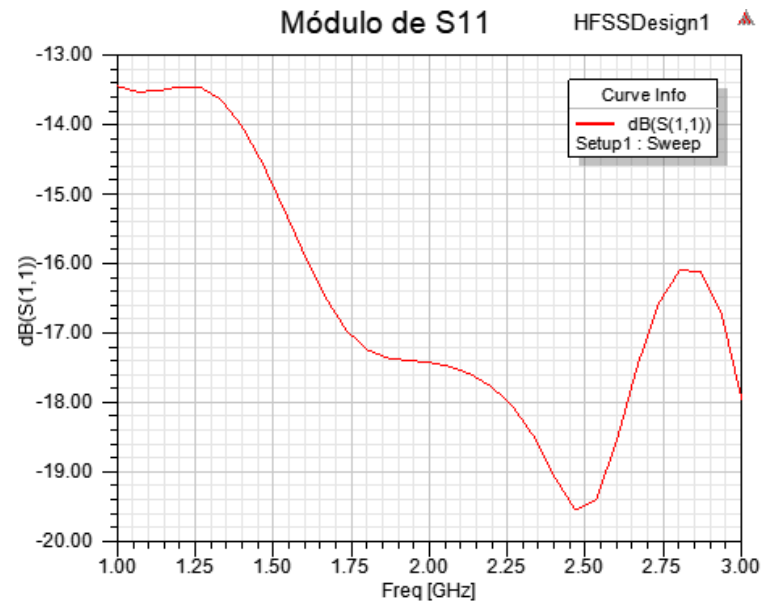
### 3.6. Simulación de las características de la antena

Se realizó la simulación utilizando el programa HFSS que pertenece al *Laboratório de Antenas e Propagação (LAP)* del *Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)* de la ciudad de São José dos Campos/SP - Brasil, obteniendo su caracterización a partir del modelo que se muestra en la Figura 34.



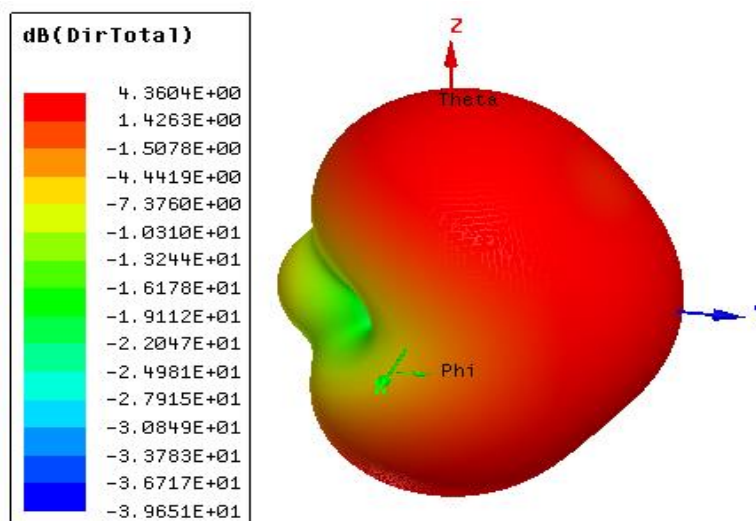
**Figura 34** Modelo de antena simulado en el programa HFSS.

Con el modelo simulado se obtuvo el parámetro de dispersión  $|S_{11}|$  (Figura 35), en donde se representa el ancho de banda de operación entre las frecuencias de 1 GHz hasta 3 GHz, lo que nos permitió continuar con nuestro proyecto.



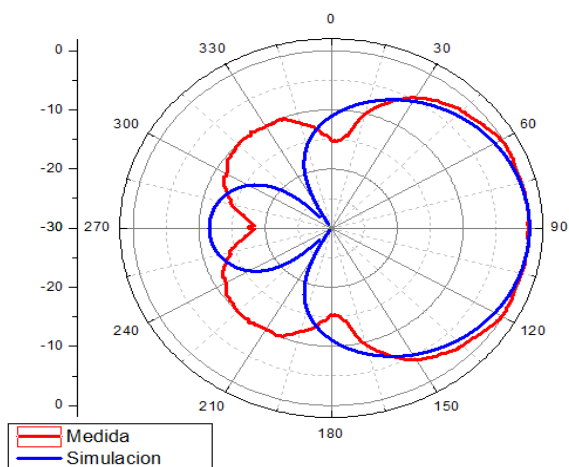
**Figura 35** Coeficiente de reflexión de la antena simulada en el programa HFSS.

Con la antena simulada en el programa HFSS, se representó el patrón de irradiación en tres dimensiones (3D) en la frecuencia de 1 GHz (Figura 36), para determinar la dirección de apuntamiento, el lóbulo principal, los lóbulos secundarios, los ángulos de 3 dB, la relación del lóbulo principal al lóbulo secundario (SLL) y la relación frente-espaldas (FBR), que es la diferencia en dB entre el valor de máxima radiación y el de la misma dirección pero en sentido opuesto.

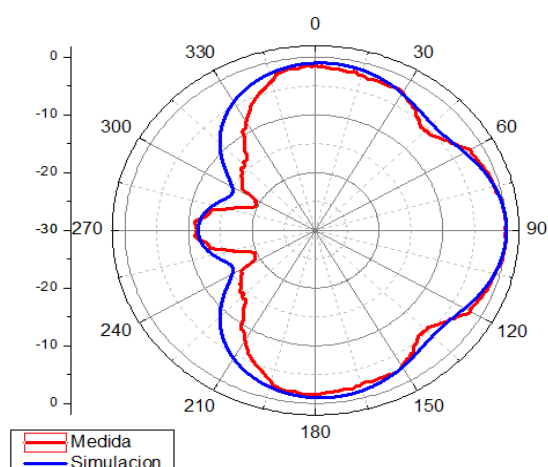


**Figura 36** Patrón de radiación en 3D a 1GHz en el programa HFSS.

A partir de las simulaciones en HFSS se obtuvieron los diagramas en los planos principales, plano horizontal (Figura 37) y plano vertical (Figura 38), en donde se puede comparar los resultados de las medidas de campo (color rojo) y las simulaciones obtenidas con el software HFSS (color azul), verificándose una excelente concordancia entre los resultados.

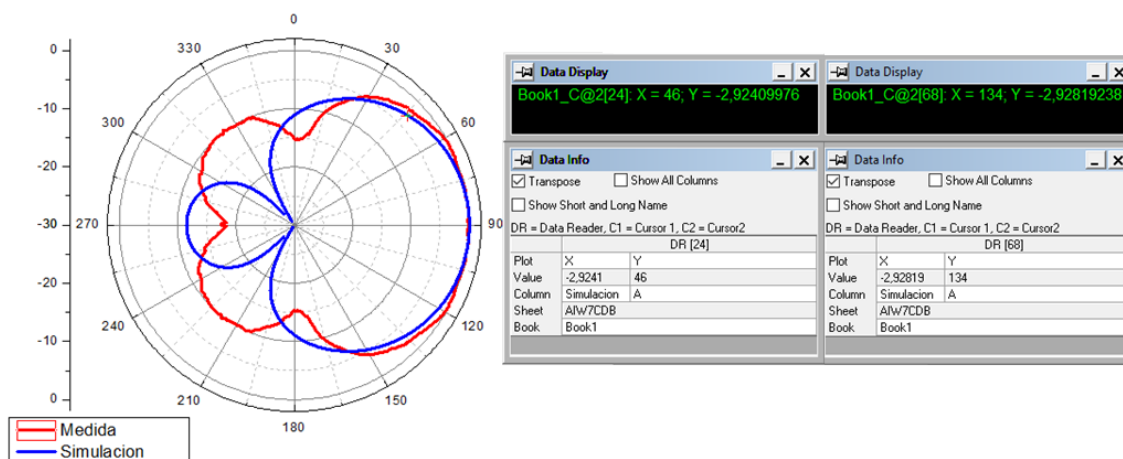


**Figura 37** Polarización horizontal con el prototipo y simulación con el software HFSS.



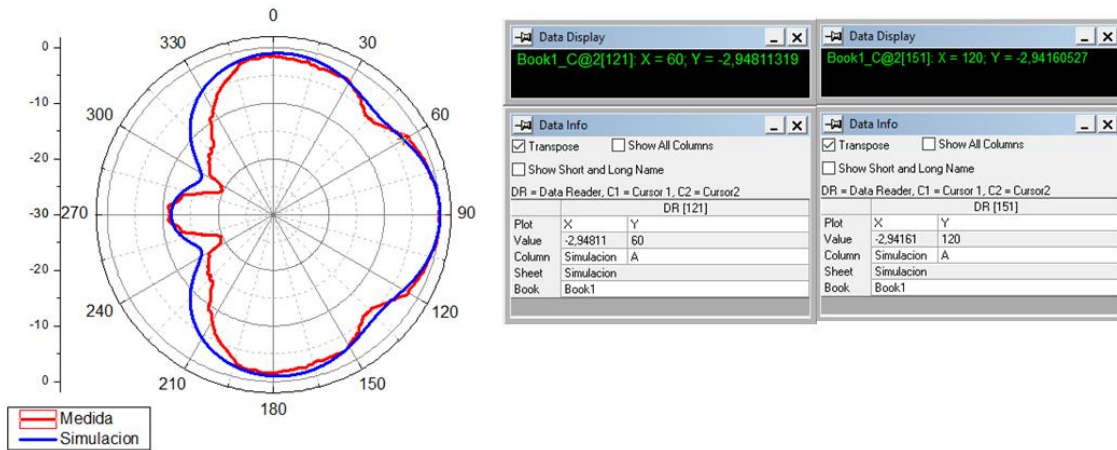
**Figura 38** Polarización vertical con el prototipo y simulación con el software HFSS .

El software HFSS nos ayuda a determinar el ancho de haz en los planos principales. El ancho de haz en el plano horizontal (Figura 39) es de  $88^\circ$ , ya que tenemos un valor mayor a  $-3$  dB de ganancia en  $46^\circ$  por el lado izquierdo y  $134^\circ$  por el lado derecho del lóbulo principal.



**Figura 39** Ancho de haz en Polarización horizontal.

El ancho de haz en el plano vertical (Figura 40) es de  $60^\circ$ , ya que tenemos un valor mayor a -3dB de ganancia en  $60^\circ$  por el lado izquierdo y  $120^\circ$  por el lado derecho del lóbulo principal.

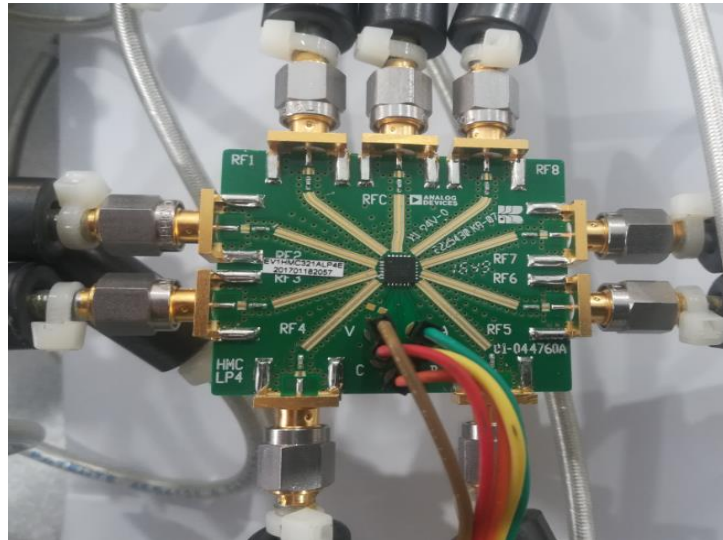


**Figura 40** Ancho de haz en Polarización vertical.

### 3.7. Conmutación del arreglo circular de antenas.

Para realizar la conmutación de las antenas direccionales que forman parte del arreglo circular de antenas se utilizó dos dispositivos: un conmutador de RF SP8T de alta velocidad de conmutación ( $10\text{ ns}$ ) ilustrado en la Figura 41 y un dispositivo de procesamiento denominado “GPIO USB”, el cual nos permite la conexión de dispositivos a la computadora través del USB. Este GPIO USB controla las tres líneas digitales del conmutador de RF.

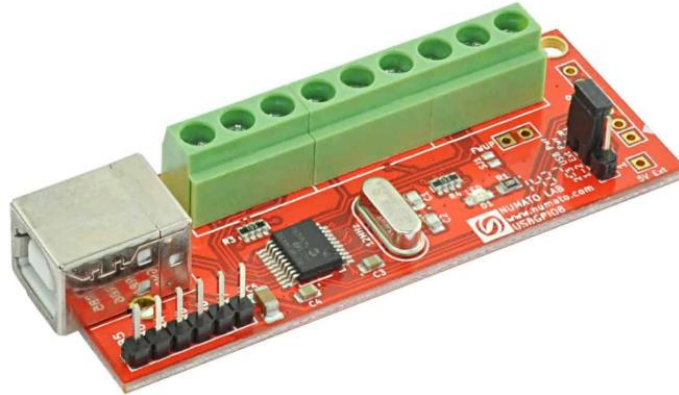




**Figura 41** Tarjeta SP8T de 8 entradas.

Cabe mencionar que el arreglo circular dispone de 9 antenas, sin embargo, solo disponemos de un SP8T por lo cual solo usamos 8.

El dispositivo GPIO USB proporciona una interfaz que permitirá controlar dispositivos eléctricos y electrónicos de manera remota desde una computadora y mediante la utilización de un enlace tipo USB, posee una gran cantidad de entradas analógicas, las cuales se pueden utilizar para leer valores analógicos como temperatura, presión entre otras (Figura 42).



**Figura 42** Módulo GPIO USB.

La conmutación de las antenas se realiza cada  $50ms$ , período en el cual se cambia la antena para recibir una nueva traza de datos por parte del equipo Signal Hound BB60C, es decir a través de la conmutación de las 8 antenas direccionales obtenemos 8 trazas de datos del espectro a ser monitoreado.

Características del Módulo GPIO USB:

- 8 IOs digitales de 5V.
- 6 entradas analógicas (0 – 5 V) la escala de entrada y una resolución de 10 bits.
- Interfaz USB con soporte CDC.
- Alimentación externa desde USB o fuente de alimentación externa.
- Resistencias pull-up en IO individuales.

Pasos para el uso del módulo GPIO USB:

- Conectar el dispositivo a un puerto USB del computador.
- Instalar el controlador del dispositivo.
- Abrir el puerto COM asignado al dispositivo a través de un software Terminal Serie.
- Ingreso de comandos.

La conmutación a través de la tarjeta antes mencionada se la realizó a través de una compilación utilizando el software Visual Studio 2019 como se redacta en la Tabla 3:

**Tabla 3**

*Código de programación para conmutación de antenas direccionales.*

---

```
//Programa para conmutación de antenas direccionales.

#include "pch.h"
#include "CommSerial.h"

////////////////////////////////////
#define COLARX 1030
#define COLATX 1030
////////////////////////////////////

// CCommSerial

CCommSerial::~CCommSerial()
{
    CortarConexion();
}

UINT ControlarEventos(LPVOID p)
{
    DWORD          dwMascEvt;
    OVERLAPPED     sOver = {0, 0, 0, 0, 0};
    CCommSerial    *pView = (CCommSerial *)p;

    sOver.hEvent = CreateEvent( NULL,TRUE,FALSE,NULL);
    if (sOver.hEvent == NULL)
    {
        AfxMessageBox( L"Fallo al crear el evento para el hilo",MB_OK|MB_ICONEXCLAMATION);
        return 0;
    }
    pView->m_sOverWrite = pView->m_sOverRead = sOver;
    if (!SetCommMask(pView->m_hDisCom,EV_RXCHAR|EV_TXEMPTY|EV_RX80FULL|EV_ERR))
        return 0;
}
```

---

---

```

while(pView->m_ConexionEstablecida)
{
    dwMascEvt = 0;
    WaitCommEvent(pView->m_hDisCom,&dwMascEvt,&sOver);
    if((dwMascEvt & EV_RXCHAR) == EV_RXCHAR)
        pView->OnEventoCom(EV_RXCHAR,0);

    else if((dwMascEvt & EV_TXEMPTY) == EV_TXEMPTY)
        pView->OnEventoCom(EV_TXEMPTY,0);

    else if((dwMascEvt & EV_RX80FULL) == EV_RX80FULL)
        pView->OnEventoCom(EV_RX80FULL,0);

    else if((dwMascEvt & EV_ERR) == EV_ERR)
        pView->OnEventoCom(EV_ERR,0);
}
pView->m_bHiloActivo = FALSE;
CloseHandle( sOver.hEvent );
return 1;
}

BEGIN_MESSAGE_MAP(CCommSerial, CWnd)
//{{AFX_MSG_MAP(CCommSerial)
ON_WM_TIMER()
//}}AFX_MSG_MAP
END_MESSAGE_MAP()

```

---

### 3.8. Comunicación con el Signal Hound BB60C.

Para establecer una interfaz entre el receptor digital BB60C y un computador es necesario instalar el software “Signal Hound SDK” (Software Development Kit), el mismo que incluye:

Compatibilidad con Windows de 64/32 bit.

Utiliza la API del dispositivo para un control rápido y directo.

Incluye ejemplos de programación para C / C ++, C #, Python y MATLAB.

Incluye manuales de programación.

Incluye compilaciones de Linux de 64 bits .so para las API de SM200A y BB60C.

Incluye las API de C para dispositivos de la serie TG (Win 32 / 64bit y 64 bits Linux) v 1.1.0

Incluye el código fuente, manual y ejemplos de VRT VITA-49 (SM200A)

Incluye el ejemplo del analizador del archivo de grabación de barrido Spike (archivos .SHR)

### **3.8.1. Requisitos de la PC para que opere el SDK:**

Windows de 64 bits 7/8/10.

VS2012 C ++ re-distribuíbles para el desarrollo de API.

Se recomiendan los procesadores Intel quad-core i-Series.

Compatibilidad con USB 3.0 nativo (SM200A / BB60C).

Compatibilidad con USB 2.0 (SA44 / SA124 / TG44 / TG124).

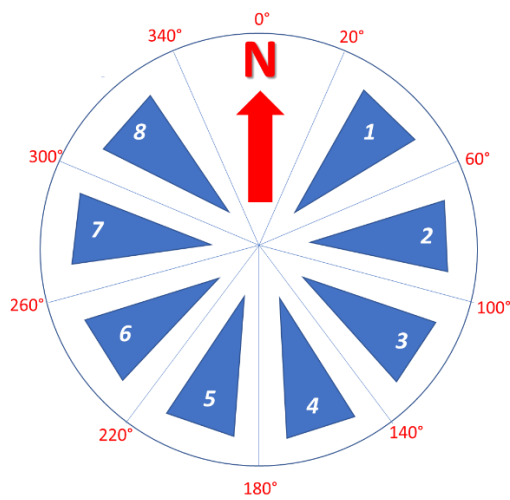
Controladores de dispositivo de Signal Hound instalados.

## **3.9. Obtención del Ángulo de Arribo**

Una vez que disponemos de la frecuencia de operación y una estimativa del ancho de banda de la señal radio eléctrica de interés, procedemos a interactuar con el BB60C, entregándole esta información como frecuencia central y “span”. El receptor digital monitorea a gran velocidad el espectro solicitado para cada una de las antenas del arreglo, devolviendo un conjunto de vectores que contienen la información del nivel de potencia de cada una de las componentes del espectro monitoreado, en un tiempo aproximado de 500 *ms*.

Como describimos anteriormente el arreglo circular de antenas directivas utilizado en la presente investigación posee 9 antenas, por lo tanto, tenemos una cobertura de 40° con cada una

para recibir la señal en los 360°. Cabe indicar que no se utiliza la antena orientada al norte, debido a que el conmutador de RF es un SP8T y únicamente podemos seleccionar 8 antenas, conforme se ilustra en la Figura 43.



**Figura 43** Distribución de las antenas para la cobertura de 360°.

Al procesar los vectores de datos entregados por el receptor digital de cada una de las 8 antenas, nuestro algoritmo determina cual de nuestras antenas recibió el mayor nivel de la señal monitoreada, es decir que obtenemos la dirección con una cobertura de 40°. Para determinar el grado exacto de la dirección de arribo de la señal buscada debemos determinar la antena vecina con el mayor nivel de la señal, esto se realiza comparando los niveles de las antenas que se encuentran a la derecha o izquierda de nuestra antena seleccionada.

Una vez determinada la antena con mayor potencia recibida y su antena vecina (derecha o izquierda), verificamos la relación entre las dos potencias recibidas y creamos una tabla para determinar el ángulo de arribo con mayor precisión como se observa en la Tabla 7.

La estimación espacial del espectro utilizando equipos de alta tecnología y con alta capacidad de procesamiento (receptor digital) nos ha permitido realizar el procesamiento de señales de forma casi instantánea, obteniendo la dirección de llegada analizando varias fuentes de señal en los 360°. La estimación del ángulo de arribo se ha realizado efectuando una tabla de datos (Tabla 7) tomando en cuenta el lóbulo de irradiación de la antena directiva extraído con anterioridad.

### **3.10. Entorno de programación.**

#### **3.10.1. Lenguaje C++.**

C++ es un lenguaje de programación y se identifica como una extensión de C, su expresión "C++" nos indica que es un "incremento de C", con el adicional que nos permite una manipulación de objetos y eventos para ejecutar interfaces gráficas. Debido a su versatilidad brinda grandes ventajas en el campo de la programación computacional para la resolución de un sin número de problemas con una compilación rápida y exacta de forma eficiente.

La programación orientada a objetos consiste en encapsular atributos (datos) y métodos (funciones) en varias estructuras (clases) para modelar objetos con una funcionalidad especial que permiten obtener resultados que pueden ser usados en un diseño de interfaces gráficas.

### 3.10.2. Microsoft Visual Studio ®

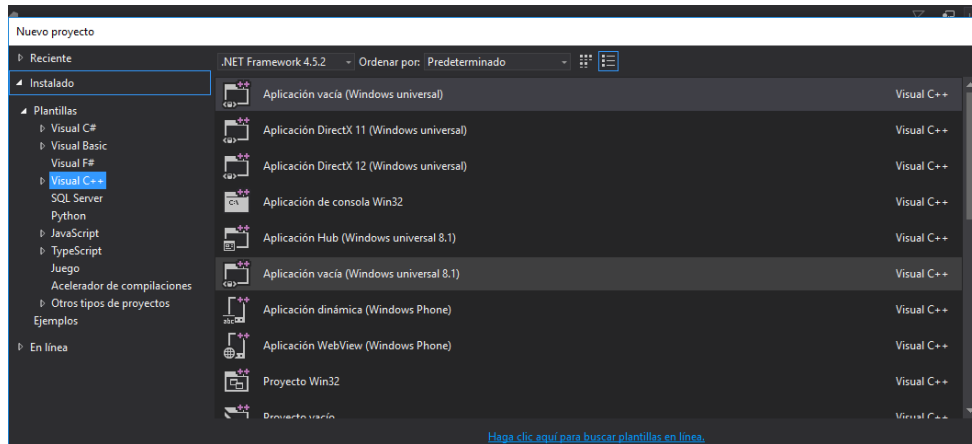
Microsoft Visual Studio 2019 ®, es una herramienta de desarrollo de software muy completa y versátil que presenta los requerimientos que se necesita para el desarrollo del Sistema de DF y la visualización del mismo en el ordenador (Microsoft, 2018).

Podemos presentar algunas características que nos ofrece al programa antes mencionado:

- Ejecución en paralelo de secuencias a través de la creación de hilos. (tareas que se ejecuten al mismo tiempo)
- Depuración de código compilado y optimizado.
- Compilación en segundo término y Autocorrección que facilita la detección de errores y sugerencias de cambios.
- Conexión a servicios Web XML.

Visual Studio es un Entorno de Desarrollo Integrado IDE (Integrated Development Environment, (Figura 44), y dentro de algunas de sus características es la de soportar cualquier tipo de código de programación. Como una bondad adicional proporciona plantillas predeterminadas para crear interfaces de aplicación como es el caso de Visual C#, Visual C++, Visual Basic, Visual F#, JavaScript entre otras (Moya Lozada, 2018).





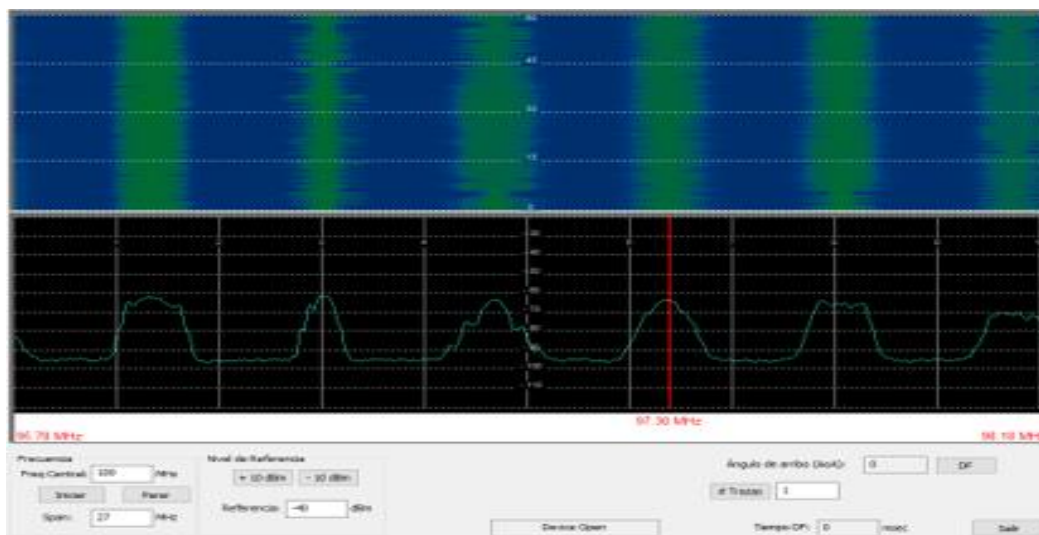
**Figura 44** Entorno Visual Studio 2015.  
Fuente: (Microsoft, 2018)

### 3.11. Diseño de Software.

La programación del software se realizó utilizando la programación “Visual Studio 2019”, con el lenguaje de programación C++, y la comunicación con el computador se realizó utilizando varios comandos propios del “Signal Hound BB60C” para identificar y sincronizar la transmisión de datos para su respectivo procesamiento.

#### 3.11.1. Clases principales.

El programa principal “main void” tiene una clase que ha sido llamada como “BB60C”, la misma que se utiliza varias clases y presenta los siguientes resultados:



**Figura 45** Espectro de señal y espectrograma.

A continuación, en la Tabla 4, se describe la funcionalidad y uso de cada una de las clases:

**Tabla 4**

*Descripción y funcionalidad de las clases utilizadas.*

Clase	Descripción
<b>BB60C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Representa la clase o Programa principal, a través de este se ejecutan las clases adicionales.</li> <li>• Realiza la lectura de los datos y a su vez la transmisión de los mismos a la clase EB200.</li> <li>• Inicializa el programa en base a la configuración inicial de los parámetros requeridos.</li> <li>• Desarrollo de interfaces y cuadros gráficos para la visualización de resultados.</li> </ul>
<b>C ArturoBB60C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se comunica con el equipo Signal Hound BB60C.</li> <li>• Obtiene los datos de la memoria del equipo.</li> </ul>
<b>CDatos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtiene de la clase Arturo View los datos (frecuencia, potencia, tiempo) para ejecutar el programa.</li> </ul>
<b>CEspectro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clase a través de la cual se programa para la esquematización y el dibujo del espectro de la señal.</li> </ul>
<b>CSonograma</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clase que grafica el panel sonograma.</li> </ul>
<b>CDF</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clase que programa el panel Direction Finder (DF)</li> </ul>
<b>C SERIAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la conmutación de las antenas para la obtención de los vectores de datos.</li> </ul>

### 3.11.2. Interfaz gráfica.

Para obtener la presentación visual de los resultados se realizó el diseño de una interfaz utilizando la plataforma MFC (Microsoft Foundation Class).

La interfaz tiene 4 paneles con varias funcionalidades y presentaciones que se requieren presentar en el sistema de DF para la banda de  $80\text{ MHz}$  hasta los  $2\text{ GHz}$  que se detallan a continuación:

- **ESPECTRO.** - Se visualiza el espectro de la señal en tiempo real para examinar la frecuencia deseada. El ancho de banda utilizado en la pantalla es de  $27\text{ MHz}$ .
- **ESPECTROGRAMA.** - Se visualiza el espectrograma de la señal recibida que representa la energía del contenido espectral que varía a lo largo del tiempo.
- **DIRECTION FINDER (DF).** – Se visualiza en la pantalla la dirección de arribo azimutal de la señal recibida.
- **CONFIGURACIÓN.** – Despliega opciones para el ingreso y variaciones de los parámetros como: frecuencia, ancho de banda, “span” y número de trazas.

### 3.12. Pruebas del Sistema.

Las pruebas de funcionamiento se desarrollaron en las canchas deportivas de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, utilizando un generador de señales, el equipo “Signal Hound BB60C” con una antena omnidireccional y un computador con el Software interfaz para la visualización del DF, ver Figura 46.



**Figura 46** Pruebas prácticas en campo abierto.

Las pruebas se realizaron utilizando el generador de frecuencia en  $1\text{ GHz}$ , ubicado en varias posiciones alrededor de nuestro receptor digital obteniendo los resultados de la Tabla 5:



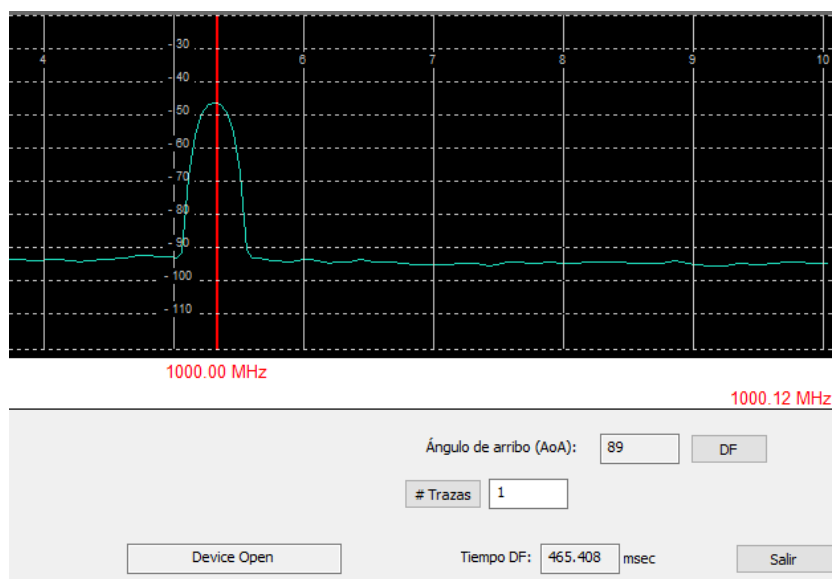
**Figura 47** Resultados de prácticas realizados en campo abierto.

Para obtener los resultados de las pruebas desarrolladas en campo abierto en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se tomaron 50 muestras de datos en varios puntos, de los cuales se obtuvo el promedio y sumando a este la varianza obtenemos el RMS (Root Mean Square), el cual nos indica el error estimado de la magnitud del AoA. Este valor es referencial para tomar en cuenta la diferencia entre los valores reales y los valores obtenidos en el sistema DF CICTE.

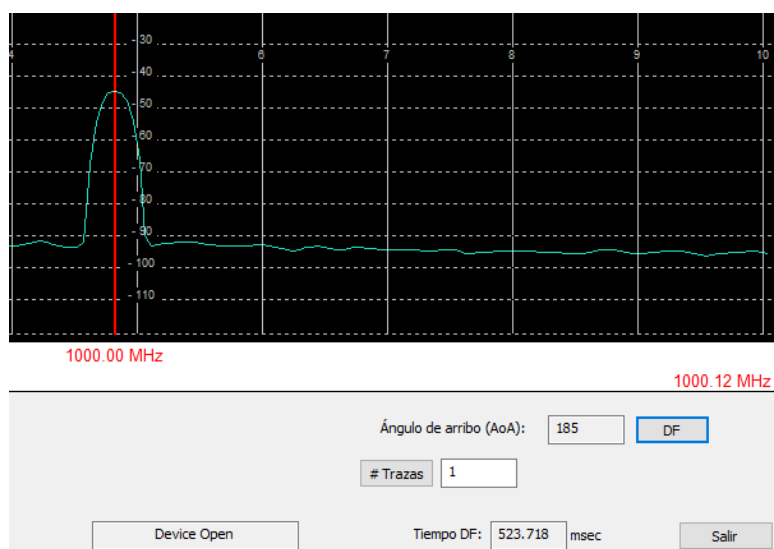
**Tabla 5**

*Resultados de pruebas en campo.*

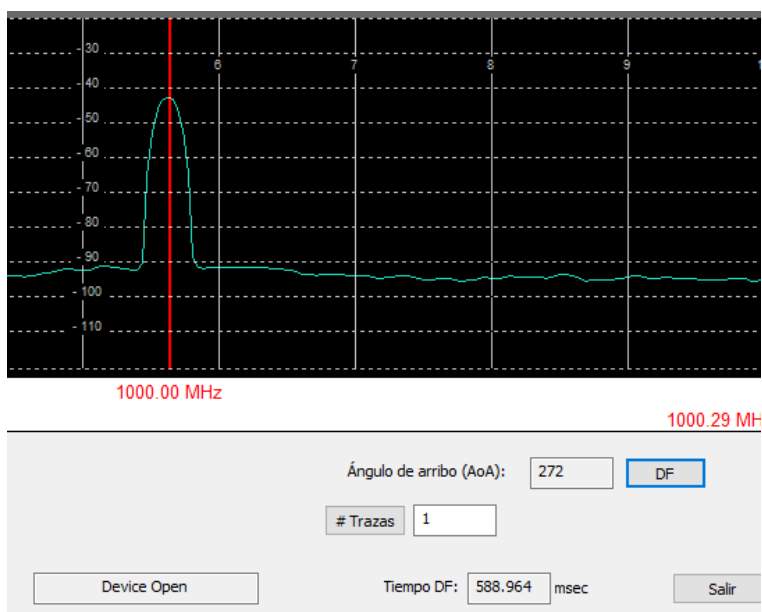
Posición del generador de señales (°)	Frecuencia (GHz)	RMS
0° (Norte)	1	5°
90° (Este)	1	8°
180° (Sur)	1	30°
270° (Oeste)	1	12°
<b>Promedio</b>		<b>14°</b>



**Figura 48** Prueba del DF con frecuencia 1GHz y azimut  $90^\circ$

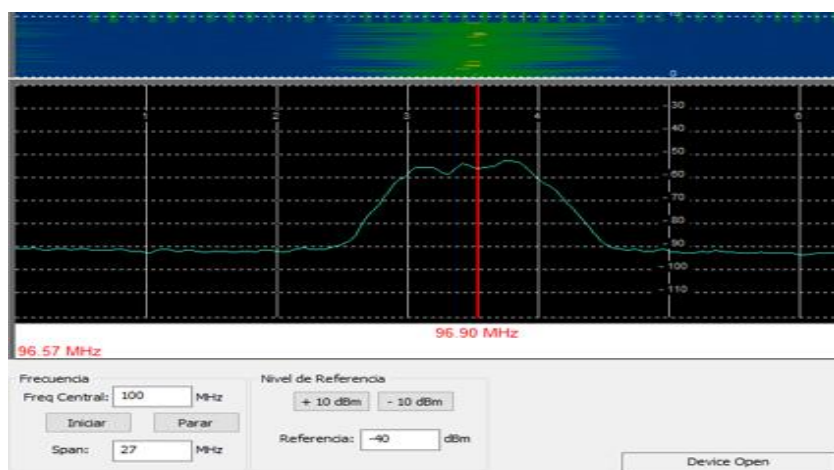


**Figura 49** Prueba del DF con frecuencia 1GHz y azimut  $180^\circ$



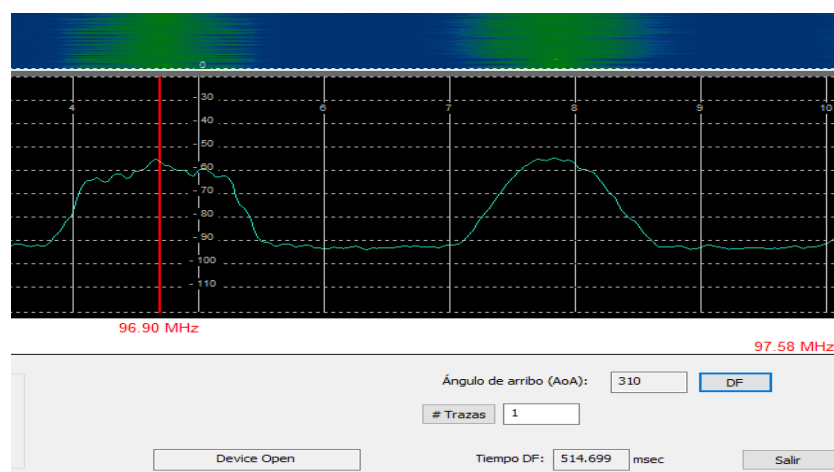
**Figura 50** Prueba del DF con frecuencia 1GHz y azimut 270°.

De la misma forma se realizó una prueba tomando en cuenta la banda de frecuencias de FM que cubre desde los 88 MHz a los 107 MHz para lo cual se escogió la frecuencia de los 96.9 MHz como se observa en la Figura 51, la cual su antena transmisora se encuentra ubicada en Cruz Loma en la parte noroccidental de la ciudad de Quito.



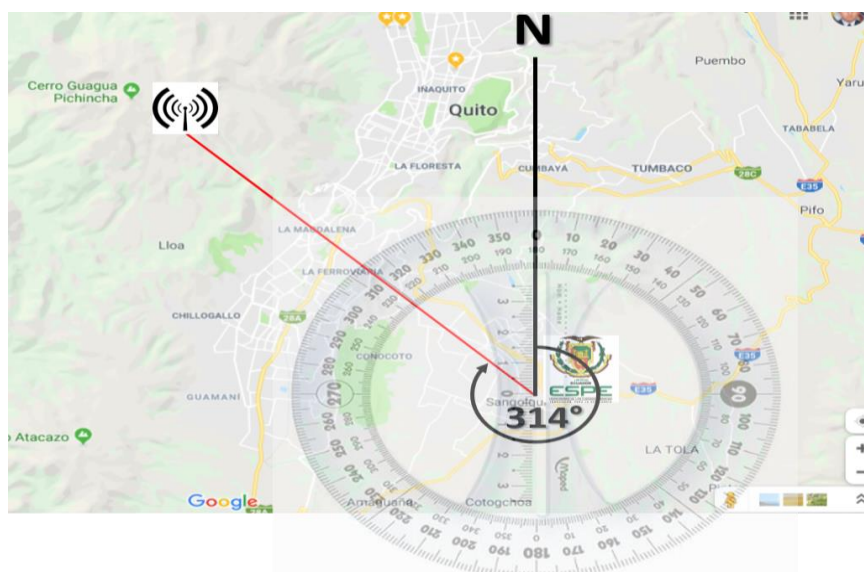
**Figura 51** Prueba con 96.9MHz, Span 27MHz.

Mediante la utilización del receptor digital Signal Hound y la aplicación DF CICTE se verificó que el azimut proporcionado por el sistema es de  $310^\circ$  como se observa en la Figura 52, mientras que con la utilización de Google Maps se identificó que el ángulo de arribo es de  $314^\circ$  encontrándonos con una diferencia de  $4^\circ$ .



**Figura 52** Resultado de  $310^\circ$  al transmisor de la emisora 96.9MHz.





*Figura 53* Azimut ejemplificado en la carta.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

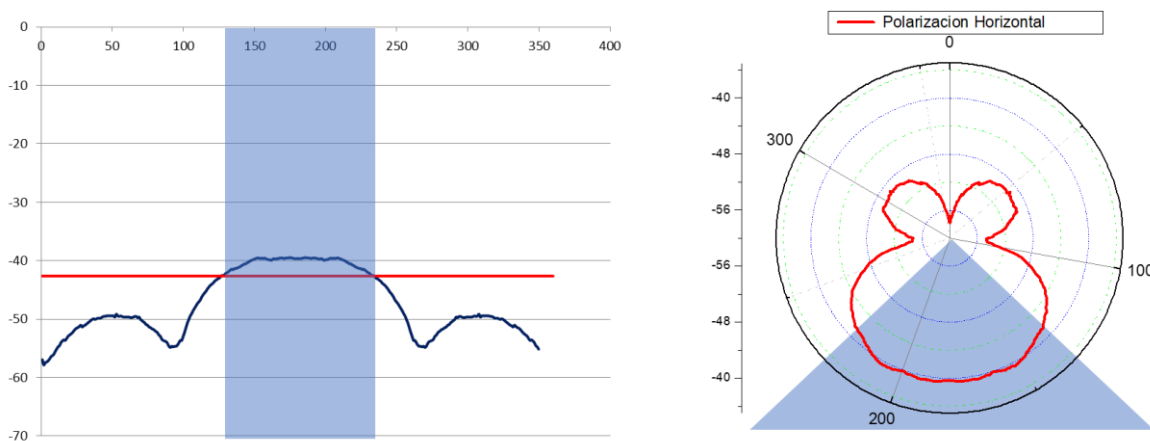
#### 4.1. Recepción de Señales Radioeléctricas.

El patrón o también llamado diagrama de irradiación de las antenas direccionales del arreglo de antenas, utilizadas en este proyecto de investigación determinan la medición de la distribución de potencia de la radiación recibida en sus  $360^\circ$  con un intervalo de  $1^\circ$ . Este patrón permite diferenciar los niveles de potencia para determinar con relativa precisión el ángulo de arribo de una señal electromagnética.

Las mediciones de la potencia de recepción se iniciaron colocando la antena direccional en dirección contraria a la antena emisora de referencia, por tal razón en los resultados del diagrama de radiación se obtiene la mayor potencia de recepción cuando la antena se encuentra frente a frente con la antena del generador, es decir a los  $180^\circ$ .

La representación del nivel de la señal, en coordenadas polares, nos ayuda a visualizar las características de la antena en cada dirección. En la Figura 38, se observa el diagrama polar de la antena utilizada con polarización vertical y se nota que la mayor cantidad de energía se irradia en los  $180^\circ$ , es decir cuando la antena se encuentra frente a frente con la señal recibida, con una cierta cantidad de energía que se irradia en direcciones no deseadas, formando dos lóbulos laterales en la parte posterior.

Para obtener el ancho del haz de la antena, se realizó la medición angular en aquella porción del espacio en donde la potencia irradiada es mayor o igual que la mitad de su valor máximo, es decir de  $-3\text{ dB}$  tal como se muestra en la Figura 39 y Figura 54 utilizando los diagramas de irradiación rectangulares y polares obtenidos con las mediciones realizadas en función a los  $360^\circ$  y la potencia registrada en nuestros equipos de recepción..



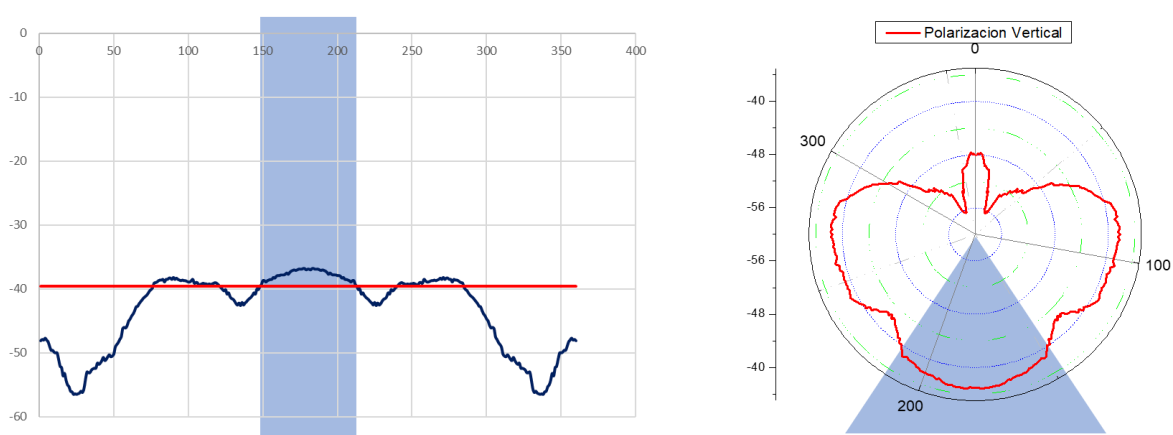
**Figura 54** Ancho de haz en los diagramas de irradiación con Polarización Horizontal.

La distancia angular entre los dos puntos de media potencia es de  $88^\circ$ , Figura 39 y Figura 54, lo cual representa el ancho del haz con polarización horizontal. Se debe tomar en cuenta que, a mayor ganancia de la antena, menor es el ancho del haz, es decir que mientras más estrecho sea el ancho del haz, la ganancia es mayor porque la energía está más concentrada. La distancia angular nos permite deducir que tenemos una mayor cobertura con cada una de las antenas directivas, y lo mejoramos colocando las 8 antenas que conforman nuestro arreglo de antenas para completar la cobertura azimutal.

Debemos recordar que el patrón de irradiación es un volumen, por lo que hay un ancho de haz horizontal y otro ancho de haz vertical, los cuales por lo general son diferentes.

En la Figura 33, se observa el diagrama polar de la antena utilizada con polarización vertical y se nota que la mayor cantidad de energía se irradia en los  $180^\circ$ , es decir cuando la antena se encuentra frente a frente con la señal recibida, con una cierta cantidad de energía que se irradia en direcciones no deseadas, formando dos grandes lóbulos laterales y un pequeño lóbulo posterior.

El ancho del haz de la antena con polarización vertical se obtiene de la medición angular en aquella porción del espacio en donde la potencia irradiada es mayor o igual que la mitad de su valor máximo, es decir de  $-3 \text{ dB}$  tal como se muestra en la Figura 40 y Figura 55, utilizando los diagramas de irradiación rectangulares y polares obtenidos con las mediciones realizadas es de  $60^\circ$ . La distancia angular obtenida nos permite deducir que tenemos una cobertura más angosta en relación a la polarización horizontal, por lo que se requiere realizar un apuntamiento más cuidadoso con la antena para que pueda cubrir el objetivo.



**Figura 55** Ancho de haz en los diagramas de irradiación con Polarización Vertical.

Uno de los puntos que se tomaron en cuenta fue que la polarización de las antenas transmisoras y receptoras deben ser “iguales” para optimizar la obtención del diagrama de irradiación.

La diferencia que se puede visualizar en la Figura 37, es que en la simulación existe únicamente un lóbulo trasero, mientras que en nuestro prototipo existen dos lóbulos traseros. Este fenómeno se puede explicar ya que en la práctica de laboratorio que se realizó no existe una medida exacta para colocar las antenas completamente paralelas con un grado de error igual a cero, pudiendo haberlo evitado de disponer una cámara anecónica. De la misma forma en la Figura 38, se puede visualizar diferencias mínimas los cuales de la misma forma se pueden justificar por la inexactitud en la colocación de los equipos de prueba utilizados en nuestro laboratorio.

#### **4.2. Comportamiento del arreglo de antenas.**

El arreglo de antenas utiliza un sistema de conmutación en un tiempo aproximado de 478,83 *ms* utilizando las 8 antenas directivas, obteniendo una traza de datos que son necesarios para determinar el ángulo de arribo de una señal electromagnética. Una traza de datos es una matriz que se genera para obtener el espectro de frecuencias con su respectiva potencia de recepción, con un ancho de banda máximo de 27 *MHz* de acuerdo a las características técnicas del equipo “Signal Hound BB60C”. En la interfaz gráfica que presentamos, el usuario tiene la facilidad de escoger el número de trazas que crea conveniente para obtener el AoA, con la ventaja de que mientras más trazas escoja, se obtendrán más muestras del espectro electromagnético que ayudarán al estudio de

datos con la reducción de posibles errores, ya que el determinar un dato en un tiempo demasiado corto forma parte de un proceso estocástico que puede variar por causas naturales, artificiales o aleatorios que varían constantemente. La desventaja del aumento de trazas para encontrar el AoA es el tiempo, ya que el sistema debe realizar un mayor procesamiento de datos para emitir el resultado, y de acuerdo a las pruebas realizadas se puede establecer un promedio de tiempos con un número determinado de trazas tal como se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Tiempo de ejecución de acuerdo al número de trazas.*

Número de Trazas	Tiempo de ejecución	Efectividad (%)
1	478,83 ms	90 %
3	1164,82 ms	92 %
5	1873,00 ms	94 %
10	3579,54 ms	96 %
20	6711,43 ms	98 %

Luego de terminar este proceso, se repite el análisis de forma inmediata, permitiendo una actualización del escaneo de la señal de forma continua con cada una de las antenas en sus sectores de responsabilidad. La conmutación de las 8 antenas nos permite actualizar los resultados cada 500 *ms*, en donde luego de realizar el análisis de las potencias con cada una de nuestras antenas directivas podemos determinar el ángulo de arribo de una frecuencia determinada. El software implementado nos permite obtener el DF de forma inmediata gracias al uso de las nuevas tecnologías que nos garantizan mayor velocidad, conectividad, acceso de datos y automatización de los programas, lo que ha acelerado la búsqueda de la dirección de una señal radioeléctrica de manera eficiente.

### 4.3. Ángulo de Arribo

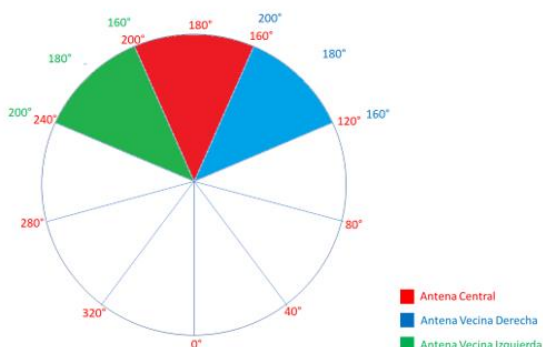
Tomando en cuenta que los resultados de la estimación del ángulo de arribo pueden verse afectados por factores externos o propios de los equipos, se tomaron en cuenta muchos aspectos importantes para evitar interferencias y efectos extraños que distorsionen los resultados. Luego de tomar en cuenta varios factores influyentes, las pruebas nos muestran un bajo índice de error en la obtención de los resultados de la estimación del ángulo de arribo.

Al revisar el diagrama de irradiación se observa que la mayor potencia obtenida es cuando nuestra antena de recepción se encuentra frente a frente a la antena de transmisión, por lo que luego de realizar la conmutación de las 8 antenas directivas podemos comparar sus potencias y determinar la antena que se encuentra con el mayor frente a la antena de transmisión, la cual ha sido nombrada como “Antena Central” y ésta es la que nos ayuda a encontrar el AoA de la frecuencia solicitada.

La antena central tiene una cobertura de  $40^\circ$ , por lo que es necesario determinar con mayor precisión el ángulo de arribo, por lo que es necesario comparar las potencias obtenidas por las antenas adyacentes a la antena central, para escoger la mayor potencia y ubicar la inclinación del ángulo, sea a la derecha o a la izquierda de la antena central.

Una vez determinada la antena central y la antena adyacente se determina la relación entre las potencias recibidas en cada antena, para ubicar con relativa precisión el ángulo de arribo. Para realizar este procedimiento se debe ubicar los ángulos de arribo con sus respectivas potencias utilizando los datos obtenidos en el diagrama de irradiación como se puede observar en la Figura

56, tanto para la antena adyacente que se encuentra al lado derecho como para la que se encuentra en su lado izquierdo.



**Figura 56** Relación entre la antena central con sus antenas vecinas.

Cuando obtenemos los valores de potencia en cada una de las antenas podemos establecer la relación entre las mismas, por lo que se generó una tabla de relación de potencias para ubicar de forma rápida y con relativa exactitud del ángulo de arribo de una señal determinada.

En la Figura 56 se puede verificar a una antena central (rojo), con sus antenas adyacentes (azul a la derecha y verde a la izquierda), en donde la antena central elige la inclinación hacia uno de los dos lados dependiendo la antena que tenga mayor potencia. Supongamos que nuestro ángulo de arribo es de  $170^\circ$  en la antena central, el sistema elige a la antena central (rojo) con mayor potencia de recepción, y elige como su antena adyacente a la de la derecha (azul), que tiene mayor potencia de recepción que la antena de la izquierda (verde). Si el ángulo de arribo es de  $170^\circ$  para la antena central (rojo), la potencia de relación para la antena derecha debe ser tomada en  $210^\circ$ .



La potencia medida en la antena central en  $170^\circ$  es  $-39,50 \text{ dBm}$ , mientras que la potencia de irradiación de la antena adyacente derecha en  $210^\circ$  es  $-39,70 \text{ dBm}$ . Para encontrar la relación de potencias primero cambiamos las unidades a [mW] y luego dividimos el valor de la antena derecha para el valor de la antena central obteniendo un valor adimensional que es el cociente entre las dos potencias, es decir igual a 0,954992586.

*NOTA: La relación de potencias de la Tabla 7 se obtuvo transformando las potencias expresadas en dBm a mW*

**Tabla 7**

*Relación de la antena con mayor radiación y su antena vecina derecha.*

Antena Central (°)	Antena Central (dBm)	Antena Derecha (°)	Antena Derecha (dBm)	Relación de Potencias Derecha[mW] / Central [mW]
160	-39,60	200	-39,60	1
161	-39,59	201	-39,61	0,995405417
162	-39,58	202	-39,62	0,990831945
163	-39,57	203	-39,63	0,986279486
164	-39,56	204	-39,64	0,981747943
165	-39,55	205	-39,65	0,977237221
166	-39,54	206	-39,66	0,972747224
167	-39,53	207	-39,67	0,968277856
168	-39,52	208	-39,68	0,963829024
169	-39,51	209	-39,69	0,959400632
170	-39,50	210	-39,70	0,954992586
171	-39,49	211	-39,83	0,924698174
172	-39,48	212	-39,96	0,895364766
173	-39,47	213	-40,09	0,866961876
174	-39,46	214	-40,22	0,839459987
175	-39,45	215	-40,35	0,812830516
176	-39,44	216	-40,48	0,78704579
177	-39,43	217	-40,61	0,76207901
178	-39,42	218	-49,88	0,73790423
179	-39,41	219	-40,87	0,714496326
180	-39,40	220	-41,00	0,691830971

Ahora supongamos que nuestro ángulo de arribo es de  $195^\circ$ , el sistema debe elegir a la antena central a la que se encuentra de color rojo, y elegirá como su antena adyacente a la que se encuentra de color verde, ya que tendrá mayor potencia de recepción que la antena que se encuentra de color azul. Si el ángulo de arribo es de  $195^\circ$  para la antena central (rojo), la potencia de relación para la antena adyacente derecha debe ser tomada en  $155^\circ$ .

La potencia de irradiación de la antena central en  $195^\circ$  es  $-39,55 \text{ dBm}$ , mientras que la potencia de irradiación de la antena adyacente izquierda en  $155^\circ$  es  $-39,65 \text{ dBm}$ . Para encontrar la relación de potencias primero cambiamos las unidades a [mW] y luego dividimos el valor de la antena izquierda para el valor de la antena central obteniendo un valor adimensional que es el cociente entre las dos potencias, es decir igual a 0,977237221.

**Tabla 8**

*Relación de la antena con mayor radiación y su antena vecina izquierda*

Antena Central (°)	Antena Central (dBm)	Antena Derecha (°)	Antena Derecha (dBm)	Relación de Potencias Derecha[mW] / Central [mW]
140	-41,00	180	-39,40	0,691830971
141	-40,87	181	-39,41	0,714496326
142	-40,74	182	-39,42	0,73790423
143	-40,61	183	-39,43	0,76207901
144	-40,48	184	-39,44	0,78704579
145	-40,35	185	-39,45	0,812830516
146	-40,22	186	-39,46	0,839459987
147	-40,09	187	-39,47	0,866961876
148	-39,96	188	-39,48	0,895364766
149	-39,83	189	-39,49	0,924698174
150	-39,70	190	-39,50	0,954992586
151	-39,69	191	-39,51	0,959400632
152	-39,68	192	-39,52	0,963829024

153	-39,67	193	-39,53	0,968277856
154	-39,66	194	-39,54	0,972747224
155	-39,65	195	-39,55	0,977237221
156	-39,64	196	-39,56	0,981747943
157	-39,63	197	-39,57	0,986279486
158	-39,62	198	-39,58	0,990831945
159	-39,61	199	-39,59	0,995405417
160	-39,60	200	-39,60	1

En las tablas de relación se puede observar que la relación entre la antena central y su antena adyacente tiene una diferencia bastante pequeña entre un grado y otro, por lo que la precisión y la exactitud de los resultados encontrados en las pruebas de campo son muy importantes para determinar exactamente el ángulo de arribo de la señal buscada.

La precisión está determinada por los valores de relación entre la antena con mayor ganancia y sus antenas vecinas, tomando en cuenta que las antenas mantienen la misma relación de una señal generada desde un mismo punto independientemente de la distancia y frecuencia que se encuentre el generador de la señal.

Con estos datos podemos garantizar que el ángulo de arribo encontrado tiene una relativa precisión y estabilidad, razón por la cual es un procedimiento confiable para realizar nuestra investigación y análisis. El uso del software nos permite estimar el ángulo de arribo de una señal con un procesamiento en tiempo real utilizando tecnología de procesamiento de alta velocidad con el equipo “Signal Hound BB60C”, que nos permite analizar múltiples señales con sus respectivas características de forma simultánea con alta precisión y efectividad.

#### 4.4. Pruebas de Uso con la interfaz gráfica.

Para comprobar la efectividad de nuestro sistema de DF, se realizaron varias pruebas, para la determinación del ángulo de arribo. El generador de señales con una frecuencia de 1 GHz alimentó a la antena de referencia ubicada en el foco del plato y se colocó en varias posiciones con diferentes ángulos, en relación a nuestro sistema de recepción, y utilizando nuestro sistema de DF se pudo determinar las siguientes ubicaciones que se muestran en la Tabla 9:

**Tabla 9**

*Ángulo de arribo en varios puntos.*

Posición del generador de señales (°)	Frecuencia (GHz)	DF (°)	Diferencia	Error (%)
50°	1	40°	10°	2,78%
90°	1	100°	10°	2,78%
165°	1	160°	5°	1,39%
180°	1	180°	0°	0%
190°	1	200°	10°	2,78%
262°	1	280°	18°	5%
270°	1	260°	10°	2,78%
330°	1	320°	10°	2,78%
<b>Promedio</b>			<b>9,125°</b>	<b>2,53%</b>

El error se obtiene tomando en cuenta que tenemos 360 posibilidades de ángulo de arribo, por lo que cuando difiere 1° se reduce 0,278% de efectividad respecto al 100%. Con los resultados obtenidos se puede determinar que el proceso para determinar el DF en nuestro trabajo de investigación tiene un error porcentual de 2,53% y una efectividad del 97,47%.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Se desarrolló el primer sistema de DF (Direction Finding) hecho en el Ecuador, para la banda de los  $80\text{MHz}$  a  $2\text{GHz}$  utilizando UN receptor digital en tiempo real “Signal Hound BB60C”, para la recepción de señales en banda ancha empleando un arreglo de antenas directivas para alcanzar una cobertura de  $360^\circ$ .
- Se realizó la configuración de la comunicación entre el receptor digital BB60C y un computador utilizando un bus universal (USB), el mismo que permitir interactuar en tiempo real y disponer de los datos resultantes del monitoreo espectral a una tasa de  $24\text{GHz/s}$ , la que comparada con los  $300\text{MHz/s}$  del actual sistema Arturo del AGRUCOMGE, representa un desempeño superior de 80 veces.
- Se realizó basados en el ambiente del Sistema Arturo el diseño del software para la visualización de resultados en un computador que nos permite obtener un entorno gráfico para el monitoreo del espectro radioeléctrico desde los  $80\text{MHz}$  hasta los  $2\text{GHz}$ , el mismo que nos proporciona varios parámetros y características de las señales radioeléctricas que se encuentran en el espectro electromagnético.
- Se empleó un arreglo de antenas para realizar el monitoreo del espectro en  $360^\circ$ , empleando 8 antenas direccionales controladas por un conmutador de RF, que

realiza una conmutación secuencial programada para la obtención de datos (8 antenas) cada 500ms.

- Se desarrolló un software utilizando las herramientas de *Microsoft Visual Studio* ®, bajo filosofía del Arturo, que permiten la compilación, optimización y visualización del DF en un ordenador de forma inmediata empleando las nuevas tecnologías del mundo digital con una mayor velocidad, conectividad, acceso de datos y automatización de la información.
- El desarrollo del sistema de DF (Direction Finding) es un primer aporte para las unidades militares de las Fuerzas Armadas, para optimizar los sistemas de búsqueda, interceptación y localización de señales electromagnéticas que facilitan el monitoreo y la detección del ángulo de arribo en tiempo real, lo cual permite alcanzar un sistema eficiente que contribuyen al apoyo de sus operaciones castrenses.
- La visualización de la potencia recibida en las ocho antenas direccionales en un tiempo corto y de manera automática nos abren el camino para utilizar y seguir optimizando este sistema que reemplazará al sistema de búsqueda de direcciones (DF) actuales que manejan las unidades de Guerra Electrónica del Ejército Ecuatoriano, ya que éstas se desempeñan de forma analógica y sobre todo de forma manual por parte de los radioperadores.

## 5.2. Recomendaciones

- Se recomienda solicitar capacitaciones a los proveedores de los equipos tecnológicos adquiridos por cualquier institución pública o privada para facilitar el uso, la manipulación y obtención de datos de los mismos, ya que esto permite explotar de forma eficiente los equipos ahorrando tiempo y costos a las personas que realizan sus estudios e investigaciones.
- Se recomienda incentivar a los alumnos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE para que realicen capacitaciones e inducciones sobre sus proyectos e investigaciones realizados, con la finalidad de integrarlos y familiarizarlos con los demás alumnos y de esta manera alcanzar un conocimiento continuo y coordinado.
- Realizar investigaciones empleando equipos de nuevas tecnologías del mundo digital para obtener sistemas con una mayor automatización, velocidad, conectividad y acceso de datos.
- Se recomienda realizar trabajos de investigación con equipos que realicen la transmisión y recepción de datos en tiempo real, con una comunicación de datos que tenga compatibilidad con varios softwares que realicen una interfaz gráfica y análisis de datos como el *Microsoft Visual Studio* ®.
- Realizar un estudio de los equipos tecnológicos que disponen las unidades de Guerra Electrónica de las Fuerzas Armadas para integrar el sistema de DF utilizado en el presente proyecto.

### 5.3. Trabajos Futuros

- Realizar futuros estudios para optimizar el sistema de DF (Direction Finding) en diferentes anchos de banda con la adquisición de equipos de nueva tecnología que permitan la obtención de datos en tiempo real del espectro de señales, es decir, mayor ancho de banda instantáneo.
- Implementar sistemas de DF utilizando técnicas de alta resolución (MUSIC), para lo cual se requiere que se adquieran un mayor número  $N$  de receptores digitales del tipo BB60C o superiores, al menos  $N = 5$ , que trabajen con una única referencia para que la recepción de los  $N$  receptores sea coherente.
- Integrar el sistema de detección automático de señales radioeléctricas con el sistema de DF en un ancho de banda determinado con la finalidad de encontrar todas las frecuencias y su respectiva ubicación de la emisión de la señal en tiempo real.
- Implementar del presente proyecto en las unidades de Guerra Electrónica de las Fuerzas Armadas considerando la disponibilidad de equipos analógicos y digitales que disponen en la actualidad.
- Realizar el DF de las señales radioeléctricas utilizando un software que incorpore un mapa digital de la geografía del terreno para visualizar de mejor forma la ubicación de los puntos donde se generan las radiofrecuencias.



- Emplear 2 o más sistemas de DF que permitan la triangulación de los ángulos de arribo para determinar la ubicación exacta en coordenadas geográficas de los equipos que generan las radiofrecuencias.

## REFERENCIAS

- AG, A. (2018). *Spectran V5 X / USB*. Strickscheid, Alemania : Aaronia AG.
- AG, A. (s.f.). *Aaronia AG*. Obtenido de <https://www.aaronia-shop.com/products/spectrum-analyzer/real-time/20ghz-real-time-rf-recorder>
- André Thiébaud, M. J. (2006). *Receptor Super-Regenerativo (900 MHz) Implementado em Tecnologia CMOS 0,35  $\mu$ m*. Universidade Estadual de Campinas, Río de Janeiro.
- Cerna Muñoz, J. P., & Morejón Patiño, J. F. (2008). *Técnicas de conformación del lóbulo de irradiación de un arreglo de sensores y su aplicación en el acceso múltiple por división de espacio*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí.
- Colombo, J. C. (2012). *Medición de Parámetros de Dispersión "S"*. Argentina.
- Dennis D, V. (1993). *Electronic Warfare Receiving Systems*. Boston.
- Devices, A. (s.f.). *Patente n° HMC321ALP4E*.
- Ecuador, C. d. (2008).
- ESPOL. (s.f.). *Servicio de Localización a través de una red UMTS*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10772/1/3%20Presentaci%C3%B3n%20Servicio%20de%20Localizaci%C3%B3n%20a%20trav%C3%A9s%20de%20una%20red%20UMTS.pdf>
- García , L., & Castaño, F. (s.f.). *Guerra Electrónica*. Universidad Pontificia Comillas, Madrid.

- García Yáñez, M. Á. (2012). *Estimación de la Dirección de Arribo de Señales a Arreglos de Antenas de Fase*. Instituto Politécnico Nacional, México.
- García Yáñez, M. A. (2013). *Estimación de la Dirección de Arribo de Señales a Arreglos de Antenas de Fase*. Instituto Politécnico Nacional., México.
- González Flores , N. C. (2004). *Estudio y Evaluacion de las tecnologías aplicadas a la inteligencia de comunicaciones COMINT*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- González Sánchez, J. C. (2007). *Modernización Y Repotenciación Del Sistema De Df (Direction Finding) Del Vehículo De Guerra Modernización y repotenciación del sistema de DF (Direction Finding) del vehículo de guerra electrónica pasiva de la Fuerza Terrestre Ecuatoriana Comint*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolqui.
- Hound, Signal. (2014). *BB60C Production Data Sheet*.
- Inc., S. H. (2019). *Signal Hound*. Obtenido de <https://signalhound.com/products/bb60c/>
- Kaiser, S. (2008). *Digital Receiver Technology, Architecture and Aplication*. Northrop Grumman Corporation.
- Ligña, D., & Yaselga, L. (2011). *Propuesta de Diseño, para modernizar el sistema de interceptación en Telecomunicaciones (SIMTEL), aplicando el sistema COMINT de Guerra Electrónica*. Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga., Latacunga.
- Microsoft. (2018). *Introducción al IDE de Visual Studio*. Obtenido de <https://docs.microsoft.com/es-es/visualstudio/ide/visual-studio-ide>

- Moya Lozada, B. F. (2018). *Localización y evaluación de señales radioeléctricas con el análisis de la radiogoniometría de WATSON-WATT de la antena de Direction Finder HF ADD119 de guerra electrónica y desarrollo de una aplicación para el monitoreo de las señales.* Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolqui.
- N.S., J., & Noll, P. (1984). *Digital Coding of Waveforms.* Berlín, Alemania.
- Neri, F. (1991). *Introduction to Electronic Defense Systems.* Boston.
- Poisel, R. (2002). *Introduction to Communication Electronic Warfare Systems.* Boston: Artech House, INC.
- Reyes, N. (2006). *Integración Física de un amplificador de Bajo Ruido a un Receptor en 100 GHz.* Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Schleher, C. (1999). *Electronic Warfare in the Information Age.* Artech House, INC.
- Trujano, F., Chan, B., Beams, G., & Rivera, R. (11 de Mayo de 2016). *web.mit.edu.* Obtenido de <https://courses.csail.mit.edu/6.857/2016/files/9.pdf>
- Tsui, J. B.-Y. (1989). *Digital Microwave Receivers.* Norwood: Artech House, INC.
- Tsui, J. B.-Y. (1995). *Digital Techniques for Wideband Receivers.* London: Artech House.