



**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 MONITOREADOR DE DRONES  
COMERCIALES WIFI, QUE LOS DETECTE, IDENTIFIQUE Y  
LOCALICE.**

**AUTORES:**

**PONCE CONSTANTE, ERICK DANILO**

**ULLOA ROVALINO, JORGE ANDRÉS**

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

**SANGOLQUÍ**

**2019**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DESARROLLO DE UN SISTEMA MONITOREADOR DE DRONES COMERCIALES WIFI, QUE LOS DETECTE, IDENTIFIQUE Y LOCALICE”*** fue realizado por los señores ***Ponce Constante, Erick Danilo y Ulloa Rovalino, Jorge Andrés*** 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, 2 de julio del 2019



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



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, *Ponce Constante, Erick Danilo* y *Ulloa Rovalino, Jorge Andrés*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Desarrollo de un sistema monitoreador de drones comerciales wifi, que los detecte, identifique y localice* 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, 2 de julio del 2019



**Ponce Constante, Erick Danilo**  
C.C 1722573266



**Ulloa Rovalino, Jorge Andrés**  
C.C 1721496675



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, *Ponce Constante, Erick Danilo* y *Ulloa Rovalino, Jorge Andrés* autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *Desarrollo de un sistema monitoreador de drones comerciales wifi, que los detecte, identifique y localice.* en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 2 de julio del 2019

**Ponce Constante, Erick Danilo**  
C.C 1722573266

**Ulloa Rovalino, Jorge Andrés**  
C.C 1721496675

## DEDICATORIA

El presente trabajo de tesis se lo quiero dedicar a mis padres María Dolores y Emilio Ponce, por ser el pilar fundamental en toda mi vida, por apoyarme a cumplir mis sueños y creer en mí. A mis hermanos por siempre apoyarme en todas las etapas de mi vida personal y estudiantil. A mi tía Rocío quien ha sido como una madre para mí guiándome al camino correcto cuando lo necesitaba. A mis abuelitos quienes me supieron querer y bendecir en cada una de las etapas de mi vida.

*Para ustedes con todo mi cariño, Erick*

Este trabajo va dedicado a mi Madre, quien con su esfuerzo y sacrificio supo darme todo el apoyo necesario para lograr una meta más a pesar de todas las adversidades, nunca podre retribuirte todo lo que has hecho por mí, todo esto es para ti Madre mía.

Aunque la vida no me dio un Padre, me obsequio algo mejor, un Pedro Calispa, quien me educo con su amor y paciencia, me enseñó valores, ética y moral, siempre cuidó de mí, esto también va para ti, Gracias Papa Pedro.

*Para ustedes con todo mi corazón, Andrés*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres por apoyarme a lo largo de la carrera universitaria, dándome consejos y palabras de aliento para seguir adelante. A mis hermanas que fueron mis confidentes y supieron escucharme y apoyarme en los momentos difíciles.

Al Ingeniero Héctor Moya quien fue una parte fundamental dentro del desarrollo del trabajo de titulación, aportando con su conocimiento, su tiempo y en ocasiones su hogar para cumplir con el objetivo de culminar con éxito el trabajo.

Al nuestro tutor el Ingeniero Rubén León que supo guiarnos durante todo el desarrollo apoyando en cada una de las etapas de investigación y desarrollo de la tesis

A mis amigos Jorge, Erika, Daniel Jhos y Marco, con los cuales formamos una gran amistad hasta convertimos en familia, superando varios obstáculos académicos y los puestos por la vida. A mis amigos Naty, Cinty, Pao, Daniela por ser parte de todos estos semestres, por apoyarnos en cada una de las cosas y por culminar con éxito ese largo camino.

A mi compañero de tesis Andrés Ulloa con quien ha sido una parte importante dentro del desarrollo de la tesis, logramos cumplir todos los objetivos planteados al principio, gracias por todo.

*Con todo cariño para ustedes, Erick*

Quiero agradecer a mi hermosa familia que la vida me dio, por todas las cosas que me supieron inculcar, siempre con cariño y en busca de mi bienestar, todo lo que soy es gracias a ustedes, y aunque solo somos 3 sentados en esa mesa grande, siempre sentí que faltaba espacio para expresar

todo el cariño que sentía en su compañía, Gracias Madre y Pedro por darme la mejor familia del mundo.

A mi Tutor el Ingeniero Rubén León, quien me guio en todo este proceso y me supo instruir en lo esencial, dedico su tiempo con paciencia a la realización de este trabajo y siempre estuvo ahí escuchando de la manera más gentil nuestras consultas, el mundo se merece más docentes como usted Ingeniero León, de corazón muchas gracias.

Al Ingeniero Moya, a quien no le importo recibirnos en su propia casa con nuestras consultas, y siempre con la gentileza que le caracteriza nos supo ayudar de la manera más noble y desinteresada al desarrollo de este trabajo, y nunca nos hizo pasar hambre pues siempre nos ofreció comida.

A mis amigos ya que con ellos empecé esta hermosa etapa, y no lo hubiera logrado de no ser por ellos, amigos Guaifi (Erick, Daniela, Erika, Cintya, Jorge, Pao, Naty), se formó una familia a partir del compañerismo, siempre ayudándonos los unos a los otros, gracias a todos y cada uno de ustedes. Amigo Erick, realizar este trabajo contigo ha sido una de las mejores decisiones que he tomado, con dedicación, constancia y trabajo duro conseguimos algo que creíamos imposible, Gracias amigo.

Primo Galo siempre me ayudaste sin pedir nada a cambio, me apoyaste y aconsejaste cada vez que necesite, me echaste una mano cuando nadie más lo hizo por eso siempre estaré agradecido contigo, gracias loco primo.

Hermano Cris, hermano de otra madre, siempre te estaré agradecido por todo el apoyo que me has brindado sea a la hora que sea y sea el día que sea, nunca me dijiste que no cuando recurrí a ti, y

hasta para trabajar somos un gran equipo, hemos compartido muchas cosas, algunas buenas y otras no tanto, pero lo importante es que siempre nos hemos apoyado y lo seguiremos haciendo, gracias de todo corazón.

*Gracias a todos con mucho cariño, Andrés*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
1. DESCRIPCIÓN.....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Justificación e Importancia .....	2
1.3. Alcance del Proyecto.....	4
1.4. Objetivos 4	
1.4.1. General .....	4
1.4.2. Específicos.....	4

1.5. Resumen de Contenidos .....	5
CAPÍTULO II .....	7
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Guerra electrónica. ....	7
2.1.1. Soporte Electrónico (EA) .....	7
2.1.2. Ataque Electrónico (EA) .....	8
2.1.3. Protección Electrónica (EP) .....	9
2.2. Sistemas no tripulados.....	10
2.2.1. Vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles, UAV).....	10
2.3. Detección de señales radioeléctricas emitidas por Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV)..	12
2.3.1. Método de monitoreo basado en video.....	13
2.3.2. Método de monitoreo basado en Radar. ....	13
2.3.3. Método de monitoreo basado en Radio Frecuencia (RF).....	14
2.3.4. Método de monitoreo basado en WiFi .....	15
2.4. Receptor digital de banda ancha. ....	16
2.4.1. Parámetros medidos por un receptor digital de banda ancha (receptor EW). ....	16
2.5. Componentes de un vehículo aéreo no tripulado de ala giratoria (DRON). ....	17
2.5.1. Dispositivo móvil. ....	17
2.5.2. Control Remoto .....	18
2.5.3. Dron.....	18

CAPÍTULO III .....	20
3. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO, DETECCIÓN Y LOCALIZACION DE DRONES.....	20
3.1. Consideraciones de diseño .....	21
3.2. Sistema mecánico de monitoreo.....	21
3.2.1. Estructura General .....	21
3.2.2. Torre giratoria.....	23
3.3. Desarrollo de Software de monitoreo, detección y localización.....	26
3.3.1. Comunicación con el Receptor Digital.....	27
3.3.2. Interfaz grafica.....	36
3.3.3. Sincronización del software con el giro de la torre .....	41
3.3.4. Recepción de datos de radiofrecuencia .....	43
3.3.5. Estimación del ángulo de arribo .....	44
3.3.6. Modelo de propagación para estimación de distancia del Dron.....	47
CAPÍTULO IV .....	49
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	49
4.1. Pruebas realizadas con el receptor digital Aaronia Spectran V5 .....	49
4.2. Pruebas realizadas con el receptor digital Signal Hound BB60C .....	53
4.3. Estimación del ángulo de arribo de la señal de radiofrecuencia del dron.....	62
4.4. Cálculo de la distancia aproximada del dron .....	64

CAPÍTULO V .....	67
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
5.1. Conclusiones .....	67
5.2. Recomendaciones.....	69
5.3. Trabajos Futuros.....	70
REFERENCIAS .....	72

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> <i>Comparación del ángulo de arribo - posición dentro del vector promedio</i> .....	47
<b>Tabla 2.</b> <i>Niveles de potencia Obtenidos por el receptor Spectran V5</i> .....	51
<b>Tabla 3.</b> <i>Nivel de potencia de cada una de las trazas.</i> .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i><b>Figura 1</b></i> Escenario genérico de una intercepción de señales de RF. ....	8
<i><b>Figura 2</b></i> Escenario genérico de una ataque electrónico al receptor .....	9
<i><b>Figura 3</b></i> UAV ala rotatoria DJI Phantom 4 .....	11
<i><b>Figura 4</b></i> UAV de ala fija Parrot Disco-PRO AG.....	11
<i><b>Figura 5</b></i> Vista general del sistema Dron. ....	17
<i><b>Figura 6</b></i> Diagrama de bloques del Sistema.....	20
<i><b>Figura 7</b></i> Modelo estructural del Prototipo .....	21
<i><b>Figura 8</b></i> Estructura de la torre.....	22
<i><b>Figura 9</b></i> Estructura total.....	23
<i><b>Figura 10</b></i> Diagrama de Flujo del movimiento del motor.....	25
<i><b>Figura 11</b></i> Vista de clases del proyecto Dron Detector.....	29
<i><b>Figura 12</b></i> Código de Configuración del receptor digital. ....	30
<i><b>Figura 13</b></i> Código para la obtención del espectro radioeléctrico.....	31
<i><b>Figura 14</b></i> Código para el escaneo del espectro radioeléctrico. ....	31
<i><b>Figura 15</b></i> Código para detener el escaneo del espectro radioeléctrico. ....	32
<i><b>Figura 16</b></i> Parámetros de configuración para el escaneo del espectro radioeléctrico.....	34
<i><b>Figura 17</b></i> Código para la conexión del receptor digital. ....	35
<i><b>Figura 18</b></i> Código para la desconexión del receptor digital.....	36

<b>Figura 19</b> Interfaz gráfica del sistema de monitoreo.....	37
<b>Figura 20</b> Código función “DibCirculo” .....	38
<b>Figura 21</b> Código función “DibGrilla” .....	39
<b>Figura 22</b> Código función “Rotar” .....	40
<b>Figura 23</b> Sincronización de la torre .....	41
<b>Figura 24</b> Código que envía el dato serial a la torre .....	42
<b>Figura 25</b> Matriz de datos de niveles de potencia .....	43
<b>Figura 26</b> Grafico de la traza número 1 (a) en función de la Frecuencia (b) en función del número de Muestras.....	45
<b>Figura 27</b> Espectro de RF del dron en un ángulo de 0° .....	49
<b>Figura 28</b> Espectro de RF del dron en un ángulo de 90° .....	50
<b>Figura 29</b> Espectro de RF del dron en un ángulo de 180° .....	50
<b>Figura 30</b> Gráfico de los niveles de potencia obtenidos por el receptor Spectran V5 .....	52
<b>Figura 31</b> Escenario para las pruebas.....	55
<b>Figura 32</b> Gráfica del espectro de RF traza 1 y 2.....	56
<b>Figura 33</b> Gráfica del espectro de RF traza 3 y 4.....	56
<b>Figura 34</b> Gráfica del espectro de RF traza 5 y 6.....	58
<b>Figura 35</b> Gráfica del espectro de RF traza 7 y 8.....	58
<b>Figura 36</b> Gráfica del espectro de RF traza 9 y 10.....	59
<b>Figura 37</b> Gráfica del espectro de RF traza 11 y 12.....	59

<b>Figura 38</b> Gráfica del espectro de RF traza 13 y 14.....	60
<b>Figura 39</b> Gráfica del espectro de RF traza 15 y 16.....	60
<b>Figura 40</b> Gráfica del espectro de RF traza 17 y 18.....	61
<b>Figura 41</b> Gráfica del espectro de RF traza 19 y 20.....	61
<b>Figura 42</b> Nivel máximo de potencia de la señal del dron.....	63
<b>Figura 43</b> Posición del nivel más alto de potencia de la señal de dron.....	63
<b>Figura 44</b> Resultado final del sistema de monitoreo.....	64
<b>Figura 45</b> Distancia calculada por el software desarrollado .....	65

## **RESUMEN**

El presente trabajo muestra el desarrollo de un sistema de monitoreo de drones comerciales wifi, el cual permite identificar, detectar y localizar dichos dispositivos, el desarrollo se lo ha enfocado a incrementar las capacidades operativas de las Fuerzas Armadas en los lugares identificados como zonas de conflicto, para lo cual se realizó el análisis de los métodos de detección de señales de radiofrecuencia mediante el uso de receptores digitales de banda ancha, por otra parte también hizo el análisis de las diversas técnicas para la determinación del ángulo de arribo (DF) de señales de radiofrecuencia con anchos de banda de al menos 40 MHz instantáneos, se desarrolló un prototipo funcional, el que incluye una torre giratoria y una interfaz de usuario con la cual se pudo detectar, identificar, y discriminar las señales de radiofrecuencia emitidas por drones comerciales con otros tipos de señales de radiofrecuencia presentes en el espectro radioeléctrico, además el prototipo fue evaluado experimentalmente en las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE conjuntamente con la ayuda del personal docente y militar que está disponible en el Centro de Investigaciones Militares CICTE, obteniendo resultados exitosos, por tal motivo el sistema de monitoreo y el prototipo desarrollado están listos para poder ser utilizados en campo y en los sectores declarados como estratégicos del país.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **DRONE**
- **(ORIGINAL EQUIPMENT MANUFACTURER) OEM**
- **(UNMANNED AERIAL VEHICLE) UAV**

## **ABSTRACT**

The present work shows the development of a monitoring system for commercial wifi drones, which allows the identification, detection and location of such devices. The development has focused on increasing the operational capabilities of the Armed Forces in places identified as conflict zones, for which it was carried out the analysis of the methods of detection of radio frequency signals by means of the use of digital receivers of wide band, on the other hand it also made the analysis of the diverse techniques for the determination of the angle of arrival (DF) of radio frequency signals with bandwidths of at least 40 MHz instantaneous, a functional prototype was developed, which includes a rotating tower and a user interface with which radio frequency signals emitted by commercial drones can be detected, identified, and discriminated against other types of radio frequency signals present in the radio spectrum, In addition, the prototype was evaluated experimentally in the facilities of the University of the Armed Forces ESPE together with the help of the teaching and military personnel that is available in the Military Research Center CICTE, obtaining successful results, for that reason the monitoring system, and the prototype developed are ready to be used in the field and in the sectors declared as strategic of the country.

### **KEY WORDS:**

- **DRONE**
- **(ORIGINAL EQUIPMENT MANUFACTURER) OEM**
- **(UNMANNED AERIAL VEHICLE) UAV**

## CAPÍTULO I

### 1. DESCRIPCIÓN

#### 1.1. Introducción

La seguridad nacional del Ecuador, es responsabilidad del Estado y por ende el mismo debe garantizar la supervivencia de la colectividad, la defensa del patrimonio nacional, el derecho a sus habitantes a una cultura de paz y mantenimiento de los objetivos nacionales, además de fortalecer la unidad nacional, asegurar los derechos fundamentales y promover el progreso económico, social y cultural de sus habitantes. (633, 2019)

Todos dentro del territorio nacional, sean personas naturales o jurídicas están obligados a cooperar para la Seguridad Nacional en la defensa de la Soberanía e Integridad Territorial, con el Consejo de Seguridad Nacional y el Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas. (Ecuador, 2008)

Dentro de la defensa de la Soberanía del Territorio Ecuatoriano se encuentran temas que requieren atención por atentar contra la misma, como son las incursiones ilegales que han tenido ciertos sectores estratégicos y la amenaza presente que enfrentan las Fuerzas Armadas al no contar con un sistema de apoyo ante los avances tecnológicos y el mal uso que estos pueden dar.

Se ha visto entonces la necesidad de desarrollar un sistema prototipo que nos permita poder detectar señales radioeléctricas provenientes de Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV-Unmanned AerialVehicle), por sus siglas en inglés, los mismos que debido a su bajo costo y pequeño tamaño han cobrado protagonismo en los últimos años, tanto como avance tecnológico y punto polémico

por su fácil adquisición y operatividad, dado que, al no contar con un permiso especial para poder obtenerlo, cualquier persona puede proceder a darle el uso que se considere pertinente.

Sin embargo, y considerando que no todas las personas lo usan de forma recreativa y siendo de gran utilidad para temas laborales, ya sean fotografías, levantamientos topográficos entre otros, no queda de lado la vileza y felonía con la que se pueden usar estos dispositivos, dado que se tienen reportes de que los UAV específicamente los drones, han sido usados de forma maliciosa para obtener fotografías de sectores y propiedades privadas, mucho más alarmante son los informes que han sido usados para fotografiar cuarteles y sectores estratégicos dentro del territorio ecuatoriano. (RedMas, 2018)

Si consideramos que no solo pueden tomar fotos o transmitir en video, si no que estos Drones son capaces de transportar cierta cantidad de peso nos podemos encontrar ante situaciones altamente riesgosas, dado que se controlan a larga distancia lo que haría muy dificultoso poder observar a la persona que lo está controlando y mucho más complejo sería el seguimiento y aprensión del o de los individuos que se encuentran detrás de estas incursiones.

## **1.2. Justificación e Importancia**

El estado ecuatoriano a través de sus Fuerzas Armadas del Ecuador cumple el objetivo de brindar la seguridad a todo el pueblo ecuatoriano dentro del territorio nacional, con la consigna de cumplirlo las Fuerzas Armadas y la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE realizan desarrollos tecnológicos que ayudan a la seguridad y defensa nacional.

Existen grupos irregulares que se mueven cerca de los límites fronterizos del Ecuador, existen reportes de que dichos grupos monitorean las bases militares ecuatorianas mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) o también conocidos comercialmente como “DRONES”.

El personal militar ubicado en las bases militares fronterizas ha identificado visualmente la presencia de drones que invaden de forma ilegal el espacio aéreo de las mismas. Por otra parte, las Fuerzas Armadas al no contar con un sistema de detección e inhibición de drones, pueden ser vulnerables a ataques realizados por los mismos. (RedMas, 2018)

Uno de los principales problemas al momento de implementar algún sistema de monitoreo comercial ya existente es su alto costo, además de la falta de soporte técnico, así como también la deficiencia en la transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción, hacen que dichos sistemas no se implementen en las bases militares.

El presente proyecto de investigación busca desarrollar un sistema prototipo de monitoreo, detección, identificación y localización de señales radioeléctricas para las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz, utilizadas por los drones comerciales. a ser utilizado en los alrededores de sitios estratégicos del estado ecuatoriano.

Con esto se pretende subsanar los inconvenientes antes mencionados con costos muy reducidos y con garantía de una transferencia de tecnología real (al usuario) dentro de todos los procesos de concepción, diseño, implementación y operación.

### **1.3. Alcance del Proyecto**

Con el proyecto de investigación se obtendrá un sistema prototipo eficaz y eficiente para el monitoreo, detección, identificación y localización de señales radioeléctricas WiFi, utilizadas por drones comerciales, con alta POI (superior al 90 %), de manera que el sistema tenga la capacidad de funcionar de forma automática o semi-automática, integrando algoritmos, procesos y métodos aplicados a diversas pruebas locales, para su posterior ejecución en prototipos y a futuro sean implementados en sistema de vigilancia y seguridad pública.

Además, el sistema generará tiempos más rápido de respuesta por parte de las organizaciones de seguridad y emergencia, mejorando así la gestión de riesgos, la reacción inmediata de las fuerzas de seguridad, la identificación específica de objetos, el control de elementos del entorno a través del seguimiento de objetivos específicos, logrando así controles electrónicos para la seguridad de zonas declaradas estratégicas (refinerías, hidroeléctricas, Asentamientos Militares etc.).

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. General**

Desarrollar un sistema de monitoreo, detección, identificación y localización de señales radioeléctricas para las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz, utilizadas por los drones comerciales.

#### **1.4.2. Específicos**

- Realizar un estudio y análisis del estado del arte en relación al problema a resolver. Se estudiarán y analizarán métodos modernos de monitoreo, detección e identificación de múltiples señales de anchos de banda de al menos 40 MHz instantáneos.

- Desarrollar el prototipo de un sistema OEM basado en la técnicas y algoritmos propuestos para el monitoreo, detección e identificación de señales radioeléctricas con alta POI (superior al 90%) y anchos de banda instantáneos de al menos 40 MHz.
- Reducir el peso, volumen, costo computacional y precio del sistema respecto a sistemas existentes en el mercado.
- Disponer de tecnología endógena basada en la investigación orientada a aplicaciones reales en el ejercicio de la soberanía tecnológica.

### **1.5. Resumen de Contenidos**

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

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

El segundo capítulo contiene el fundamento teórico referente a la detección de señales “Spread Spectrum” utilizadas por drones comerciales, algoritmos de detección y monitoreo de señales de frecuencias utilizadas en las bandas ISM específicamente en la banda de 2.4 GHz y 5.8 GHz.

En el tercer capítulo se establece las consideraciones de diseño para la elaboración del prototipo para el sistema de monitoreo, detección, identificación, y localización de señales radioeléctricas.

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 presentan conclusiones y recomendaciones que se evidenciaron durante el análisis de los resultados obtenidos de las pruebas que fueron realizadas durante todo el desarrollo del proyecto, y posteriores trabajos futuros a desarrollarse.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

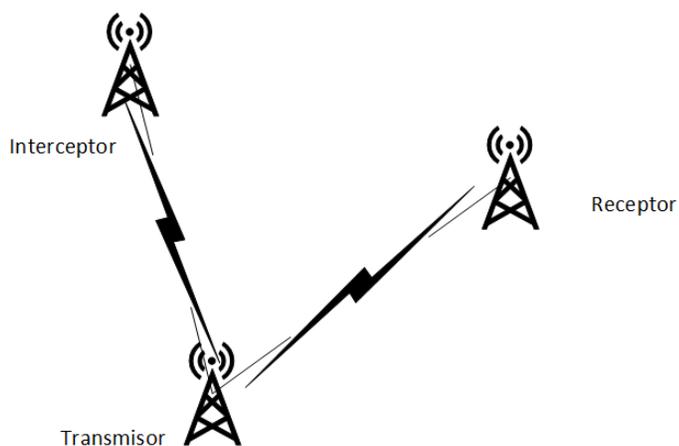
#### 2.1. Guerra electrónica.

La guerra electrónica o EW por sus siglas en inglés “Electronic Warfare” es uno de los pilares fundamentales dentro de la llamada guerra de la información (Schleher, 1999), el objetivo fundamental de la EW es realizar acciones de interceptación, denegación y bloqueo de señales radio eléctricas con el fin de impedir la comunicación entre un punto transmisor y un punto receptor.

La guerra electrónica tiene tres elementos principales para poder lograr el objetivo de negar la comunicación, estos son: el Ataque Electrónico (EA, Electronic Attack), el Apoyo Electrónico (ES, Electronic Support), la Protección Electrónica (EP, Electronic Protection). (Poisel, 2002)

##### 2.1.1. Soporte Electrónico (EA)

El soporte electrónico es fundamental para la guerra electrónica, ya que este elemento permite obtener información de los adversarios, dicha información se la obtiene mediante la interceptación de las señales radioeléctricas emitidas por cualquier tipo de transmisor dentro de una red de comunicación, en la Figura 1 se puede observar el escenario genérico del soporte electrónico en un enlace inalámbrico.



**Figura 1** Escenario genérico de una interceptación de señales de RF.

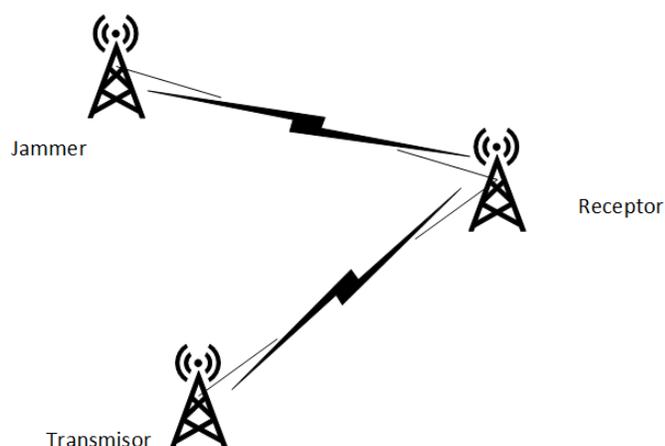
Fuente: Grafico modificado de (Poisel, 2002)

El soporte electrónico es la recolección de señales de comunicación con el fin de obtener información de las mismas (Poisel, 2002), esta información puede ser de vital importancia para los otros dos elementos de la EW, ya que se puede determinar la frecuencia de operación, modulación, tasa de transmisión, además de poder determinar la localización geográfica del transmisor.

### **2.1.2. Ataque Electrónico (EA)**

Negar a los adversarios el uso efectivo de sus sistemas de comunicaciones es el objetivo de un ataque electrónico de comunicaciones. (Poisel, 2002)

Los ataques electrónicos son de tres tipos: Jamming, Engaño, Radiación Directa, cada uno de estos ataques tiene características propias que bien utilizadas pueden evitar la misión del enemigo. En la Figura 2 se observa el escenario genérico en el cual se realiza un ataque electrónico al receptor con el fin de denegar la comunicación entre transmisor y receptor.



**Figura 2** Escenario genérico de una ataque electrónico al receptor

Fuente: Grafico modificado de (Poisel, 2002)

### **2.1.3. Protección Electrónica (EP)**

La protección electrónica consiste en aplicar estrategias dentro los sistemas de comunicación para evitar los efectos de los dos anteriores elementos, es decir que la EP protege las señales de ataques electrónicos y de que la señal no sea interceptada por el adversario.

Para proteger los sistemas de comunicación y evitar que un sistema externo pueda interceptar, bloquear o dañar la comunicación dentro de una red de comunicación civil o militar, se han desarrollado sistemas conocidos como “Sistemas Anti Jamming”, los cuales modifican la modulación y codificación para ser inmunes a la interceptación, bloqueo u ataque de los adversarios.

## **2.2. Sistemas no tripulados**

Los sistemas no tripulados son vehículos motorizados que no transportan un operador humano. Estos sistemas pueden ser operados remotamente o de forma autónoma, además estos sistemas pueden transportar cargas útiles dependiendo de su tipo.

Las aplicaciones civiles y militares que se le puede dar a estos sistemas son varias desde la vigilancia del medio ambiente, el socorro en caso de desastres, hasta la vigilancia de las fronteras de un país.

Existen varios tipos de sistemas no tripulados, entre los cuales se encuentran: Vehículos aéreos no tripulados (UAV), vehículos terrestres no tripulados (UGV), vehículos de superficie no tripulados (USV) y vehículos submarinos no tripulados (UUV), todos estos sistemas son similares en cuanto a sus arquitecturas fundamentales, propulsión y comunicación. (Valavanis & Vachtsevanos, 2014)

### **2.2.1. Vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles, UAV)**

Los vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como aviones teledirigidos o drones, poseen varias características como: alta movilidad, bajo costo, tamaño reducido, etc. Lo que hace que estos sistemas no tripulados sean los más solicitados para realizar misiones civiles y militares.

Los UAV se pueden clasificar en dos categorías: UAV de ala fija y UAV de ala giratoria, los UAV de ala fija pueden volar a altas velocidades, además pueden transportar una gran carga útil, pero se debe mantener en movimiento de avance continuo para permanecer en el aire (Figura 4). Por otra parte, los UAV de ala giratoria no pueden transportar una gran carga útil, pero a

diferencia de los UAV de ala fija, estos pueden moverse en cualquier dirección y pueden mantenerse inmóviles en el aire (Figura 3). (Zeng, Zhang, & Lim, 2016)



**Figura 3** UAV ala rotatoria DJI Phantom 4

Fuente : (DJI, 2019)



**Figura 4** UAV de ala fija Parrot Disco-PRO AG

Fuente: (Parrot, 2019)

El prototipo que se pretende implementar en el presente proyecto tiene como objetivo monitorear, detectar y localizar UAV's por lo que la investigación se enfocará en entender el funcionamiento, así como también las distintas formas de detección de señales radioeléctricas emitidas por los mismos.

### **2.3. Detección de señales radioeléctricas emitidas por Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV).**

Los vehículos aéreos no tripulados han sido uno de los desarrollos tecnológicos que han generado más interés en los últimos años, el poder pilotar un vehículo volador desde larga distancia fue siempre un punto de investigación muy común.

Hoy en día gracias a los avances tecnológicos que han surgido referente al desarrollo de telecomunicaciones inalámbricas se ha logrado mucho más de lo esperado, pues no solo se abarca el poder controlar un objeto a largas distancias, sino también poder observar a través de una cámara lo que está pasando en tiempo real, y por ende poder tomar fotografías o efectuar grabaciones de video por el mismo medio.

Pero surge la problemática de que al poder acceder de forma fácil a estos dispositivos se pueda generar un uso inapropiado, pudiendo ser que se violen derechos de propiedad privada, privacidad, espacio personal o se intente atentar contra la integridad y seguridad física de las personas y de un estado. (Ecuador, 2008).

Nuevas técnicas de detección, probadas en una variedad de escenarios de la vida real, demostraron ser capaz de detectar e identificar de manera eficiente los drones intrusos en todas las configuraciones experimentales consideradas, las que las convierten en una tecnología prometedora para la detección de vehículos aéreos no tripulados en el marco de la vigilancia de drones aficionados.

Se han probado diferentes técnicas de monitoreo y detecciones ya existentes aplicados a vehículos voladores no tripulados en la vida real, como una de las más comunes se exponen la

video vigilancia, detección basado en radar, detección basado en Radio Frecuencia, detección basado en Wi-Fi. (Bisio, Garibotto, Lavagetto, Sciarrone, & Zappatore, 2018)

### **2.3.1. Método de monitoreo basado en video.**

Esta clase de técnica está basada en el uso de cámaras las cuales tienen integradas sensores, capaces de identificar movimiento de un objeto en el cielo, esto permite vigilar un área razonablemente amplia.

El principal problema relacionado a este método de detección se da en el caso de drones muy pequeños como los Quadricopteros, ya que estos se pueden confundir con aves, lo cual generaría una falsa alarma y recursos de vigilancia desperdiciados.

Este método de monitoreo requiere la atención de una persona, además del criterio de la misma al visualizar las imágenes proporcionadas por una cámara de vigilancia y poder distinguir un vehículo volador no tripulado, discriminando así a otros que podrían presentarse o confundirse en el medio ya sean aves o animales voladores. (Ganti & Kim, 2016)

### **2.3.2. Método de monitoreo basado en Radar.**

Este tipo de método ahonda en el principio electromagnético de la retrodispersión, esto se da porque el enfoque tradicional del radar sirve para detectar Aeronaves grandes, sin embargo, esta falla cuando se trata de objetivos pequeños, de hecho, el uso de la sección transversal del radar para la identificación de drones no es muy adecuada por el mismo hecho de que son UAV demasiados pequeños para que el radar los pueda detectar. Además, es difícil distinguir estos dispositivos de otros sistemas biológicos voladores como ya se expuso anteriormente, inclusive si consideramos

que los drones comerciales en su gran mayoría están hechos de materiales plásticos, que resultaría en poca reflexión al transmisor.

Razón por la cual los radares modificados tienen el desarrollo de sensores que aprovechan la energía retrodispersada de las piezas giratorias como las hélices y los rotores analizando firmas de micro-Doppler. Este enfoque emplea una Red Neuronal de Aprendizaje (DBN) por sus siglas en inglés, para obtener la clasificación de patrones de firma, los resultados experimentales nos demuestran que el sistema puede alcanzar valores de alta precisión, y dado que esta técnica se puede implementar de forma portátil, es bastante factible su montaje a bordo de aviones no tripulados de vigilancia. (Mendis, 2016)

### **2.3.3. Método de monitoreo basado en Radio Frecuencia (RF).**

Este método de monitoreo se basa en el hecho de que los aviones no tripulados deben tener una comunicación activa con la estación de control que dirige su curso y acciones, por ende, existen bandas de frecuencia comunes que sirven para este fin, normalmente en el ámbito comercial las más empleadas son las de la banda ISM (2.4 y 5.8 GHz).

Además, los vehículos aéreos no tripulados utilizan cámaras para transmitir video a su unidad de control, por ende, el uso de un canal inalámbrico adicional para el envío de las imágenes suele ser común.

El filtrado morfológico en el dominio de la frecuencia se utiliza para separar la señal deseada de las perturbaciones, permitiendo así una detección fiable, este tipo de detección de RF tiene un rango efectivo, sin embargo, se presenta un problema menor que es la tasa de detección del objetivo que depende en gran medida de la potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor. (Witschi, 2016)

#### 2.3.4. Método de monitoreo basado en WiFi

Básicamente lo que se pretende con este método es explotar un rastreador de paquetes de datos (sniffer) que son enviados al objeto Teledirigido, sin embargo, se debe tener amplio conocimiento sobre el tipo de vehículo volador no tripulado y sus características técnicas, esto con el fin de conocer el identificador único organizativo (OUI) por sus siglas en inglés.

Con esto se puede efectuar un análisis de los flujos que son enviados al vehículo aéreo no tripulado, este método implementa un rastreador de paquetes, el más común Wireshark, a bordo de una estación, un objeto volador “guardián” o sobre un vehículo de patrullaje común. Luego todos los datos que han sido capturados de los canales WiFi se descargan en un archivo “.pcap”.

Con todos estos datos se puede procesar en el mismo vehículo o dispositivo que se encuentre a bordo el sniffer, posterior a esto se extrae y analiza todas las características específicas para proceder al análisis.

Se analizan los flujos de datos recibidos, y se determinan los intervalos de tiempo en el que fue enviado y recibido cada paquete de información, dado que los tiempos de cada dispositivo son propios se puede determinar una característica propia a cada flujo, conocido como “huella dactilar”, con esto se puede determinar intrusos que emitan flujos de datos no correspondientes a los propios vehículos aéreos no tripulados usados para despliegue o vigilancia.

Con esto se evita falsas alarmas en cuanto a detecciones de intrusos, y se puede tener un análisis correspondiente de los vehículos aéreos no tripulados más comunes para hacer intrusión en zonas no permitidas. (Kamkar, 2017)

## **2.4. Receptor digital de banda ancha.**

Uno de los principales componentes del sistema de detección e identificación es el receptor digital de banda ancha, con el cual se va a detectar las señales de radio frecuencia (RF) generadas por el control del dron o el dron.

El receptor digital de banda ancha se lo utiliza recientemente en lo que se llama la “Guerra Electrónica”, por lo que cuenta con características específicas para la detección de señales de RF en un ancho de banda instantáneo.

La diferencia que existe entre los receptores convencionales superheterodinos y los receptores digitales de banda ancha, también conocidos como receptores EW (*Electronic Warfare*) por sus siglas en inglés, es que la señal de entrada es desconocida, por lo cual el receptor debe tener un amplio ancho de banda de entrada con una resolución de frecuencia fina y una alta sensibilidad para detectar la mayor cantidad de señales de RF posibles. (Tsui, 1989)

### **2.4.1. Parámetros medidos por un receptor digital de banda ancha (receptor EW).**

La digitalización de las señales ha sido de mucha ayuda en la guerra electrónica, ya que al realizar el proceso de digitalización se puede obtener información adicional que sirve para tomar acciones defensivas u ofensivas.

Por tal motivo los receptores digitales pueden medir cuatro parámetros a partir de una señal detectada, estos parámetros son: ángulo de arribo, intensidad de señal, frecuencia y ancho de banda de operación. Al conocer uno o varios parámetros de estos se pueden tomar acciones en defensa o ataque a las mismas.

## 2.5. Componentes de un vehículo aéreo no tripulado de ala giratoria (DRON).

Conocer los componentes y el funcionamiento del sistema de control de un dron es un punto importante para el sistema de detección e identificación.

Existen en el mercado varias empresas que producen y venden drones, entre las cuales se puede destacar a Parrot y DJI, dichas empresas poseen un amplio catálogo de dispositivos (drones).

El DJI Phantom 4 Pro es la versión más actual de la familia de drones Phantom. Este sistema que se ilustra en la Figura 5, cuenta con varios componentes: dispositivo móvil, control remoto, dron, cada uno de estos dispositivos cuenta con una función específica dentro del sistema.



**Figura 5** Vista general del sistema Dron.

Fuente: (Trujano, Chan, Beams, & Rivera, 2016)

### 2.5.1. Dispositivo móvil.

Dentro del dispositivo móvil se debe descargar una aplicación móvil la cual sirve para poder controlar las características avanzadas del dron (modos de vuelo, modos de grabación, características del video, despegue automático, retorno automático, etc), además de mostrar información adicional como: altitud, trayectoria de vuelo, posicionamiento, información de los

sensores, proximidad a objetos, carga de la batería, velocidad, etc. También se muestra el video en tiempo real capturado por la cámara integrada en el dron, mismo que nos permite la perspectiva de cómo se vería una grabación o se lo puede tomar de ayuda para poder pilotar a largas distancias. (Trujano, Chan, Beams, & Rivera, 2016)

### **2.5.2. Control Remoto**

El control remoto es la principal fuente de comunicación entre el dron y el operario. Para poder realizar el control del dron, el control remoto crea un punto de acceso WiFi que comúnmente opera en la banda de 2.400 GHz – 2.483 GHz, esto permite conectar el dispositivo móvil con el control remoto. Por otra parte, las instrucciones de vuelo e instrucciones adicionales son enviadas hacia el dron a través de señales radioeléctricas en la banda de 5.725 GHz – 5.825 GHz. (Trujano, Chan, Beams, & Rivera, 2016)

### **2.5.3. Dron**

El dron como tal recibe las señales de RF desde el control remoto, quien es el que determinará el curso de vuelo del dron, además el dron cuenta con varios sensores integrados en su estructura como: GPS, un barómetro, sensores de proximidad, acelerómetro, brújula electrónica, giroscopio.

El dron cuenta con características inteligentes como el retorno a casa (R2H) por sus siglas en inglés, esta característica permite al dron realizar un vuelo autónomo hacia una localización específica dictada por su sensor de GPS. (Trujano, Chan, Beams, & Rivera, 2016)

Todos estos elementos en conjunto hacen que el sistema dron funcione correctamente, pero como se mencionó en principio no todas las aplicaciones que se realicen con drones son correctas

o legales, por lo cual es necesario implementar un sistema de detección con el fin de salvaguardar la integridad de los puntos estratégicos del Ecuador.

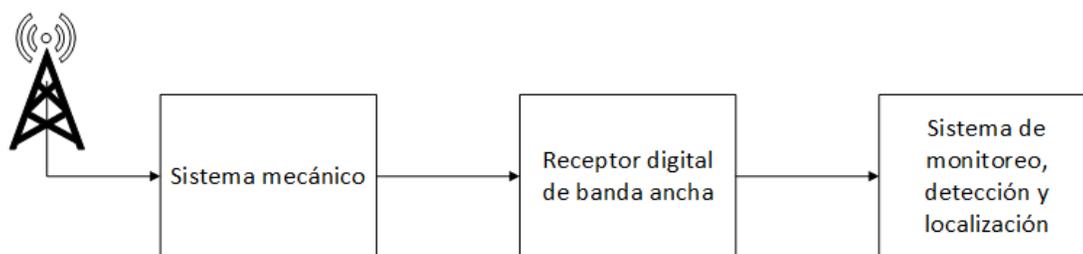
Los esfuerzos de investigación y desarrollo deben incluir el diseño de técnicas adecuadas que permitan detectar la presencia de dispositivos controlados a distancia, como drones voladores o terrestres, sin embargo, nos enfocaremos en Vehículos Aéreos no Tripulados, específicamente los UAV's de ala giratoria, comúnmente llamados drones, los cuales son comercializados libremente.

### CAPÍTULO III

Con base en los temas abordados en el capítulo II, el prototipo que se desarrolló es parte de uno de los pilares fundamentales de la Guerra electrónica y Soporte Electrónico, este prototipo permitirá recibir las señales de radiofrecuencia emitidas por los UAV, por lo cual brindará el soporte para poder monitorear, detectar y estimar la distancia y el ángulo de arribo de un dron.

#### 3. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO, DETECCIÓN Y LOCALIZACION DE DRONES.

El sistema de monitoreo, detección y localización de drones se enfoca en desarrollar un prototipo que monitoree el espectro en las bandas de 2400-2483 MHz y 5GHz, frecuencias utilizadas por drones para la transmisión y recepción de instrucciones de vuelo, como se ilustra en la Figura 6.



*Figura 6* Diagrama de bloques del Sistema.

### 3.1. Consideraciones de diseño

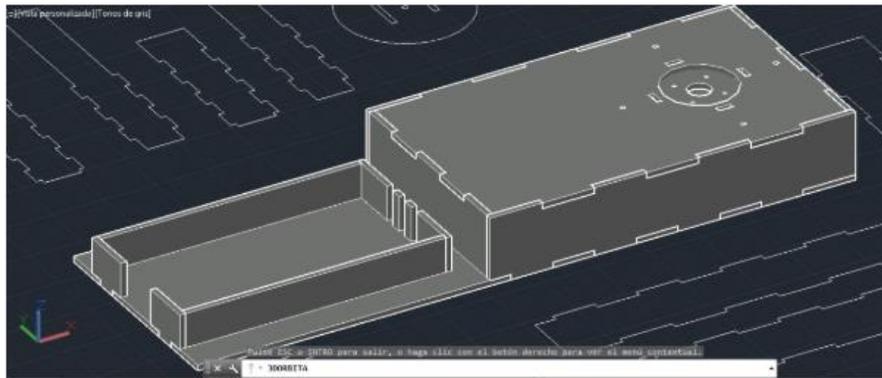
En la Figura 6 se observa el diagrama de bloques del prototipo que se desarrolló, el cual cuenta con 3 componentes principales:

1. Receptor digital de banda ancha
2. Estructura mecánica
3. Sistema de monitoreo, detección y localización, software desarrollado en lenguaje C.

### 3.2. Sistema mecánico de monitoreo

#### 3.2.1. Estructura General

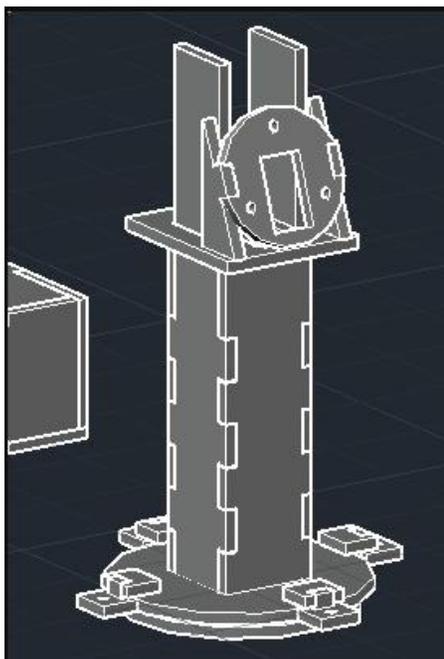
Todos los componentes de la estructura mecánica se los alojó dentro de un modelo estructural construido en madera, el cual se puede visualizar en la Figura 7.



**Figura 7** Modelo estructural del Prototipo

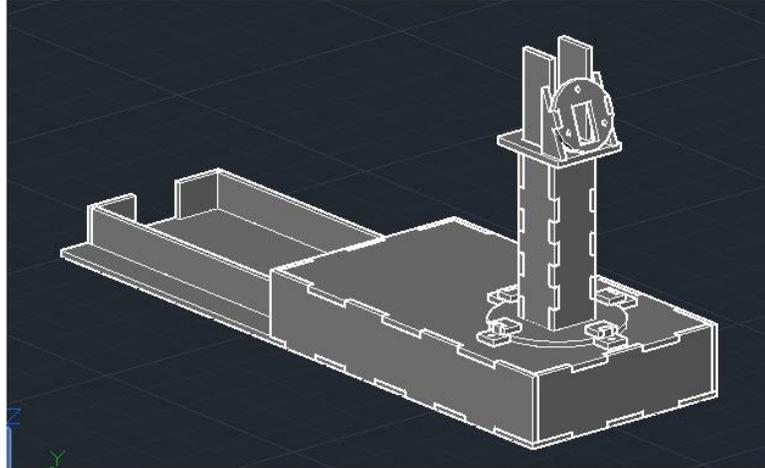
Además, se diseñó una torre del mismo material de la caja la que se puede visualizar en la Figura 8, en la cual se ubicó la antena con la cual se realiza el monitoreo del espectro radioeléctrico.

La torre se puede mover en un rango de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , a una velocidad apta para que permita monitorear el espectro radioeléctrico emitido por el dron.



**Figura 8** Estructura de la torre

Todo el modelo estructural contiene los elementos necesarios para poder efectuar el movimiento de la Torre, el prototipo completo con la torre incluida se lo puede visualizar en la Figura 9.



*Figura 9* Estructura total

### 3.2.2. Torre giratoria

El sistema requiere que el monitoreo del espectro se lo realice con una antena que pueda moverse en un rango de visión medido en grados, por lo que se utilizó un motor de pasos para realizar dicho movimiento.

El motor de pasos que se escogió es el NEMA 17, ya que es un motor capaz de llevar una carga de 3.2 kg/cm y esta característica ayuda a mover la torre conjuntamente con la antena sin ningún problema. Cabe destacar que el nombre NEMA 17, no se refiere a ninguna marca o fabricante, sino al estándar con el cual están contruidos los motores de pasos.

Por otra parte, el motor NEMA 17 posee las siguientes características:

- Peso: 350 gramos.
- Diámetro de eje: 5mm.
- Longitud de eje: 25mm

- Pasos por vuelta: 200 pasos (1.8°/paso).
- Corriente: 1.2 A por bobinado.
- Tensión: 4 V – 20 V.
- Torque: 3.2 kg/cm.

El control de movimiento se lo realiza mediante el uso de una tarjeta arduino y un driver para motores de pasos, la torre va a girar en un rango de 0° a 360° con un intervalo de giro de 22.5°, de esta forma se van a obtener los datos necesarios para el análisis y posterior estimación del ángulo de arribo de la señal y la distancia aproximada a la que se encuentre el dron.

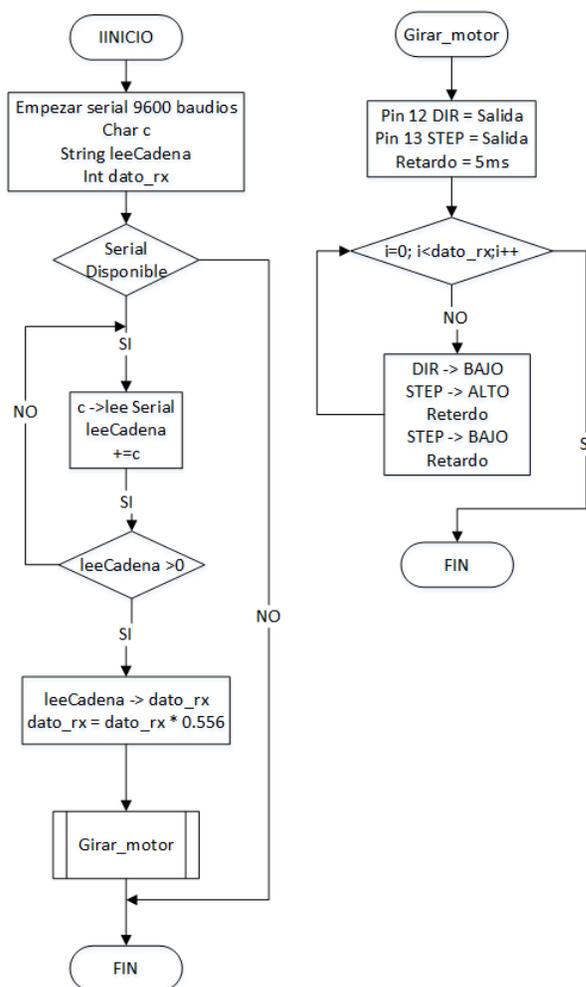
El datasheet del motor NEMA 17 especifica que se deben dar 200 pasos para completar una vuelta (360°), por lo que es necesario hacer una transformación de pasos a grados con la siguiente formula.

$$num_{pasos} = angulo \times 0.556$$

Con esta fórmula se obtienen el número de pasos que debe dar el motor para cumplir con el ángulo de visión para realizar el monitoreo.

Dentro de la interfaz gráfica se han implementado la comunicación serial entre la computadora y el programa que mueve el motor, el programa principal de la interfaz envía un dato de forma serial, dicho dato inicia el movimiento de la torre conjuntamente con la antena que recepta las señales de radiofrecuencia emitidas por el dron.

El diagrama de flujo del programa desarrollado para mover el motor, se lo pude observar en la Figura 10.



**Figura 10** Diagrama de Flujo del movimiento del motor

El movimiento de la torre es accionado cada vez que se presiona un botón dentro de la interfaz gráfica desarrollada para el sistema de monitoreo. Para lograr girar  $360^\circ$  se dividió en pasos de  $18^\circ$ , en cada uno de los pasos que da el motor se obtienen los datos del espectro radioeléctrico a través del receptor digital, obteniendo un total de 20 trazas de datos que se analizarán posteriormente.

### **3.3. Desarrollo de Software de monitoreo, detección y localización**

El sistema total planteado en el presente trabajo requiere del desarrollo de una aplicación de software desarrollada en lenguaje de programación C++, con la cual el operario pueda centralizar las funciones de monitoreo, detección y localización de Drones, además del manejo de todo el sistema mecánico.

Por otra parte, el sistema debe cumplir con los siguientes requerimientos para un correcto funcionamiento:

1. Controlar el sistema mecánico para efectuar el giro de la torre.
2. Sincronizar el giro de la torre con la toma de datos del receptor digital.
3. Efectuar el monitoreo del espectro radioeléctrico.
4. Procesar los datos obtenidos por el receptor digital.
5. Detectar las señales emitidas por los drones.
6. Procesar estas señales y definir el ángulo de arribo.
7. Considerar el modelo de propagación para estimar la distancia a la cual se encuentra el Dron.
8. Proyectar en la interfaz gráfica la ubicación estimada en la cual se encuentra el dron.

Desde el software de monitoreo se puede visualizar una interfaz gráfica en la cual se muestra un radar con 16 secciones de división, incluye también un botón para poder iniciar el monitoreo y la toma de datos, posterior a esto los datos obtenidos serán procesados para determinar y detectar una señal radioeléctrica correspondiente a un dron.

Al procesar estos datos también se efectúa el análisis del ángulo de arribo, además se utilizó un modelo de propagación que permitirá conocer la distancia aproximada a la cual el dron se encuentra, y finalmente todo esto nos permitirá determinar la localización del dron tanto el ángulo de arribo, distancia aproximada y todo desde un mismo sistema.

### **3.3.1. Comunicación con el Receptor Digital**

En la Figura 6 se puede observar el diagrama de bloques del sistema desarrollado en el presente trabajo. Dentro del sistema un componente importante es el receptor de banda ancha, el cual es el encargado de recibir las señales de radiofrecuencia emitidas por el dron.

El receptor digital usado para este propósito presenta las siguientes características:

- Rango de frecuencia de RF de 9 kHz a 6 GHz.
- Velocidad de barrido de hasta 24 GHz / s ( $\geq 10$  kHz RBW).
- Amplio rango dinámico de -158 dBm a +10 dBm.
- Ancho de banda de resolución disponibles de 10 Hz a 10 MHz.
- Alimentado únicamente a través de USB, no se necesita fuente de alimentación externa.
- El potente procesamiento de la señal digital ocurre en la PC.
- Software y hardware incluidos por un bajo precio.
- Datos de IF digitalizados a 80 millones de muestras por segundo.

- Ancho de banda instantáneo de 27 MHz, configurable hasta llegar al rango necesario para poder monitorear el espectro del dron que es de 83 MHz.
- Compatible con los sistemas operativos Windows 7/8/10 de 64 bits.
- Comunicaciones USB 3.0 que proporcionan un rendimiento sostenido de 140 MB / s a PC.
- Medidas de menos de 9 pulgadas de largo.

Las características que presenta el receptor de banda ancha permitirán detectar las señales de RF de los drones, además de poder obtener los datos de potencia en forma de trazas (vectores) que serán enviados al sistema de monitoreo para un posterior análisis.

El receptor de banda ancha cuenta con un software propio del fabricante, el cual cuenta con varias características entre la cuales podemos listar las siguientes:

- Visualización del espectro radioeléctrico en tiempo real.
- Configuración de ancho de banda, frecuencia central, tiempo de muestreo, etc.
- Almacenamiento de datos en forma de trazas (vectores).

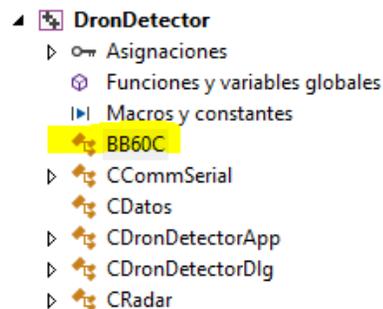
Estas características son de suma importancia para la estimación del ángulo de arribo de las señales de RF emitidas por el dron, además de la estimación de la distancia a la cual se encuentra el mismo, sin embargo, desarrollamos nuestro propio software para obtener las trazas del receptor.

Según las especificaciones del fabricante el receptor digital permite acoplar los datos obtenidos por el receptor digital y la interfaz maquina humano desarrollada en el presente proyecto,

para lograr un correcto acople es necesario incluir las librerías y clases de comunicación entre el receptor y el sistema desarrollado.

En la Figura 11 se observa todas las clases incluidas para el desarrollo de la aplicación de software para el monitoreo de drones a la cual se le dio el nombre de “DronDetector”. Cada una de las clases cumple una función específica detallada a continuación:

- Clase BB60C: Se encarga de realizar la comunicación entre el receptor digital y la aplicación de software desarrollada.
- Clase CCommSerial: Se encarga de realizar la comunicación serial entre la interfaz gráfica y el motor de la torre giratoria.
- Clase CDatos: Se encarga de guardar los datos de radiofrecuencia de los drones y la configuración de los parámetros de monitoreo del espectro radioeléctrico.
- Clase CRadar: Se encarga de realizar la gráfica del radar y mostrar la ubicación del dron dentro de las secciones del mismo radar.
- Clase CDronDetectorApp y CDronDetectorDlg: Son las clases en las que se crea la interfaz gráfica y todos los componentes de la aplicación.



**Figura 11** Vista de clases del proyecto Dron Detector.

### 3.3.1.1. Configuración de parámetros del Receptor Digital

Las clases **BB60C** y **CDatos** son las encargadas de configurar cada uno de los parámetros de adquisición de los datos del espectro radioeléctrico, además de configurar los parámetros necesarios para la comunicación entre la aplicación desarrollada y el receptor digital.

Para que el receptor digital establezca una comunicación correcta con la aplicación desarrollada y envíe de forma correcta los datos hacia la misma debe incluir las siguientes cuatro funciones en la clase **BB60C**:

- **Config\_BB60C()**: En esta función se declaran todos los parámetros de configuración del receptor digital como escala de adquisición de datos, tipo de dato adquirido, span, tiempo de toma de datos, etc. Estos parámetros se los configura de acuerdo a la recomendación del fabricante para que tenga un correcto funcionamiento, En la Figura 12 se puede observar la declaración de la función, así como también los parámetros configurados para el proyecto.

```
void BB60C::Config_BB60C()
{
    bbConfigureAcquisition(handle, BB_AVERAGE, BB_LOG_SCALE);
    bbConfigureCenterSpan(handle, HM.m_fc, HM.m_span);
    bbConfigureLevel(handle, HM.m_level, BB_AUTO_ATTEN);
    bbConfigureGain(handle, BB_AUTO_GAIN);
    bbConfigureSweepCoupling(handle, HM.rwb, HM.vwb, HM.sweepTime, BB_RBW_SHAPE_FLATTOP, BB_NO_SPUR_REJECT);
    bbConfigureProcUnits(handle, BB_POWER);
}
```

**Figura 12** Código de Configuración del receptor digital.

- **GetEspectrumData()**: Esta función es la encargada de obtener y guardar los datos del espectro radioeléctrico detectado por el receptor digital en forma de trazas.

```

void BB60C::GetEspectrumData()
{
    ULONGLONG startTime;
    static ULONGLONG endTime;
    ULONGLONG elapsedTime;
    startTime = GetTickCount64();

    for (int j = 0; j < HM.m_vector; j++)
    {
        bbFetchTrace_32f(handle, HM.m_SweepSize, HM.m_TraceMin[j], HM.m_TraceMax[j]);
    }
    endTime = GetTickCount64();
    elapsedTime = endTime - startTime;
    HM.m_ElapTime = (int)(elapsedTime / HM.m_vector);
}

```

**Figura 13** Código para la obtención del espectro radioeléctrico.

- Scan(): Esta función permite monitorear el espectro radioeléctrico en tiempo real y transmitir los datos hacia la computadora.

```

CString BB60C::Scan()
{
    if (bbInitiate(handle, BB_SWEEPING, 0) != bbNoError)
    {
        return L"Error al configurar el equipo";
    }
    bbQueryTraceInfo(handle, &HM.m_SweepSize, &HM.binSize, &HM.startFreq);

    for (int i = 0; i < MATRIX; i++)
    {
        HM.m_TraceMax[i] = new float[sweepSize];
        HM.m_TraceMin[i] = new float[sweepSize];
    }
    return L"Equipo configurado correctamente";
}

```

**Figura 14** Código para el escaneo del espectro radioeléctrico.

- StopScan(): Detiene el escaneo del espectro radioeléctrico.

```
[-] CString BB60C::StopScan()
{
    const char* res = "Stop";
    bbStatus openStatus = bbAbort(handle);
    if (openStatus != bbNoError)
    {
        res = bbGetErrorString(openStatus);
    }
    return (CString)res;
}
```

**Figura 15** Código para detener el escaneo del espectro radioeléctrico.

Para que un dron comercial funcione correctamente debe establecer un enlace inalámbrico entre el mismo y el control remoto, este enlace se lo hace en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, específicamente en la banda de 2400 MHz a 2483 MHz, dentro de estos 83 MHz se establece un canal que tiene un ancho de banda de 10 MHz por donde se envían datos como: video, GPS, altura del dron, etc. Todos estos datos serán incluidos dentro de la clase CDatos, con el fin de poder monitorear el espectro radioeléctrico que emite el dron cuando está en vuelo.

La frecuencia central como su nombre indica es el punto central del escaneo del espectro, dado que los drones pueden operar dentro de un ancho de banda de 83 MHz, se utilizó una frecuencia de 2440 MHz, como frecuencia central de esta forma se pudo monitorear completamente el espectro radioeléctrico utilizado por los drones.

Por otra parte, el receptor digital necesita que se especifique el tiempo de barrido de las señales radioeléctricas, por lo que se utilizó un tiempo de barrido de 0.1 s (100 ms), tiempo en el cual podrá detectar cualquier señal que llegue hacia el Receptor digital, es decir, cualquier señal que este al menos 0.1 s presentes en el espectro podrá ser detectada.

También se debe especificar el tamaño de cada una de las trazas adquiridas, esto es fundamental dado que estos datos serán guardados y posteriormente procesados, con el fin de obtener el ángulo aproximado de arribo de la señal del dron y la distancia aproximada del mismo.

Cada traza se refiere a los datos que nos llegan del espectro radioeléctrico y que serán guardadas en vectores de información según cuantas tomas de datos se efectúen, posteriormente se explicara la cantidad de vectores de información que se tomaron y la forma de obtención del ángulo de arribo de la señal.

Para las pruebas se estableció un tamaño de traza de 16000, es decir que se obtendrán 16000 datos de potencia, este tamaño de traza es referencial, ya que el número de datos utilizados depende de la resolución de la señal, tiempo de barrido y otras variables.

En la Figura 16 se puede observar cada uno de los parámetros anteriormente mencionados, y algunos más que ayudaran a obtener cada una de las trazas de datos para su posterior análisis.

```

CDatos::CDatos()
{
    m_fc = 2440000000;
    m_span = 83000000;
    m_level = -40;
    rwb = 200.0e3;
    vwb = 200.0e3;
    sweepTime = 0.1;
    m_SweepSize = 16000;
    m_ElapTime = 0;
    binSize = 0.0;
    startFreq = 0.0;

    for (int j = 0; j < MATRIX; j++)
    {
        m_TraceMax[j] = NULL;
        m_TraceMin[j] = NULL;
    }

    m_tiempoSonograma = 60; //Segundos
    m_tiempoBarrido = 250; //Milisegundos

    m_vector = 1;
}

```

**Figura 16** Parámetros de configuración para el escaneo del espectro radioeléctrico.

A partir de las clases **BB60C** y **CDatos** se realiza la comunicación entre la interfaz gráfica desarrollada y el receptor digital, además de poder recolectar los datos de potencia de las señales radioeléctricas emitidas por el dron para su análisis.

### 3.3.1.2. Conexión y desconexión del receptor digital

El receptor digital utilizado posee una única interfaz USB, la cual sirve para enviar los datos hacia la aplicación desarrollada y para alimentación eléctrica del mismo, por lo cual se debe hacer una correcta conexión y desconexión del receptor para prevenir daños en el mismo.

Por lo mencionado anteriormente, se han implementado dos funciones dentro de la clase BB60C, las cuales son:

- Conectar\_BB60C(): Esta función es la encargada de abrir y mantener abierto el puerto serial por el cual se va a comunicar el receptor digital mientras se esté realizando el escaneo del espectro radioeléctrico, en la Figura 17 se muestra parte del código con su conexión a través de una función dentro de la clase BB60C.h.

```
[-] CString BB60C::Conectar_BB60C()
{
    const char* res = "Device Open";
    bbStatus openStatus = bbOpenDevice(&handle);
    if (openStatus != bbNoError)
    {
        res = bbGetErrorString(openStatus);
    }
    return (CString)res;
}
```

**Figura 17** Código para la conexión del receptor digital.

- Desconectar\_SH(): Es la encargada de cerrar el puerto serial por el cual se comunica el receptor digital y la aplicación desarrollada, el fabricante sugiere mantener cerrado el puerto serial si el receptor no está siendo utilizado, para de esta forma evitar daños al momento de desconectar el receptor de la computadora.

```

[-] CString BB60C::Desconectar_SH()
{
    const char* res = "Ok";
    bbStatus openStatus = bbCloseDevice(handle);
[-] if (openStatus != bbNoError)
    {
        res = bbGetErrorString(openStatus);
    }
    return (CString)res;
}

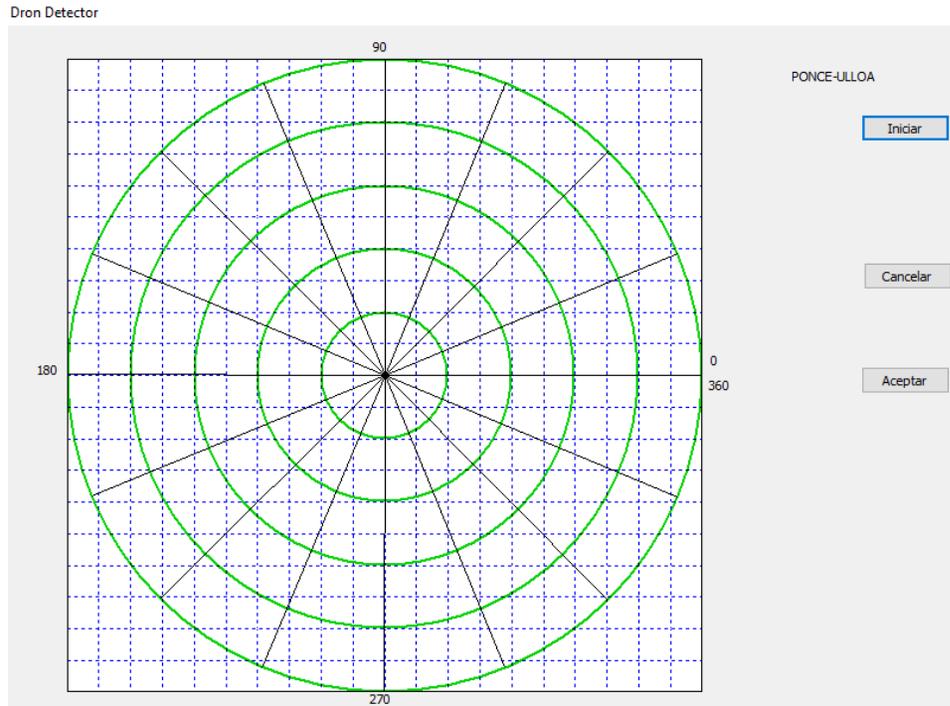
```

**Figura 18** Código para la desconexión del receptor digital.

A partir de estas dos funciones se puede tener una correcta conexión y desconexión del receptor digital, las dos funciones implementadas son de suma importancia, ya que estas se van a ejecutar constantemente cada vez que se escanea el espectro radioeléctrico del dron.

### 3.3.2. Interfaz grafica

La aplicación de software desarrollada cuenta con una interfaz gráfica en la cual se incluyen botones de acción, además de un panel gráfico. Los botones sirven para iniciar el movimiento de la torre giratoria y la toma de las trazas de datos del espectro radioeléctrico, en el panel gráfico se muestra el radar, el cual incluye cinco círculos divididos en dieciséis partes, cada una de 22.5°, en la cual se muestra el ángulo de arribo de la señal emitida por el dron, y la distancia aproximada a la que se encuentra el mismo. En la Figura 19 se observa la interfaz gráfica desarrollada para el sistema de monitoreo.



**Figura 19** Interfaz gráfica del sistema de monitoreo.

La interfaz gráfica se la desarrollo mediante el uso del IDE de programación Visual Studio, además se utilizó **MFC (Microsoft Foundation Classes)**, que es un conjunto de clases las cuales son específicas para desarrollar aplicaciones para sistemas operativos Windows basados en lenguaje C++.

Se utilizó la técnica de dibujo en memoria para el desarrollo de todo el radar, esta técnica consiste en realizar varios dibujos, guardarlos en memoria y mostrarlos en conjunto cuando se efectuó algún evento como por ejemplo dar un clic en el botón iniciar.

La encargada de realizar cada uno de los dibujos, tanto de los círculos como de las líneas de división del radar, es la clase CRadar (Figura 11), dentro de esta clase se establecieron tres funciones que sirven para dibujar los círculos, la grilla (líneas divisoras con disposición de mallado) y las líneas de división del radar (líneas radiales con separación angular de 22.5°).

- DibCirculo(): Función que dibuja los círculos que se muestran en el radar, en la Figura 20 se puede observar el código necesario para poder dibujar los cinco círculos necesarios para el radar.

```
void CRadar::DibCirculo()
{
    CPen pen(PS_SOLID, 2, RGB(10, 210, 10));
    mem_circulo->Rectangle(0, 0, m_ancho, m_alto);
    mem_circulo->SelectObject(&pen);
    mem_circulo->Ellipse((m_ancho) * 0, (m_alto) * 0, (m_ancho)*10/10, (m_alto)*10/10);
    mem_circulo->Ellipse((m_ancho) * 1/10, (m_alto) * 1/10, (m_ancho) * 9/10, (m_alto) * 9/10);
    mem_circulo->Ellipse((m_ancho) * 2 / 10, (m_alto) * 2 / 10, (m_ancho) * 8 / 10, (m_alto) * 8 / 10);
    mem_circulo->Ellipse((m_ancho) * 3 / 10, (m_alto) * 3 / 10, (m_ancho) * 7 / 10, (m_alto) * 7 / 10);
    mem_circulo->Ellipse((m_ancho) * 4 / 10, (m_alto) * 4 / 10, (m_ancho) * 6 / 10, (m_alto) * 6 / 10);
}
```

**Figura 20** Código función “DibCirculo”

Se establece una relación de tamaño de la ventana principal y a partir de eso se secciona de manera uniforme y proporcional los círculos a graficar que nos mostraran la imagen de un radar convencional, estas líneas deben tener la misma separación para poder establecer distancias de aproximación lineal y que se observe de mejor manera la ubicación del dron.

- DibGrilla(): Es la función que se encarga de graficar la grilla de color azul mostrada en el fondo del elemento de dibujo, en la Figura 21 se observa el código que se implementó para dibujar la grilla, sirve de forma guía para que las gráficas estén alineadas y se obtenga una sensación más simétrica de toda la interfaz gráfica.

```

void CRadar::DibGrilla(int rango)
{
    CPen pen(PS_DOT,1,RGB(0,0,255));
    mem_grilla->Rectangle(0,0,m_ancho,m_alto);
    mem_grilla->SelectObject(&pen);

    for(int i=0;i<=40;i=i+rango)
    {
        mem_grilla->MoveTo(m_ancho*(i-m_origenx)/m_escalax,0);
        mem_grilla->LineTo(m_ancho*(i-m_origenx)/m_escalax,m_alto);
    }

    for(int i=0;i<=40;i=i+rango)
    {
        mem_grilla->MoveTo(0,m_alto*(i-m_origeny)/m_escalay);
        mem_grilla->LineTo(m_ancho,m_alto*(i-m_origeny*1.)/m_escalay);
    }
    mem_grilla->SelectStockObject(BLACK_PEN);
}

```

**Figura 21** Código función “DibGrilla”

- Rotar(): Esta función es la que dibuja cada una de las líneas que dividen el radar en dieciséis secciones cada una de  $22.5^\circ$ , en la Figura 22 se observa el código necesario para dibujar cada una de las líneas de división del radar.

Es una función propia desarrollada para poder realizar la rotación de una línea o sección al ángulo que lo deseemos, nos sirve también para que una vez realizado el análisis de los datos ubiquemos el dron y según el ángulo nos permita la gráfica en la sección de ángulo correspondiente dentro del radar, es importante para poder ubicar al dron dentro del radar con exactitud.

```

void CRadar::rotar( float da)
{
    float cx = m_ancho / 2;
    float cy = m_alto / 2;
    float x = 2 * cx;
    float y = cy;
    float dx = x - cx;
    float dy = y - cy;
    float r = sqrt((dx * dx) + (dy * dy));
    float a = atan2(dy, dx);
    a -= da / 180 * 3.14;
    x = cx + r * cos(a);
    y = cy + r * sin(a);

    mem_linea->MoveTo(cx, cy);
    mem_linea->LineTo(x, y);
}

```

**Figura 22** Código función “Rotar”

Las funciones que crean los dibujos de cada uno de los elementos se la implementó siguiendo los siguientes pasos:

- Se crea un rectángulo en blanco, el cual tiene el mismo tamaño del Picture Control.
- Se crea un lápiz y se le agrega el color con el cual se desea que el dibujo aparezca.
- Se procede a realizar el dibujo de los elementos del radar (círculos, grilla, líneas de división).
- Se procede a guardar en memoria cada uno de los dibujos realizados.
- Se procede a dibujar en conjunto todos los elementos dentro del Picture Control, esto se logra sobreponiendo cada uno de los dibujos individuales guardados en memoria.

Cada una de las funciones crea un rectángulo en blanco que es en donde se van a realizar cada uno de los dibujos individuales, para que al final se pueda visualizar el radar, se sobreponen todos los dibujos individuales y de esa forma se muestra el radar con cada una de sus secciones (Figura 19).

### 3.3.3. Sincronización del software con el giro de la torre

El software debe poder operar la torre giratoria desde la interfaz gráfica presentada al operario del sistema de monitoreo, y a la vez debe obtener los datos de forma sincronizada al recorrido de la antena. Todo se logrará de la siguiente forma:

- En la Figura 23 se observa el botón “Iniciar”, mismo que envía a través del puerto serial los datos de control necesarios para efectuar el movimiento de la torre. El motor que permite el giro de la torre ha sido programado para que reciba, mediante comunicación serial, el ángulo que debe girar en cada uno de los pasos (Figura 24).



**Figura 23** Sincronización de la torre

```
for (int j = 0; j < 20; j++)  
{  
    count -= 10;  
    unsigned char m_traza[2];  
    m_traza[0] = '1';  
    m_traza[1] = '8';  
    Sleep(100);  
    m_serial.EscribirCarsPuerto(m_traza, 2);  
}
```

**Figura 24** Código que envía el dato serial a la torre

- Una vez efectuado el primer barrido hasta el ángulo de 18°, toma los datos correspondientes del espectro radioeléctrico y continua así, hasta terminar el giro de los 360 grados.
- Estos datos serán almacenados en una matriz para su posterior análisis y procesamiento. De esta forma logramos sincronía entre la torre, el software y la toma de datos.

Esto se lo realizó con la finalidad de que no exista errores entre el movimiento de la torre y la toma de datos, dado que al efectuar una sincronización de un equipo mecánico giratorio se debe tener cierto cuidado por el mismo hecho de ser manejado externamente, en este caso un software de desarrollo propio, involucra el envío de datos de control a la torre para que pueda entender que requerimos movimiento y en otros casos parada de la torre giratoria.

Dado que el rango de movimiento no se limita de forma mecánica, se debe efectuar este control para que no exista un sobregiro de la torre que nos pueda causar inconvenientes con el cable de conexión que va desde el Receptor Digital a la antena montada en la torre.

### 3.3.4. Recepción de datos de radiofrecuencia

El receptor digital es el que monitorea el espectro de radiofrecuencia con los parámetros previamente configurados en el apartado 3.3.1.1. El receptor obtiene los niveles de potencia de la señal de radiofrecuencia que están presentes durante el recorrido de la antena.

La antena gira un rango de 360°, al cual se lo dividió en pasos de 18°, en cada uno de los pasos de la antena obtiene una traza de los niveles de potencia, al final de cada uno de los recorridos de la antena se obtienen 20 trazas de datos. Cada una de las trazas tiene 2125 datos de niveles de potencia que posteriormente serán analizadas para determinar el ángulo de arribo de la señal de dron.

En el apartado 3.3.1.1 se detalla la función `GetEspectrumData()`, la cual permite obtener los niveles de potencia de las señales de RF presentes durante el giro de la antena, los niveles de potencia obtenidos por el receptor son almacenados en una matriz (Figura 25).

```

for (int i = 0; i < HM.m_SweepSize; i++)
    m_droncito[j][i] = HM.m_TraceMax[0][i];

```

**Figura 25** Matriz de datos de niveles de potencia

Al finalizar cada uno de los giros de la antena se obtiene una matriz de 2125 x 20, la cual contiene las veinte trazas de 2125 datos de niveles potencia, el software desarrollado tiene la función de almacenar la matriz generada en un archivo de texto plano, para tener un registro de los escaneos realizados, estos datos se analizarán de acuerdo al ancho de banda y al nivel de potencia correspondiente de los drones comerciales existentes.

### 3.3.5. Estimación del ángulo de arribo

Los drones comerciales establecen enlaces de radiofrecuencia dentro de la banda de 2400 MHz – 2483 MHz, esta banda está dentro de las bandas ISM (900 MHz, 2400 MHz, 5800MHz), por lo que es necesario discriminar señales de radiofrecuencia producidas por el dron y las producidas por redes de Wi-Fi.

El estándar 802.11a/b/g/n/ac trabajan en la banda de 2400 MHz y 5800 MHz, cada uno de estos estándares manejan un ancho de banda específico. El ancho de banda del estándar 802.11 b/g, es de 20 MHz dentro de la banda de 2400 MHz, mientras que el ancho de banda del estándar 802.11a/n/ac es de 20 MHz y 40 MHz. Por otra parte, el ancho de banda que manejan los drones es de 10 MHz (down link, drone – control), por lo que es relativamente sencillo diferenciar las señales de radiofrecuencia producidas por drones que las producidas por redes de Wi-Fi.

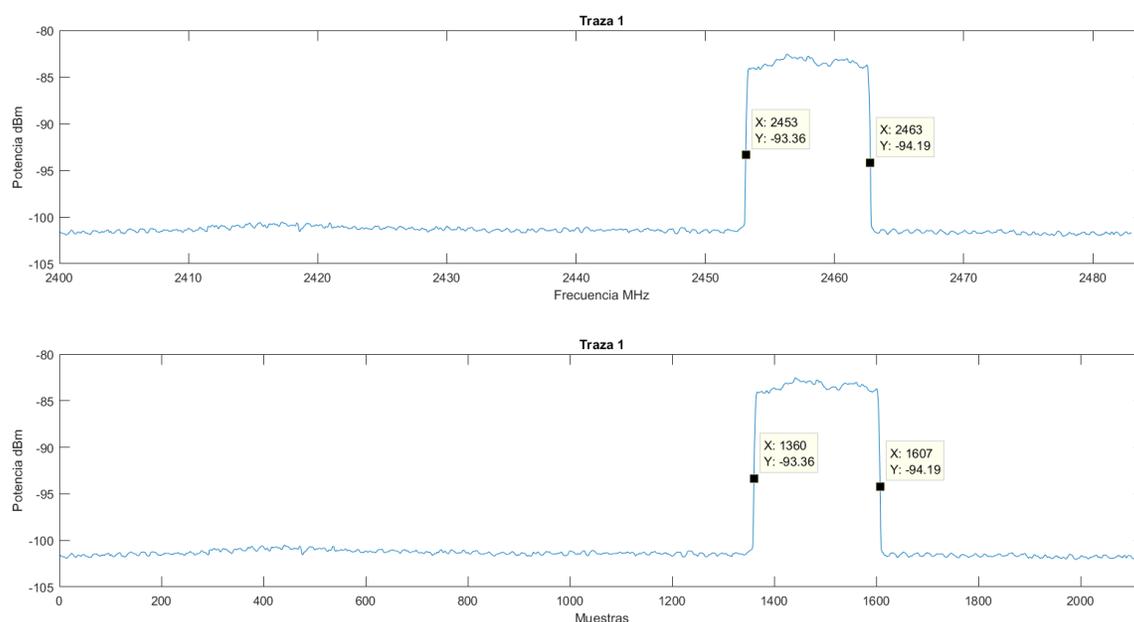
Cada una de las trazas obtenidas por el dron contienen los niveles de potencia dentro de la banda de 2400 MHz – 2483 MHz, por lo que se puede afirmar que los 2125 datos de cada traza son muestras del espectro de 83 MHz. A partir de esta afirmación, se calculan el número de datos que debe contener el ancho de banda del dron, mediante una regla de tres.

$$\begin{array}{ccc}
 2125 \text{ puntos} & & 83 \text{ MHz} \\
 & \times & / \\
 x \text{ puntos} & & 10 \text{ MHz}
 \end{array}$$

$$x \text{ puntos} = \frac{10 \text{ MHz} \times 2125 \text{ puntos}}{83 \text{ MHz}} = 256 \text{ puntos}$$

Se establece que 256 datos de potencia representan 10 MHz, por lo que cada traza es analizada cada 256 puntos, se obtiene el promedio de cada uno de los datos de cada grupo de datos y selecciona el máximo valor de cada uno de los grupos, este procedimiento se lo realiza con cada una de las veinte trazas.

En la Figura 26 se observa el grafico de la traza número uno en función de la frecuencia y en función del número de muestras, y se evidencia la presencia de un dron, ya que el ancho de banda de la señal es de 10 MHz (Figura 26), además se observa que existen alrededor de 256 muestras que representan los 10 MHz (Figura 26) del canal utilizado por el dron.



**Figura 26** Grafico de la traza número 1 (a) en función de la Frecuencia (b) en función del número de Muestras.

Al finalizar con todas las trazas se procede a obtener el valor máximo de potencia y seleccionar el número de traza en el que se encuentra. El ángulo de arribo es determinado por el número de trazas ya que cada traza representa un sector de  $18^\circ$ , es decir que si el valor máximo de potencia obtenido se encuentra en la traza número 11 el ángulo de arribo de la señal del dron estará en  $198^\circ$  (Todo esto ejemplificado previo a los resultados que serán presentados en el capítulo 4).

El ángulo de arribo se lo obtiene mediante el cálculo del valor promedio de cada uno de los vectores guardados previamente en el archivo de texto plano “datosDronP01”. El cálculo consiste en tomar 256 muestras, que representan 10MHz, y obtener el valor promedio, esto se repite para todos los 2125 datos de cada una de las 20 trazas.

Después de obtener el valor promedio de cada una de las trazas, se procede a buscar el valor promedio más alto dentro de cada uno de las trazas, de esta forma se obtiene un único vector de 20 valores, al cual se lo denomino promedio, el mismo almacena los valores más altos de todos los promedios que se obtuvieron al realizar el cálculo.

Por último, a partir del vector promedio se obtendrá el único valor máximo de potencia, la posición del valor máximo de potencia, dentro del vector, indica el ángulo por el cual está llegando la señal del dron. De acuerdo con la Tabla 1, se hace una comparativa dentro de la aplicación de software desarrollada y se dibuja un pequeño círculo (representación del dron), en el sector circular correspondiente.

**Tabla 1.***Comparación del ángulo de arribo - posición dentro del vector promedio*

<b>Posición dentro del vector</b>	<b>Sección circular (ángulo)</b>
<b>1</b>	0° - 18°
<b>2</b>	18° - 36°
<b>3</b>	36° - 54°
<b>4</b>	54° - 72°
<b>5</b>	72° - 90°
<b>6</b>	90° - 108°
<b>7</b>	108° - 126°
<b>8</b>	126° - 144°
<b>9</b>	144° - 162°
<b>10</b>	144° - 180°
<b>11</b>	180° - 198°
<b>12</b>	198° - 216°
<b>13</b>	216° - 234°
<b>14</b>	234° - 252°
<b>15</b>	252° - 270°
<b>16</b>	270° - 288°
<b>17</b>	288° - 306°
<b>18</b>	306° - 324°
<b>19</b>	324° - 342°
<b>20</b>	342° - 360°

### **3.3.6. Modelo de propagación para estimación de distancia del Dron**

El modelo de propagación es una estimación matemática que nos va a permitir estimar la distancia a la cual se encuentra el Dron, todo esto se dará gracias a los datos de potencia obtenidos por el receptor digital, en ellos se estima seleccionar el vector con el mayor nivel de potencia, una vez que ya ha sido excluido y seleccionado para obtener el ángulo de arribo.

El modelo de propagación utilizado para la estimación de la distancia es el modelo de propagación en espacio libre. Se eligió este modelo por los parámetros necesarios para su cálculo, puesto que se cuenta los valores de todas las variables necesarias para utilizar el mismo.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{ATX} + G_{ARX} - (92.4 + 20 \log(f_{GHz}) + 20 \log(d_{km}))$$

- Prx: Es el valor máximo de potencia obtenido al estimar el ángulo de arribo de la señal de RF del dron.
- Ptx: Es la potencia de transmisión máxima que emite el control remoto del dron, el fabricante especifica que la potencia de transmisión es de 26 dBm en la banda de 2400 - 2483 MHz y 28 dBm en la banda de 5725 – 5825 MHz.
- Gatx y Garx: Es la ganancia de las antenas tanto de transmisión como de recepción, para el desarrollo del presente trabajo, se cuenta con una ganancia de 0 dB para la antena del control del dron y 10 dBi para la antena espiral de banda ancha que sirve para el monitoreo.
- f: Es la frecuencia en la que está operando el dron, para el presente trabajo se utilizará la frecuencia de 2.4 GHz como constante para todos los cálculos.
- d: Es la distancia que existe entre el transmisor y el receptor, esta es la variable que será calculada

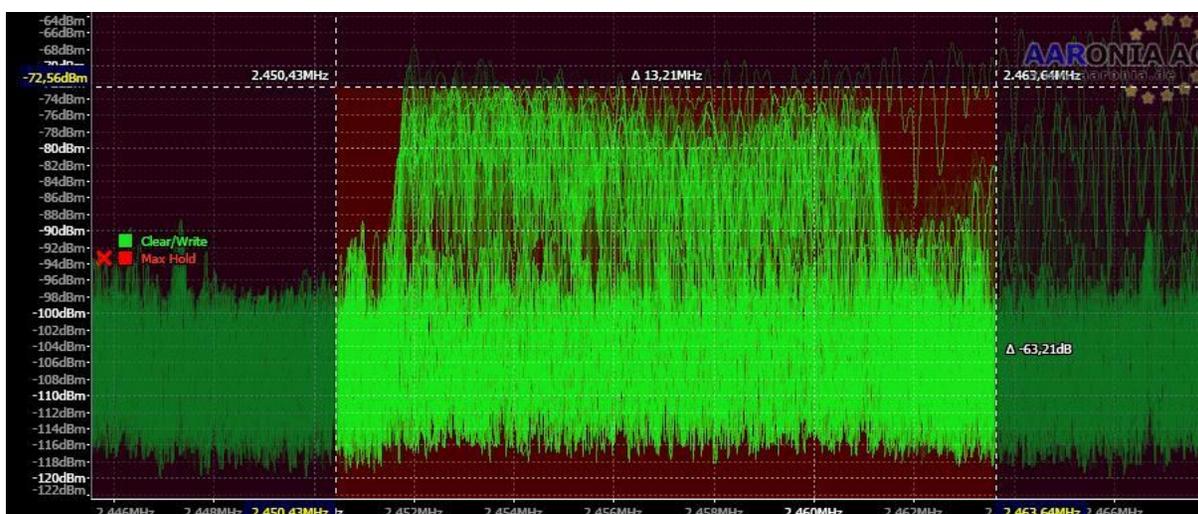
Se despeja la ecuación del modelo de propagación de espacio libre y se obtiene la distancia aproximada a la que se encuentra volando el dron. El modelo de propagación fue implementado en lenguaje C++, y el resultado del mismo se lo muestra dentro de la interfaz gráfica mostrada al operador del sistema de monitoreo.

## CAPÍTULO IV

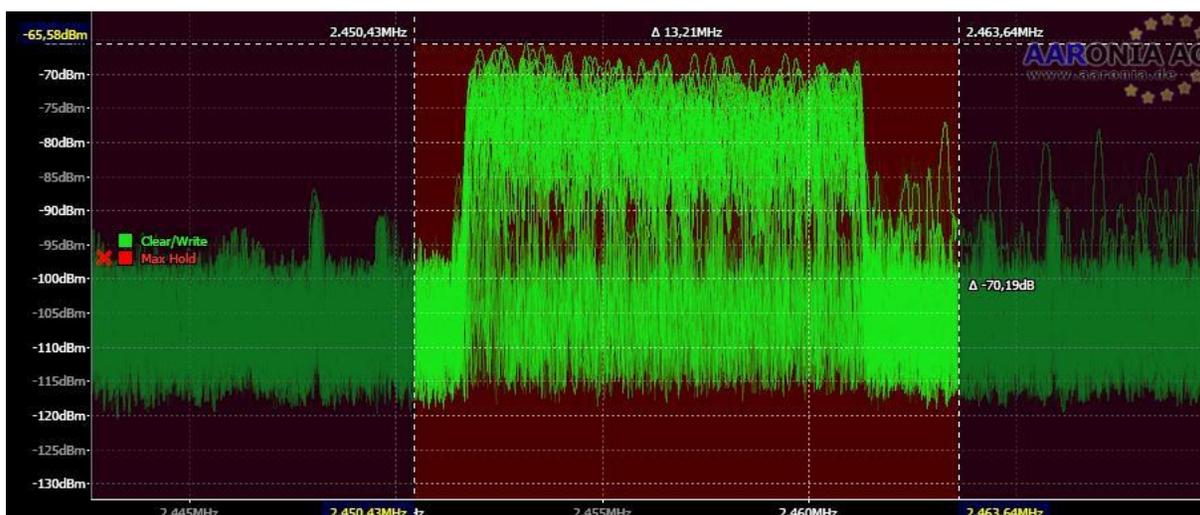
### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Pruebas realizadas con el receptor digital Aaronia Spectran V5

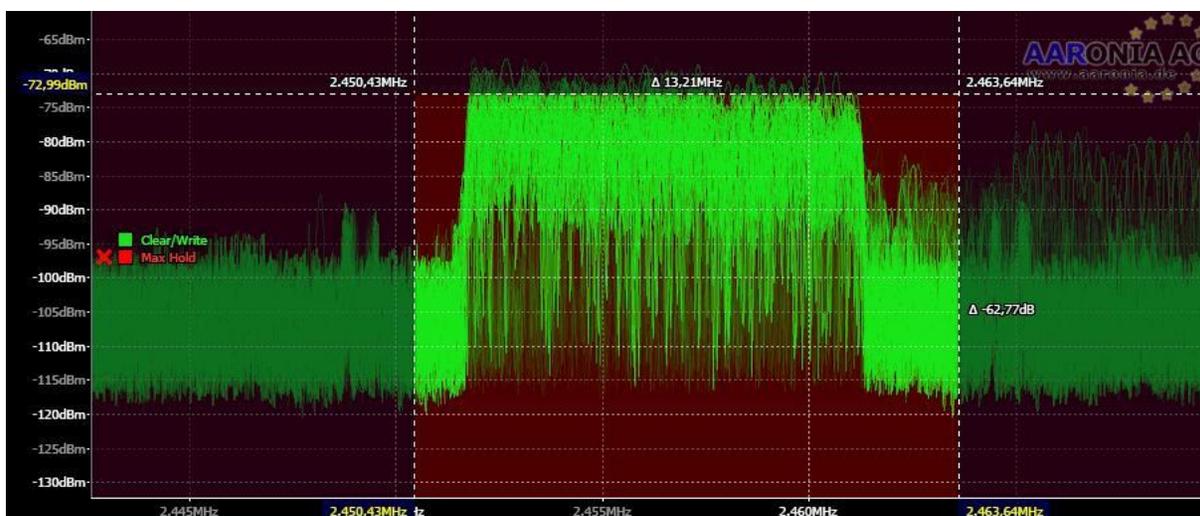
Se realizó el primer experimento utilizando el receptor digital Aaronia Spectran V5 (AG, 2018), con este receptor digital se pudo observar por primera vez la señal de radiofrecuencia emitida por el dron la cual se muestra en las Figuras 27, 28 y 29.



*Figura 27* Espectro de RF del dron en un ángulo de 0°



*Figura 28* Espectro de RF del dron en un ángulo de  $90^\circ$



*Figura 29* Espectro de RF del dron en un ángulo de  $180^\circ$

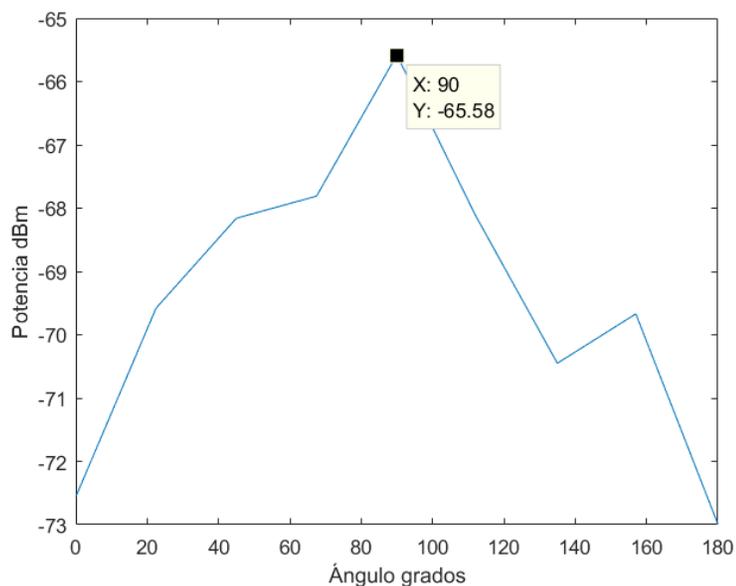
Se observa el espectro en tres puntos importantes dentro del recorrido de  $180^\circ$  que realizó la antena para el primer escenario montado, para este caso se hizo volar al dron a una altura de 40 metros y 150 metros de distancia, y se lo ubicó en un ángulo aproximado de  $90^\circ$  con referencia a la ubicación de la antena, todo este escenario se lo implementó en los exteriores del hangar del CICTE. La antena comienza a girar en sentido antihorario, se ubicó la antena en los  $0^\circ$ , la misma dio pasos de  $22.5^\circ$  hasta completar los  $180^\circ$ , se tomaron imágenes de cada uno de los pasos, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2.**  
*Niveles de potencia Obtenidos por el receptor Spectran V5*

Ángulo	Nivel de potencia
<b>0°</b>	-72.56 dBm
<b>22.5°</b>	-69.58 dBm
<b>45°</b>	-68.16 dBm
<b>67.5°</b>	-67.81 dBm
<b>90°</b>	-65.58 dBm
<b>112.5°</b>	-68.11 dBm
<b>135°</b>	-70.45 dBm
<b>157.5°</b>	-69.67 dBm
<b>180°</b>	-72.99 dBm

En la Tabla 2 se detallan los niveles de potencia obtenidos en cada uno de los pasos de la antena, se puede observar que mientras la antena se aproxima al ángulo en el que se encuentra volando el dron ( $90^\circ$ ) el nivel de la potencia aumenta, de esta forma se obtiene el ángulo de arribo de la señal de RF del dron. Por otra parte, también se puede observar que el decaimiento de los niveles de potencia son bruscos como se muestra en la Figura 30, ya que en su mayoría decaen alrededor de 1 a 3 dB por paso, este valor es aproximado, ya que al observar el espectro desde la

interfaz propia del fabricante es complicado obtener un valor exacto de potencia por sus constantes variaciones.



**Figura 30** Gráfico de los niveles de potencia obtenidos por el receptor Spectran V5

El receptor digital Aaronia no cuenta aún con una interfaz de comunicación con la computadora, es decir que aún no se lo puede acoplar a desarrollos de software propios (el interfaz está siendo desarrollado por el personal del CICTE), este receptor se lo utilizó en primera instancia para el desarrollo completo, pero por el conflicto descrito con la interfaz de comunicación solo se pudo contar como analizador de espectros para tener un primer acercamiento con el espectro de radiofrecuencia emitido por el dron.

Aunque los resultados nos enfocaron de mejor forma a lo que sería una versión final, si se logró implementar un prototipo funcional con este equipo, y se pudo obtener resultados como los que se presentan en la Figura 30.

Sin embargo, no cumplía con la condición de que sea un sistema monitreador automático, dado que requería una acción manual para que empiece su barrido de espectro y mediante un panel de control se efectuaba la estimación de ángulo de arribo al observar la potencia de la señal que se recibía.

Todo esto nos demostró que el prototipo no sería del todo factible para entrar en operatividad, por lo cual de manera simultánea se buscó una solución para poder agilizar el proceso en cuanto a la estimación del ángulo de arribo y el funcionamiento como tal de monitoreo.

Se procedió entonces con la elaboración de TDRs, para la adquisición de un equipo receptor que nos permita efectuar el monitoreo de forma más sencilla y sin tanta interacción humana que se encuentre con el sistema.

#### **4.2. Pruebas realizadas con el receptor digital Signal Hound BB60C**

Una vez adquirido el nuevo receptor digital Signal Hound BB60C (referencia manual o datasheet) (Hound, 2015), y con la factibilidad de que nos permita un enlace con interfaces de comunicación se procedió al análisis y el acople con el anterior software desarrollado.

Debido a que requiere una conexión y enlaces en codificación de lenguaje c ++ algo más complejo que el anterior software desarrollado se procedió con un nuevo desarrollo del software de monitoreo.

Dado que se tiene ya una base de funcionalidad se siguió la misma línea de proceso en cuanto al análisis de los datos para obtener ángulo de arribo y modelo de propagación. Todos los procesos anteriores explicados hasta este capítulo son ya los implementados, solo se hace una referencia al trabajo posterior que conlleva a un desarrollo óptimo para este sistema de monitoreo, detección y localización.

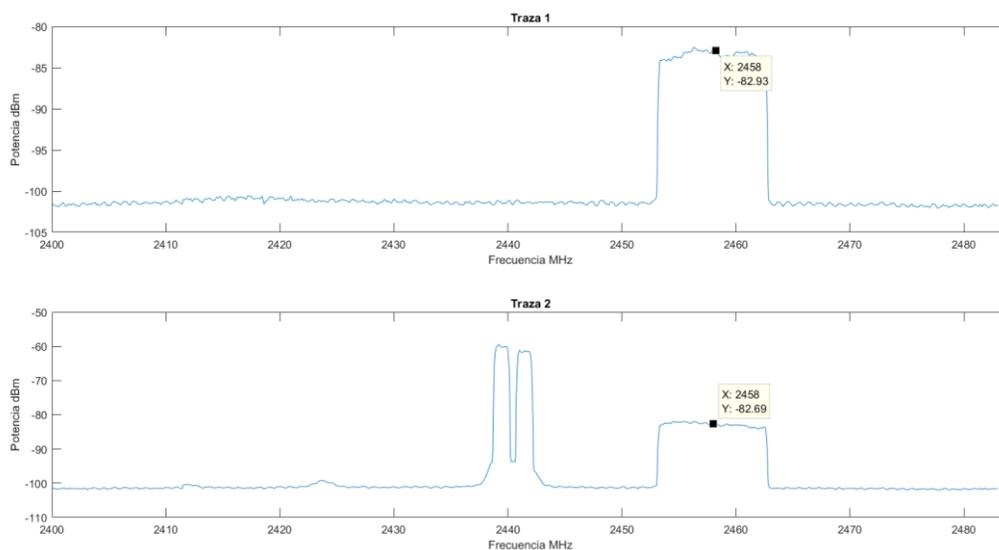
El sistema obtiene trazas en las cuales se guardan los niveles de potencia escaneados durante el recorrido de la antena. La antena realiza un recorrido de  $360^\circ$  en los cuales se toman 20 trazas de 2125 datos cada una, las cuales posteriormente son almacenadas dentro de una matriz de  $20 \times 2125$ . Estos datos son analizados para estimar el ángulo de arribo de la señal de radiofrecuencia emitida por el dron.

En la Figura 31 se puede observar el esquema que se utilizó para realizar las pruebas del sistema de monitoreo. El dron efectuó un sobre vuelo a una altura de 50 metros y a una distancia de 250 metros, se realizaron dos tomas de datos las cuales se almacenaron dentro de dos archivos de texto plano llamados “datosDroneP01”, “datosDroneP02”.

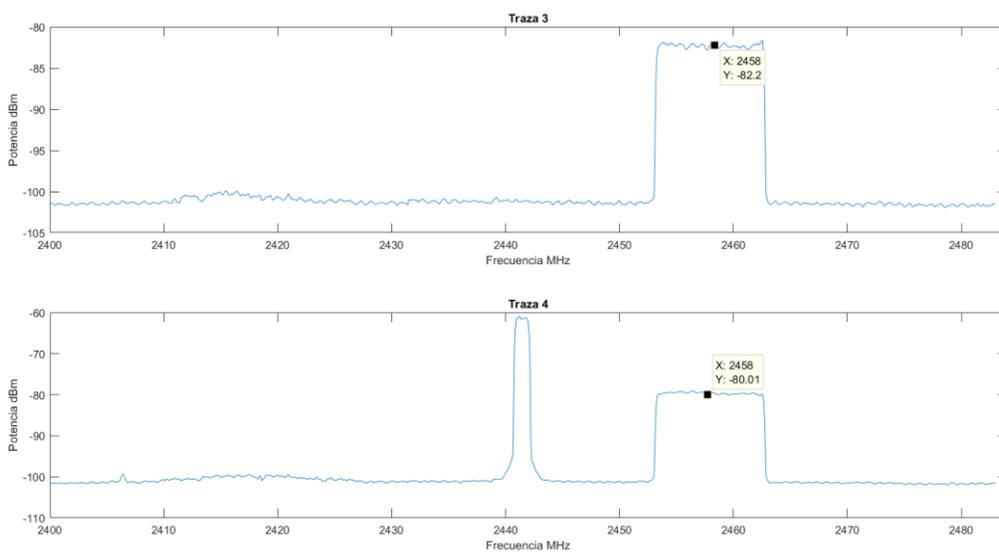


**Figura 31** Escenario para las pruebas

Mediante el Matlab se obtuvieron las gráficas espectrales de cada una de las trazas del dron, de la Figura 32 hasta la Figura 41. Se observa el espectro de cada una de las trazas obtenidas por el receptor digital BB60C.



**Figura 32** Gráfica del espectro de RF traza 1 y 2

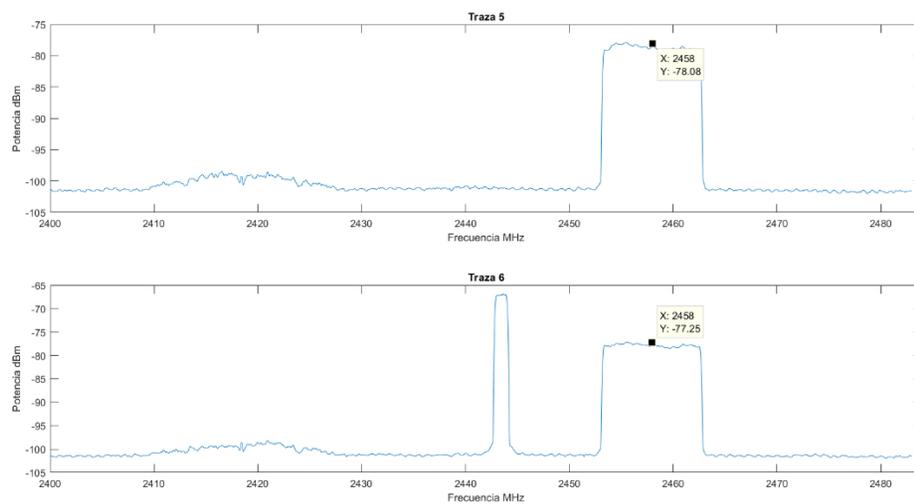


**Figura 33** Gráfica del espectro de RF traza 3 y 4

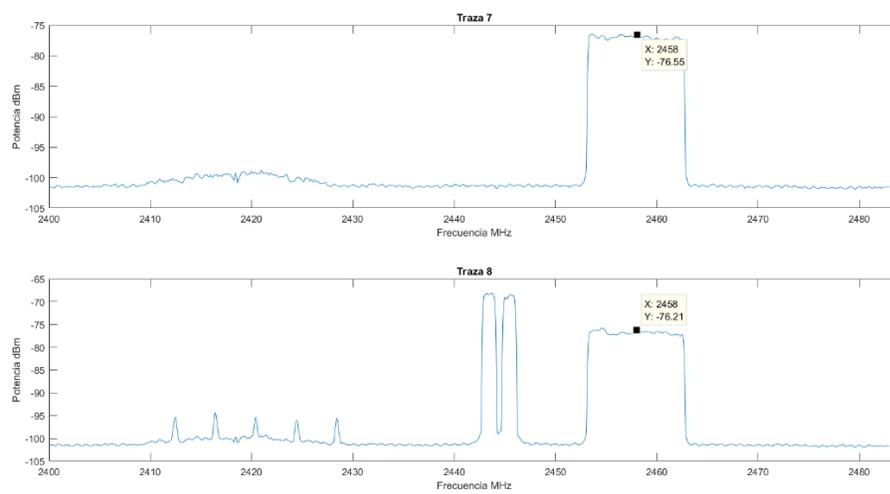
El dron establece un canal de subida (uplink) y canal de bajada (downlink), por cada uno de estos canales se transmite información importante desde el control remoto hasta el dron y viceversa.

En el uplink se envía información sobre las instrucciones de vuelo que debe seguir el dron, es decir los movimientos que debe realizar el dron cuando este se encuentra en vuelo. El UL utiliza la tecnología de Frequency Hopping con portadoras de 2 MHz.

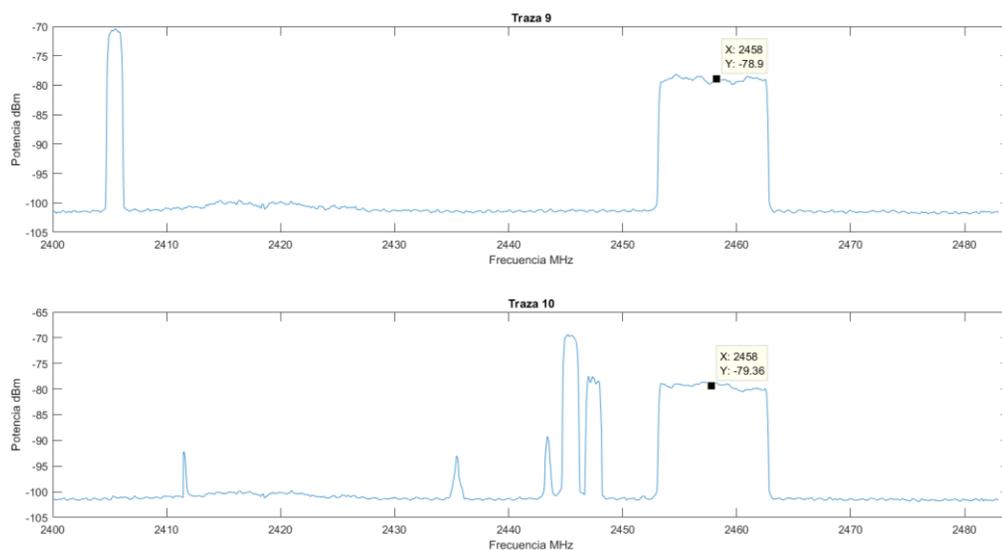
En cambio, en el downlink se envía información de los sensores que se encuentran en el dron, y la señal de video captada por el mismo cuando está en vuelo, para poder enviar toda esta información hacia el piloto, el dron establece un canal de 10 MHz. En las Figuras 32 y 33 se puede observar dos o más portadoras, la portadora más ancha es la señal del DL, mientras que la portadora de aproximadamente 2 MHz es la señal del UL. (Fu, Abeywickrama, Zhang, & Yuen, 2018)



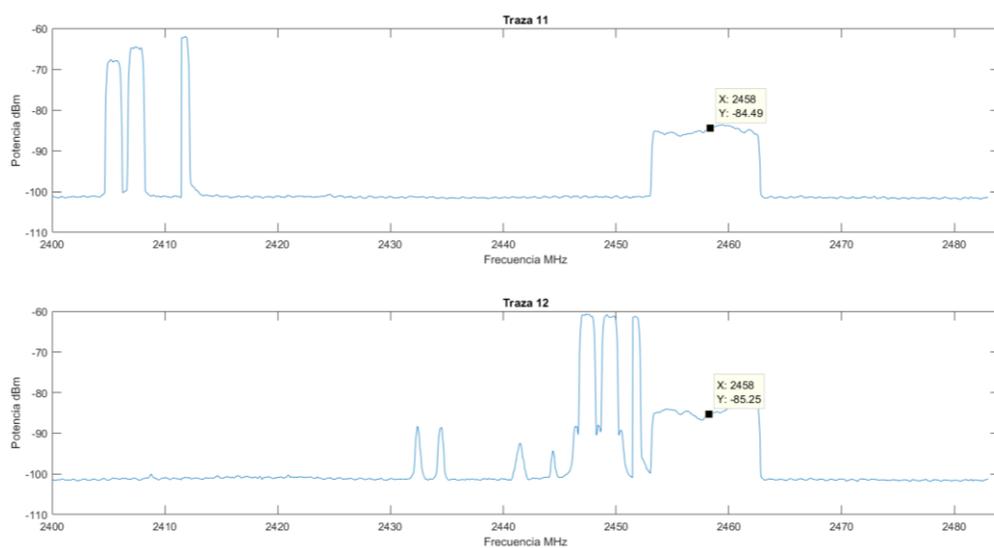
**Figura 34** Gráfica del espectro de RF traza 5 y 6



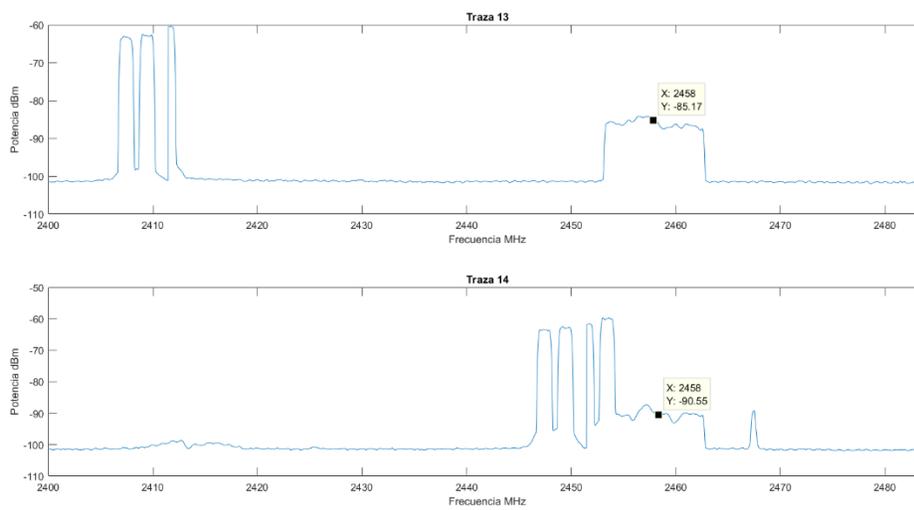
**Figura 35** Gráfica del espectro de RF traza 7 y 8



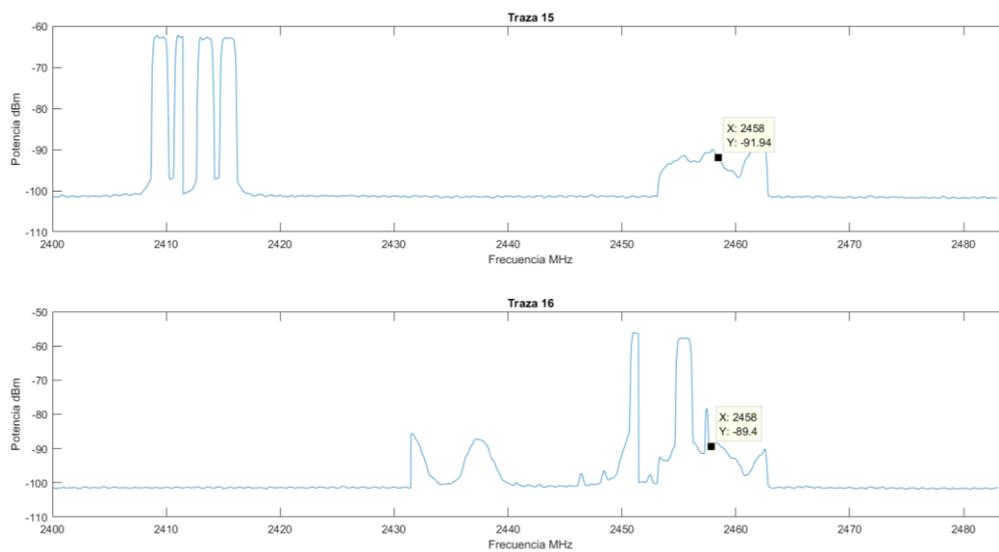
**Figura 36** Gráfica del espectro de RF traza 9 y 10



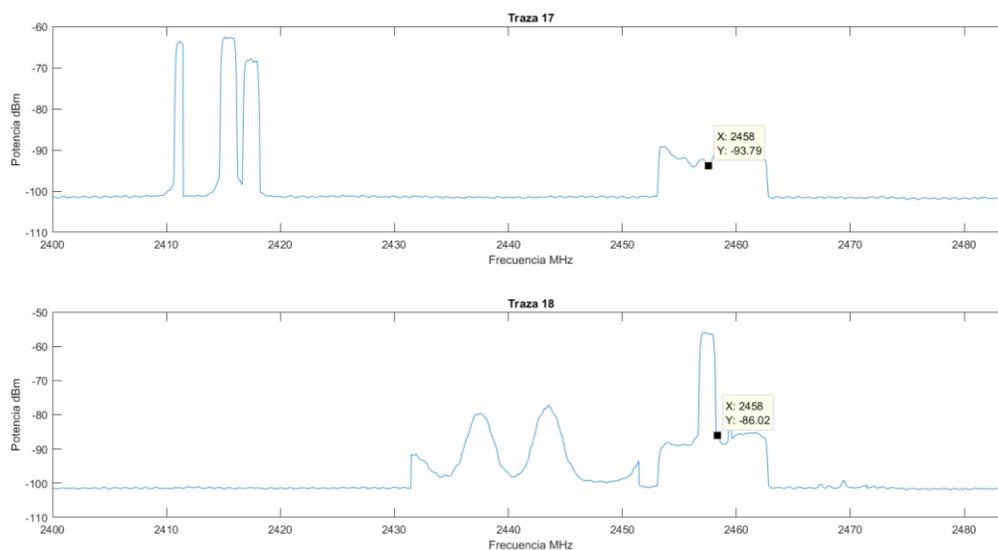
**Figura 37** Gráfica del espectro de RF traza 11 y 12



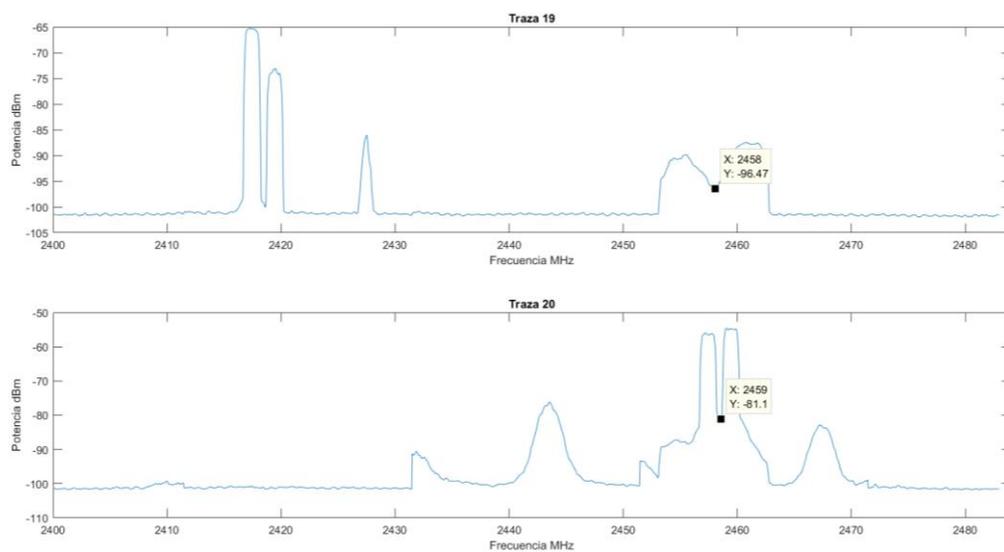
**Figura 38** Gráfica del espectro de RF traza 13 y 14



**Figura 39** Gráfica del espectro de RF traza 15 y 16



**Figura 40** Gráfica del espectro de RF traza 17 y 18



**Figura 41** Gráfica del espectro de RF traza 19 y 20

### 4.3. Estimación del ángulo de arribo de la señal de radiofrecuencia del dron.

Los datos con el nivel más alto de potencia en cada una de las trazas se detallan en la Tabla 3, evidenciando la presencia de un dron.

En la traza número 8 se observa que existe el nivel de potencia mayor, por lo que se deduce, según la tabla, que la señal de arribo de la señal es de  $144^\circ$ .

**Tabla 3**

*Nivel de potencia de cada una de las trazas.*

Numero de traza	Nivel de potencia	Sección de ángulo
1	-84.1511459	$0^\circ-22.5^\circ$
2	-83.5731125	$22.5^\circ-45^\circ$
3	-83.0012512	$45^\circ-67.5^\circ$
4	-80.4528427	$67.5^\circ-90^\circ$
5	-79.5162201	$90^\circ-112.5^\circ$
6	-78.6828308	$112.5^\circ-135^\circ$
7	-77.8313675	$112.5^\circ-135^\circ$
8	<b>-77.6423264</b>	<b><math>135^\circ-157.5^\circ</math></b>
9	-79.8286819	$157^\circ-180^\circ$
10	-80.2197266	$180^\circ-202.5^\circ$
11	-85.8063583	$180-202.5^\circ$
12	-79.6618881	$202.5^\circ-225^\circ$
13	-86.7259674	$225^\circ-247.5^\circ$
14	-78.2528992	$247.5^\circ-270^\circ$
15	-81.0184555	$270^\circ-292.5^\circ$
16	-84.6973038	$270-292.5^\circ$
17	-87.8168106	$292.5^\circ-315^\circ$
18	-83.4195709	$315^\circ-337.5^\circ$
19	-91.7254486	$337.5^\circ-360^\circ$
20	-78.9426651	$337.5^\circ-360^\circ$

En el capítulo 3 se detalló el algoritmo utilizado para obtener el ángulo de arribo de la señal de RF del dron. El algoritmo se basa en obtener el valor máximo de potencia, además de la posición en el cual se encuentra dentro del vector de promedio. Al utilizar el algoritmo desarrollado para la detección del dron se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Figura 42 y Figura 43.

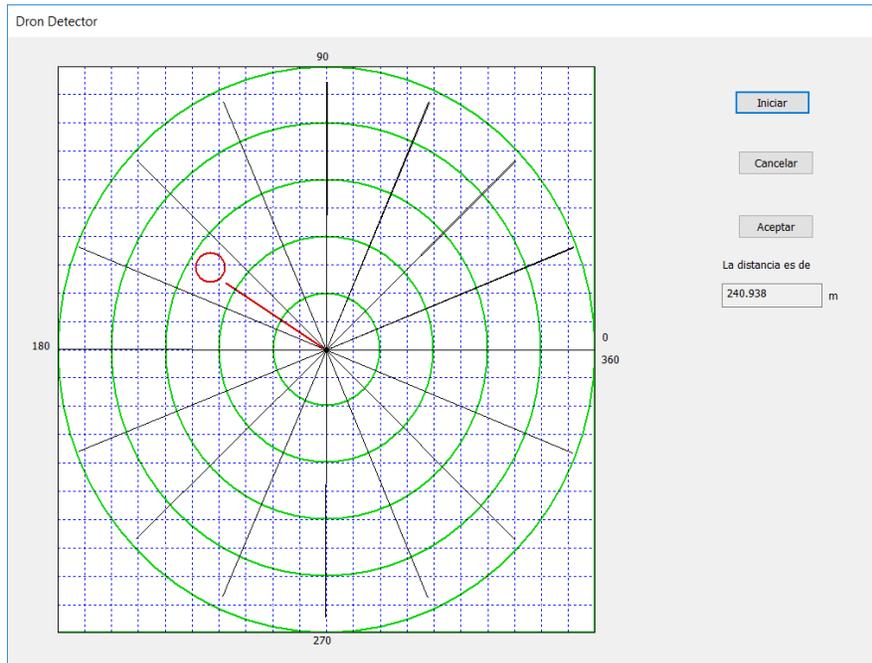
angulo	6
di	-107374176.
maxi	-77.6423264

**Figura 42** Nivel máximo de potencia de la señal del dron

angulo	126
di	-107374176.
maxi	-77.6423264

**Figura 43** Posición del nivel más alto de potencia de la señal de dron

La variable maxi representa el valor máximo de potencia obtenido  $maxi = -77.64 \text{ dBm}$ , la variable ángulo obtiene la posición del valor máximo dentro del vector,  $angulo = 126$ , obteniendo así los valores de maxi (este valor permite estimar la distancia a la que se encuentra el dron) y ángulo. A partir del ángulo obtenido, en el software se procede a ilustrar esta posición dentro del radar como se observa en la Figura 44.



**Figura 44** Resultado final del sistema de monitoreo

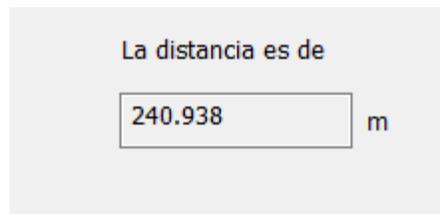
#### 4.4. Cálculo de la distancia aproximada del dron

Se utilizó la ecuación de propagación con pérdidas en el espacio libre para poder realizar el cálculo de la distancia a la que se encuentra el dron. Se utilizaron los siguientes valores:

- $P_{tx} = 0 \text{ dBm}$
- $P_{rx} = -77.64 \text{ dBm}$  , valor máximo de potencia obtenido por el software
- $G_{atx} = 0 \text{ dBi}$
- $G_{arx} = 10 \text{ dBi}$
- $f = 2.4 \text{ GHz}$

El fabricante del DJI Phantom 4 especifica una potencia máxima de transmisión de 26 dBm, esta potencia permitirá volar el dron hasta una distancia máxima de 7 km, en condiciones ideales. Para las pruebas realizadas se escogió una potencia de 10 dBm, puesto que los experimentos se los realizó en ambientes controlados, y esto permitió obtener resultados más ajustados a la realidad.

Utilizando los datos descritos anteriormente se obtuvo el resultado que el dron se encuentra a una distancia aproximada de 240.938 m, cuyo resultado se lo puede observar en la Figura 45.



**Figura 45** Distancia calculada por el software desarrollado

Por otra parte, se realizó el cálculo de la distancia a partir del nivel de potencia máximo obtenido mediante las gráficas de frecuencia de las trazas, mostrado en la Tabla 3, para lo cual se consideraron los siguientes valores:

- $P_{tx} = 0 \text{ dBm}$
- $P_{rx} = -76.21 \text{ dBm}$ , valor máximo de potencia obtenido de las gráficas.
- $G_{atx} = 0 \text{ dBi}$
- $G_{arx} = 10 \text{ dBi}$
- $f = 2.4 \text{ GHz}$

Al realizar el cálculo de la distancia, a partir de los datos obtenidos mediante las gráficas se obtuvo que el dron se encuentra a una distancia de 204.4 m.

El radar cuenta con cinco circunferencias concéntricas, las que representan la distancia a la cual puede detectarse el dron. Las circunferencias están separadas entre sí una distancia de 100 m. hasta llegar a la última que representa 500 m.

La distancia calculada por el software y la distancia calculada mediante los datos de la gráfica, no interfiere en el resultado final del proyecto, puesto que el objetivo es estimar la distancia aproximada a la que se encuentra el dron y tomar acciones de defensa.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se desarrolló un sistema PROTOTIPO de monitoreo, efectivo y funcional que obtiene las señales radioeléctricas presentes en el medio, consecuente a esto las analiza para determinar y discriminar señales de Drones de otras presentes, logrando así la detección, ubicación y mediante algoritmos matemáticos estimar la distancia para proceder a localizar de manera aproximada la ubicación del Dron.

El sistema cuenta con un estudio previo de todas las técnicas y algoritmos existentes propuestos en estudios pasados, para determinar los más efectivos y lograr así el monitoreo, detección e identificación de señales radioeléctricas en un ancho de banda que para el presente trabajo se logró con 83 MHz (con apenas 4 saltos de la portadora que analiza 27 MHz instantáneamente), superando así la expectativa planteada en un inicio.

Los sistemas comerciales de detección de aeronaves no tripuladas cumplen con las mismas capacidades que el prototipo aquí desarrollado, sin embargo al momento de efectuar el desarrollo del sistema de monitoreo se evidencio una reducción significativa en cuanto a costos, peso y volumen estructural, muy consciente de que se trata de un prototipo no se deja de lado la notoriedad de que el desarrollo de un sistema comercial basado en el prototipo desarrollado y con sus mejoras respectivas, significaría un costo mucho menor en comparación a los existentes, aún más si se optaría por una producción controlada en masa para salvaguardar la integridad y seguridad del país.

El sistema como tal es una herramienta que nos permitirá dotar de tecnología a las Fuerzas Armadas en virtud de su labor de salvaguardar la integridad y soberanía del país, todo esto con la premisa de que el prototipo fue desarrollado dentro del Centro de Investigación y Aplicaciones Militares (CICTE), lo cual demuestra que el desarrollo de tecnología militar es posible con la determinación adecuada el apoyo y guía correcta dentro del marco de lo legal y lo ético.

Durante el desarrollo del sistema se observó la necesidad urgente del prototipo que, da paso a futuras investigaciones en cuanto a defensa del país, lo cual consideramos de gran importancia dado los avances tecnológicos presentes, avances que no siempre son bien utilizados por parte de las personas, más aún cuando se trata de posibles afectaciones a lugares estratégicos que pudiesen conllevar a un gran impacto por parte de la filtración de información con fines maliciosos.

Igualmente, los principales problemas que se presentan a la hora de implementar este tipo de sistemas de monitoreo ya existentes en el mercado de Inteligencia de Señales, fueron superados, es decir: a) altos costos de los existentes y de alta reserva (el nuestro es 10 veces más barato y 100 % propietarios), b) falta de soporte al mediano y largo plazo (el nuestro siempre tendrá el soporte del CICTE – ESPE), c) deficiencia en la transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción (el nuestro permite 100% de transferencia tecnológica). Por lo tanto, el desarrollo del presente prototipo supera estas dificultades, puesto que a través de la investigación y desarrollo pueden ser solventadas dando como resultado mejores herramientas que sobre todo son parte intrínseca y propietaria del sistema general de vigilancia y seguridad de nuestro Estado.

## 5.2. Recomendaciones

La utilización del sistema desarrollado realiza una detección más favorable y precisa si se lo ubica en lugares estratégicos a campo abierto con cierta protección para intemperie, dado que su utilización dentro de un ambiente recurrido y poblado influirá en su monitoreo por la presencia de señales radioeléctricas que serán detectadas y de existir un solapamiento en canales podrían resultar en falsos positivos o la ejecución de una doble detección, dado que la finalidad del dispositivo es que sea aplicable en campos abiertos.

Como consecuencia del desarrollo del prototipo, la implementación de un sistema de producción requiere una estructura más robusta, con un correcto análisis previo a su construcción, dado que al contar con una antena receptora directiva esta podría verse afectada por estructuras del tipo metálico que puedan afectar al momento de la detección de la señal, sin embargo, los nuevos materiales presentes en el mercado como Fibra de Vidrio, fibra de carbono PLA tipo A o tipo B, polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policloruro de vinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET) y poliuretano no causan dicho efecto de reflexión, y brindan una amplia selección en cuanto a materiales, todo esto previo un estudio del lugar en el cual se podría aplicar y las condiciones climáticas que deberá soportar.

En caso de requerir una depuración en el código del Software se lo puede efectuar en cualquier Plataforma que soporte el lenguaje C++, sin embargo, se recomienda que se lo haga sobre la plataforma de “Visual Studio”, dado que nos brinda un sin número de herramientas útiles para una posible variación de procesos, cambios en la interfaz gráfica, tiempos de monitoreo, modos de operación entre otras.

El estudio de ancho de banda para detección de aeronaves se lo efectuó dirigido a los Drones Comerciales, ya que en su gran mayoría utilizan un ancho de banda de 10 MHz, por su necesidad de transmitir datos de control, imágenes y su sistema de posicionamiento global, sin embargo en caso de ser requerida la detección para drones de desarrollo propio o de uso militar el sistema puede ser actualizado para nuevos requerimientos de ancho de banda, pues el receptor digital utilizado puede monitorear desde 9 KHz – 6 GHz.

### **5.3. Trabajos Futuros**

Una forma alternativa de detección de drones puede ser a partir del sonido que producen las hélices al girar, ya que se podría caracterizar el sonido y de esta forma detectar la presencia de drones, además de ajustar los algoritmos desarrollados para la discriminación de señales no producidas por drones.

Un próximo trabajo será la sustitución del subsistema de antena; que en nuestro caso lo constituye una antena plana espiral (en la banda de 1 – 18 GHz), un motor de pasos y el sistema de control del motor; por un subsistema de antena inteligente que no requiere de giro mecánico, sino por un aparente giro del lóbulo de irradiación.

Todo lo desarrollado en el presente trabajo se lo podría acoplar a un sistema más avanzado que haga uso de un solo dispositivo de procesamiento por ejemplo un FPGA, y de esta forma poder ajustar los parámetros de medición de acuerdo al tipo de dron que se requiera detectar, ya sea los drones comerciales o drones más especializados como los de uso militar.

El estudio continuo de tecnologías de uso militar es indispensable, y en este caso por tratarse de defensa su importancia se incrementa, ya que el sistema presentado efectúa un correcto

monitoreo, localización y detección, lo posterior a este proceso sería la interceptación y neutralización de dichas aeronaves, esto conforme a los datos ya obtenidos podríamos sugerir un nuevo sistema acoplado con una parte que realice interferencia y posterior captura a dichas aeronaves.

Posterior a que se efectúe una captura o una neutralización de aeronaves, es vital conocer el motivo y las intenciones del intento de afectación al lugar que protege el sistema, por lo cual entra en juego la posibilidad de además de detectar, interferir y neutralizar, se pueda obtener un historial de las rutas que haya efectuado dicha aeronave en caso de tenerlas, considerando el desarrollo de un sistema que cuente con la posibilidad de interferir y generar una señal de control diferente pero efectiva y poder obtener datos que la aeronave tenga dentro de su registro de vuelo entre otra información.

El prototipo presentado cuenta con alimentación fija, por lo cual se ve sujeto a una conexión alámbrica, sin embargo, en caso de requerir la portabilidad del mismo se lo podría desarrollar con un banco de baterías con una interfaz gráfica montado en un HMI (interfaz hombre máquina, por sus siglas en ingles), sistema que llevado a cabo podría ser utilizado en patrullajes preventivos, minimizando aún más la afectación que podría sufrir cualquier lugar estratégico militar o civil.

## REFERENCIAS

- 633, D. E. (16 de Enero de 2019). Obtenido de Presidencia de la Republica del Ecuador:  
[https://minka.presidencia.gob.ec/portal/usuarios\\_externos.jsf](https://minka.presidencia.gob.ec/portal/usuarios_externos.jsf)
- AG, A. (06 de 11 de 2018). *aaronia.de*. Obtenido de Aaronia:  
<http://www.aaronia.com/fileadmin/beta-releases/V5-X.pdf###>
- Bisio, I., Garibotto, C., Lavagetto, F., Sciarrone, A., & Zappatore, S. (Abril de 2018). Unauthorized Amateur UAV Detection Based on WiFi Statistical Fingerprint Analysis. *IEEE Communications Magazine*, 106 - 111.
- DJI. (2019). Obtenido de <https://www.dji.com/phantom-4-pro/>
- Ecuador, C. d. (2008).
- Fu, H., Abeywickrama, S., Zhang, L., & Yuen, C. (2018). Low-Complexity Portable Passive Drone Surveillance via SDR-Based Signal Processing. *IEEE Communications Magazine* , 112-118.
- Ganti, S. R., & Kim, Y. (2016). Implementation of Detection and Tracking Mechanism for small UAS. *Int'l Conf Unmanned Aircraft System*, 1254-60.
- Hound, S. (06 de 03 de 2015). *Signal Hound*. Obtenido de <https://signalhound.com/>
- Kamkar, S. (28 de Agosto de 2017). *Skyjack: Autonomous Drone Hacking w/ Raspberry Pi, aircrack & Javascript*. Obtenido de <http://www.samy.pl/skyjack/>
- Mendis, G. J. (2016). Deep Learning Based Doppler Radar for Micro UAS Detection and Clasification. *MILCOM*, 924-929.

- Parrot*. (2019). Obtenido de <https://www.parrot.com/global/parrot-professional/parrot-disco-pro-ag>
- Poisel, R. (2002). *Introduction to Communication Electronic Warfare Systems*. Boston: Artech House.
- RedMas. (29 de 07 de 2018). *Red Mas Colombia*. Obtenido de <http://www.redmas.com.co/colombia/alias-guacho-burla-las-autoridades-drones/>
- Schleher, C. (1999). *Electronic Warfare in the Information Age*. Artech House.
- 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 microwaves receivers*. Norwood: Artech House.
- Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2014). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. New York: Springer Science+Business Media .
- Witschi, M. (2016). Detection of Modern Communication Signal Using Frequency Domain Morphological Filtering. *Signal Processing Conf.*, 1413-17.
- Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges. *IEEE Communications Magazine*, 36-42.