



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS  
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO

PROGRAMA DE SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

**“Análisis de cobertura en comunicaciones aire-tierra bajo  
perturbaciones aleatorias en un vehículo aéreo no tripulado”**

T E S I S

Que presenta

Ing. Esteban Tlelo Coyotecatl

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

EN SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

Directores de Tesis:

Dra. Giselle Monserrat Galván Tejada

Dr. Mauricio Lara Barrón

Ciudad de México

Abril, 2023.

# Agradecimientos

---

*Quiero mostrar agradecimientos al  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)  
por darme la beca para poder estudiar este posgrado.  
A mis padres por apoyarme en todo momento  
y a mis asesores la Dra. Giselle Monserrat Galván Tejada  
y el Dr. Mauricio Lara Barrón  
que estuvieron atentos en todo este proceso.*

# Resumen

---

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés) han ido tomando cada vez más importancia en cuanto a desarrollo tecnológico. Esto se debe a que por su relativo bajo costo y capacidad de operar bajo condiciones en las que los seres humanos por sí mismos no podrían operar, son capaces de desarrollar tareas específicas. En este sentido, un tema de gran importancia en la actualidad es la conectividad en todo momento, donde los UAVs se vuelven clave para alcanzar zonas que no cubre una estación base terrestre (BS).

A pesar de que los UAVs son capaces de operar como una extensión de una BS, hay factores externos (perturbaciones) que modifican su comportamiento. Uno de estos pueden ser las ráfagas de viento, ya que al ser alterado el UAV por una perturbación aleatoria de este tipo, dejará de proporcionar cobertura en la zona deseada.

A partir de lo anterior, en el presente trabajo de tesis se realiza el estudio de cómo las perturbaciones aleatorias, en este caso las ráfagas de viento, alteran la cobertura proporcionada por un UAV que opera como una estación base aérea (ABS), se caracteriza la perturbación, se muestra el modelo matemático del cuadricóptero y se trabaja bajo un modelo de propagación sin obstáculos.

Finalmente se muestra la cobertura proporcionada antes y después de la perturbación y se ilustra cómo es afectada en términos de potencia recibida; esto se logra considerando una distribución aleatoria de usuarios terrestres en el área de cobertura deseada.

# Abstract

---

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have been taking more importance in terms of technological development. This is due to the fact that because their relative low cost and ability to operate under conditions in which human beings by themselves could not operate, they are capable of performing specific tasks. In this sense, a topic of great importance today is the connectivity everywhere, where UAVs become key to reach areas that are not covered by a terrestrial base station (BS).

Although UAVs are capable of operating as an extension of a BS, there are external factors (perturbations) that modify their behavior. One of these may be wind gusts, since as the UAV is altered by a random disturbance of this type, it could not longer provide coverage in the desired area.

Based on the above, in this thesis a study is carried out on how random disturbances, in this case wind gusts, alter the coverage provided by a UAV that operates as an aerial base station (ABS), the disturbance is characterized, the mathematical model of the quadrotor is shown and the final simulation results under a propagation model without obstacles.

Finally, the coverage provided before and after the disturbance is shown and it is illustrated how it is affected in terms of received power; this is achieved considering a random distribution of users in the desired coverage area.

# Índice general

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Lista de acrónimos</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>X</b>
<b>Introducción</b>	<b>XII</b>
<b>1. Estado del arte de las comunicaciones aire-tierra en el contexto de redes celulares 5G</b>	<b>1</b>
1.1. Evolución de las redes móviles celulares previo a 5G . . . . .	1
1.2. Servicios planteados en 5G . . . . .	4
1.3. Tecnologías utilizadas en 5G . . . . .	4
1.3.1. Ondas milimétricas (banda de las milimétricas) . . . . .	4
1.3.2. Celdas pequeñas . . . . .	5
1.3.3. MIMO masivo . . . . .	5
1.3.4. Formadores de haces . . . . .	5
1.3.5. Full-duplex . . . . .	5
1.4. UAV dentro de 5G . . . . .	6
1.4.1. Beneficios y tipos de plataformas aéreas . . . . .	6
1.4.2. Ejemplo de aplicaciones . . . . .	7
1.4.3. Experimentos con UAVs . . . . .	8
1.5. Comunicación Aire-Tierra (A2G) . . . . .	9
1.5.1. Definición e importancia . . . . .	9
1.5.2. Bandas de frecuencia utilizadas en comunicaciones A2G . . . . .	10
1.5.3. Casos de uso (de acuerdo con estándares 3GPP (TR 22.829)) . . . . .	10

<b>2. Caracterización de las perturbaciones de los UAV</b>	<b>14</b>
2.1. Definición del concepto de cobertura . . . . .	14
2.2. Efectos de las perturbaciones aleatorias de los UAVs en la cobertura . . . . .	16
2.3. Área de cobertura reflejada a través de niveles de potencia recibidos . . . . .	23
2.4. Modelo de viento Dryden . . . . .	28
<b>3. Modelado matemático de un UAV tipo cuadrirrotor</b>	<b>33</b>
3.1. Obtención de la matriz de Coriolis y derivadas . . . . .	35
3.2. Control rotacional (orientación) . . . . .	39
3.3. Control de traslación . . . . .	40
<b>4. Interfaz de simulación</b>	<b>43</b>
4.1. Interfaz de simulación . . . . .	43
4.2. Simulación de PVTOL en configuración + . . . . .	43
4.3. Integración de los modelos DWM y UAV tipo cuadrirrotor . . . . .	44
4.4. Descripción de la plataforma de simulación . . . . .	45
<b>5. Simulación y análisis de resultados</b>	<b>49</b>
5.1. Parámetros generales de las simulaciones . . . . .	49
5.2. Resultados de simulación de la plataforma UAV sin perturbaciones . . . . .	49
5.3. Resultados de simulación de la plataforma UAV con perturbaciones . . . . .	53
5.3.1. Efectos de las perturbaciones en el UAV . . . . .	53
5.3.2. Efectos de las perturbaciones en la cobertura de una ABS . . . . .	58
<b>Conclusiones</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>75</b>

# Lista de acrónimos

---

<b>1G</b>	Primera Generación
<b>2G</b>	Segunda Generación
<b>3G</b>	Tercera Generación
<b>3D</b>	Tridimensional
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>4G</b>	Cuarta Generación
<b>5G</b>	Quinta Generación
<b>A2G</b>	Air to Ground
<b>ABS</b>	Aerial Base Station
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System
<b>Broadcasting</b>	Comunicación Amplia
<b>BS</b>	Base Station
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CoMP</b>	Transmisión Multipunto Coordinada
<b>DAMPS</b>	Digital Advanced Mobile Phone System
<b>DoCoMo</b>	Do communications over the mobile network
<b>eMBB</b>	Banda ancha móvil mejorada
<b>EDGE</b>	Enhanced Data GSM Environment
<b>end to end</b>	Extremo a extremo
<b>EHF</b>	Extremely High Frequency
<b>FANET</b>	Flying Adhoc Network
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplexing
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communication
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GU</b>	Ground Users
<b>HAP</b>	High Altitude Platform
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>LAP</b>	Low Altitude Platform
<b>LoS</b>	Line-of-Sight
<b>mMTC</b>	massive Machine Type Communications

<b>mmWave</b>	milimetrical Wave
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>NTT</b>	Nippon Telegraph and Telephone
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frecuency Division Multiplexing
<b>PDF</b>	Función de Densidad probabilística
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>SWAP</b>	Size, Weight And Power
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TDD</b>	Time Division Duplexing
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>URLLC</b>	Ultra Reliable Low Latency Communication
<b>USs</b>	User Stations
<b>UBS</b>	UAV Base Stations
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access



# Índice de tablas

---

5.1. Porcentaje de usuarios dentro del área de cobertura . . . . .	68
5.2. Estadísticas para viento fuerte . . . . .	70
5.3. Estadísticas viento moderado . . . . .	70
5.4. Porcentaje de usuarios dentro del área de cobertura tras realizar 50 simulaciones (simulación 1 - 25) . . . . .	71
5.5. Porcentaje de usuarios dentro del área de cobertura tras realizar 50 simulaciones (simulación 26 - 50) . . . . .	72

# Índice de figuras

---

1.1. Ejemplificación del concepto TDMA y FDMA . . . . .	2
2.1. Ejemplificación del concepto cobertura . . . . .	15
2.2. Área de cobertura del UAV . . . . .	16
2.3. Complemento de un cierto operador de cobertura con UAV . . . . .	17
2.4. Modelo del sistema, basado en [48] . . . . .	18
2.5. Ángulos de azimuth y elevación . . . . .	19
2.6. Ángulos de azimuth y elevación (UAV con inclinación) . . . . .	19
2.7. Área de cobertura antes de que el ángulo de elevación varíe . . . . .	22
2.8. Área de cobertura después de variar el ángulo de elevación . . . . .	22
2.9. Área de cobertura variando manualmente $\alpha$ a $30^\circ$ . . . . .	23
2.10. Patrón de radiación de una antena comercial [20] . . . . .	25
2.11. Niveles de potencia recibidos en condiciones de propagación de espacio libre. Transmisor radiando con una antena isotrópica . . . . .	25
2.12. Niveles de potencia recibidos en condiciones de propagación de espacio libre. Transmisor radiando con una antena isotrópica mostrando el área de cobertura . . . . .	26
2.13. Niveles de potencia recibidos usando en el transmisor una antena con patrón de radiación comercial . . . . .	26
2.14. Niveles de potencia recibidos simulando en el transmisor una antena comercial . . . . .	27
2.15. Ejemplificación de los efectos en la cobertura debido a perturbaciones . . . . .	28
2.16. Diagrama de UAV con perturbación . . . . .	31
2.17. Componentes de velocidad lineal obtenidas de los filtros: a) Velocidad lineal $u_g$ , b) velocidad lineal $v_g$ y c) velocidad lineal $w_g$ . . . . .	32
3.1. Marcos de referencia y sistemas de fuerza de un cuadricóptero . . . . .	34
4.1. Diagrama a bloques de la plataforma de simulación. . . . .	46
4.2. Variables de entrada al bloque del cálculo de potencia recibida . . . . .	47
4.3. Bloque del control del sistema . . . . .	47
4.4. Bloque del modelo dinámico del sistema . . . . .	48
5.1. Movimiento del UAV sin perturbación . . . . .	50
5.2. Resultados de simulación de los ángulos de alabeo, cabeceo y guiñada cuando el UAV no tiene perturbaciones. . . . .	51

5.3. Resultados de simulación en los 3 ejes sin considerar perturbaciones en el UAV. Desplazamiento longitudinal, desplazamiento lateral, ascenso. . . . .	52
5.4. Potencia recibida en condiciones de espacio libre con la ABS a 5 m de altura. . .	53
5.5. Resultados de simulación del vector de perturbaciones basado en el DWM. . .	54
5.6. Resultados de simulación del vector de perturbaciones basado en el DWM ini- cializado a los 5 segundos . . . . .	55
5.7. Desplazamiento del UAV en el eje $x$ . . . . .	56
5.8. Desplazamiento del UAV en el eje $y$ . . . . .	56
5.9. Desplazamiento del UAV en el eje $z$ . . . . .	57
5.10. Rotación en $\phi$ . . . . .	57
5.11. Rotación en $\theta$ . . . . .	58
5.12. Rotación en $\psi$ . . . . .	58
5.13. Potencia recibida antes de la perturbación . . . . .	59
5.14. Potencia recibida después de la perturbación . . . . .	60
5.15. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura antes de la perturbación . .	60
5.16. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura después de la perturbación	61
5.17. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura antes de la perturbación (5 s)	62
5.18. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (10 s)	63
5.19. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (20 s)	63
5.20. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (30 s)	64
5.21. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (40 s)	64
5.22. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (50 s)	65
5.23. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (60 s)	65
5.24. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (70 s)	66
5.25. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (80 s)	66
5.26. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (90 s)	67
5.27. Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura al termino de la simulación (100 s) . . . . .	67
5.28. Histograma de la cantidad de usuarios que se encuentran dentro del área de cobertura . . . . .	68

# Introducción

---

En años recientes, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés) ha incrementado en varios sectores, como lo son el uso industrial y el recreativo. En el primer caso, que es el foco de interés, se opta por incorporar el uso de UAVs porque con ellos se pueden desempeñar tareas que difícilmente el ser humano podría realizar o mejorar servicios existentes.

Una de las tecnologías que ha comenzado a incorporar el uso de este tipo de vehículos es la comunicación móvil de quinta generación (5G). De manera que la cobertura no solo sea proporcionada a través de estaciones base (BS) terrestres, sino que se pueda incorporar este servicio en UAVs para las zonas en donde no se tenga una buena cobertura o sea inexistente.

## **Planteamiento del problema y solución propuesta.**

En este contexto, los UAV desempeñarían el trabajo de una Estación Base Aérea (ABS por sus siglas en inglés), el problema es que las perturbaciones aleatorias afectan el comportamiento de la cobertura proporcionada por la ABS. Se propone analizar el comportamiento de la ABS para saber cuál es el porcentaje de cobertura a lo largo de un tiempo de simulación.

## **Hipótesis.**

El análisis de cobertura en una ABS puede ser estudiado de distintas formas, no solo de una forma geométrica, puede estudiarse midiendo los niveles de potencia recibidos por cada usuario en un área determinada, así se puede conocer el porcentaje de área de cobertura efectiva proporcionada por una ABS.

En el presente trabajo se realiza el análisis de cobertura en comunicaciones aire-tierra mediante la simulación de un UAV de tipo cuádrirrotor, el cual es sometido a perturbaciones aleatorias con el objetivo de observar la variación en los niveles de potencia recibida por los usuarios terrestres los cuales se reflejan en el área de cobertura.

El objetivo principal es:

- Identificar y analizar los efectos causados por las perturbaciones aleatorias en una plataforma UAV que se relacionan con la cobertura que este tipo de plataformas ofrecen para brindar comunicaciones aire-tierra en aplicaciones 5G

El objetivo principal se alcanzará cumpliendo los siguientes objetivos particulares:

- Dar a conocer lo que se está realizando en el campo de comunicaciones A2G (*Air to ground* por sus siglas en inglés) utilizando UAVs en 5G.
- Dar a conocer el comportamiento de la ABS una vez introducida la perturbación aleatoria para saber el porcentaje de usuarios que está cubriendo en cierta zona.
- Evaluar como afectan la cobertura variables que son externas a la ABS en diferentes circunstancias para obtener una comparación y saber en que casos se comporta de una mejor forma.
- Obtener un modelo de perturbaciones para estudiar la cobertura proporcionada por una ABS.

Para lograr los objetivos planteados, el presente trabajo de tesis está organizado en los siguientes capítulos:

- En el Capítulo 1 se presenta el estado del arte de las comunicaciones móviles celulares de quinta generación (5G) orientado hacia los enlaces aire-tierra que se forman con plataformas de baja altitud.
- En el Capítulo 2 se realiza una caracterización de las perturbaciones de los UAVs que afectan las coberturas de las señales de comunicación en enlaces aire-tierra .
- El Capítulo 3 muestra el modelado matemático de las ecuaciones dinámicas de un cuadrirotor para posteriormente realizar la simulación.
- El Capítulo 4 muestra el desarrollo de una interfáz de simulación para comunicaciones aire-tierra soportadas por plataformas UAVs.
- En el Capítulo 5 se muestra la simulación y análisis de resultados de cobertura.
- Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo realizado.



---

# Estado del arte de las comunicaciones aire-tierra en el contexto de redes celulares 5G

---

## 1.1. Evolución de las redes móviles celulares previo a 5G

La comunicación 5G ha sido el resultado de la evolución tecnológica de la forma en la que los humanos nos comunicamos, conforme el tiempo pasa las necesidades cambian, se ha buscado desarrollar la comunicación por medio de dispositivos electrónicos tal que sea lo más apegado a la realidad, es decir, lo más parecido a tener el remitente frente a nosotros, es por ello que un aspecto muy importante de la comunicación es el hacerlo en tiempo real.

La red 5G es la quinta generación de las redes móviles celulares que mejora algunas características de las generaciones previas e introduce algunas nuevas capacidades. A continuación se presenta un resumen de los puntos principales que distinguen cada una de las generaciones que anteceden a la red 5G.

De acuerdo con [30], la primera generación permitió el uso de teléfonos móviles por primera vez, haciendo posible que las llamadas telefónicas no sólo se hicieran a través de teléfonos fijos. Esta generación fue desarrollada alrededor de la década de 1980 por Nippon Telegraph and Telephone (NTT) en Tokio, Japón, primer país en comercializarla. No obstante, el estándar estadounidense AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), sistema que permitió el uso de más canales mediante la asignación de un rango más estrecho del espectro y una mejor cobertura [14] es quizás el más representativo de esta generación. En cualquier caso, esta generación se distingue por usar tecnología analógica y como esquema de acceso múltiple FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) entre otros parámetros de la interfaz aérea<sup>1</sup>

Por su parte la segunda generación (2G) caracterizada por implementar tecnología digital, incorporó los mensajes de texto a los servicios de comunicación. Esta generación se introdujo en la década de 1990 destacándose el desarrollo europeo GSM (*Global System for Mobile Commu-*

---

<sup>1</sup>La interfaz aérea o interfaz aire es el enlace de comunicación por radio entre la estación móvil (hoy en día llamado Equipo de Usuario UE, por sus siglas en inglés) y la estación base activa.

*nication*) el cual se expandió años más tarde en otras regiones del mundo. Asimismo, en esos años Estados Unidos impulsó una versión digital de AMPS (conocida comercialmente como DAMPS) la cual fue adoptada por diferentes operadores de tecnología móvil en varios países, incluyendo México (aunque posteriormente el mercado de GSM se fue aceptando todavía más debido a sus capacidades de acceso a Internet). Las ventajas de esta generación se pueden resumir como [30]:

- Ofrece una mayor seguridad en comparación con la primera generación.
- Permite un uso más eficiente del espectro de frecuencias disponible.
- Mayor facilidad en los servicios de texto.
- Su versión mejorada de GSM incorpora GPRS (General Packet Radio Service), servicio que permite acceso a Internet.

Con el advenimiento de la tecnología digital en 2G, se adopta como esquema de acceso múltiple TDMA (*Time Division Multiple Access*) combinado con FDMA (véase Figura 1.1). Esto permite que a diferencia de la primera generación, más usuarios pudieran conectarse a la vez en una banda de frecuencia determinada.

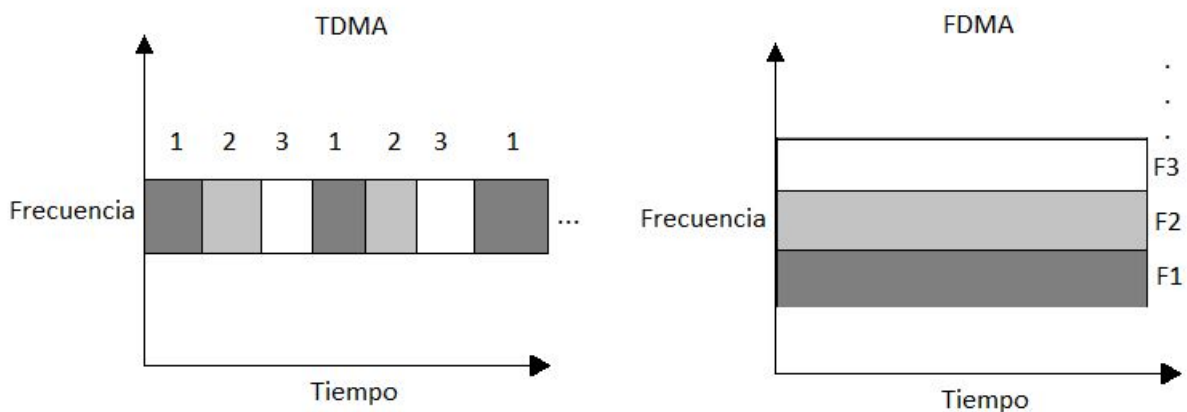


Figura 1.1: Ejemplificación del concepto TDMA y FDMA

El sistema GSM utilizaba un espectro de frecuencia de 25 MHz en la banda de 900 MHz. Tenía una velocidad alrededor de 14.4 kbps.

La red GSM fue mejorada con la incorporación de GPRS a medida que aumentaba la necesidad de enviar datos a través de la interfaz aérea. Logrando alcanzar una velocidad de hasta 150 kbps. Debido a la necesidad de aumentar la velocidad de envío de datos, se introdujo EDGE (*Enhanced Data GSM Environment*), que aumentó hasta cuatro veces la cantidad de datos que



se podían enviar. EDGE puede ser considerado como la red 2.5G.

La tercera generación (3G) se comenzó a desplegar comercialmente en el año 2000 y a la fecha todavía continúan algunos servicios en varias regiones del mundo. Por ejemplo, en Japón la compañía NTT DoCoMo comercializó el 3G a principios de la década de los 2000. Como ventaja, la 3G era compatible con versiones anteriores a los sistemas 2G. De acuerdo con [30] la necesidad de contar con un acceso a Internet más rápido y estable, impulsó la implementación de tecnologías más eficientes en este contexto. Esta generación utiliza como esquemas de acceso múltiple CDMA (*Code Division Multiple Access*) y WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*).

Las bandas de frecuencia del espectro asignado a 3G se ampliaron a 1800 MHz y 2500 MHz en porciones de 15 MHz y 20 MHz, alcanzando una velocidad máxima de alrededor de 2 Mbps [30].

Actualmente se utiliza la red 4G (Cuarta Generación), que permite tener altas velocidades de navegación en dispositivos móviles, esto surge de la demanda que se tiene al momento de incrementar el número de dispositivos que se conectan a una red.

La red 4G según se menciona en [34], al ser una evolución de la red 3G, cuenta con un mayor ancho de banda siendo capaz de ofrecer más servicios, el usuario de esta red puede esperar alta velocidad en cuanto a la transferencia de datos. Lo que la distingue es que utiliza un protocolo de Internet llamado extremo a extremo (*end to end*), que se refiere a que la comunicación es llevada a cabo de dispositivo a dispositivo, para así poder compartir audio de alta calidad y transmisión de video de una forma más rápida que en la tercera generación.

Las características que destacan de la comunicación 4G, son las siguientes [34]:

- Soporte para medios interactivos como lo son: transmisión de voz y video, juegos, Internet y otros servicios que requieren el uso de mayor banda ancha.
- Sistema móvil basado en direcciones IP
- Alta velocidad, alta capacidad y bajo costo por bit.
- Acceso global, portabilidad de servicios y escalamiento de servicios móviles
- Al estar mejor optimizada que sus predecesoras, evita la congestión de datos.

Los puntos antes mencionados se logran debido a la arquitectura que tiene la comunicación 4G.

Las tecnologías que contribuyen al funcionamiento de los dispositivos 4G incluyen OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que permiten transportar más datos al dividir las señales de radio que se transmiten en diferentes frecuencias y al ser ortogonales son inmunes a las interferencias. Los sistemas 4G también utilizan tecnologías de antenas inteligentes que son para orientar la señal de radio en la dirección del receptor desde la estación base. Cuando se combinan, el procesamiento de señales y las antenas múltiples ayudan a anular todo tipo de

---

interferencia en los canales.

Los sistemas 4G han adoptado OFDM como tecnología base debido a que ayuda a dividir los recursos en unidades más pequeñas que luego se pueden asignar a diferentes servicios según sea necesario. OFDM se considera vital para lograr una alta eficiencia espectral en redes 4G inalámbricas [34].

## 1.2. Servicios planteados en 5G

Actualmente, hay tres pilares principales sobre los cuales se soporta la comunicación de quinta generación (5G) [9]. A continuación se explican brevemente cada uno de estos pilares identificados como categorías de servicios.

Como servicio prioritario se tiene la banda ancha móvil mejorada (eMBB). Este servicio proporciona la capacidad de mejorar el ancho de banda y confiabilidad de datos, con velocidades de red inalámbrica que van más allá de los 10 Gbps [5].

Las siguientes dos categorías de servicios en donde se busca implementar redes 5G son:

Las comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC) que brindarán la capacidad de reducir la latencia o el retraso a menos de 1 milisegundo y aumentarán la confiabilidad. Estas son capacidades que transformarán los procesos industriales y empresariales, permitiendo la automatización y el control basados en redes de amplio espectro para industrias.

Las capacidades de comunicación masiva de tipo máquina (mMTC) permitirán un despliegue altamente eficiente de Internet de las cosas a una escala masiva, por ejemplo, donde se podría tener más de un millón de sensores y dispositivos de medición conectados dentro de un kilómetro cuadrado.

## 1.3. Tecnologías utilizadas en 5G

La red 5G, permite enviar datos a mayor velocidad, reduce la latencia y permite conectar múltiples dispositivos a la vez, es decir, permite el envío de mayores volúmenes de información que en las redes de generaciones anteriores [32].

Las tecnologías utilizadas en 5G de acuerdo con [32] se mencionan a continuación, buscando dar a entender los principios básicos de su funcionamiento.

### 1.3.1. Ondas milimétricas (banda de las milimétricas)

Se utiliza la banda de frecuencia EHF (frecuencias extremadamente altas por sus siglas en inglés) que se encuentra entre 30 GHz - 300 GHz del espectro electromagnético por lo que se conoce como ondas milimétricas (*mmWave*), en consecuencia, se puede atender a más usuarios

---

y dispositivos inalámbricos en general, esto se logra debido a que se tiene un mayor número de canales en una sola frecuencia.

### **1.3.2. Celdas pequeñas**

Según [12] el concepto de celdas pequeñas es atractivo para los operadores móviles al momento de buscar una mejora de cobertura, la alta demanda de velocidad de datos y la eficiencia espectral. Todo lo antes mencionado se debe a que al reducir el tamaño de las celdas se puede reutilizar más las frecuencias en comparación con macroceldas y la potencia de transmisión puede reducirse porque el alcance sería menor. Las celdas pequeñas se colocan como complemento de macroceldas que la tecnología 4G ya incluía, así se permite la transmisión a más de una celda para comunicarse con un equipo de usuario, logrando un mejor rendimiento en la recepción de datos y mayor eficiencia espectral mediante la reutilización de frecuencias.

### **1.3.3. MIMO masivo**

De acuerdo con [30] la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) es una tecnología donde se usan arreglos de antenas tanto en el receptor como en el transmisor con la que se aprovecha la propagación multirrayecto para mejorar el enlace de radio. Lo anterior se logra ya que se forman distintos canales de comunicación entre las terminales. Debido a esto, se reduce la posibilidad de error y mejora el rendimiento. 5G propone la utilización de este concepto de forma masiva, es decir, colocando masivamente arreglos de antenas tanto en los equipos de usuarios, como en las radio bases, de tal forma que realicen esta tarea para ampliar la capacidad de comunicación.

### **1.3.4. Formadores de haces**

Esta tecnología busca mejorar la calidad de la señal recibida en ciertos dispositivos, utilizando arreglos de antenas y sensores [7], de tal forma que la energía radiada por estos arreglos es sensada por el servidor (p.e. un ruteador, punto de acceso, estación base, entre otros) con el fin de aumentar la intensidad de señal en dirección hacia el dispositivo de interés, logrando así mejorar la calidad de señal.

A diferencia del uso de antenas omnidireccionales, que radían la señal hacia todas las direcciones, o una antena direccional con un patrón de radiación fijo. Es decir, con un formador de haces se puede considerar que se tiene una forma de controlar la dirección hacia donde se envían las señales, permitiendo una comunicación más eficiente alcanzando conexiones con mayor banda ancha, altas tasas de datos y enlaces de radio confiables.

### **1.3.5. Full-duplex**

Esta tecnología permite una comunicación bidireccional en tiempo real (es decir, cuando se establece una conversación telefónica ambos usuarios pueden hablar incluso de forma simultánea) y se ha implementado desde la primera generación de sistemas móviles celulares. En estas primeras generaciones lo anterior se hacía a través de canales separados de frecuencia, de tal forma

---

que los enlaces de la estación móvil a la estación base se establecían en una frecuencia, mientras que en sentido inverso en otra frecuencia, lo que se conoce como FDD (Frequency Division Duplexing). Ahora bien, la forma en la que se utiliza esta tecnología dentro de la 5G, es formando más canales temporales en una sola frecuencia, implementando TDD (Time Division Duplexing), lo que permite el envío de datos de manera masiva.

## 1.4. UAV dentro de 5G

### 1.4.1. Beneficios y tipos de plataformas aéreas

Desde el punto de vista de [37] se espera que los UAVs sean un componente importante para la quinta generación de arquitecturas celulares, que puedan facilitar la comunicación amplia (*broadcasting*) sin conexión o transmisiones de punto a multipunto, mejorando los enlaces de subida y de bajada.

Los beneficios principales por los cuales se palantea el uso de drones en 5G son [37]:

- Pueden operar en entornos peligrosos o desastrosos.
- Pueden cambiar de localización fácilmente dependiendo de la utilización que se le esté dando.
- Pueden ofrecer condiciones de propagación de línea de vista (*Line-of-Sight*, LoS) con los usuarios terrestres.
- Pueden ajustar su altura para mejorar la calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) dependiendo de los requerimientos del usuario, es decir, pueden mejorar la intensidad de señal, la tasa de datos deseada y evitar interferencias.

No todos los drones tienen las mismas características, por lo tanto no todos pueden cumplir con las mismas tareas, es por eso que se distinguen por sus limitaciones, determinadas por su tamaño, peso y potencia por sus siglas en inglés SWAP (*Size, Weight And Power*). Estas limitaciones impactan en la altitud máxima en la que operan, comunicación, capacidades de cobertura, cálculos y resistencia de un drone [37].

Las plataformas de UAVs pueden operar a diferentes alturas, por lo que estas plataformas se clasifican de la siguiente forma. LAP (*Low Altitude Platform*), estos drones operan a una altitud relativamente baja 1250 m sobre el nivel de la tierra [25], no tienen tanta capacidad de carga como la tiene un drone que opera a altitudes mayores las cuales se conocen como HAP (*High Altitude Platform*) que rondan los 17 a 24 km sobre el nivel terrestre [41], estos pueden crear enlaces de comunicación de LoS efectivos de relativo corto alcance. Las HAPs son destinadas hacia áreas geográficas relativamente grandes, ya que proveen una cobertura más amplia y poseen mayores capacidades, durando así más tiempo en el aire que las LAP.

---

### 1.4.2. Ejemplo de aplicaciones

La introducción de drones en redes de comunicación terrestres se ha vuelto importante para facilitar la realización de tareas diversas lo que conlleva a la implementación de aplicaciones específicas [46].

Un ejemplo donde estas plataformas se han utilizado es la agricultura. En esta aplicación un dron puede realizar varias misiones lo cual puede implicar que se eleve a distintas alturas, como puede ser 10 m para mantenimiento de los cultivos con ciertos productos o químicos, o 50 m para inspección de la zona en cuestión [46]. Para realizar un mapeo de la región se puede necesitar una altura de 200 a 300 m como lo señala [46] y para enviar esta información en tiempo real a una estación terrestre, implica tener en cuenta algunas consideraciones de la cobertura del UAV.

Con la tecnología 5G se pueden resolver problemas como este, ya que las capacidades mejoradas de las redes 5G en comparación con generaciones anteriores, tienen el potencial de proporcionar conectividad móvil eficiente y eficaz para despliegues de drones a gran escala [46]. Así mismo introducen nuevas tecnologías, como técnicas masivas de MIMO, mejoras de la transmisión multipunto coordinada (CoMP), relación automática de celdas vecinas, optimización de informes de medición. y mecanismos de control de potencia optimizados [46].

Ahora bien, la tecnología “*Cellular-Connected UAV*” mencionada en [47] es una tecnología en desarrollo que promete tener ventajas en cuanto a la conexión aire tierra. Esta tecnología tiene el objetivo de realizar radio transmisión de forma aérea, por ejemplo, de contenido multimedia, en especial videos en vivo, que pueden ser enviados en tiempo real a lugares más alejados, gracias a la cobertura tridimensional (3D).

En cobertura 3D en comparación con los USs (*User Stations*) terrestres convencionales, los UAVs suelen tener una altitud mucho mayor, que incluso puede superar significativamente la altura de la antena de la BS. Como resultado, las ABSs (*Aerial Base Station*), que son BSs montadas en UAVs ofrecen una nueva cobertura de comunicación 3D, en comparación con la cobertura terrestre bidimensional (2D) convencional. Para lograr esto, las antenas en las BSs existentes suelen inclinarse hacia abajo, ya sea de forma mecánica o electrónica, para lograr una cobertura dirigida hacia usuarios terrestres con interferencias reducida.

Otra aplicación es aquella planteada en [45], en donde las ABSs se utilizan para diferentes propósitos, uno de ellos, y muy importante es el de monitoreo de emergencias. En ese trabajo se utiliza un algoritmo que permite a la estación de emergencia proveer un servicio, es por ello que se vuelve a mostrar la importancia de la conectividad entre drones y estaciones base o equipos de usuarios terrestres. En los últimos años se ha estado trabajando en establecer conexión entre UAVs y dispositivos móviles, por lo que han ido surgiendo técnicas para mejorar la eficiencia en las estaciones base aéreas.

Por su parte, en [16] se propone utilizar celdas atendidas por drones como estaciones base para lograr mejorar la cobertura de cierto número de usuarios utilizando un número dado de celdas. Cabe aclarar que una celda puede contener varios usuarios siempre y cuando estos se

encuentren en su alcance operativo eficiente.

Lo que se busca hacer utilizando las celdas atendidas por drones como se propone en [16] es crear una FANET (*Flying Ad-Hoc Network*), y buscar que pueda desplazarse. Para esto se sigue el modelo de tráfico recomendado por 3GPP, en el que los dispositivos tienen que alternar continuamente entre el tiempo de lectura y tiempo de transmisión [16]. Este monitoreo se realiza para asegurar la correcta operación de la estación base.

El movimiento constante que se propone en [16] para las estaciones base aéreas tiene el objetivo de mejorar la eficiencia espectral de las celdas. De mejorar la eficiencia espectral, se lograría una mayor transmisión de datos, logrando así el envío de multimedia en tiempo real.

Estudios de [10] dicen que 10 m es la altura óptima para colocar una ABS que atienda una pequeña celda, ponerlo por debajo de dicha altura causa problemas de cobertura mientras que ponerlo por encima de 10 m puede causar interferencias con celdas vecinas.

La motivación principal de que la ABS se desplace en movimiento constante es lograr reducir la distancia entre usuario y la BS. La FANET debe desplazarse en movimiento constante, no muy aceleradamente, ya que al hacerlo muy deprisa, se tienen problemas para mantener la conexión.

### 1.4.3. Experimentos con UAVs

En la práctica ya se han realizado los primeros experimentos de comunicación inalámbrica entre drones y estaciones base o equipo de usuario terrestres, de los cuales vale la pena citar por ejemplo el trabajo presentado en [28] entre un drone volando a diferentes alturas y una estación base 5G comercial.

Los experimentos que se llevaron a cabo en [28] ponen énfasis en la altura que un drone puede tomar, y concluyen en que mientras más alto se encuentre volando, el rendimiento en cuanto a la comunicación se ve afectado con la torre comercial 5G.

Como se ha revisado en los trabajos mencionados en la subsección 1.4.2, la altura es un factor muy importante al momento de realizar una conexión aire tierra, ya que las estaciones base aéreas mejoran o empeoran su cobertura en función de este parámetro. Además, otro aspecto importante a considerar es la aplicación que se le va a dar al drone, ya que estos tienen características de acuerdo al uso que se le dará, permitiéndoles volar a una altitud alta o baja.

Finalmente, como se menciona en [28], con las torres comerciales aún no es posible lograr comunicaciones óptimas a mayores altitudes, es algo en lo que se sigue valorando.

---

## 1.5. Comunicación Aire-Tierra (A2G)

### 1.5.1. Definición e importancia

Como se vio en la sección anterior, los UAVs desempeñan un papel muy importante en 5G, mostrando crecimiento en varios campos debido a su alta movilidad, relativo bajo costo y fácil desarrollo. Debido a esto, los vehículos UAV ayudados de una comunicación aire-tierra (*Air-to-Ground*, A2G) son prometedores para las siguientes generaciones de comunicaciones móviles.

Algunos autores como [6], [29], [35], [39] y [44] recalcan la importancia de este término, el cual se refiere en general a la comunicación entre una terminal aérea y una en tierra. En el marco de la integración de los UAV en 5G, los drones fungiendo como el segmento aéreo de las comunicaciones A2G pueden operar como una ABS o como un UE. En el primer caso las comunicaciones A2G serán entre un ABS y UEs terrestres, mientras que en el segundo caso, las comunicaciones A2G serán entre UEs aéreos y BSs terrestres. En el presente trabajo de tesis, para la comunicación A2G se tomará el caso del segmento aéreo como una ABS y la terminal terrestre será cualquier UE que esté dentro de la cobertura de la ABS.

Ahora bien, en [6] y [29] se estudia el desempeño de la comunicación A2G a partir de un modelo de probabilidad de tener condiciones de propagación de LoS en función de la altitud del dron. En ambos trabajos se presentan mejoras en modelos de predicción estándar, como lo es en este caso ITU-R (*International Telecommunication Union-Radio*) y 3GPP. Además, en [6] se busca elaborar un modelo de predicción LoS general para comunicaciones A2G mmWave con buen equilibrio entre complejidad y precisión.

Para el caso de [6] los autores presentan un modelo más versátil tanto para plataformas que se elevan a mayores y menores alturas (de orden de 0 a 1000 m), además de que el modelo de probabilidad de tener condiciones de propagación de LoS dependiente de la altura está basado en 3GPP y a su vez se combina con técnicas de aprendizaje automático (*Machine Learning*), la comunicación aire tierra es de gran importancia, con ella se busca mejorar varios aspectos, entre ellos tener una baja latencia, mayor velocidad de transmisión y recepción de datos, reducir las interferencias, entre otras.

En [35] se enfatiza el actual requerimiento global en cuanto al uso de comunicaciones inalámbricas debido al amplio uso de dispositivos de comunicación y la creciente demanda de acceso a internet. Los autores también señalan que, a diferencia de dispositivos terrestres, el uso de banda ancha en comunicaciones aéreas aún está limitado debido a las bajas tasas de transmisión y la QoS que es demasiado pobre por lo general.

Como se abordó en la sección 1.3.4, la implementación de la tecnología de formadores de haces es una de las piezas clave para lograr las capacidades que se buscan lograr en 5G. En este contexto, el uso de esta tecnología instalada en la parte baja de un vehículo aéreo operando como una ABS ha sido estudiado por Markovski et al. [35]. Los resultados muestran que los sistemas A2G pueden proporcionar velocidades de datos significativamente mejoradas para la conectividad en vuelo en 5G.

En cuanto al desarrollo de la comunicación A2G en los próximos años, la bibliografía existente es muy reciente. En [39], por ejemplo, se habla de que conforme va avanzando 5G, la integración de los UAVs en esta generación de redes móviles celulares se considera una parte importante del Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) y redes de radio, ya que la tecnología 5G proporciona los recursos necesarios para el uso de estas herramientas.

Sin embargo, existen diversas limitantes al momento de intentar lograr una buena comunicación A2G, como lo son, entornos edificadas, interferencias, incluso las perturbaciones aleatorias que los mismos UAVs introducen. En particular el tema de las perturbaciones aleatorias se estudiará en el Capítulo 2 del presente trabajo de tesis.

### **1.5.2. Bandas de frecuencia utilizadas en comunicaciones A2G**

Como menciona [11], los sistemas de comunicaciones A2G de corto alcance operan en las bandas de UHF (Frecuencia Ultra Alta) / VHF (Frecuencia Muy Alta). Se ha destinado un intervalo de frecuencias de 118 – 136.975 MHz para los sistemas de control de tráfico aéreo y comunicaciones entre aeronaves civiles, esta banda es conocida como banda aérea. La totalidad de la banda aérea es dividida en canales separados de 25 kHz.

Sistemas operando a distancias mayores que el alcance de LoS, se denominan sistemas de largo alcance. Por lo que las frecuencias portadoras para estos sistemas son de HF (Alta Frecuencia) (3 – 30 MHz).

El uso de tecnologías de formadores de haces mencionadas en la Sección 1.3.4 se ha optimizado para su uso en bandas de frecuencias alrededor de 2.4 GHz y 5.8 GHz [11].

Según [24] hay dos bandas de frecuencia populares, 2.4 GHz y 5.8 GHz, utilizadas por empresas para operaciones de control en vuelo. Sin embargo, las bandas de frecuencia se pueden utilizar para aplicaciones adicionales, por ejemplo, para transferir videos desde el UAV a la BS se utiliza una frecuencia de 3.4 GHz.

La banda de 5.8 GHz es una mejor opción que la de 2.4 GHz para la mayoría de escenarios, debido a que tiene menor número de interferencias. No obstante, debido a las menores pérdidas que se presentan en una señal transmitida con una frecuencia de 2.4 GHz y para fines del estudio de cobertura, se utilizará esta frecuencia en las simulaciones del presente trabajo de tesis.

### **1.5.3. Casos de uso (de acuerdo con estándares 3GPP (TR 22.829))**

Las comunicaciones han ido evolucionando de tal forma que hoy en día es posible disponer de ciertos recursos que facilitan tareas que difícilmente se lograban años atrás. El uso de los UAVs son un claro ejemplo de como ha evolucionado la comunicación A2G, ya que al tener esta comunicación es posible utilizarlos para ciertos casos de uso. A continuación se mencionan algunos de estos casos de acuerdo con estándares de 3GPP (TR 22.829).

---



Algunos casos de uso son: UAV compatible con la aplicación de transmisión en vivo de video de alta resolución, en este caso se menciona la importancia de utilizar la tecnología 5G para lograr la comunicación A2G de tal forma que puedan enviarse datos en tiempo real para una correcta transmisión de video.

Otro caso de uso es el de UAVs autónomos controlados por inteligencia artificial (*artificial intelligence, AI*). Para este caso se plantea el uso de AI requiriendo que la comunicación 5G sea óptima para lograr que el UAV tome las mejores decisiones posibles. Esto puede ser utilizado en entornos urbanos en donde a un piloto no le sería muy sencillo controlar al UAV ya que los obstáculos impedirían el poder verlo en todo momento.

Al lograr una buena comunicación A2G, los UAVs pueden ser complementados con diversas tecnologías, como se mencionó puede ser ML dentro del contexto general de AI, incluso pueden llegar a comunicarse entre ellos utilizando IoT. En un caso de uso mencionado en los estándares 3GPP: “*Separación del área de servicio de UAV*” se muestra cómo los UAVs pueden cubrir áreas distintas ofreciendo el mismo servicio, para ello tienen que estar conectados entre sí.

Existen más casos de uso en donde entra en juego la comunicación A2G, como lo son:

- Garantía de experiencia de servicio
- Disponibilidad del servicio a las necesidades de los UAVs
- Cambio de controlador de UAV y marco para dirigir los KPI (*Key Performance Indicator*) de UAV

y otros que se relacionan de forma más directa con la cobertura son:

- Nodo de acceso de radio a bordo del UAV: el uso de nodos de acceso de radio a bordo de un UAV ha atraído el interés de la comunidad para mejorar la cobertura en una variedad de escenarios, por ejemplo situaciones de emergencia
- Cobertura temporal para usuarios móviles y eventos *hotspot*, debido a su rápido despliegue y gran capacidad de cobertura.

Los siguientes casos de uso detallan algunos aspectos a considerar al momento de utilizar UAVs como ABS, sin dejar de lado la comunicación A2G ya que se requiere para saber qué es lo que está ocurriendo con el UAV y mejorar cada uno de estos casos.

1. Comunicación de comando y control (C2) de una ABS. Lo que este caso de uso considera para la operación de ABS es la seguridad, incluido el riesgo de colisión en el aire con otro UAV, el riesgo de pérdida de control de un UAV, el riesgo de mal uso intencional de un UAV y el riesgo de varios usuarios de una ABS, por ejemplo negocios, ocio, etc, que comparten el espacio aéreo. Para evitar los riesgos de seguridad, al considerar la red 5G
-

como la red de transporte, es importante proporcionar servicios ABS garantizando QoS para la comunicación C2.

2. Admitir simultáneamente la transmisión de datos para usuarios de UAV y eMBB. Siendo limitados los recursos de ancho de banda, una estación base puede necesitar admitir la transmisión de datos para UAV en el aire y para usuarios de eMBB en tierra al mismo tiempo. Por ejemplo, en escenarios de transmisión en vivo, un UAV de más de 100 m de altura necesita transmitir las imágenes o videos capturados a la estación base en tiempo real, lo que requiere una alta velocidad de transmisión y un gran ancho de banda. Al mismo tiempo, la estación base también debe proporcionar la QoS requerida para los usuarios terrestres (por ejemplo, usuarios de eMBB). La interferencia entre estos dos tipos de comunicación debe minimizarse.
  3. Despliegue aislado de acceso por radio a través de un UAV. Existe un límite en el tiempo de vuelo del UAV y esto afecta el tiempo de funcionamiento del equipo de red montado en el UAV. En un escenario, como una ubicación aislada remota, se puede implementar un UAV en un área donde no se necesita conectividad de retorno para la comunicación entre un grupo privado de usuarios.
  4. Acceso por radio a través de UAV. Los UAV actualmente disponen de un tiempo de vuelo limitado, típicamente en el intervalo de 10 minutos a 1 hora. Debido a la relación entre el peso, la energía de la batería, la carga útil, la aerodinámica, la capacidad de control, las regulaciones, entre otros factores, el tiempo de vuelo no se puede aumentar de forma arbitraria o infinita. Cuando un UAV funciona como una red de acceso por radio, el peso del UAV aumenta debido a la carga útil del equipo de la red de acceso por radio. Esto, a su vez, reducirá aún más el tiempo de vuelo real alcanzable del UAV. Entonces, el UAV tiene que volar cierta distancia desde el campamento base hasta el área remota, y el UAV tiene que volar de regreso al campamento base antes de que se quede sin energía.
  5. Separación del área de servicio de UAV, las antenas para la comunicación celular se montan en torres de telefonía celular de gran altura y se inclinan un poco hacia abajo. Se debe a que los humanos suelen estar a una altura relativamente cercana al suelo (en comparación con la altura de las radio bases) o en un edificio. Con la introducción del servicio de comunicación a los UAV, algunos UEs se ubican por encima de la cobertura convencional. Por lo tanto, existe la necesidad de ajustar el sistema de antena para que haya una cobertura a la altura donde opera un UAV. En algunos casos, se puede instalar equipo adicional.
  6. Enjambre de UAVs en logística. Los UAV pueden realizar actividades de entrega que los camiones encontrarían difíciles, especialmente en áreas montañosas remotas y en emergencias. Pero los vehículos aéreos no tripulados de entrega sufren un problema, su operación carece de la densidad de ruta necesaria para competir con los camiones de reparto estándar. Con cada entrega, el UAV tiene que regresar a su base de operaciones
-

en un almacén probablemente lejos para recoger su próximo paquete. La empresa de entrega puede lanzar un enjambre de vehículos aéreos no tripulados en rápida sucesión para entregar decenas de paquetes en paralelo para resolver este problema.

Una vez mencionados algunos casos de uso, se observa que más de uno de ellos involucran el uso de comunicación aire tierra, a su vez, buscan lograr el objetivo de extender la cobertura a zonas donde una BS deja de tener alcance. En este trabajo se analizará cómo las perturbaciones aleatorias afectan la cobertura que proporciona una ABS en un entorno sin obstáculos.

---

# Caracterización de las perturbaciones de los UAV

---

En este capítulo se lleva a cabo la caracterización de las perturbaciones de los UAVs que afectan las coberturas de las señales de comunicación en enlaces A2G, para lo cual inicialmente se define el concepto cobertura para dar a conocer cómo se puede afectar.

## 2.1. Definición del concepto de cobertura

El término cobertura se refiere al área geográfica dentro de la cual se dispone de un servicio, por ejemplo, hablando de una red móvil celular, sería el equivalente al área en la que la intensidad de la señal está por encima de un umbral dado por las especificaciones de la red, teniendo, en principio, mejor cobertura en el centro del área que en los bordes. Esta cobertura la provee una estación base (BS), como se ilustra en la Figura 2.1.

El autor de [3], menciona que el nivel de cobertura alcanzado por una estación base en una determinada zona es un parámetro fundamental en el diseño de la cobertura celular a fin de garantizar la prestación del servicio.

Por otro lado, de acuerdo con [26], la cobertura, es el alcance máximo (es decir, aquella distancia hasta donde el nivel de la potencia recibida está por encima de un nivel mínimo para lograr una conexión con calidad suficiente entre terminales inalámbricas) de una red de comunicaciones. Ahora bien, hay lugares en donde no se tiene cobertura, esto puede ser debido a muchas razones, por ejemplo, obstáculos que impiden que la BS tenga un alcance máximo, estos pueden ser edificios o árboles de gran tamaño, interferencias causadas por factores externos, entre otros casos. Es por ello que se sigue estudiando este concepto con el fin de mejorar la señal dentro de ese alcance máximo y a su vez, aumentarla. El autor de esta publicación menciona la técnica de *control de potencia* para aumentar la cobertura, de modo que se reducen las interferencias entre el envío de datos por parte de cada usuario.

La movilidad de los UAVs en el aire es una de las características clave que diferencia a esta tecnología de las estaciones base terrestres [23]. Esta permite que la red sea adaptable a diferentes ambientes evitando obstáculos en tierra. Por otro lado su desplazamiento implica

inestabilidad de los enlaces de comunicación. En consecuencia, la intensidad o calidad de la señal recibida va a presentar variaciones.

El autor de [1] también habla sobre la ampliación de la cobertura. En la Figura 2.1 se muestran las delimitaciones o alcances máximos de unas estaciones base, y se propone a su vez un sistema de ampliación con el cual se tendría una mejor cobertura para que los dispositivos puedan ser enlazados entre sí. Este sistema de ampliación consiste en colocar varias BSs para obtener una zona de cobertura más grande.

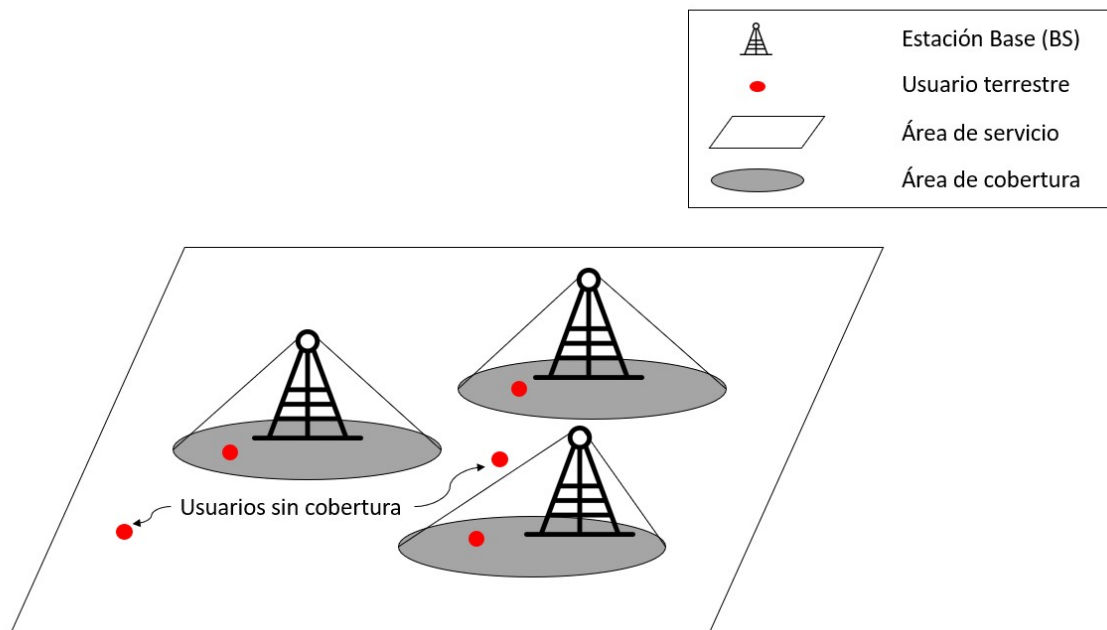


Figura 2.1: Ejemplificación del concepto cobertura

Según [42] el área de servicio es una zona en la que un operador de telecomunicaciones proporciona una comunicación red, es decir, puede existir un área de cobertura en la que el operador pueda proporcionar servicios, pero si no es necesario utilizar toda el área, entonces el área de servicio también estaría delimitada según las necesidades del usuario, en la Figura 2.2 se ejemplifica este concepto.

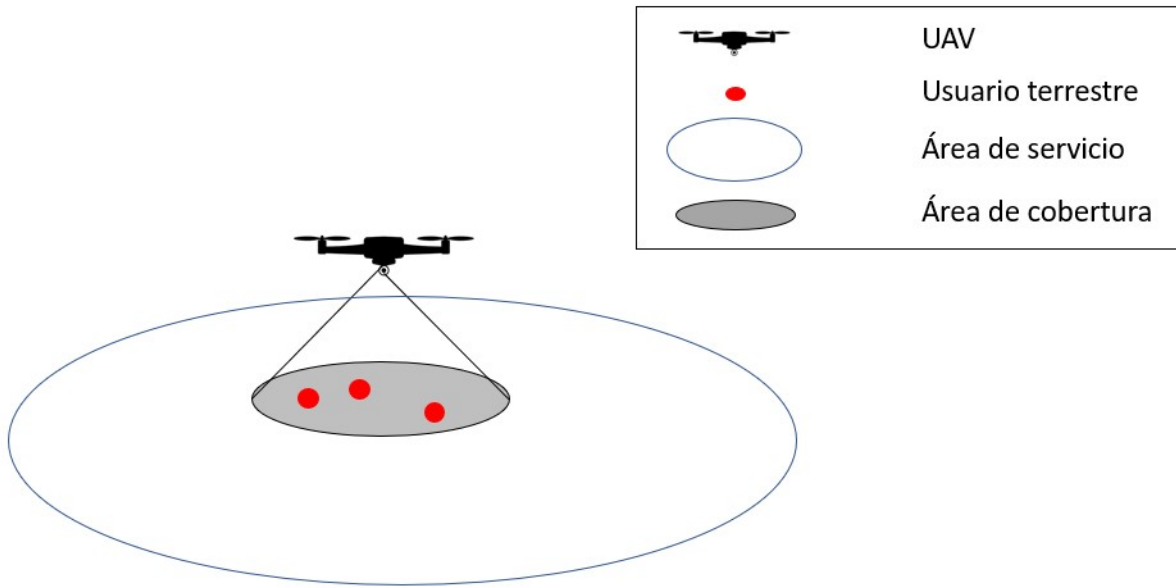


Figura 2.2: Área de cobertura del UAV

El área de cobertura puede verse afectada por muchos factores entre ellos se menciona en [21], que la banda de 5 GHz, tiene un radio de cobertura menor, por lo que se ve la dependencia de la frecuencia de operación en la cobertura. En un ambiente de radio propagación sin línea de vista (o NLOS, por sus siglas en inglés) entre antenas transmisora y receptora, las señales con frecuencias relativamente altas (principalmente de microondas y más) se verán más atenuadas por objetos en la trayectoria de propagación que aquellas señales operando a menores frecuencias, las cuales logran bordear dichos objetos. En cuanto a la presencia de interferencias estas son menores, debido a la escasa utilización de esta banda en comparación con la de 2.4 GHz.

Algunos de los vehículos aéreos no tripulados, utilizan la banda 5G para llevar a cabo misiones como lo son búsqueda y rescate, monitoreo de alguna zona específica, envío de paquetes, ampliación de cobertura de red, entre otros. Una de las grandes problemáticas que se tiene para estos vehículos en cuanto al radio de cobertura que pueden obtener está asociada a su movilidad [21].

## 2.2. Efectos de las perturbaciones aleatorias de los UAVs en la cobertura

Como se mencionó en el Capítulo 1, los UAVs se utilizan en algunos sistemas de radio comunicaciones debido a la flexibilidad que da su movilidad y su relativo bajo costo de desarrollo. Lo que se busca obtener utilizando UAVs en comunicaciones 5G son ABS, repetidores o que los mismos UAVs operen como usuarios. En el caso de ABS o repetidores, el objetivo es contar

con una alternativa para ampliar la cobertura, con un buen nivel de confiabilidad y mejorando la capacidad.

Como se detalló en la Sección 1.5, en los enlaces de comunicación A2G se plantea el uso de ABSs considerando el lugar en que serán posicionadas, con el objetivo de ampliar la cobertura proporcionada por una BS.

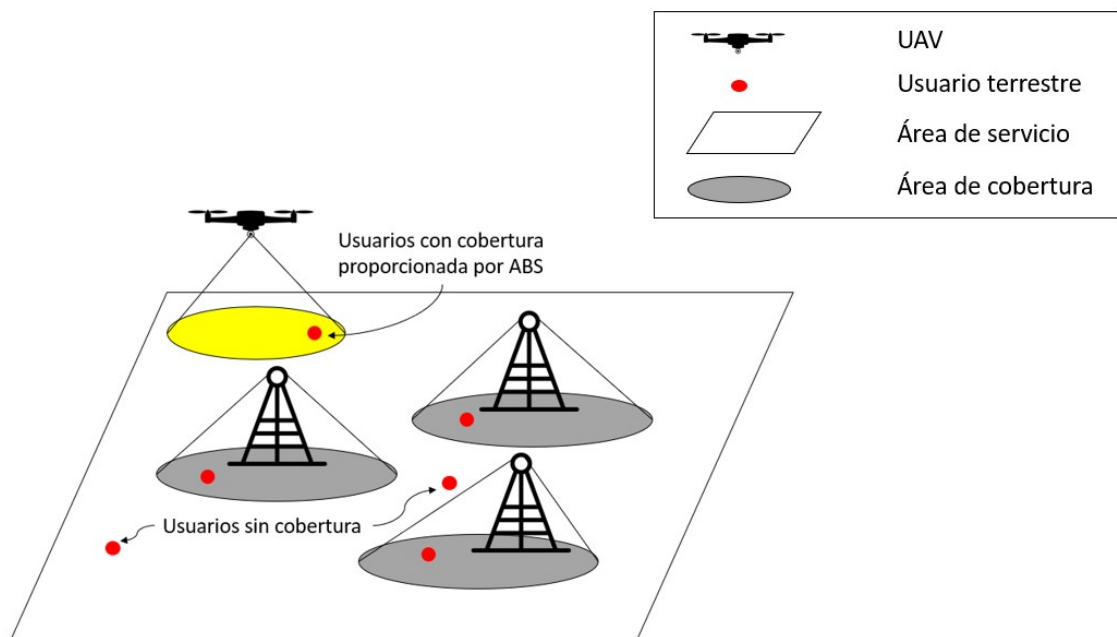


Figura 2.3: Complemento de un cierto operador de cobertura con UAV

Ahora bien, en dinámica de vuelo un UAV experimenta perturbaciones aleatorias debido al flujo de aire, vibraciones en su propio cuerpo entre otros factores. Esto ocasiona giros y distorsiones del área de cobertura en las ABSs y dificultades en los enlaces inalámbricos de comunicación A2G como se ha estudiado en [48] donde las simulaciones se basan en un análisis geométrico del área de cobertura.

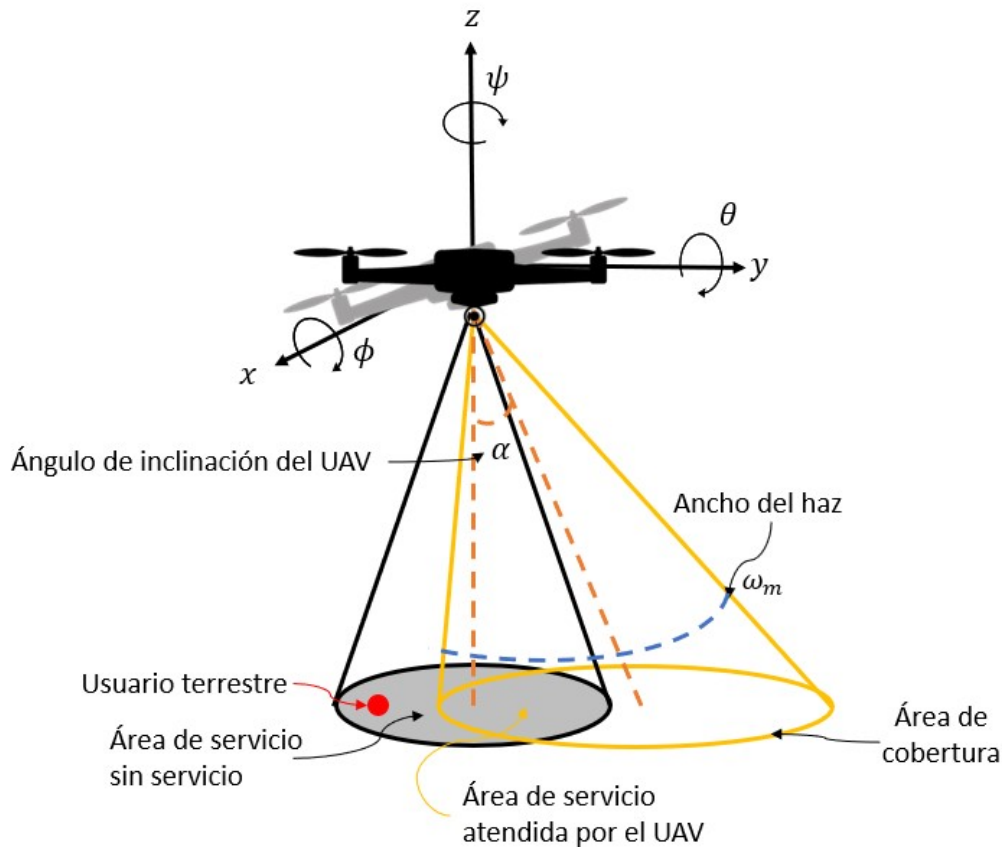


Figura 2.4: Modelo del sistema, basado en [48]

En la Figura 2.4 se presenta el modelo del sistema basado en [48], en donde el ángulo  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del UAV con respecto al eje  $z$ , al existir un ángulo de inclinación, el área de cobertura se ve afectada, al verse afectada, los usuarios terrestres que se encuentran en el borde del área de cobertura pueden entrar en un área sin servicio. Es importante mencionar que la energía radiada por la ABS se puede representar gráficamente por un haz cónico con un ancho  $\omega_m$  como se muestra en la Figura 2.4, donde la base del cono corresponde al área de cobertura. Obsérvese que el área de cobertura se ve modificada debido al ángulo de inclinación de la ABS.

Para las simulaciones de [48] se utilizó el modelo que se muestra en la Figura 2.4 en donde los ángulos de elevación ( $\alpha$ ) y de azimuth ( $\gamma$ ) se pueden obtener a través de los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  que proporciona el modelo matemático de un UAV como es mostrado en la Figura 2.4. En la Figura 2.5 se muestran dichas equivalencias, siendo  $\beta$  el complemento del ángulo de elevación para formar  $90^\circ$ . Obsérvese que al existir un ángulo de inclinación, el UAV toma otra posición en el plano, esto se muestra en la Figura 2.6.



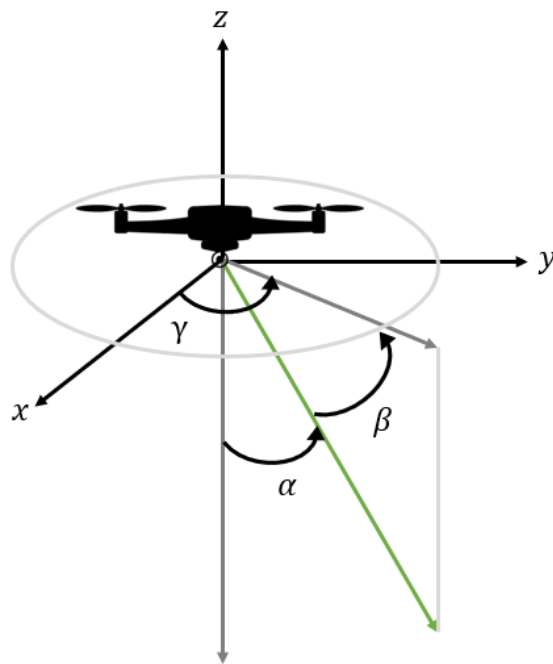


Figura 2.5: Ángulos de azimuth y elevación

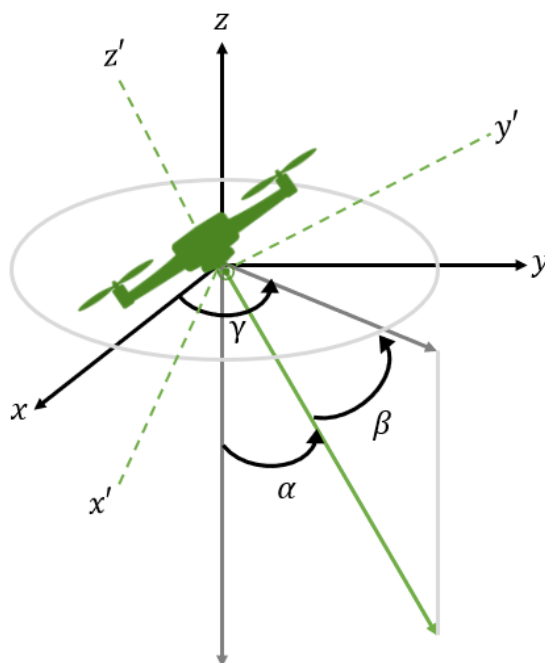


Figura 2.6: Ángulos de azimuth y elevación (UAV con inclinación)

Cuando las ABSs están planeando o volando en el aire, éstas tendrán perturbaciones aleatorias debido a los flujos de aire o las vibraciones del cuerpo. Como se observa en la Figura 2.4, la ABS rota alrededor de tres ángulos, *roll*, *pitch* y *yaw*. Para este caso se utiliza el ángulo de elevación en lugar de *pitch* y *roll*. El ángulo *yaw* es considerado como el ángulo de azimuth. El área de cobertura se ve distorsionada debido a las perturbaciones, en este caso de ser un área circular cambia a elipses con radios variantes según el ángulo de inclinación. Durante el periodo de perturbación, debido a la rotación del ángulo de azimuth, el contorno del área de cobertura de la ABS es circular.

Los autores de [48] caracterizan las perturbaciones a través de variables aleatorias que representan los ángulos de elevación y azimuth y cuyas funciones de densidad de probabilidad (PDFs), están dadas, respectivamente, como:

$$f_e(\alpha) = \frac{\pi}{2\alpha_b} \sin\left(\frac{\pi}{\alpha_b}\alpha\right), \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_b \quad (2.1)$$

y

$$f_a(\gamma) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \gamma \leq 2\pi \quad (2.2)$$

El radio del círculo del área de cobertura bajo los efectos de perturbaciones aleatorias también es caracterizado de manera geométrica. Como se ilustra en la Figura 2.4 inicialmente el área de cobertura de la ABS se representa geométricamente como un círculo, pero cambia de un disco de radio  $rm = H \tan\left(\frac{\omega_m}{2}\right)$  a elipses variables debido a la perturbación aleatoria de la plataforma UAV, siendo  $H$  la altura a la que se encuentra la ABS y  $\omega_m$  el ancho del haz.

El área de cobertura de la ABS presentada en [48] está dada por:

$$\frac{(x - \Delta x)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \leq 1 \quad (2.3)$$

Donde  $\Delta x$  es el desplazamiento del centro  $(0,0,H)$ .  $a$  y  $b$  representan la longitud del semieje mayor y semieje menor de la elipse, respectivamente, dados por:

$$\Delta x = \frac{H}{2} \left( \tan\left(\frac{\omega_m}{2} + \alpha\right) - \tan\left(\frac{\omega_m}{2} - \alpha\right) \right) \quad (2.4)$$

$$a = \frac{H}{2} \left( \tan\left(\frac{\omega_m}{2} + \alpha\right) + \tan\left(\frac{\omega_m}{2} - \alpha\right) \right) \quad (2.5)$$

$$b = \frac{H \tan \frac{\omega_m}{2}}{\cos \alpha \sqrt{1 - \tan^2 \alpha \tan^2 \frac{\omega_m}{2}}} \quad (2.6)$$

En [48] se muestra el desarrollo matemático para el modelo de la plataforma UAV con perturbaciones aleatorias únicamente de forma geométrica, siendo así se ponen los puntos a considerar como sigue.

El ángulo de elevación variable afecta el desplazamiento y distorsiona el área de cobertura, mientras que el ángulo de azimut variable no afecta la geometría del área de cobertura. Por lo tanto, el área de cobertura sólo se ve afectada por el ángulo de elevación variable provocado por perturbaciones aleatorias.

Basado en lo anterior, se realizó una simulación de un UAV en modo *hover*<sup>1</sup> a 100 m de altura, utilizando la Ecuación (2.3) para observar cómo varía el área de cobertura según el ángulo de inclinación. Como se dijo previamente, en [48] el área de cobertura sólo se analiza de manera geométrica y no se relaciona con niveles de potencia recibidos, por lo que no se puede saber exactamente el umbral en el que los usuarios terrestres dejan de tener una buena cobertura. Efectivamente, en las Figuras 2.7 y 2.8, se puede ver, respectivamente, cómo es el área de cobertura antes de que el ángulo de elevación varíe y cómo es al término de la simulación, es decir, una vez que ya se ha introducido una perturbación.

Los parámetros utilizados en esta simulación e introducidos en las Ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.6) son:  $H = 100$  m,  $\omega_m = \frac{\pi}{9}$  y  $\alpha$  es el ángulo inclinación de la ABS tras una perturbación aleatoria que en este caso  $1.7^\circ$ .

---

<sup>1</sup>La traducción de *hover* al español es *flotar* en términos del UAV, se refiere a que el UAV busca permanecer suspendido en el aire en una posición sin desplazarse.

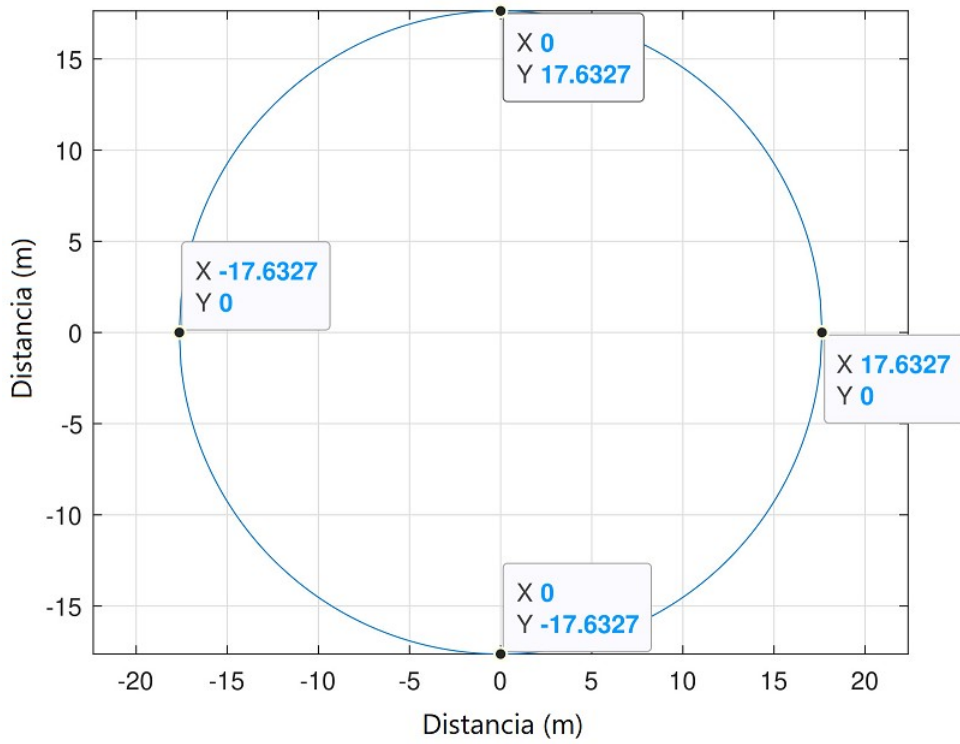


Figura 2.7: Área de cobertura antes de que el ángulo de elevación varíe

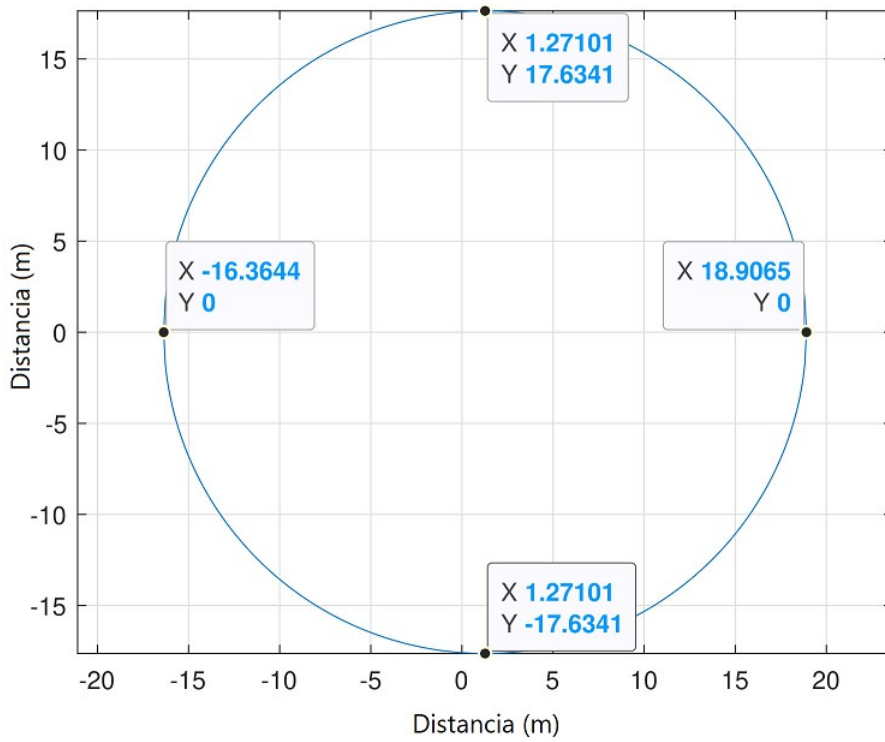


Figura 2.8: Área de cobertura después de variar el ángulo de elevación

En la Figura 2.8 se puede ver una variación muy pequeña en cuanto al desplazamiento de la distancia y no se aprecia una variación significativa en cuanto a la forma del área de cobertura, ya que el ángulo de inclinación varió solamente  $1.7^\circ$ ; a diferencia de la figura 2.7 se observa un desplazamiento el cual provoca que el área de cobertura cambie de posición. No obstante, colocando cursores, se puede observar que la forma del área de cobertura ya no es un círculo, sino una elipse con centro en  $[1.27101 \ 0]$  y con un radio A igual a  $17.6341$  m y radio B igual a  $17.63545$  m. A continuación, en la Figura 2.9 se muestra un ejemplo de una variación mayor, donde este ángulo se varió manualmente a  $30^\circ$ .

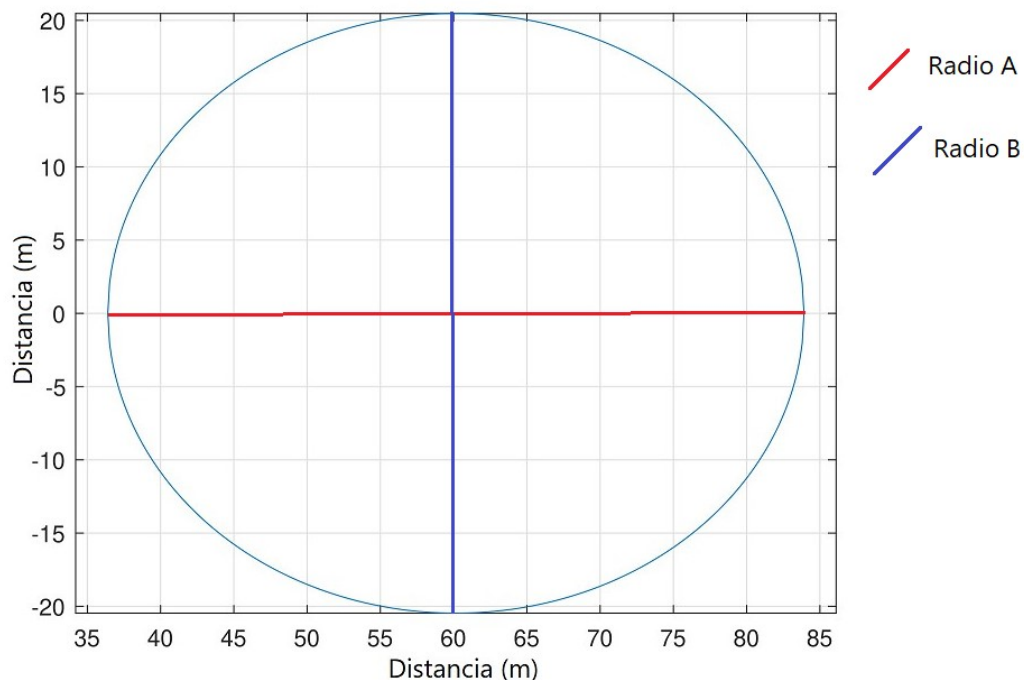


Figura 2.9: Área de cobertura variando manualmente  $\alpha$  a  $30^\circ$

### 2.3. Área de cobertura reflejada a través de niveles de potencia recibidos

La forma en la que se vuelve posible el uso de ABS, es instalando un transreceptor 5G en el UAV. Ahora bien, la intensidad de señal recibida por el usuario en tierra se verá afectada por las condiciones de propagación, la frecuencia de operación y el tipo de antena utilizada tanto en la ABS como en el equipo de usuario.

Existen distintos tipos de antenas, las cuales pueden tener diferentes patrones de radiación como se menciona en [22]. Existen patrones de radiación teóricos y prácticos (como aquellos que se pueden encontrar en hojas de especificaciones de fabricantes). En cualquier caso, estos patrones dan una idea de la distribución de la señal recibida o transmitida en diversos puntos al rededor de la antena. En la práctica, el resultado de la señal recibida puede variar dependiendo de los obstáculos que se encuentren entre el transmisor y receptor, también puede variar debido

a la altura o factores externos como perturbaciones que alteren la posición de la ABS mientras proporciona el servicio.

Con fines de ilustrar el efecto de las características de las antenas en el concepto de cobertura, se muestran a continuación dos casos, simulando los niveles de potencia recibida en un área dada usando en el transmisor una antena isotrópica con ganancia unitaria y una antena práctica operando a 2.4 GHz. Estas simulaciones se realizaron bajo condiciones de propagación de espacio libre [13], es decir, sin obstrucciones en la trayectoria transmisor-receptor.

El modelo de propagación de espacio libre está dado por la siguiente expresión.

$$P_R = P_T G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.7)$$

En donde  $P_R$  es la potencia recibida en W,  $P_T$  es la potencia de transmisión en W,  $G_T$  es la ganancia de la antena transmisora,  $G_R$  es la ganancia de la antena del receptor,  $\lambda$  es la longitud de onda en m, dada por el cociente  $c/f$  en donde  $f$  es la frecuencia en Hz,  $c$  es la constante de velocidad de la luz en m/s y  $d$  es la distancia de separación de transmisor a receptor en m.

Para estas simulaciones el transmisor se ubicó en el centro de un área probando dos casos de potencia de transmisión: 1 W equivalente a 30 dBm, que es la potencia de transmisión de una ABS, véase [36] y 0.316 W que equivale a 25 dBm potencia de transmisión utilizada para ABSs en la red 5G [27] y que será utilizada para las simulaciones del Capítulo 5. Se consideró que los puntos de recepción sobre esta área (puntos de prueba) contaban con antenas isotrópicas con ganancia unitaria. Para tener una comparación justa con el segundo caso de la antena directiva, la frecuencia de operación se dejó fija a 2.4 GHz.

Los resultados de estas simulación se muestran a través de las Figuras 2.11 a 2.13 donde se aprecia una gama de colores iniciando en el centro con colores cálidos (escala de amarillos) y a medida que se alejan del centro los colores cada vez van siendo más fríos (escala de azules). Esta escala de colores representa niveles de potencia recibida y por tanto se relacionan con la cobertura como se expuso al principio de esta sección. Así, en los colores cálidos se tiene una mejor cobertura que en los colores fríos, esto se ve claramente en la escala de colores mostrada a la derecha de cada figura.

Ahora bien, para el segundo caso se consideró que el transmisor radiaba con una antena práctica tomada de [20] con un patrón de radiación directivo como se ilustra en la Figura 2.10, donde se muestra cómo su patrón de radiación concentra la energía de manera no uniforme, identificándose así lo que se conoce como lóbulo principal y lóbulos secundarios. En este caso, la orientación de esta antena (y antenas con patrones de radiación similares) juega un papel importante en la cobertura. De esta forma, las zonas que estén dentro del lóbulo principal tendrán mejores niveles de potencia recibida que aquellas que estén en los ángulos de los lóbulos secundarios donde la ganancia en principio es menor.

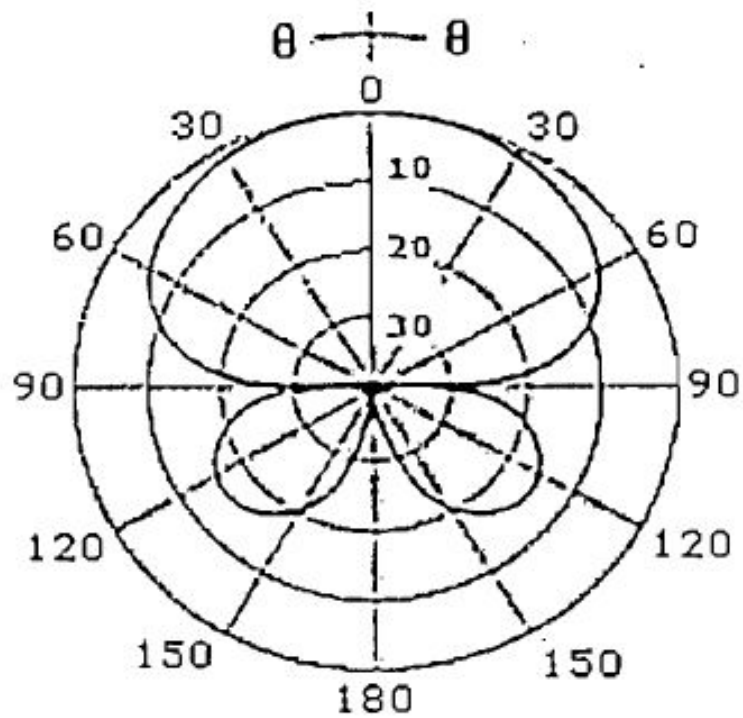


Figura 2.10: Patrón de radiación de una antena comercial [20]

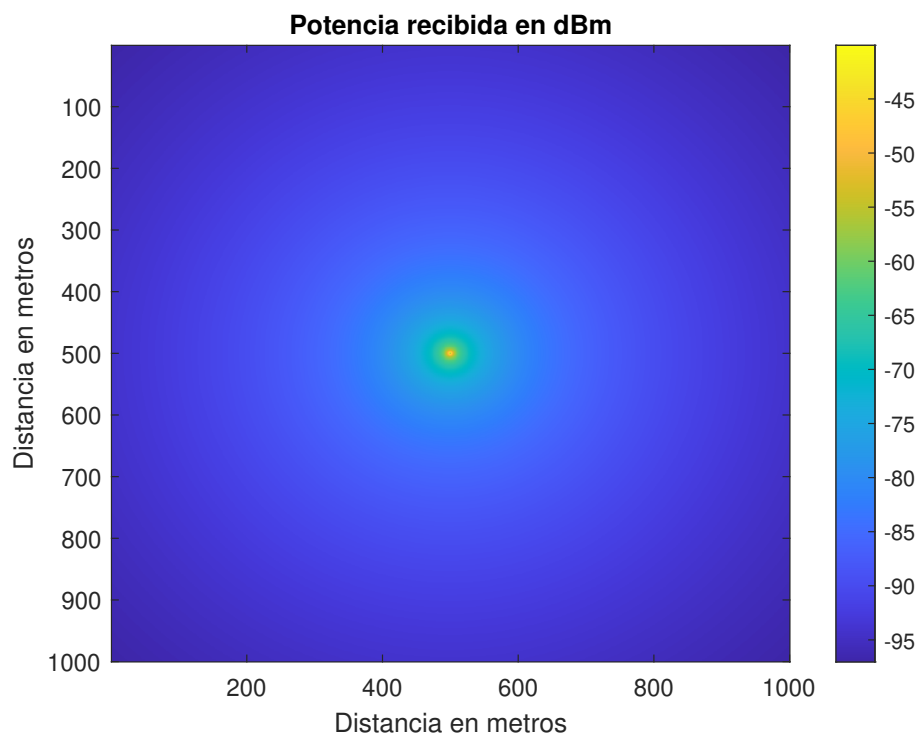


Figura 2.11: Niveles de potencia recibidos en condiciones de propagación de espacio libre. Transmisor radiando con una antena isotrópica

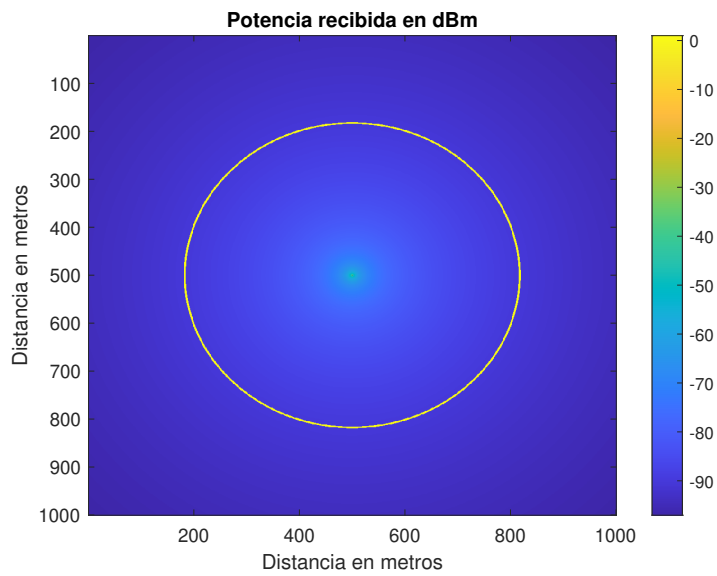


Figura 2.12: Niveles de potencia recibidos en condiciones de propagación de espacio libre. Transmisor radiando con una antena isotrópica mostrando el área de cobertura

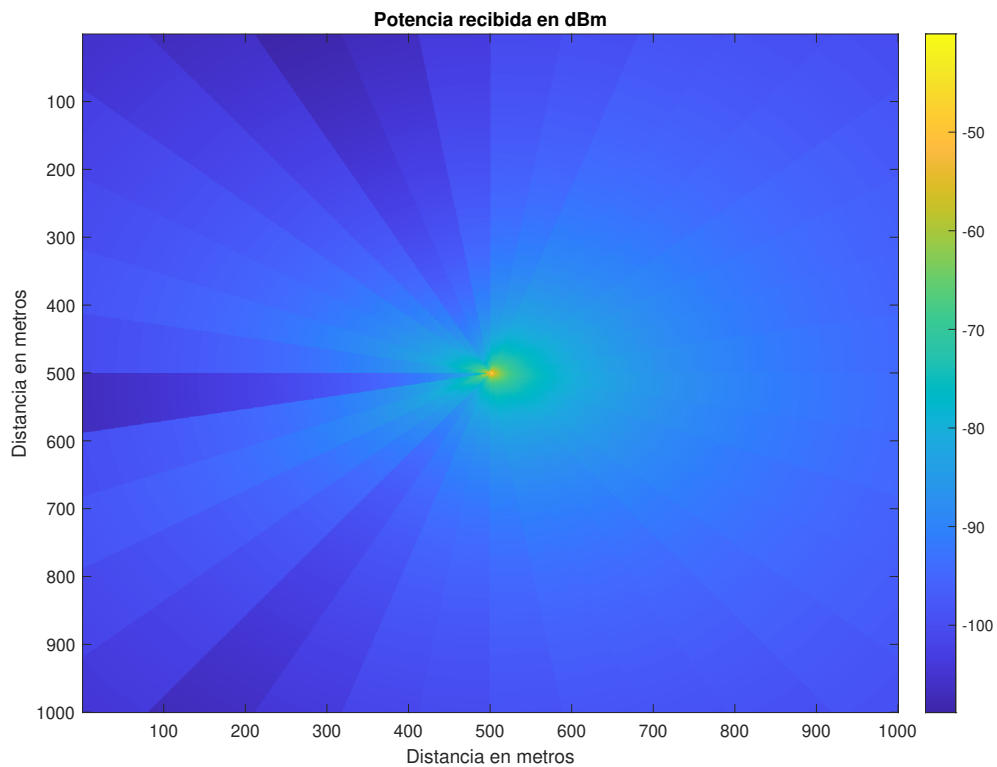


Figura 2.13: Niveles de potencia recibidos usando en el transmisor una antena con con patrón de radiación comercial



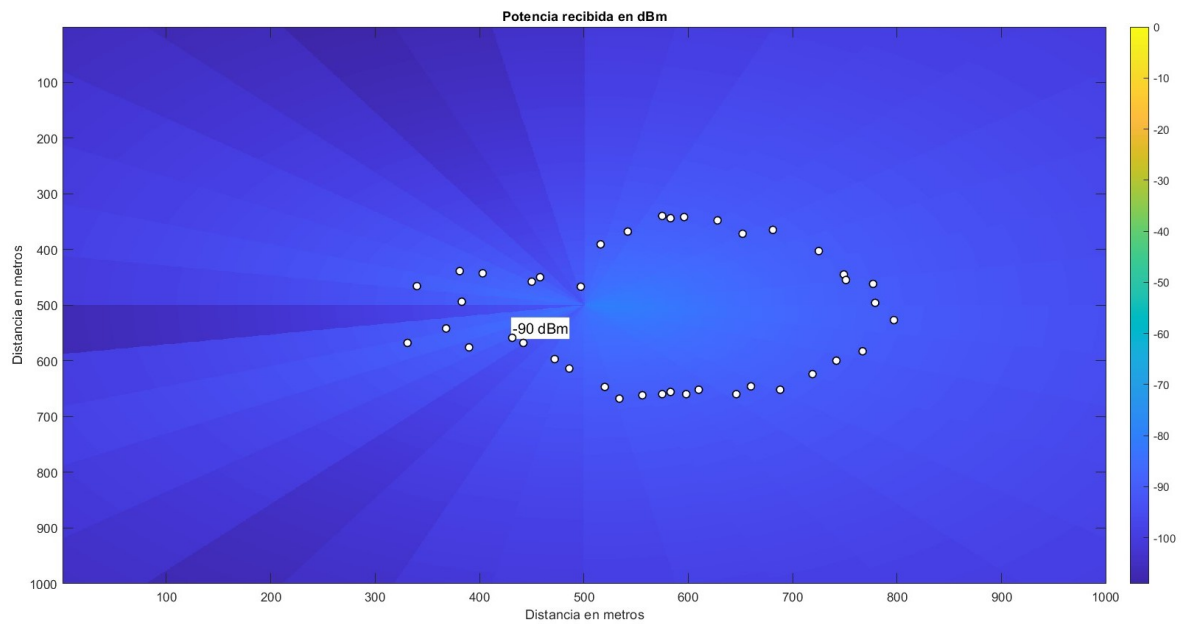


Figura 2.14: Niveles de potencia recibidos simulando en el transmisor una antena comercial

En la Figura 2.11 se muestran los resultados de simulación de los niveles de potencia recibidos dentro de un perímetro de  $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ , colocando una antena isotrópica en el centro y contando con condiciones ideales, es decir, en condiciones de espacio libre, en donde no existe ningún factor que altere la propagación de la señal, más que la misma distancia.

Los parámetros utilizados para obtener los resultados de la Figura 2.11 fueron una frecuencia  $f = 250 \text{ MHz}$ ,  $P_T = 1 \text{ W}$ , para el caso de la Figura 2.13 los valores fueron los que están dados por el fabricante  $f = 185 \text{ MHz}$  y la  $G_T$  es variable según el ángulo que se forma entre transmisor y receptor, por simplicidad se utiliza como valor de potencia de transmisión  $P_T = 1 \text{ W}$ .

Para la Figura 2.13 se utilizaron las ganancias del patrón de radiación de la Figura 2.10 y se orientó el lóbulo principal hacia la derecha. Se puede ver en la escala de colores que en efecto, en la dirección de la orientación del lóbulo principal se tienen niveles de potencia más altos que en la dirección de los lóbulos secundarios, y que al igual que en la Figura 2.10 existen zonas entre los lóbulos en las que la potencia recibida es baja debido a que las ganancias son bajas. Cabe señalar que las ganancias que se tienen en la Figura 2.10 están dadas en dBi y que para poder utilizarlas en el modelo de espacio libre de la Ecuación (2.7) se pasaron a una escala lineal.

Las Figuras 2.12 y 2.14 ejemplifican lo que es un área de cobertura donde, para fines ilustrativos, se muestra un área delimitada entre  $-80 \text{ dBm}$  a  $-90 \text{ dBm}$  para tener una cobertura aceptable [8].

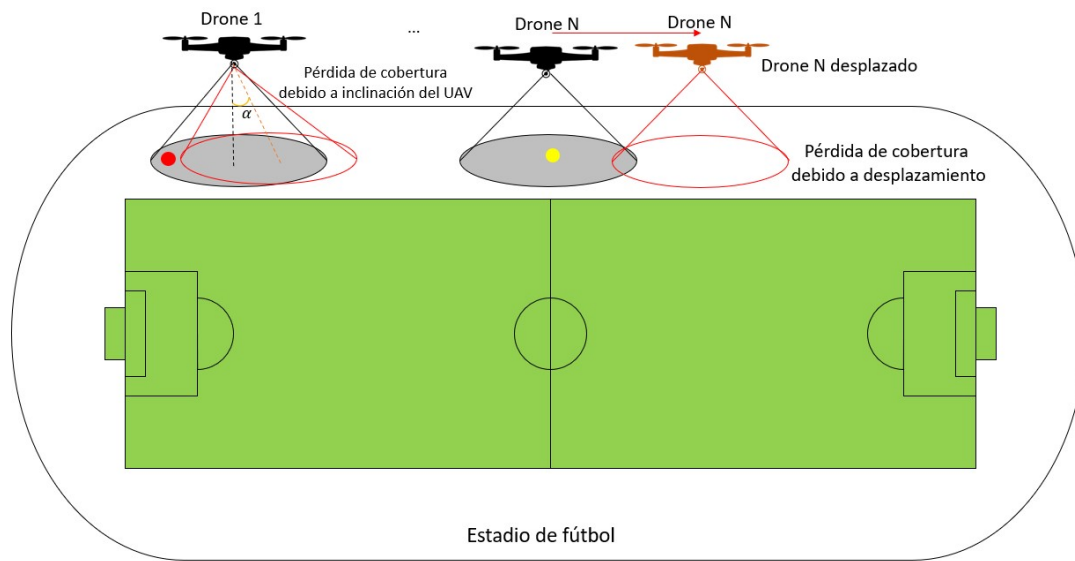


Figura 2.15: Ejemplificación de los efectos en la cobertura debido a perturbaciones

Ahora bien, como se presentó en el Capítulo 1, uno de los servicios que se proyecta para 5G es el de banda ancha móvil mejorada (eMBB) en donde una posible aplicación es en eventos masivos. Bajo esta óptica supóngase que se busca proporcionar servicio temporal de internet inalámbrico a usuarios dentro de un estadio de fútbol utilizando  $N$  estaciones base aéreas. Los efectos de perturbación en un UAV pueden impactar de tal forma que los usuarios en tierra perderían cobertura, lo cual se ilustra en el ejemplo de la Figura 2.15. En esta figura el punto rojo, representa a un usuario terrestre, el cual puede dejar de recibir la señal de la ABS y quedar fuera de su cobertura al existir un ángulo de inclinación lo suficientemente grande. De forma similar sucede con un usuario representado por el punto amarillo. Al desplazarse la ABS debido a ráfagas de viento, el usuario deja de estar ubicado en la zona donde la cobertura es aceptable, es decir, deja de recibir los niveles de potencia adecuados. A partir de este planteamiento, a continuación se expone un modelo de viento que se consideró para las simulaciones en este trabajo de tesis con el fin de introducir perturbaciones aleatorias a un UAV y verificar su impacto en su cobertura.

## 2.4. Modelo de viento Dryden

Para representar las perturbaciones aleatorias introducidas en el UAV en el presente trabajo de tesis se utiliza el modelo de viento Dryden (DWM por sus siglas en inglés) en Simulink, ya que genera turbulencias aleatorias y presenta versatilidad al momento de implementarlo [4].

El DWM, también llamado *Dryden gusts*, en honor a Hugh Latimer Dryden quien fue un científico aeronáutico y funcionario estadounidense [18], es un modelo matemático de ráfagas continuas que es aceptado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para ser utilizado en aplicaciones de simulación y diseño de aeronaves.

En el modelo DWM, los componentes de velocidad lineal y angular de ráfagas continuas se tratan como procesos estocásticos que varían espacialmente y especifican la densidad espectral de potencia de cada componente. Se aplica una componente de ruido, el cual se modela con propiedades espectrales conocidas como perturbaciones de velocidad y variación de ángulo a los ejes del cuerpo del vehículo. El efecto de la turbulencia se captura durante las simulaciones en tiempo discreto.

El espectro de ruido para cada una de las perturbaciones se describe mediante una longitud de escala de turbulencia ( $L$ ) en m, la velocidad del aire ( $V$ ) en m/s y la intensidad de la turbulencia ( $\sigma$ ). La longitud de escala de turbulencia  $L$  es la longitud del campo de turbulencia que se expresa en el eje longitudinal, lateral y vertical ( $L_u$ ,  $L_v$  y  $L_w$ ). La intensidad de turbulencia  $\sigma$  es la magnitud de la turbulencia expresada en el eje longitudinal, lateral y vertical ( $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$ ).

La longitud de la escala de turbulencia está en función de la altura ( $h$ ) de acuerdo a [19] y se expresa de la siguiente forma:

$$2L_w = h \quad (2.8)$$

$$L_u = 2L_v = \frac{h}{(0.177 + 0.000823h)^{1.2}} \quad (2.9)$$

Las intensidades de turbulencia se expresan de la siguiente forma:

$$\sigma_w = 0.1W20 \quad (2.10)$$

$$\sigma_u = \sigma_v = \sigma_w \frac{1}{(0.177 + 0.000823h)^{0.4}} \quad (2.11)$$

En donde  $W20$  es un valor típico de la velocidad del viento a 20 pies de altura cuyos valores típicos de acuerdo a [43] son: Turbulencia ligera, 15 nudos, turbulencia moderada, 30 nudos y turbulencia severa, 45 nudos.

En el DWM se utiliza una señal de ruido blanco (ruido blanco Gaussiano de banda limitada) para excitar las ondas del espectro de potencia la cual pasa por unos filtros, llamados *filtros continuos Dryden*. El ruido blanco es una señal aleatoria que tiene la misma intensidad en diferentes frecuencias, lo que le da una densidad espectral de potencia constante.

Según [19] los filtros continuos Dryden para los espectros de velocidad se expresan a través de las funciones de transferencia derivadas de las raíces cuadradas de las ecuaciones del espectro de potencia Dryden.

$$H_u(s) = \sigma_u \sqrt{\frac{2L_u}{\pi V}} \frac{1}{1 + \frac{L_u}{V}s} \quad (2.12)$$

$$H_v(s) = \sigma_v \sqrt{\frac{2L_v}{\pi V}} \frac{1 + \frac{2\sqrt{3}L_v}{V}s}{\left(1 + \frac{2L_v}{V}s\right)^2} \quad (2.13)$$

$$H_w(s) = \sigma_w \sqrt{\frac{2L_w}{\pi V}} \frac{1 + \frac{2\sqrt{3}L_w}{V}s}{\left(1 + \frac{2L_w}{V}s\right)^2} \quad (2.14)$$

Por otro lado, el filtro continuo Dryden para las variaciones angulares se expresa como las siguientes funciones de transferencia:

$$H_p(s) = \sigma_w \sqrt{\frac{0.8}{V}} \frac{\left(\frac{\pi}{4b}\right)^{1/6}}{(2L_w)^{1/6} \left(1 + \frac{4b}{\pi V}s\right)} \quad (2.15)$$

$$H_r(s) = \frac{\frac{\pm s}{V}}{\left(1 + \frac{3b}{\pi V}s\right)} H_v(s) \quad (2.16)$$

$$H_q(s) = \frac{\frac{\pm s}{V}}{\left(1 + \frac{4b}{\pi V}s\right)} H_w(s) \quad (2.17)$$

Entonces, la salida del filtro está conformada por 3 componentes de velocidad lineal ( $u_g, v_g, w_g$ ) y 3 componentes de variación de ángulos ( $p_g, q_g, r_g$ ). Esas salidas irán al modelo del UAV como una señal de perturbación, esta señal entra en forma de vector, para posteriormente ser añadida al modelo dinámico traslacional y rotacional como una perturbación externa y así variar la posición del UAV.

En la Figura 2.16 se muestra un diagrama a bloques que ilustra cómo las componentes de velocidad dadas por el DWM se introducen al modelo del UAV. Básicamente estas componentes de velocidad lineal obtenidas a partir del DWM se introducirán en el UAV, sumadas al modelo matemático del UAV mostrado en el siguiente capítulo y con ello se realizarán las simulaciones del Capítulo 5.

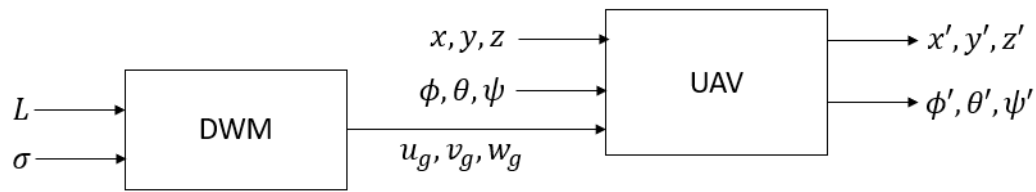


Figura 2.16: Diagrama de UAV con perturbación

En la Figura 2.17 se pueden ver 3 distintos resultados en color azul, cada uno hace referencia a una componente de velocidad lineal,  $(u_g, v_g, w_g)$ , respectivamente, Figuras 2.17a, 2.17b y 2.17c. Como señal de entrada se está proporcionando ruido Gaussiano aleatorio, en la figura está representado de color gris, de tal forma que lo que están haciendo los filtros es correlacionar cada muestra de ellos, siendo así, se utilizan las componentes de velocidad en forma de vector como perturbación en el modelo matemático del UAV.

Al tener perturbaciones en el UAV, se modifican las posiciones y ángulos de los ejes, si se estaba operando en un plano horizontal, este puede verse modificado de tal forma que tenga una inclinación, como se muestra en la Figura 2.4. Con esto en mente, los resultados de simulación toman en cuenta las posiciones finales del drone debido a perturbaciones mostrando distorsión del área de servicio en cuanto a desplazamiento y niveles de potencia recibidos.

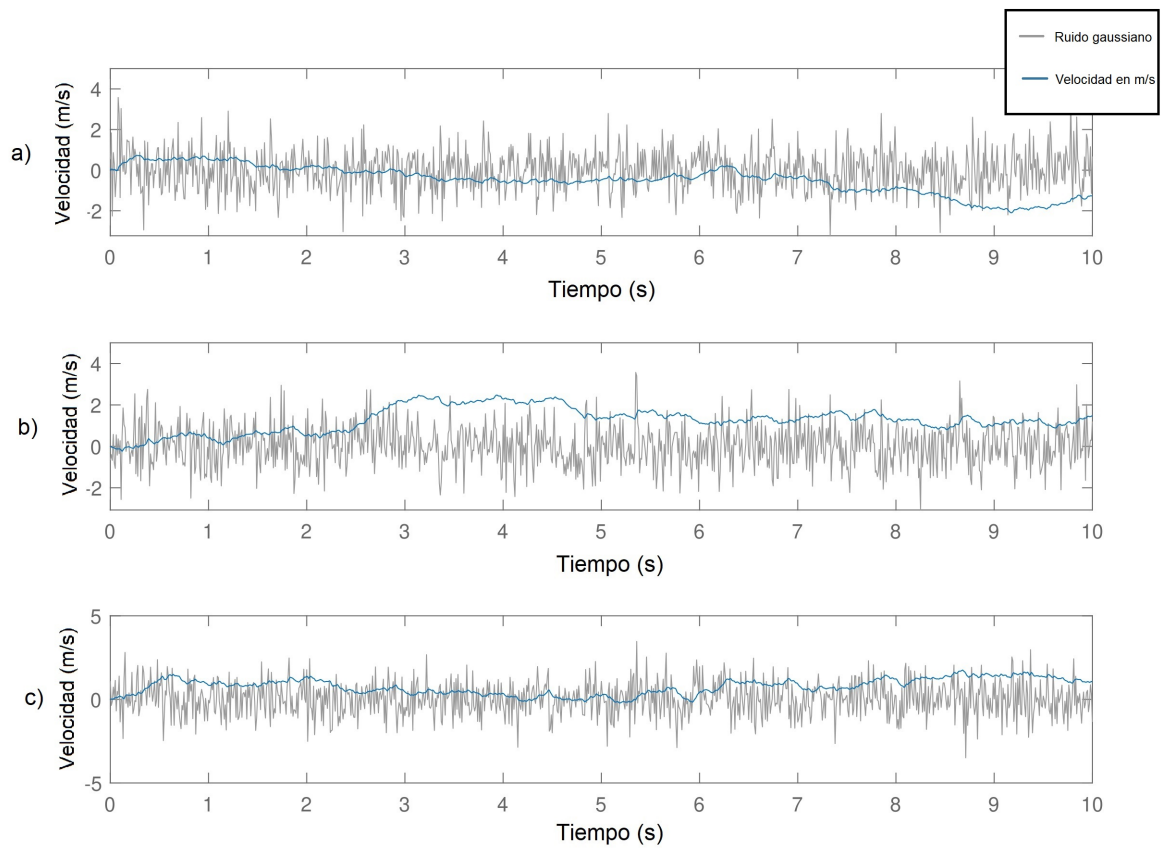


Figura 2.17: Componentes de velocidad lineal obtenidas de los filtros: a) Velocidad lineal  $u_g$ , b) velocidad lineal  $v_g$  y c) velocidad lineal  $w_g$

Estas velocidades, como se mencionó anteriormente son una entrada al modelo matemático del UAV, como salida se obtiene una posición para el UAV distinta a la deseada en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ , al ser perturbaciones aleatorias, la posición que se obtiene como resultado a lo largo de la simulación es variable.

---

## Modelado matemático de un UAV tipo cuadrirrotor

---

Con el fin de analizar cómo afecta una perturbación aleatoria a la posición y los ángulos de inclinación de la plataforma, es necesario comprender el modelo matemático de un cuadrirrotor. Este modelo se introducirá en la interfaz de simulación descrita en el Capítulo 4.

Un cuadrirrotor es un helicóptero con cuatro rotores que se encuentran colocados en forma de cruz a una misma distancia del centro de masa de la aeronave. El cuadrirrotor es controlado mediante el ajuste de las velocidades angulares de los rotores cuyo giro es provocado por motores eléctricos. El cuadrirrotor es un diseño típico de los UAVs que es utilizado en muchas aplicaciones como se mencionó en el Capítulo 1 en la Sección 1.5.3.

Con el objetivo de entender cada uno de los movimientos que realiza el UAV, primero se debe realizar un análisis detallado de cómo el UAV lo logra físicamente. Para ello se tiene el siguiente diagrama de fuerzas y marcos de referencia que se expone en la Figura 3.1. En ella se puede apreciar la descripción general del cuadrirrotor, mismo que es caracterizado por los sistemas de coordenadas  $(x, y, z)$ , las fuerzas  $f_i$ , momentos  $\tau_{Mi}$ , y velocidades angulares  $\omega_i$  que generan los cuatro motores ( $i=1, 2, 3, 4$ ). La estructura elegida para este modelamiento es de tipo cruz donde los motores se encuentran en las puntas de cada brazo y los ejes coordenados coinciden con los brazos de la estructura.

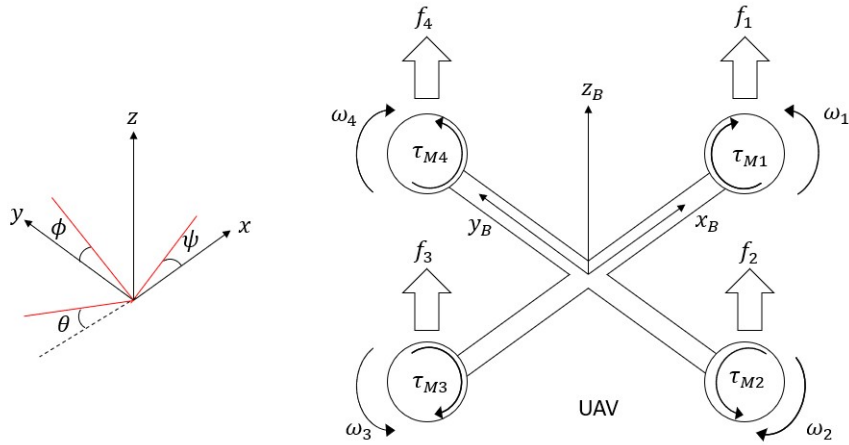


Figura 3.1: Marcos de referencia y sistemas de fuerza de un cuadrirrotor

En la Figura 3.1 se define a  $x_B$ ,  $y_B$  y  $z_B$  como el sistema de coordenadas fijo al UAV, donde  $x_B$  es el eje de dirección normal de ataque del cuadrirrotor, es decir, la dirección en la que el vehículo avanza hacia adelante,  $y_B$  es el eje perpendicular a  $x_B$  y  $z_B$  es el eje vertical orientado en sentido ascendente.

Debido a la rotación de las hélices en un fluido viscoso, en este caso, el aire, se genera el empuje aerodinámico, este empuje es utilizado para poder elevar el UAV y mantenerlo en el aire. El empuje se relaciona con la velocidad de rotación de los motores mediante la expresión:

$$f_i = k_t \cdot \omega_i^2 \quad (3.1)$$

En donde  $k_t$  es la constante de empuje y la velocidad angular del motor  $i$  es denotada por  $\omega_i$ .

Si los motores están perfectamente alineados con respecto al sistema de coordenadas móvil, la dirección de la fuerza de empuje (*thrust*) será del eje  $z$  del sistema de referencia mencionado, donde esta componente en los otros ejes es nula.

A continuación se presentan las ecuaciones dinámicas de un cuadrirrotor derivadas de las ecuaciones Newton-Euler y Euler-Lagrange [17]. Como técnica de control se utiliza un controlador PD, para controlar la trayectoria del vuelo del cuadrirrotor así como para reducir el efecto de las fluctuaciones en el cuadrirrotor causado por fuerzas externas aleatorias.

Para el modelado matemático del cuadrirrotor, se designa el vector  $\xi$  para las coordenadas traslacionales y el vector  $\eta$  para las coordenadas rotacionales que representa los ángulos de Euler: *roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$  y *yaw*  $\psi$ .

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$



Con el objetivo de obtener el control rotacional del UAV, se tiene que obtener la matriz de Coriolis, cuyo efecto es muy importante al momento de realizar el modelado de un UAV, ya que un objeto al desplazarse sobre cualquier sistema que rota sufre una aceleración adicional (en este caso el marco de referencia es la Tierra [31]).

### 3.1. Obtención de la matriz de Coriolis y derivadas

Teniendo definida la matriz de relación entre velocidades angulares como:

$$\mathbf{W}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi)\cos(\theta) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

La matriz dada en la Ecuación (3.3) relaciona las velocidades de los ángulos de Euler con las velocidades expresadas en el marco del cuerpo.

El vector  $\boldsymbol{\eta}$  correspondiente a los ángulos de rotación del UAV se define como:

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

El tensor de inercia del cuerpo rígido es una medida de la resistencia de un sistema al cambiar su velocidad angular y está definido como:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Se puede obtener la matriz Jacobiana  $\mathbf{J}$  a partir de  $\mathbf{W}_n^T \mathbf{I} \mathbf{W}_n$  para posteriormente obtener la energía cinética rotacional:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

En donde las componentes son:

$$J_{11} = I_{xx}$$

$$J_{12} = 0$$

$$J_{13} = -I_{xx} \sin(\theta)$$

$$J_{21} = 0$$

$$J_{22} = I_{yy} \cos^2(\phi) + I_{zz} \sin^2(\phi)$$

$$J_{23} = \cos(\phi)\cos(\theta)\sin(\phi)(I_{yy} - I_{zz})$$

$$J_{31} = -I_{xx} \sin(\theta)$$

$$J_{32} = \cos(\phi)\cos(\theta)\sin(\phi)(I_{yy} - I_{zz})$$

$$J_{33} = I_{xx} \sin^2(\theta) + I_{yy} \cos^2(\theta)\sin^2(\phi) + I_{zz} \cos^2(\phi)\cos^2(\theta)$$

Entonces, se obtuvo la energía cinética rotacional a partir de la relación  $T_{rot} = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}}$

$$\begin{aligned} T_{rot} = & \left[ \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - \dot{\phi}\dot{\psi}\sin(\theta) + \frac{1}{2}(\dot{\psi}\sin^2(\theta))I_{xx} + \left[ \frac{1}{2}(\dot{\psi}^2\cos^2(\theta)\sin^2(\phi)) \right. \right. \\ & \left. \left. + \dot{\psi}\dot{\theta}\cos(\phi)\cos(\theta)\sin(\phi) + \frac{1}{2}(\dot{\theta}^2\cos^2(\phi))\right]I_{yy} + \left[ \frac{1}{2}(\dot{\psi}^2\cos^2(\phi)\cos^2(\theta)) \right. \right. \\ & \left. \left. - \dot{\psi}\dot{\theta}\cos(\phi)\cos(\theta)\sin(\phi) + \frac{1}{2}(\dot{\theta}^2\sin^2(\phi))\right]I_{zz} \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Realizando el álgebra correspondiente la Ecuación (3.7) se reduce a:

$$\begin{aligned} T_{rot} = & \frac{1}{2}I_{xx}[\dot{\phi} - \dot{\psi}\sin(\theta)]^2 + \frac{1}{2}I_{yy}[\dot{\theta}\cos(\phi) + \dot{\psi}\sin(\phi)\cos(\theta)]^2 + \frac{1}{2}I_{zz}[\dot{\theta}\sin(\phi) \\ & + \dot{\psi}\cos(\phi)\cos(\theta)]^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Para obtener la matriz de Coriolis que se define como  $\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) = \dot{\mathbf{J}} - \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\eta}} \left( \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \right)$  se

realizaron las derivadas parciales del término  $\left( \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \right)$  con respecto a los ángulos  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$ .

El resultado de esto es una matriz de derivadas parciales que se nombró **dp\_eta** la cual se simplificó utilizando el comando *simplify* de Matlab. Cabe señalar que para obtener  $\dot{\mathbf{J}}$  contenida en la matriz de Coriolis, se derivó cada término de la matriz  $\mathbf{J}$  dada en (3.6) con respecto a  $\boldsymbol{\eta}$ .

La matriz de Coriolis resultante es:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

En donde las componentes son:

$$C_{11} = 0$$

$$C_{12} = (I_{yy} - I_{zz})(\dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi) + \dot{\psi}\sin^2(\phi)\cos(\theta)) + (I_{zz} - I_{yy})\dot{\psi}\cos^2(\phi)\cos(\theta) - I_{xx}\dot{\psi}\cos(\theta)$$

$$C_{13} = (I_{zz} - I_{yy})\dot{\psi}\cos(\phi)\sin(\phi)\cos^2(\theta)$$

$$C_{21} = (I_{zz} - I_{yy})(\dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi) + \dot{\psi}\sin^2(\phi)\cos(\theta)) + (I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi}\cos^2(\phi)\cos(\theta) + I_{xx}\dot{\psi}\cos(\theta)$$

$$C_{22} = (I_{zz} - I_{yy})\dot{\phi}\cos(\phi)\sin(\phi)$$

$$C_{23} = -I_{xx}\dot{\psi}\cos(\theta)\sin(\theta) + I_{yy}\dot{\psi}\sin^2(\theta)\cos(\theta)\sin(\theta) + I_{zz}\dot{\psi}\cos^2(\theta)\cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$C_{31} = (I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi}\cos^2(\theta)\cos(\theta)\sin(\theta) - I_{xx}\dot{\theta}\cos(\theta)$$

$$C_{32} = (I_{zz} - I_{yy})(\dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi)\sin(\theta) + \dot{\phi}\sin^2(\phi)\cos(\theta)) + (I_{yy} - I_{zz})\dot{\theta}\cos^2(\phi)\cos(\theta) + I_{xx}\dot{\psi}\cos(\theta)\sin(\theta) + I_{yy}\dot{\psi}\sin^2(\theta)\cos(\theta)\sin(\theta) - I_{zz}\dot{\psi}\cos^2(\theta)\cos(\theta)\sin(\theta)$$

$$C_{33} = (I_{yy} - I_{zz})\dot{\phi}\cos(\phi)\sin(\phi)\cos^2(\theta) - I_{yy}\dot{\psi}\sin^2(\theta)\cos(\theta)\sin(\theta) - I_{zz}\dot{\psi}\cos^2(\theta)\cos(\theta)\sin(\theta) + I_{xx}\dot{\theta}\cos(\theta)\sin(\theta)$$

Ahora bien, se tiene el Lagrangiano definido como [17]:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2}m\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\dot{\boldsymbol{\xi}} - mgz + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\eta}}^T\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (3.10)$$

En donde  $m$  es la masa del cuadricóptero,  $g$  es la aceleración gravitacional y  $z$  es la altura del vehículo, siendo  $\mathbf{q}$ :

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi} \\ \boldsymbol{\eta} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Ahora bien, el Lagrangiano con respecto a las coordenadas rotacionales está definido como:

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) = \frac{1}{2}I_{xx}(\dot{\phi} - \dot{\psi}\sin(\theta))^2 + \frac{1}{2}I_{yy}(\dot{\theta}\cos(\phi) + \dot{\psi}\sin(\phi)\cos(\theta))^2 + \frac{1}{2}I_{zz}(\dot{\theta}\sin(\phi) + \dot{\psi}\cos(\phi)\cos(\theta))^2 \quad (3.12)$$

Obsérvese que en (3.12) ahora el Lagrangiano sólo está en función de  $\boldsymbol{\eta}$  y su derivada, lo cual se debe a que no se considera la energía cinética traslacional, ni la energía potencial. Lo anterior se debe a que para obtener el control rotacional no se requiere la posición del UAV, sino que únicamente se utiliza su orientación. Entonces, calculando las derivadas parciales del Lagrangiano en función de  $\boldsymbol{\eta}$  en (3.12), los resultados son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \phi} &= (\dot{\psi}^2\cos(\phi)\cos^2(\theta)\sin(\phi) + \dot{\psi}\dot{\theta}\cos^2(\phi)\cos(\theta) - \dot{\psi}\dot{\theta}\cos(\theta)\sin^2(\phi) \\ &\quad - \dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi))I_{yy} + (\dot{\psi}\dot{\theta}\cos(\theta)\sin^2(\phi) - \dot{\psi}\dot{\theta}\cos^2(\phi)\cos(\theta) \\ &\quad - \dot{\psi}^2\cos(\phi)\cos^2(\theta)\sin(\phi) + \dot{\theta}^2\cos(\phi)\sin(\phi))I_{zz} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \theta} &= (\cos(\theta)\sin(\theta)\dot{\psi}^2 - \dot{\phi}\cos(\theta)\dot{\psi})I_{xx} + (-\cos(\theta)\sin(\theta)\dot{\psi}^2\sin^2(\phi) \\ &\quad - \dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\theta)\dot{\psi}\sin(\phi))I_{yy} + (\dot{\psi}\dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi)\sin(\theta) \\ &\quad - \dot{\psi}^2\cos^2(\phi)\cos(\theta)\sin(\theta))I_{zz} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \psi} = 0 \quad (3.15)$$

Asímismo, se calcularon las derivadas parciales del Lagrangiano en función de  $\dot{\boldsymbol{\eta}}$  de (3.12):

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \dot{\phi}} = (\dot{\phi} - \dot{\psi}\sin(\theta))I_{xx} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \dot{\theta}} = (\dot{\theta}\cos^2(\phi) + \dot{\psi}\cos(\theta)\sin(\phi)\cos(\phi))I_{yy} + (\dot{\theta}\sin^2(\phi) - \dot{\psi}\cos(\phi)\cos(\theta)\sin(\phi))I_{zz} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \dot{\psi}} &= (\dot{\psi}\sin^2(\theta) - \dot{\phi}\sin(\theta))I_{xx} + (\dot{\psi}\cos^2(\theta)\sin^2(\phi) + \dot{\theta}\cos(\phi)\cos(\theta)\sin(\phi))I_{yy} \\ &\quad + (\dot{\psi}\cos^2(\phi)\cos^2(\theta) - \dot{\theta}\cos(\phi)\cos(\theta)\sin(\phi))I_{zz} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Y finalmente calculando las derivadas con respecto al tiempo de las Ecuaciones (3.16), (3.17) y (3.18) se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \dot{\phi}} \right) = I_{xx}(\ddot{\phi} - \ddot{\psi}\sin(\theta) - \dot{\phi}\dot{\psi}\cos(\theta)) = \tau_{\phi} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \dot{\theta}} \right) &= I_{yy}(\ddot{\theta}\cos^2(\phi) - 2\dot{\theta}\dot{\phi}\cos(\phi)\sin(\phi) + \ddot{\psi}\cos(\phi)\sin(\phi)\cos(\theta) \\ &\quad - \dot{\psi}\dot{\phi}\sin^2(\phi)\cos(\theta) + \dot{\psi}\dot{\phi}\cos^2(\phi)\cos(\theta) - \dot{\psi}\dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi)\sin(\theta)) \\ &\quad + I_{zz}(\ddot{\theta}\sin^2(\phi) - 2\dot{\theta}\dot{\phi}\cos(\phi)\sin(\phi) + \ddot{\psi}\cos(\phi)\sin(\phi)\cos(\theta) \\ &\quad - \dot{\psi}\dot{\phi}\sin^2(\phi)\cos(\theta) + \dot{\psi}\dot{\phi}\cos^2(\phi)\cos(\theta) - \dot{\psi}\dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi)\sin(\theta)) = \tau_{\theta} \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \dot{\psi}} \right) &= I_{xx}(-\ddot{\phi}\sin(\theta) - \dot{\phi}\dot{\theta}\cos(\theta) + \ddot{\psi}\sin^2(\theta) + 2\dot{\psi}\dot{\theta}\sin(\theta)\cos(\theta)) \\ &\quad + I_{yy}(\ddot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi)\cos(\theta) - \dot{\theta}\dot{\phi}\sin^2(\phi)\cos(\theta) + \dot{\theta}\dot{\phi}\cos^2(\phi)\cos(\theta) \\ &\quad - \dot{\theta}^2\cos(\phi)\sin(\phi)\sin(\theta) + \ddot{\psi}\sin^2(\phi)\cos^2(\theta) + 2\dot{\psi}\dot{\phi}\cos(\phi)\sin(\phi)\cos^2(\theta) \\ &\quad - 2\dot{\psi}\dot{\theta}\sin^2(\phi)\cos(\theta)\sin(\theta)) + I_{zz}(-\ddot{\theta}\cos(\phi)\sin(\phi)\cos(\theta) + \dot{\theta}\dot{\phi}\sin^2(\phi)\cos(\theta) \\ &\quad - \dot{\theta}\dot{\phi}\cos^2(\phi)\cos(\theta) + \dot{\theta}^2\cos(\phi)\sin(\phi)\sin(\theta) + \ddot{\psi}\sin^2(\phi)\cos^2(\theta) \\ &\quad - 2\dot{\psi}\dot{\phi}\cos(\phi)\sin(\phi)\cos^2(\theta) - 2\dot{\psi}\dot{\theta}\sin^2(\phi)\cos(\theta)\sin(\theta)) = \tau_{\psi} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Una vez calculada la matriz de Coriolis, ésta se utilizará en la siguiente sección para realizar el control rotacional del UAV, es decir, para dirigir el vehículo en la dirección deseada considerando los efectos de Coriolis.

### 3.2. Control rotacional (orientación)

A continuación se presenta el modelo dinámico de orientación [17]. Las ecuaciones de Euler-Lagrange para el movimiento rotacional son:

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})}{\partial \boldsymbol{\eta}} \quad (3.22)$$

Derivando con respecto al tiempo la expresión en paréntesis se obtiene:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\eta}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\eta}} (\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \boldsymbol{\eta}) \quad (3.23)$$

Escribiendo las ecuaciones de Euler-Lagrange en términos de coordenadas rotacionales y utilizando la matriz de Coriolis ya que  $\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) = \dot{\mathbf{J}} - \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\eta}} \left( \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \right)$  se tiene:

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\tau} \quad (3.24)$$

Al realizar el respectivo despeje de las aceleraciones angulares de la Ecuación 3.24 [17] se define la dinámica de rotación como sigue:

$$\ddot{\phi} = \frac{\mathbf{I}_{xx} + \mathbf{I}_{yy} - \mathbf{I}_{zz}}{\mathbf{I}_{xx}} \dot{\psi} \dot{\theta} + \frac{\boldsymbol{\tau}_{\phi}}{\mathbf{I}_{xx}} \quad (3.25)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-\mathbf{I}_{xx} - \mathbf{I}_{yy} + \mathbf{I}_{zz}}{\mathbf{I}_{yy}} \dot{\psi} \dot{\phi} + \frac{\boldsymbol{\tau}_{\theta}}{\mathbf{I}_{yy}} \quad (3.26)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{\mathbf{I}_{xx} - \mathbf{I}_{yy} + \mathbf{I}_{zz}}{\mathbf{I}_{zz}} \dot{\theta} \dot{\phi} + \frac{\boldsymbol{\tau}_{\psi}}{\mathbf{I}_{zz}} \quad (3.27)$$

Para realizar el control de orientación se utilizó la siguiente señal de control:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{J}\boldsymbol{\tau}_{new} \quad (3.28)$$

donde  $\boldsymbol{\tau}_{new}$  es una señal auxiliar dada por:

$$\boldsymbol{\tau}_{new} = k_1 \dot{\mathbf{e}}_{\boldsymbol{\eta}} + k_2 \mathbf{e}_{\boldsymbol{\eta}} + \ddot{\boldsymbol{\eta}}_d \quad (3.29)$$

Es importante mencionar que  $\boldsymbol{\eta}_d$  es el vector de orientación deseado. Por otro lado, el error de orientación está definido como: [17]:

$$\mathbf{e}_{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\eta}_d - \boldsymbol{\eta} \quad (3.30)$$

La dinámica del error se desea que sea:

$$\ddot{e}_\eta + k_1 \dot{e}_\eta + k_2 e_\eta = 0 \quad (3.31)$$

Ya que al momento de realizar la simulación el error se va actualizando y la Ecuación (3.31) permite disminuirlo utilizando ganancias de compensación  $k_1$  y  $k_2$  de tal forma que tienda a cero.

Y la señal de control queda como:

$$\tau = \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{J}(k_1 \dot{e}_\eta + k_2 e_\eta + \ddot{\boldsymbol{\eta}}_d) \quad (3.32)$$

Para cada ángulo ( $\phi, \theta, \psi$ ) se definió una señal de control de orientación rotacional en Matlab partiendo de la Ecuación (3.32), tal que las diferentes señales resultaron como (en código Matlab):

Señal de control rotacional para  $\phi$

$$u(i+1,1) = k1\_phi * e\_phi\_p + k2\_phi * e\_phi + phi\_d2p(i);$$

Señal de control rotacional para  $\theta$

$$u(i+1,2) = k1\_theta * e\_theta\_p + k2\_theta * e\_theta + theta\_d2p(i);$$

Señal de control rotacional para  $\psi$

$$u(i+1,3) = k1\_psi * e\_psi\_p + k2\_psi * e\_psi + psi\_d2p(i);$$

### 3.3. Control de traslación

El modelo dinámico del cuadrirrotor [17] es:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} F_\xi \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

En donde  $\boldsymbol{\tau}$  representa los momentos *roll*, *pitch* y *yaw* y  $F_\xi$  representa la fuerza resultante del movimiento traslacional.

Las ecuaciones de Euler-Lagrange para las coordenadas de traslación son [17]:

$$F_\xi = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}(\xi, \dot{\xi})}{\partial \dot{\xi}} \right) - \left( \frac{\partial \mathcal{L}(\xi, \dot{\xi})}{\partial \xi} \right) \quad (3.34)$$

$$F_\xi = m\ddot{\boldsymbol{\xi}} + mg \quad (3.35)$$

Reescribiendo la Ecuación (3.35) en función del vector de estado  $\boldsymbol{\xi}$  se tiene:

$$\ddot{\boldsymbol{\xi}} = \frac{1}{m} \mathbf{R} * \mathbf{F} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

En donde  $F_\xi = R \times F$  y  $R$  es la matriz de coseno directa y  $F$  el vector de fuerza traslacional.

Para llevar a cabo la parte del control traslacional se utilizaron las siguientes ecuaciones de control de posición [17]:

$$\ddot{x} = \frac{f}{m}(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi) \quad (3.37)$$

$$\ddot{y} = \frac{f}{m}(\cos\phi\sin\theta\cos\psi - \sin\phi\sin\psi) \quad (3.38)$$

$$\ddot{z} = \frac{f}{m}(\cos\phi\cos\theta - g) \quad (3.39)$$

En donde  $m$  es la masa del UAV,  $f$  la fuerza resultante del movimiento traslacional y  $g$  es la fuerza de gravedad.

De igual forma se tuvo que considerar el control de altura dado por

$$f = \frac{m}{\cos\phi\cos\theta}(g + f_{new}) \quad (3.40)$$

En donde  $f_{new}$  es un vector de fuerzas que se están actualizando conforme avanza la simulación.

Para el caso de la posición en el eje  $z$  del UAV, se utiliza  $f_{new}$ .

$$f = \frac{m}{\cos\phi\cos\theta}(g - k_{1z}\dot{e}_\psi - k_{2z}e_\psi + \ddot{\psi}_d) \quad (3.41)$$

A continuación, en las Ecuaciones (3.42) y (3.43) se muestran las entradas de control virtuales, las cuales, a través de la solución de (3.44), proporcionan los ángulos deseados  $\phi_d$  y  $\theta_d$  únicamente, ya que  $\psi$  está considerado en el control de altura dado en la Ecuación (3.41).

$$\mu x = \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \quad (3.42)$$

$$\mu y = \cos\phi\sin\theta\cos\psi - \sin\phi\sin\psi \quad (3.43)$$

$$\begin{bmatrix} \mu x \\ \mu y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\psi & \cos\psi \\ -\cos\psi & \sin\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\phi \\ \cos\phi\sin\theta \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Entonces, sustituyendo (3.37) en (3.42) se tiene

$$\ddot{x} = \frac{f}{m}\mu x$$

De forma análoga sustituyendo (3.38) en (3.43)

$$\ddot{y} = \frac{f}{m}\mu y$$


---

Así, las señales de control para las entradas virtuales son:

$$\mu x = \frac{m}{f}(\mu x_{new})$$

$$\mu y = \frac{m}{f}(\mu y_{new})$$

Error en  $x$  y  $y$ :

$$\mu x = \frac{m}{f}(-k_{1x}\dot{e}_\phi - k_{2x}e_\phi + \ddot{\phi}) \quad (3.45)$$

$$\mu y = \frac{m}{f}(-k_{1y}\dot{e}_\theta - k_{2y}e_\theta + \ddot{\theta}) \quad (3.46)$$

Y los cálculos de los ángulos deseados para  $\phi_d$  y  $\theta_d$  se definen de la forma:

$$\phi_d = \arcsin(\sin\psi\mu x - \cos\psi\mu y) \quad (3.47)$$

$$\theta_d = \arcsin\left(\frac{\cos\psi\mu x + \sin\psi\mu y}{\cos\phi}\right) \quad (3.48)$$



---

# Interfaz de simulación

---

## 4.1. Interfaz de simulación

Para llevar a cabo la interfaz de simulación, se optó por utilizar el modelo de un cuadrirrotor PVTOL en configuración positiva, ya que en los casos de uso mencionados en el Capítulo 1, Sección 1.5.3 se utilizan estos UAVs como ABSs debido a que si se utiliza un dron de ala fija no sería posible realizar vuelos estacionarios. Por tanto, no se podrían realizar trabajos que requieran que el dron este volando fijo a una altura determinada como lo es el fungir como ABS en cierta zona [15]. En este capítulo se describe la interfaz de simulación, es decir, se describe cómo fue la integración de los distintos componentes de simulación para lograr observar los efectos de las perturbaciones aleatorias a la cobertura proporcionada por una ABS.

## 4.2. Simulación de PVTOL en configuración +

Dentro de la clasificación de los vehículos VTOL se pueden encontrar aeronaves con características PVTOL (*Planar Vertical Take off and Landing*). Esta configuración se utiliza comúnmente para estudiar algunas de las propiedades que se presentan en los vehículos VTOL de múltiples rotores. En particular, el PVTOL es una versión simplificada de un vehículo aéreo que se desempeña en el plano vertical, contiene todos los elementos que deben ser considerados al momento de realizar el control para una aeronave real. Tiene seis grados de libertad ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$ ) correspondientes a su posición y orientación en el plano.

En el Capítulo 3 se muestran las ecuaciones de Euler-Lagrange de un vehículo cuadrirrotor, para lo cual se muestra paso a paso el procedimiento que se siguió para derivar el Lagrangiano parcialmente con respecto a un vector  $\eta$ , posteriormente con respecto a la derivada de ese vector ( $\dot{\eta}$ ) y finalmente su derivada con respecto al tiempo ( $d\mathcal{L}/dt$ ).

También se realizó el control rotacional de un vehículo cuadrirrotor utilizando una dinámica rotacional en el Capítulo 3.

### 4.3. Integración de los modelos DWM y UAV tipo cuadirrotor

Para llevar a cabo la simulación, se deben colocar las dinámicas rotacionales y traslacionales del sistema, ya que éstas estarán variando según se busque desplazar u orientar en alguna dirección al vehículo cuadirrotor. Las dinámicas del sistema son:

Para traslación:

$$\ddot{x} = \frac{f}{m}(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi) \quad (4.1)$$

$$\ddot{y} = \frac{f}{m}(\cos\phi\sin\theta\cos\psi - \sin\phi\sin\psi) \quad (4.2)$$

$$\ddot{z} = \frac{f}{m}(\cos\phi\cos\theta - g) \quad (4.3)$$

Para rotación:

$$\ddot{\eta} = \mathbf{J}^{-1}(\tau_B - \mathbf{C}(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}) \quad (4.4)$$

El vector  $\eta$  y el vector  $\xi$  son la orientación y posición, respectivamente, de tal forma que conforme avanza la simulación se tiene una posición y orientación en el UAV.

Ahora bien, para los fines de la presente tesis, se buscó la integración de un modelo de perturbación con el modelo del UAV. En este sentido, en el Capítulo 2 en la Sección 2.4 se describe el funcionamiento del modelo DWM el cual entrega como salidas las componentes lineales de velocidad  $u_g$ ,  $v_g$  y  $w_g$  (ejemplificadas en la Figura 2.17). Estas componentes son los elementos de un vector de perturbación Per dado como

$$\text{Per} = \begin{bmatrix} u_g \\ v_g \\ w_g \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Así, este vector se introduce al modelo matemático del UAV tipo cuadirrotor explicado en el Capítulo 3 como sigue:

$$\dot{\xi} + \text{Per} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_g \\ v_g \\ w_g \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

## 4.4. Descripción de la plataforma de simulación

La plataforma de simulación se organizó como se muestra en el diagrama general de la Figura 4.1. Se optó por realizar la simulación de la plataforma del UAV en Simulink que es un entorno de simulación integrado a Matlab que ofrece una amplia gama de herramientas para simular casi cualquier sistema mediante diagramas de bloques, esto es muy útil ya que en este entorno se introdujo la perturbación Dryden al modelado de la plataforma UAV.

Se tienen como salida en el modelo dinámico del UAV a un vector  $\mathbf{x}$ , este vector contiene a  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ,  $\dot{\phi}$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\dot{\psi}$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  y  $\dot{z}$ , las variables que se utilizarán son  $x_7$ ,  $x_8$  y  $x_9$  correspondientes al desplazamiento del UAV en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente. Asimismo se utilizan las variables  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  que corresponden respectivamente a  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$ . Estos valores se extraen para calcular los niveles de potencia recibida en un programa externo representado en el bloque de la Figura 4.2 e implementado en Matlab.

El cálculo de la potencia recibida se lleva a cabo en condiciones de propagación de espacio libre, es decir, cuando el transmisor y el receptor tienen una línea de visión clara y sin obstáculos entre ellos, para lo cual se utiliza la Ecuación (2.7). En dicha ecuación, se requiere conocer cuál es la distancia entre el transmisor y receptor, es por ello que en la Figura 4.2 se muestra a  $z$  como entrada hacia el bloque “Cálculo de potencia recibida”, al hacer esto se obtiene la matriz de potencia recibida en tierra, según sea el caso se obtendrá una matriz de  $n \times n$  datos, para las simulaciones mostradas en el Capítulo 5 se obtuvieron matrices de niveles de potencia de  $1000 \times 1000$  datos, cada posición de la matriz corresponde a 1 m en tierra.

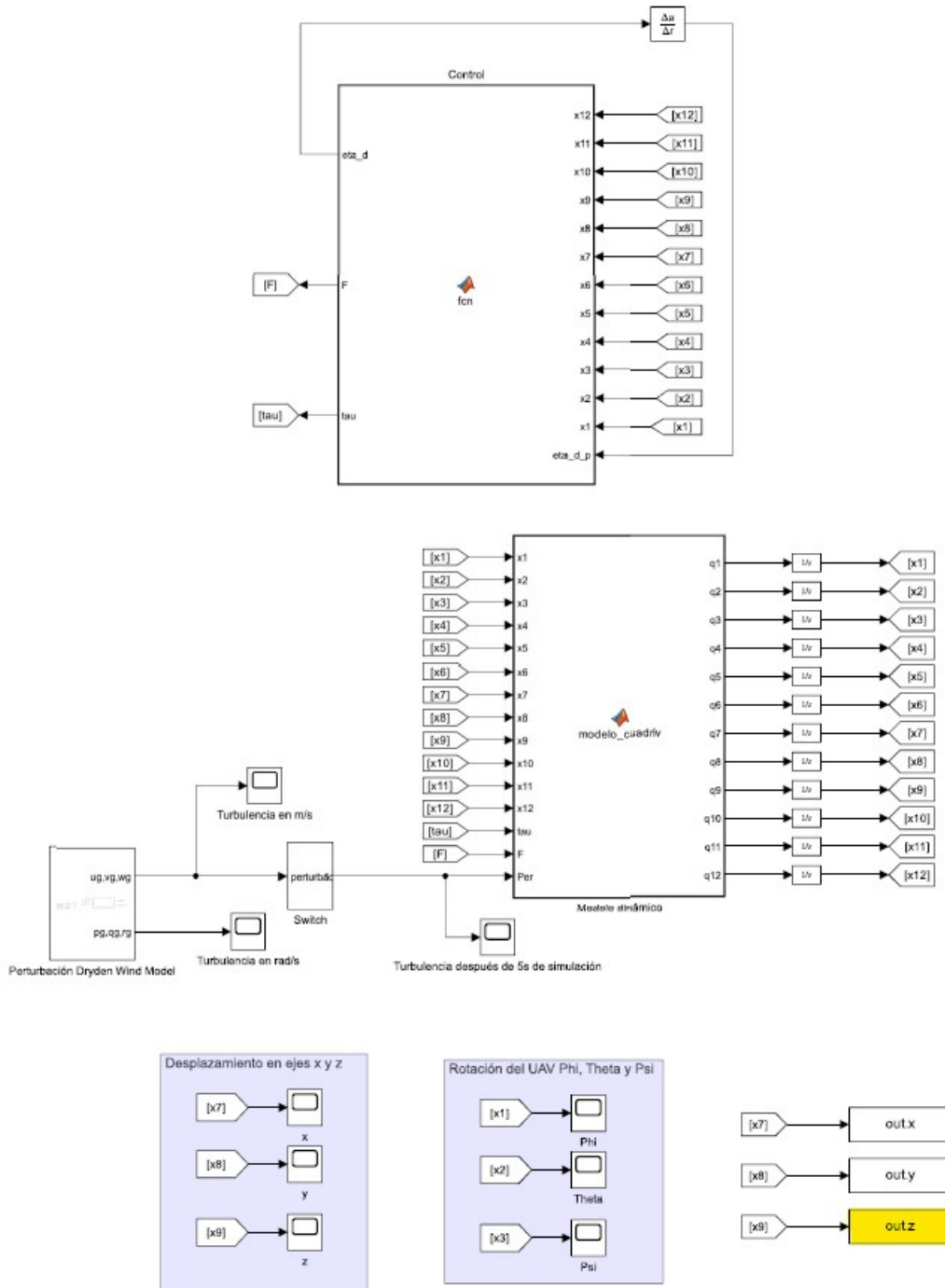


Figura 4.1: Diagrama a bloques de la plataforma de simulación.

Ahora bien, en el diagrama general de la Figura 4.1 se incluye el bloque de control, el cual para facilitar su visualización se muestra en la Figura 4.3 y el modelo dinámico implementado en el bloque mostrado en la Figura 4.4. Obsérvese que en este último se utiliza un bloque de perturbación siguiendo el modelo DWM explicado en el Capítulo 2 y cuyo resultado se explica en el Capítulo 5 con el fin de observar variaciones en las posiciones del UAV. Una vez que varíen las posiciones en el UAV, la cobertura también cambiará de posición debido a que

los niveles de potencia recibidos no serán los mismos para los usuarios en tierra debido a la posición y ángulo de inclinación  $\alpha$  que tenga el UAV. En la Figura 4.1 se está marcando una etiqueta amarilla la cual representa la altura  $z$  que será utilizada como entrada en el programa de potencia recibida mostrado en la Figura 4.2 (y etiquetada en amarillo también).

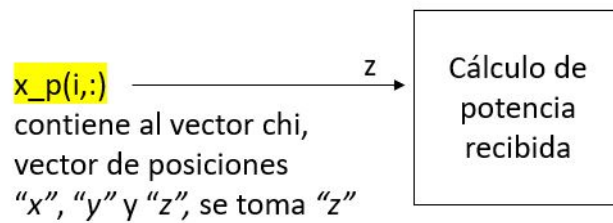


Figura 4.2: Variables de entrada al bloque del cálculo de potencia recibida

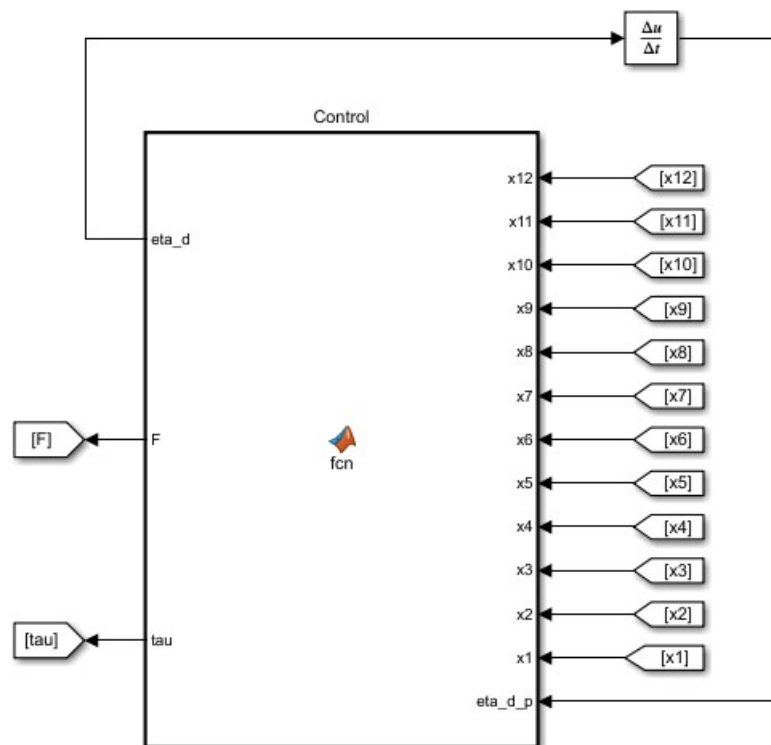


Figura 4.3: Bloque del control del sistema

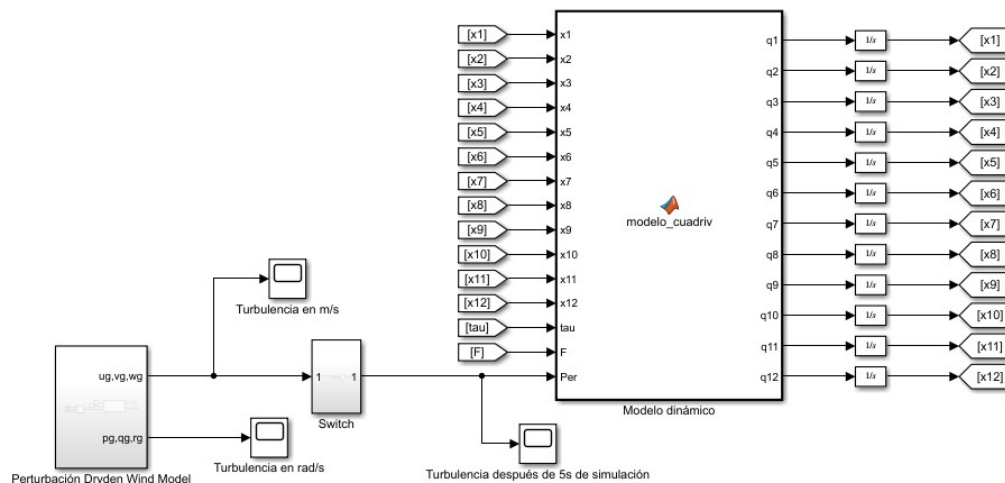


Figura 4.4: Bloque del modelo dinámico del sistema

Por otra parte, en el diagrama de bloques mostrado en la Figura 4.1 se muestran en la parte inferior, 2 bloques: “Desplazamiento en ejes x y z” y “Rotación del UAV Phi Theta y Psi” cuyas variables se extraen para ser utilizadas en el programa de espacio libre implementado en Matlab. Vale la pena mencionar que este programa se utilizó en la simulación que se mostró previamente en el Capítulo 2 en la Sección 2.2, donde las variables a extraer fueron  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$  para obtener el ángulo de elevación y así observar cómo es que cambia el área de cobertura de manera geométrica.

Finalmente, es importante mencionar que para las simulaciones del Capítulo 5 se utilizarán estos parámetros extraídos con el objetivo de saber a qué distancia se encuentra cada usuario con respecto a la ABS, es decir a qué distancia se encuentra el transmisor con respecto a cada uno de los receptores.

Para la parte de los receptores que corresponden a usuarios en tierra, se realizó una distribución aleatoria de diez mil usuarios en una matriz de  $1000 \times 1000$  m, al haber distribuido de forma aleatoria esa cantidad de usuarios, no se sabe de primera instancia cuántos usuarios quedarán dentro del área de cobertura, por lo que se tendrán resultados más realistas en cuanto al comportamiento que tendría una ABS con respecto a usuarios en tierra.

---

## Simulación y análisis de resultados

---

En el presente capítulo se presentan los resultados de simulación obtenidos, así como un análisis de los mismos. Las simulaciones se realizaron con la misma plataforma ABS bajo distintas circunstancias. Básicamente, en la primera simulación se muestra cómo la ABS realiza un desplazamiento sin perturbaciones, mostrando al final el área de cobertura lograda y tomada como referencia. Para los siguientes casos, se incluye una perturbación aleatoria, la cual modifica la posición deseada final de la ABS, por lo que impacta directamente en el área de cobertura deseada.

Al existir una perturbación aleatoria, como se mencionó en el Capítulo 2 el área que la ABS cubre se ve modificada, debido a ello es de gran importancia el estudio de lo que se mostrará en este capítulo, es decir, cómo afectan las perturbaciones aleatorias en una ABS y a los usuarios en tierra.

### 5.1. Parámetros generales de las simulaciones

Se utilizaron parámetros generales de simulación, los cuales se eligieron en base a la literatura existente, los cuales son: potencia de transmisión  $P_t$  de 0.316 W que equivale a 25 dBm que es utilizada para ABSs en redes 5G [27]. Se consideró que la ABS y los puntos de recepción sobre esta área (puntos de prueba) contaban con antenas isotrópicas con ganancia unitaria y la frecuencia de operación se dejó fija a 2.4 GHz.

En cuanto a las simulaciones del DWM, los parámetros usados para generar las perturbaciones son:  $h$  (altura) igual a la salida correspondiente a  $z$  de la plataforma de simulación, viento moderado 6.9444 m/s y viento fuerte 13.8889 m/s en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

### 5.2. Resultados de simulación de la plataforma UAV sin perturbaciones

La Figura 5.1 muestra el desplazamiento del UAV en los ejes,  $x$ ,  $y$  y  $z$ , donde puede observarse que es una línea recta. Esto se debe a que no hay perturbación alguna en el UAV, el cual se desplazó siguiendo los parámetros especificados de tal forma que éste se elevara hasta 10 m en

un primer movimiento y descendiera a 5 m en un segundo movimiento.

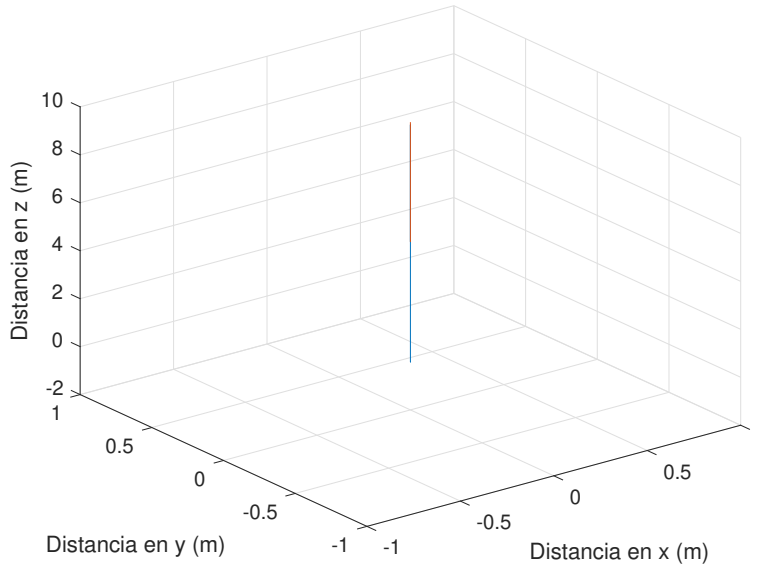


Figura 5.1: Movimiento del UAV sin perturbación

Los ángulos de alabeo, cabeceo y guiñada del UAV se tomaron como nulos, con el fin de observar el comportamiento del vehículo en condiciones ideales, es decir, sin perturbaciones. Los resultados de simulación para este caso se muestran en la Figura 5.2.



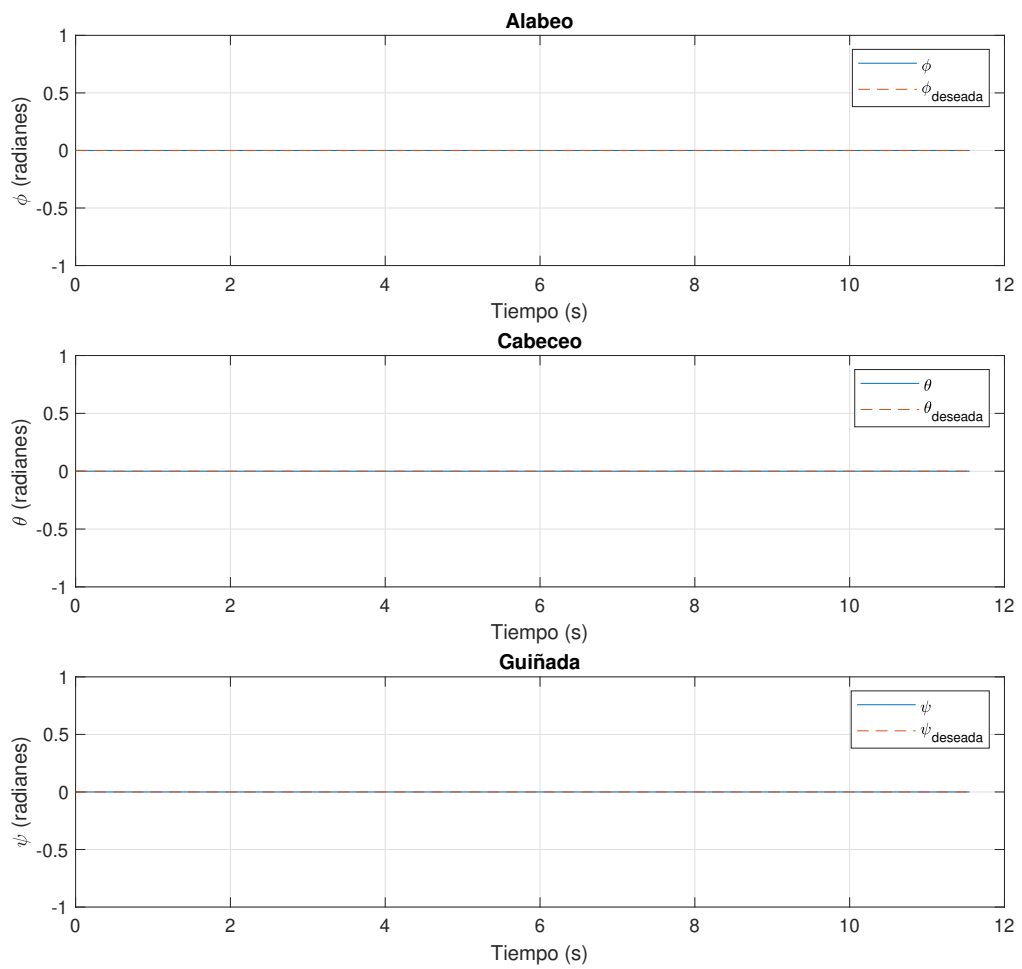


Figura 5.2: Resultados de simulación de los ángulos de alabeo, cabeceo y guiñada cuando el UAV no tiene perturbaciones.

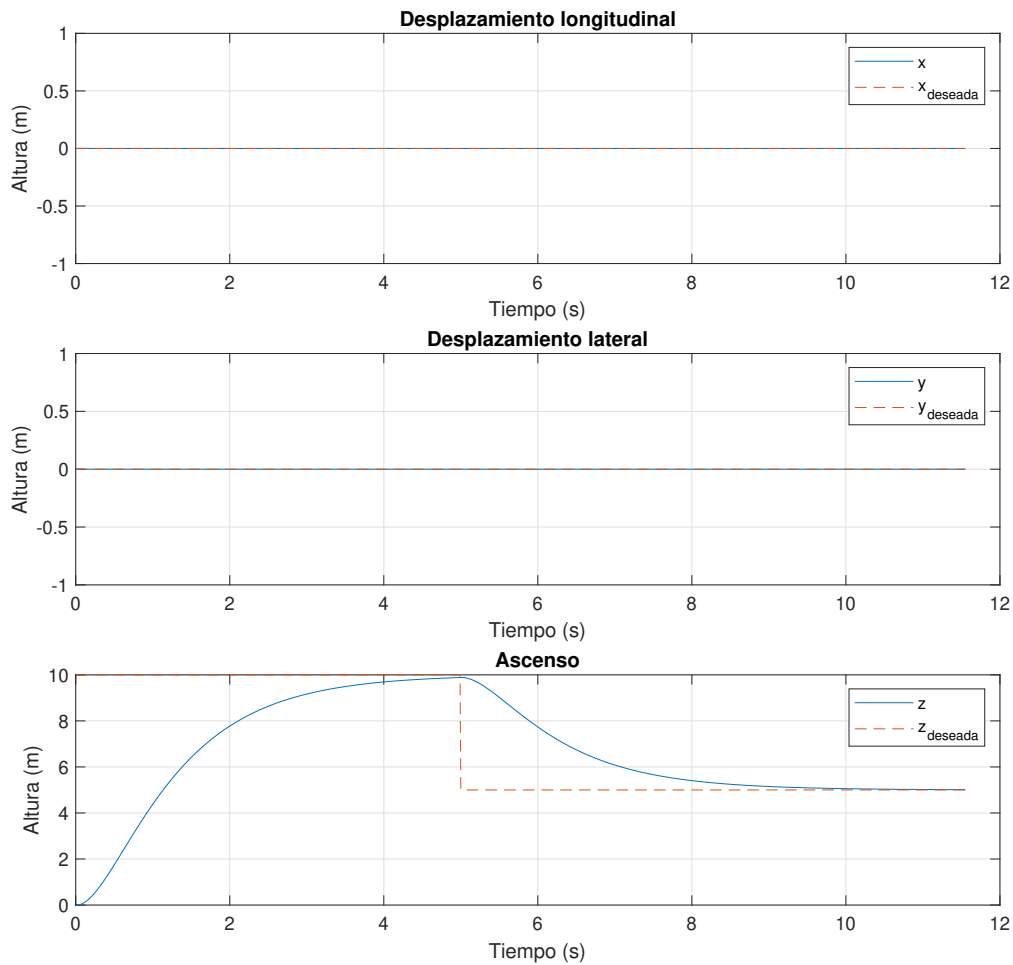


Figura 5.3: Resultados de simulación en los 3 ejes sin considerar perturbaciones en el UAV. Desplazamiento longitudinal, desplazamiento lateral, ascenso.

En la Figura 5.3 se muestra cómo el desplazamiento del vehículo UAV en los ejes  $x$  y  $y$  es nulo, ya que como primera simulación se realizó únicamente el desplazamiento en el eje  $z$ . En esta figura se puede apreciar el movimiento del UAV en el eje  $z$  (ascenso) en función del tiempo y también se puede observar cómo el UAV llega a elevarse 10 m de altura y posteriormente descende 5 m dentro del tiempo de simulación que se especificó (5 s).

Ahora bien, en el marco de esta primera consideración para el dron (sin perturbaciones) se realizó una simulación para observar los niveles de potencia recibidos en un área de 1000 m por 1000 m elevando al dron a una altura de 5 m y en condiciones de propagación de espacio libre. El resultado de esta simulación se muestra en la Figura 5.4, la cual ilustra la distribución de potencias recibidas al ras del suelo. El círculo amarillo representa el área de cobertura en donde dentro del círculo los niveles de potencia recibidos son mayores a -90 dBm y fuera son menores.

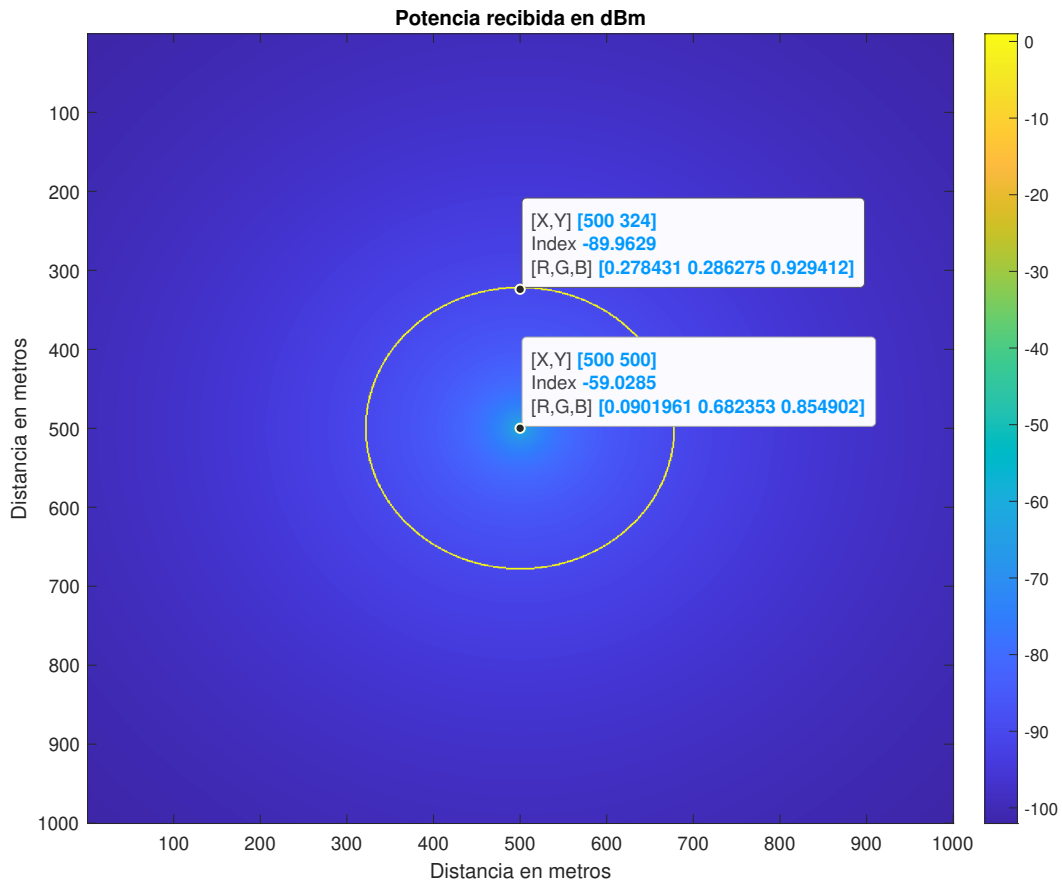


Figura 5.4: Potencia recibida en condiciones de espacio libre con la ABS a 5 m de altura.

### 5.3. Resultados de simulación de la plataforma UAV con perturbaciones

#### 5.3.1. Efectos de las perturbaciones en el UAV

A continuación se muestran los resultados del desplazamiento del UAV una vez que se introdujo una perturbación aleatoria. En este caso se utilizó el bloque que representa al modelo DWM explicado en el Capítulo 2 el cual genera turbulencias aleatorias. Se iniciaron estas perturbaciones una vez que el UAV se encuentra en modo *hover*, que para este caso fue 5 s después de haber iniciado la simulación. En las Figuras 5.5 y 5.6 se presenta el resultado de esta simulación en donde se pueden apreciar tres gráficas, cada una de ellas corresponde a una componente de velocidad lineal como se mencionó en el Capítulo 2 en la Sección 2.4. La gráfica de color verde representa a  $u_g$ , la gráfica de color azul corresponde a  $v_g$  y por último la gráfica de color naranja muestra el comportamiento de  $w_g$ .

Los desplazamientos obtenidos en cada eje de la ABS, se utilizan para realizar la simulación de niveles de potencia recibidos, distribuyendo en un área de  $1000 \times 1000$  m a 10000 usuarios terrestres, los cuales se quedan en posiciones fijas mientras que la ABS cambia de posición debido a la perturbación aleatoria.

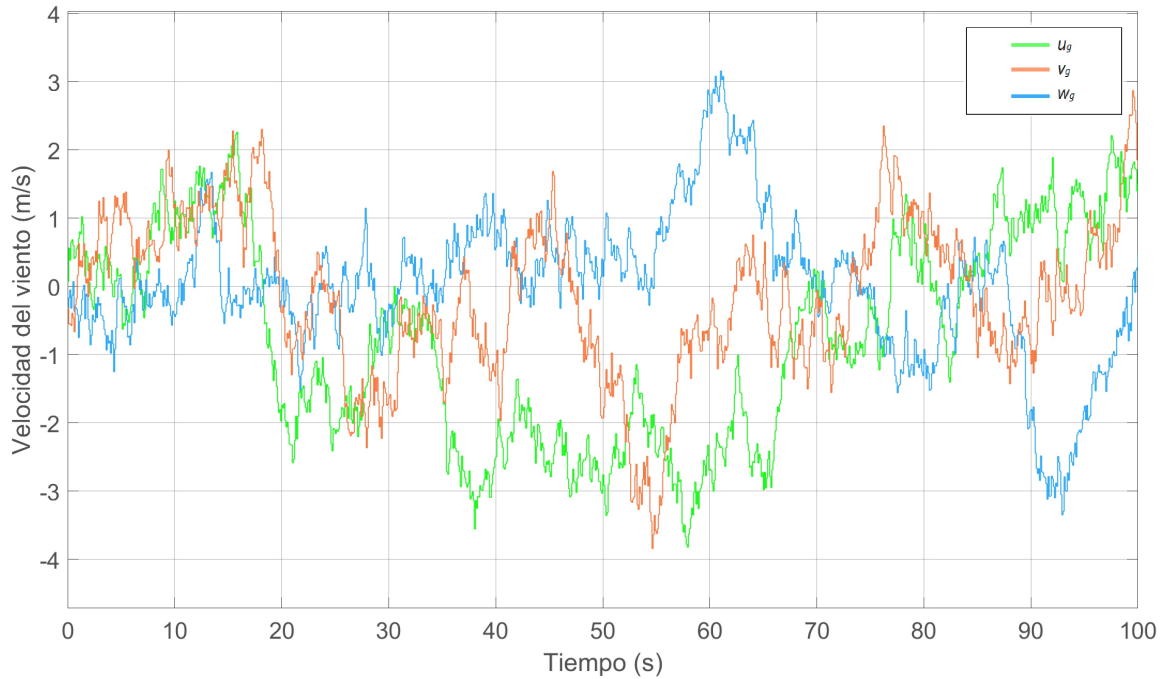


Figura 5.5: Resultados de simulación del vector de perturbaciones basado en el DWM.

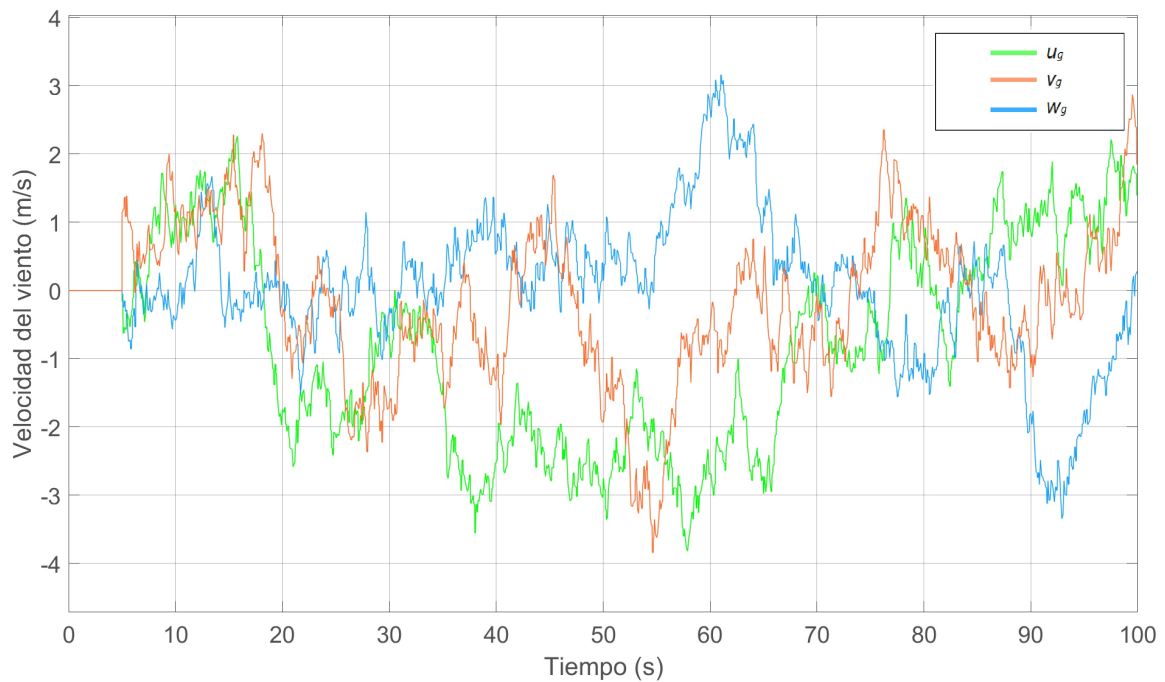


Figura 5.6: Resultados de simulación del vector de perturbaciones basado en el DWM inicializado a los 5 segundos

La diferencia entre las Figuras 5.5 y 5.6 es que en la segunda en los primeros 5 s de simulación no se introduce ninguna perturbación a diferencia de la primera figura.

Estas perturbaciones aleatorias modifican el comportamiento del UAV en cuanto a la posición, lo cual hace que se modifiquen los parámetros con los que se calculan los niveles de potencia recibida. En las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se puede observar cómo se modifican las posiciones respecto a los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente, conforme avanza el tiempo. En la Figura 5.7 se puede observar el desplazamiento del UAV respecto al eje  $x$  el cual varía de 1 a 2 m. Vale la pena mencionar que una distancia positiva en esta figura indica que el UAV se mueve hacia delante y si es negativa se mueve hacia atrás. En la Figura 5.8 se puede observar que el comportamiento es parecido hacia ambas direcciones, en este caso la distancia positiva representa un movimiento del UAV hacia la derecha y la negativa hacia la izquierda. Para el caso de la Figura 5.9 la distancia positiva indica que el UAV se está elevando y si es negativa está descendiendo.

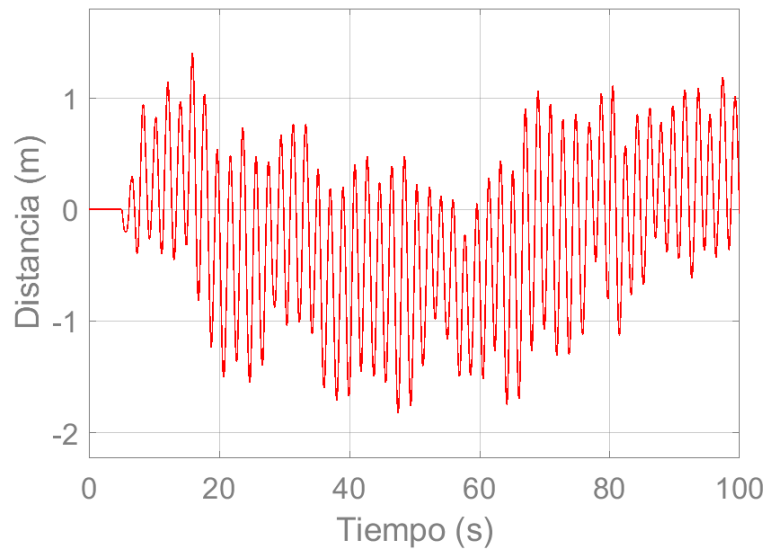


Figura 5.7: Desplazamiento del UAV en el eje  $x$

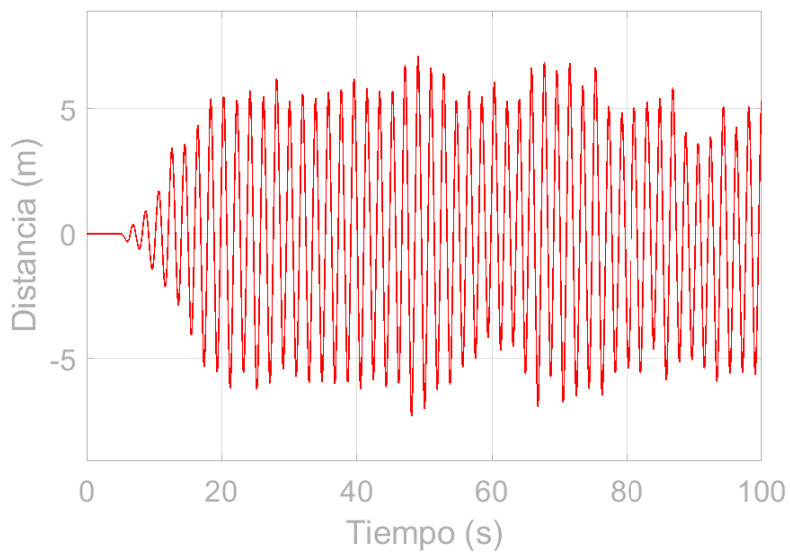
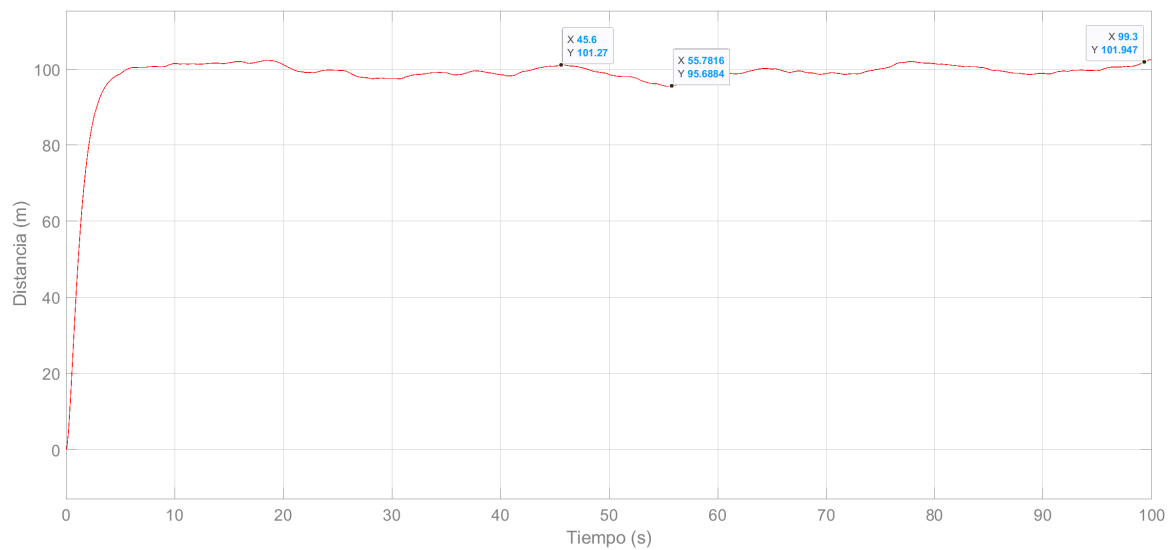
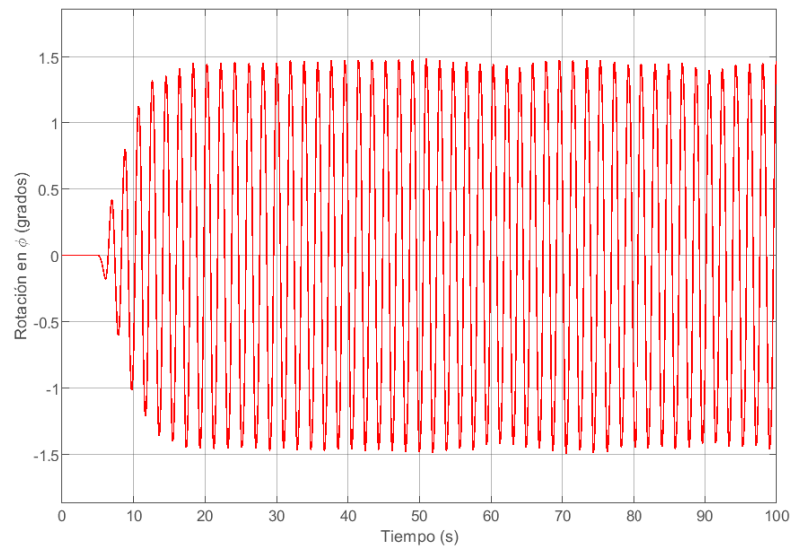


Figura 5.8: Desplazamiento del UAV en el eje  $y$

Figura 5.9: Desplazamiento del UAV en el eje  $z$ 

De manera análoga a la modificación de las posiciones del UAV, se tiene una modificación en los ángulos  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$  tal como se puede apreciar, respectivamente, en las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12. Los resultados para los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  son menores a  $1.5^\circ$  y para el caso de  $\psi$  la variación es casi nula ya que como puede observarse en la Figura 5.12 la escala es del orden de  $10^{-16}$  m. Como se mostró en el Capítulo 2 en la Sección 2.2 al utilizar una antena isotrópica y tener una variación muy pequeña en los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  la forma del área de cobertura no se verá afectada de manera significativa.

Figura 5.10: Rotación en  $\phi$

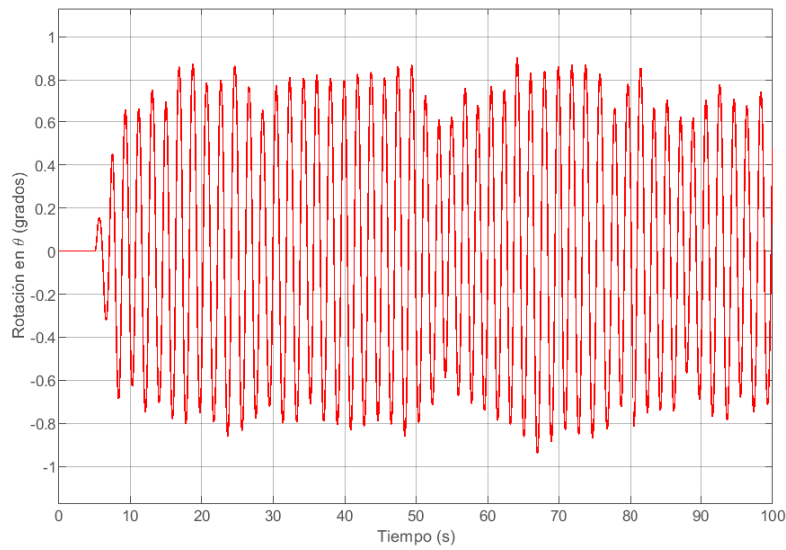


Figura 5.11: Rotación en  $\theta$

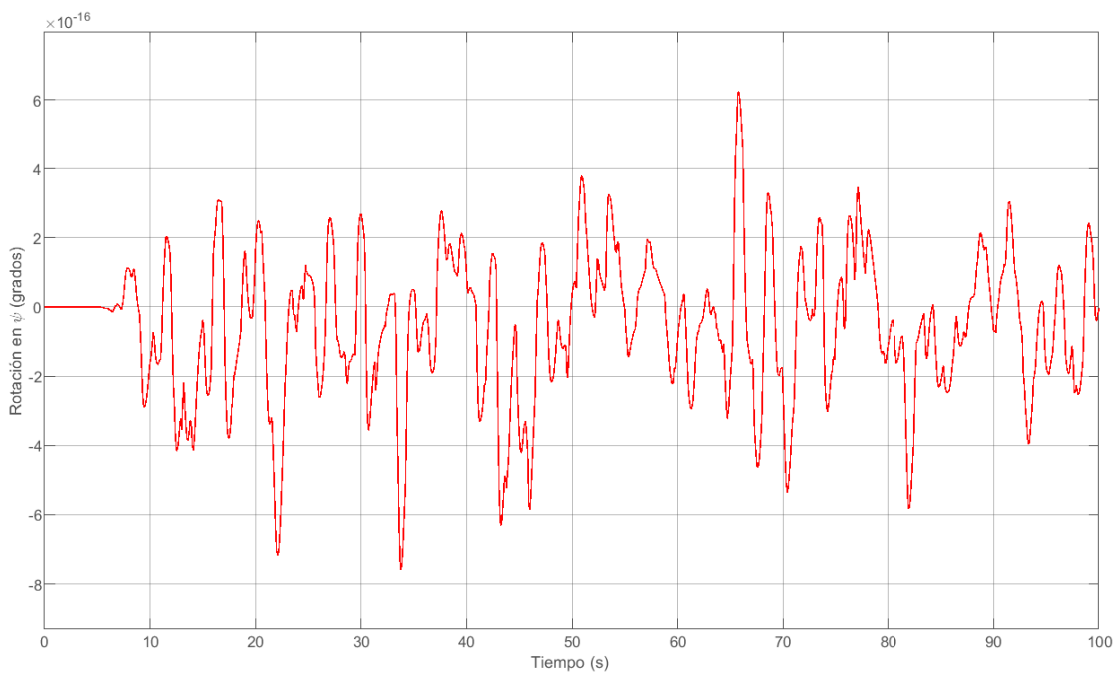


Figura 5.12: Rotación en  $\psi$

### 5.3.2. Efectos de las perturbaciones en la cobertura de una ABS

A continuación se muestran y explican los resultados de simulación del efecto de las perturbaciones en el área de cobertura que puede dar una UAV operando como una ABS. Estos resultados se grafican utilizando el comando *imagesc* en MATLAB, el cual produce una matriz de colores, donde cero es el valor máximo que se puede obtener; este valor comienza junto a la



posición en la que se encuentra la ABS, también en el umbral de cobertura que se definió. En las figuras que se muestran en esta sección [XY] representa la posición en el plano  $x, y$  de la ABS, Index muestra el valor de potencia recibida en dBm y [R,G,B] indica la escala de color del plano en la coordenada que se encuentra el usuario terrestre.

El efecto de las perturbaciones en el UAV en la cobertura que ofrece puede observarse al comparar los resultados de simulación cuando la ABS se eleva a 100 m de altura. En la Figura 5.13 se muestra el área de cobertura antes de la perturbación y en la Figura 5.14 se muestra 100 s después de la perturbación. A fin de tener una comparación justa, ambas figuras tienen marcadores en la misma coordenada [437 372] del plano.

Como se puede observar, los niveles de potencia recibidos en esa coordenada cuando no hay perturbación (Figura 5.13) son mayores a -90 dBm que es el umbral para tener una buena cobertura en la red 5G, por lo que un usuario en esa posición estaría dentro del área de cobertura proporcionada por la ABS. Por otro lado, el nivel de potencia recibida en la misma coordenada cuando la ABS experimenta las perturbaciones (Figura 5.14) ya no se encuentra dentro del área de cobertura original, por lo tanto el usuario no contaría con una buena cobertura.

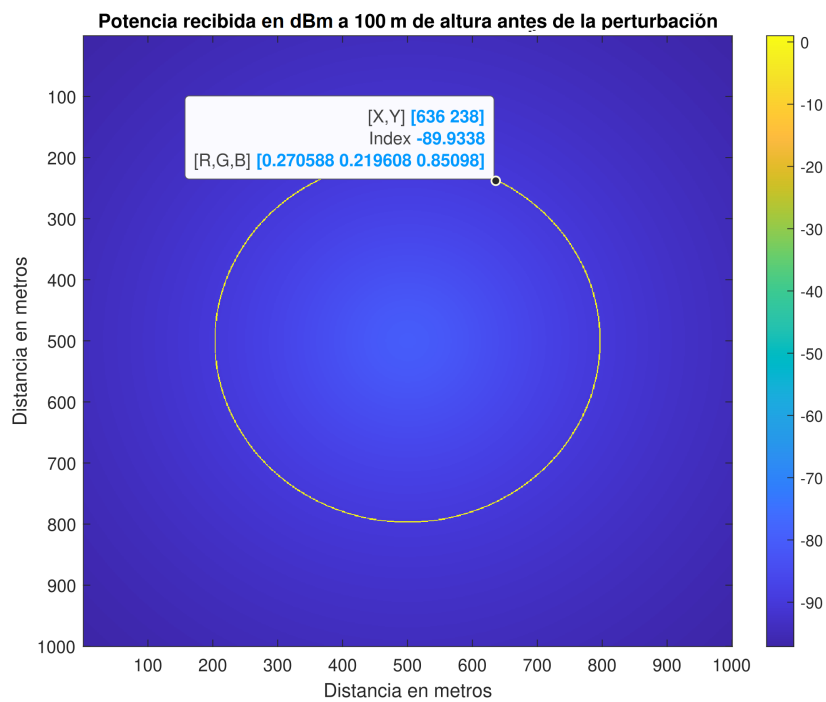


Figura 5.13: Potencia recibida antes de la perturbación

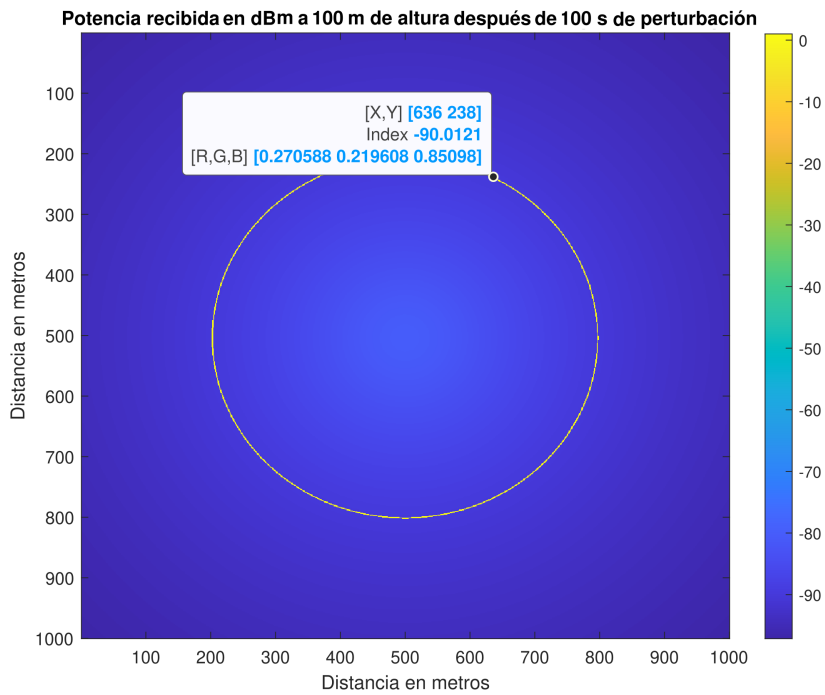


Figura 5.14: Potencia recibida después de la perturbación

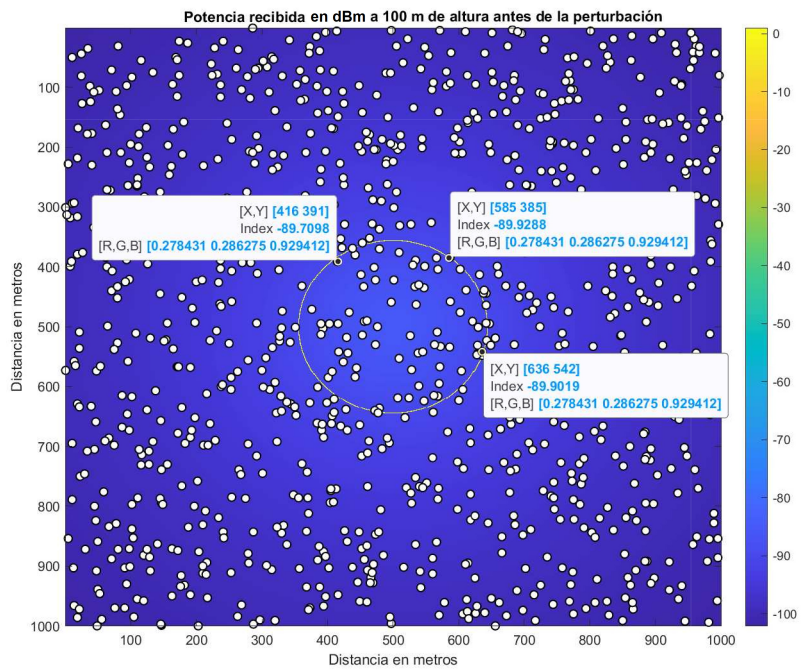


Figura 5.15: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura antes de la perturbación

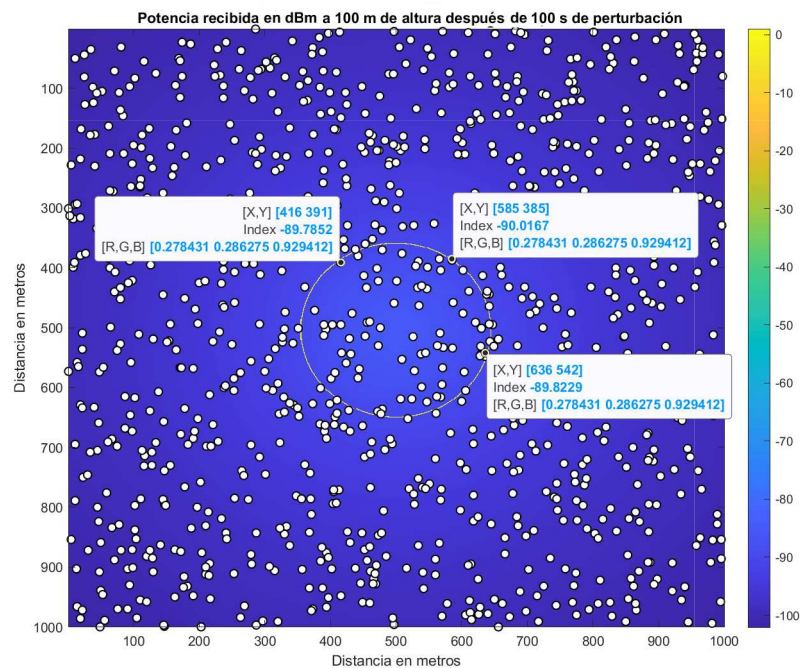


Figura 5.16: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura después de la perturbación

Posteriormente se hizo un análisis cuantitativo para conocer cuál es el porcentaje del número de usuarios que aún cuentan con servicio de cobertura después que la ABS ha sido perturbada. Para ello se distribuyeron 1000 usuarios en un área de  $1000 \times 1000$  m. Los resultados de este análisis se muestran en las Figuras 5.15 y 5.16 para los casos antes y después de la perturbación, respectivamente.

Como se puede ver, existen usuarios que se encuentran en el límite del área de cobertura, por lo que al desplazarse el UAV, estos pueden dejar de estar o no dentro del área de cobertura. Para este análisis únicamente se considerarán usuarios que se encuentren dentro de la zona de cobertura antes de la perturbación. Se puede apreciar que en la Figura 5.16 únicamente un usuario que se encontraba en los límites de la zona de cobertura, que se encuentra en las coordenadas [585 385] ya no está recibiendo un nivel de potencia que esté sobre -90 dBm, por lo que ya no se encuentra en la zona de cobertura limitada por este umbral de potencia.

Bajo estas condiciones y con el fin de ilustrar lo expuesto hasta aquí, se analizó el porcentaje de usuarios afectados por el cambio de cobertura de un UAV debido a las perturbaciones. Inicialmente se tenían 74 usuarios fijos dentro del área de cobertura del UAV sin perturbaciones. Después, al término de la perturbación se tienen 73 usuarios dentro del área, esto implica una reducción al 98.64 % de usuarios. Es importante notar, que para poder sacar este porcentaje no se consideraron nuevos usuarios que pudieran quedar en la nueva área de cobertura generada por la perturbación del UAV.

Con el objetivo de observar el comportamiento del área de cobertura en más detalle, en

### 5.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LA PLATAFORMA UAV CON PERTURBACIONES

una siguiente simulación, se capturaron muestras en intervalos de 10 s, cuyos resultados se muestran a continuación, en las Figuras 5.17 a 5.27. Asimismo, en la Tabla 5.1 se muestra el porcentaje de usuarios que se encuentra dentro del área de cobertura en tiempos específicos.

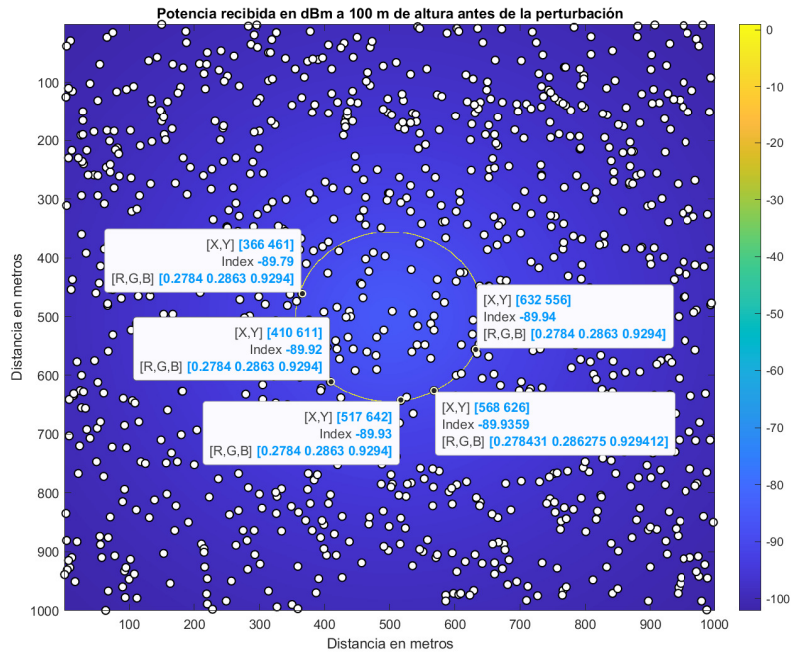


Figura 5.17: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura antes de la perturbación (5 s)

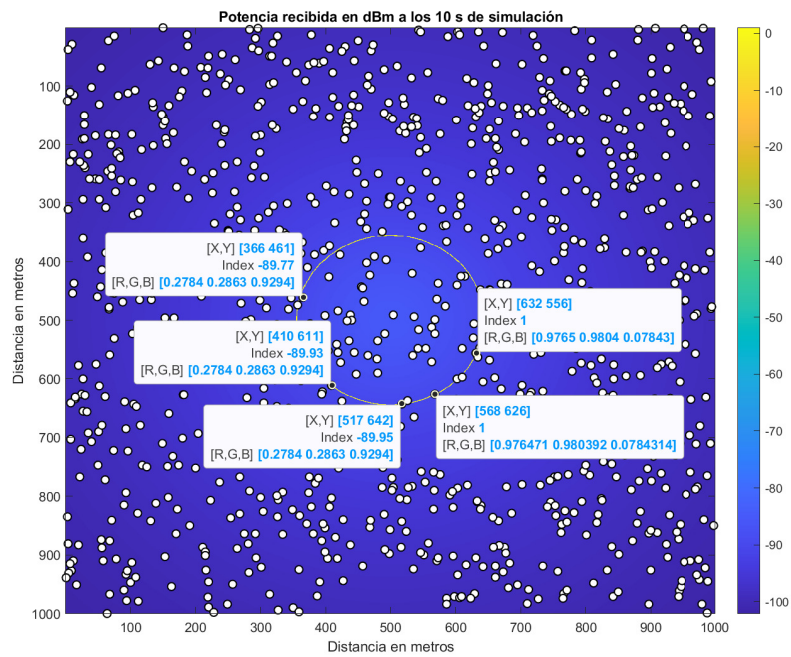


Figura 5.18: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (10 s)

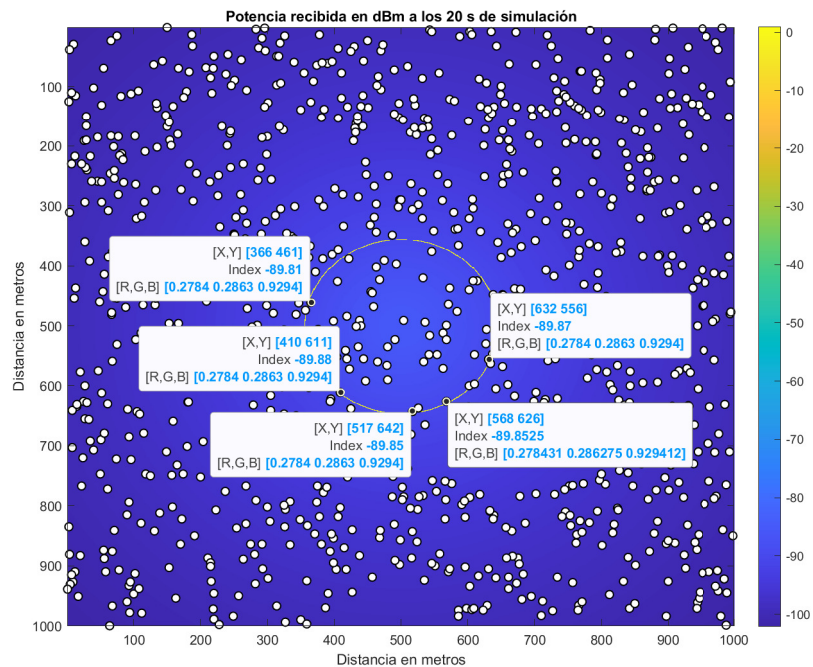


Figura 5.19: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (20 s)

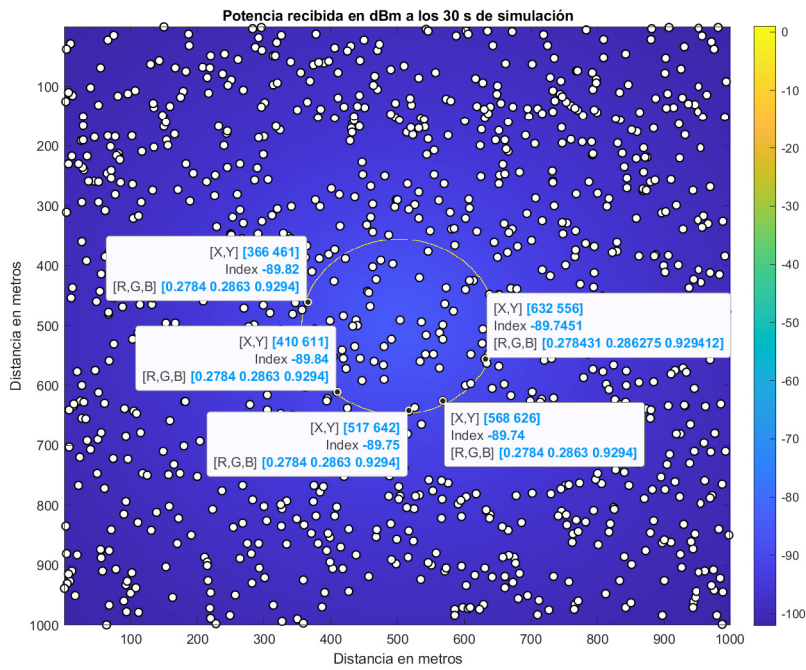


Figura 5.20: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (30 s)

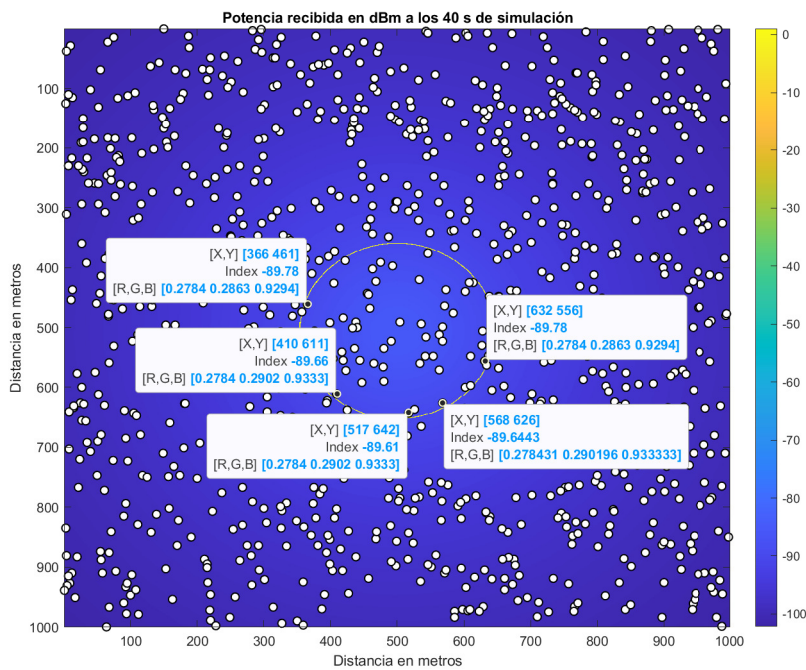


Figura 5.21: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (40 s)

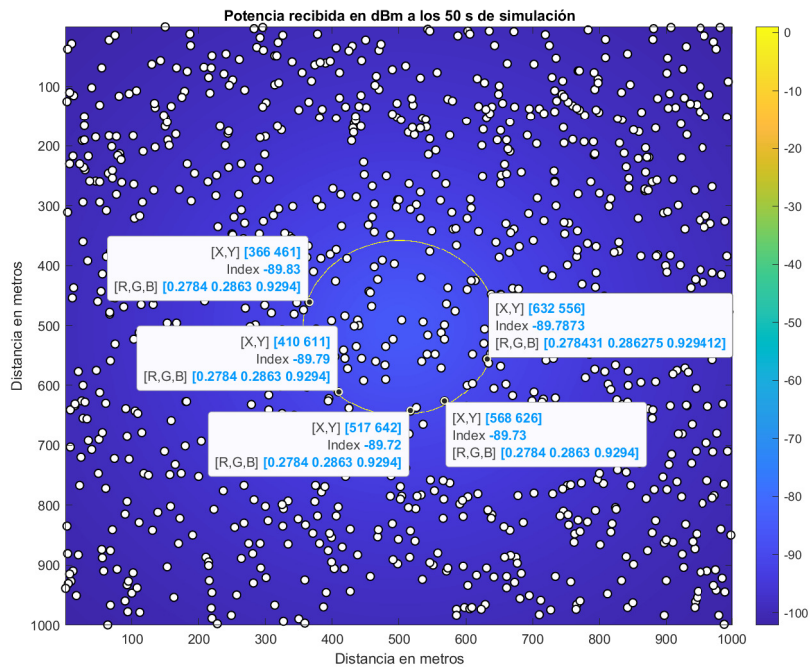


Figura 5.22: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (50 s)

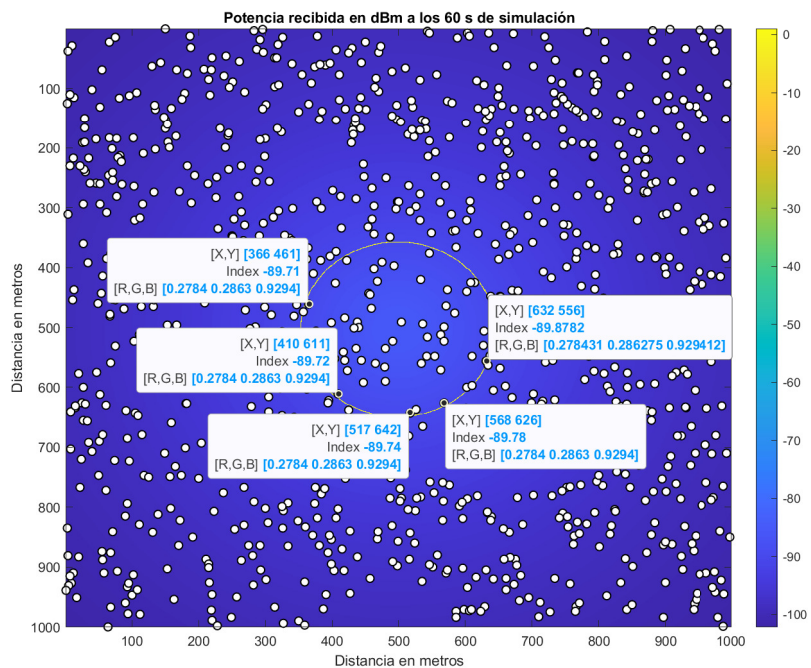


Figura 5.23: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (60 s)

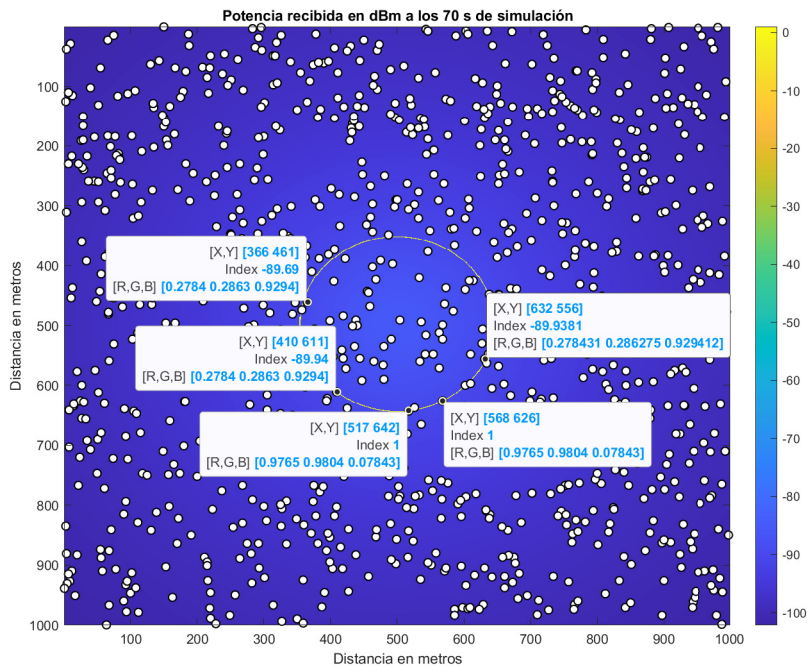


Figura 5.24: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (70 s)

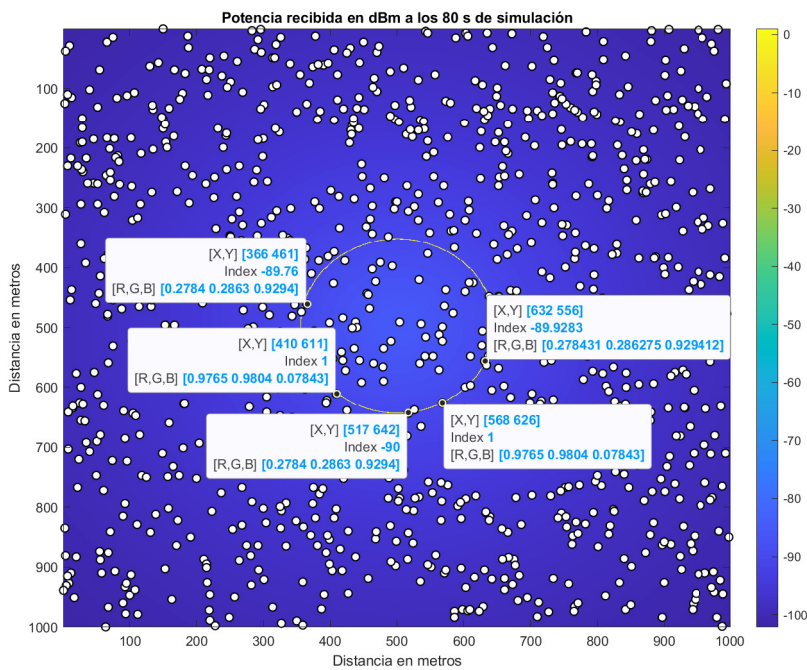


Figura 5.25: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (80 s)



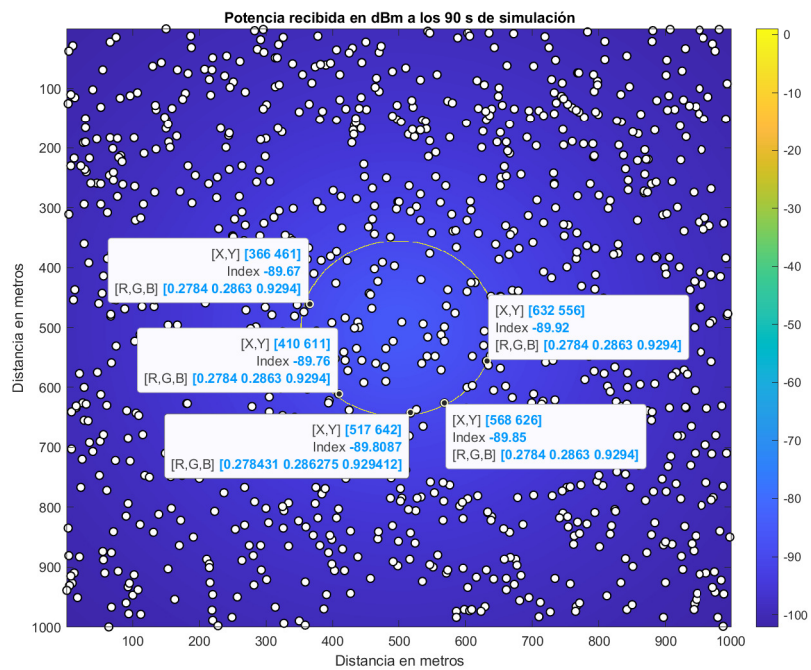


Figura 5.26: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura durante la perturbación (90 s)

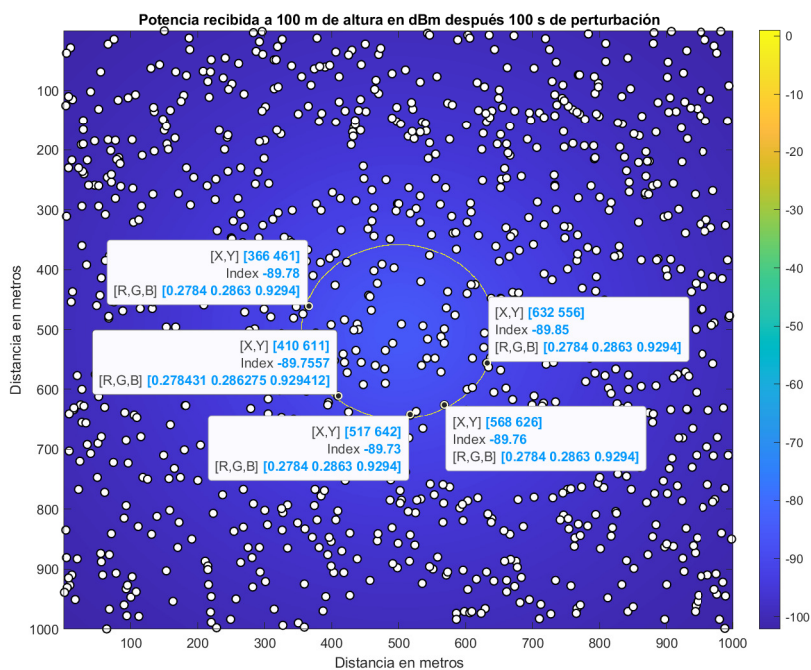


Figura 5.27: Usuarios distribuidos dentro de la zona de cobertura al termino de la simulación (100 s)

Tiempo (s)	Número de usuarios	Porcentaje
5	63	100 %
10	61	96.8 %
20	63	100 %
30	63	100 %
40	63	100 %
50	63	100 %
60	63	100 %
70	61	96.8 %
80	60	95.2 %
90	63	100 %
100	63	100 %

Tabla 5.1: Porcentaje de usuarios dentro del área de cobertura

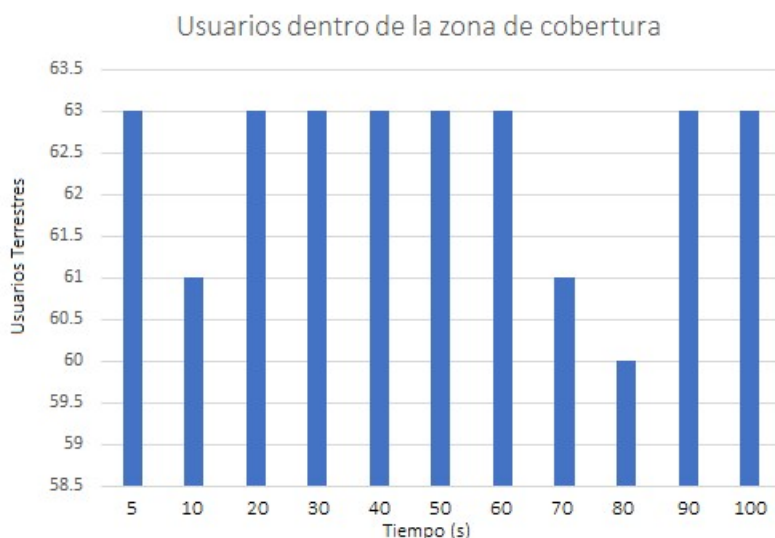


Figura 5.28: Histograma de la cantidad de usuarios que se encuentran dentro del área de cobertura

El histograma de la Figura 5.28 muestra a los usuarios que estuvieron dentro del área de cobertura en un tiempo de simulación de 100 s. Como se puede observar, se inició con 63 usuarios dentro de la zona de cobertura y a lo largo de la simulación en el segundo 80 se contaba con 60 usuarios, por lo que se puede ver los efectos de las perturbaciones en el área de cobertura, que son una pérdida de ésta para los usuarios que se encuentran cerca del umbral.

Al inicio de esta simulación, se fijaron 5 usuarios que se encuentran dentro de la zona de cobertura, en las posiciones [366 461], [410 611], [517 642], [568 626] y [632 556], los cuales se seleccionaron debido a que se encuentran en el borde de la zona de cobertura, lo que significa

que si la zona de cobertura proporcionada por la ABS varía, son más propensos a dejar de recibir niveles de potencia para obtener un servicio de buena calidad.

En las Figuras 5.18, 5.24 y 5.25 se observa que algunos de estos usuarios dejan de recibir cobertura. Como se explicó antes, cuando la potencia recibida por un usuario en particular es menor a -90 dBm, se despliega Index = 1 (indicando que el usuario está fuera de la cobertura) y en caso contrario, Index se pone con el valor exacto de potencia recibida. Es decir, mientras sea mayor a -90 dBm el usuario se encuentra dentro de la zona de cobertura. Así, por ejemplo, en la Figura 5.18 los usuarios ubicados en las posiciones [568 626] y [632 556] salen del área de cobertura, pero 10 s después vuelven a estar dentro, véase la Figura 5.19.

Ahora bien, en el caso de los resultados mostrados en la Figura 5.24 también se puede apreciar que salen dos usuarios del área de cobertura, pero a diferencia de lo observado en la Figura 5.18 las posiciones son [517 642] y [568 626], de tal forma que el usuario [632 556] en este momento sí se encuentra dentro del área de cobertura. Al pasar 10 s más, la cantidad de usuarios que se encuentran fuera del área de cobertura aumentó, como se puede ver en la Figura 5.25 en donde los usuarios en las posiciones [517 642] y [568 626] siguen fuera y a su vez el usuario en la posición [410 611] sale del área de cobertura, mientras que en las Figuras 5.26 y 5.27 se puede observar que nuevamente se encuentran dentro.

Debido a que el UAV se encuentra en movimiento constante, el área de cobertura varía. Con el objetivo de observar cómo varían los niveles de potencia recibida en función de la altura del UAV, se realizaron simulaciones a 25, 50 y 100 m de altura. En las Tablas 5.2 a 5.3 se muestran los resultados obtenidos en términos de la media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) del desplazamiento del UAV respecto a cada uno de los 3 ejes, donde se utilizó viento moderado de 6.9444 m/s y viento fuerte de 13.8889 m/s para ver si variaban demasiado. Como se esperaba la variación es mayor cuando se realiza la simulación con un viento fuerte.

Los resultados en términos de desviación estándar mostrados en la Tabla 5.2 reflejan que a menor altura para un viento fuerte se tiene un mayor desplazamiento en el eje  $x$ ; para el eje  $y$  el desplazamiento es mayor a 100 m de altura (Aunque el orden de magnitud de los resultados en las tres alturas es comparable); y para el eje  $z$  se observa una desviación estándar del orden de 10 % de la altura del UAV, por lo tanto, hay una mayor variación a mayor altura. Por otro lado, los resultados para viento moderado se muestran en la Tabla 5.3. Como se puede observar se tiene una mayor variación en el eje  $x$  cuando el UAV se encuentra a 100 m de altura, mientras que para el eje  $y$  esta variación es mayor a 50 m de altura (aunque prácticamente se encuentra en el mismo orden que las otras alturas). Finalmente, de la misma forma que resultó para viento fuerte la desviación estándar es este caso, varía en un 10 % aproximadamente en el eje  $z$ , por lo que se observa un mayor desplazamiento a 100 m de altura del UAV.

Vale la pena recordar que para el eje  $x$  una media positiva indica que la ABS se mueve hacia delante y si es negativa se mueve hacia atrás. Para el caso del eje  $y$  la media positiva representa un movimiento hacia la derecha y la negativa hacia la izquierda y para el eje  $z$  la media positiva indica que la ABS se está elevando y si es negativa está descendiendo.

Viento fuerte						
Altura	100 m		50 m		25 m	
Eje	$\mu$ (m)	$\sigma$ (m)	$\mu$ (m)	$\sigma$ (m)	$\mu$ (m)	$\sigma$ (m)
$x$	0.0636	0.6789	0.0270	0.7290	-0.0079	0.7774
$y$	-0.0198	3.9072	0.0991	3.8378	0.0084	3.7405
$z$	98.4659	10.2329	49.0894	5.0759	24.3890	2.7548

Tabla 5.2: Estadísticas para viento fuerte

Viento moderado						
Altura	100 m		50 m		25 m	
Eje	$\mu$ (m)	$\sigma$ (m)	$\mu$ (m)	$\sigma$ (m)	$\mu$ (m)	$\sigma$ (m)
$x$	-0.1635	0.8683	-0.2205	0.7295	-0.2197	0.7221
$y$	0.0665	3.4405	-0.0734	4.0032	-0.0235	3.9915
$z$	98.3152	11.0750	49.0292	5.0789	24.3623	2.8029

Tabla 5.3: Estadísticas viento moderado

Al tener a usuarios distribuidos al azar en cada simulación, la cantidad de usuarios dentro del área de cobertura nunca es la misma, así como la cantidad de usuarios que se tiene al término de la simulación. En las Tablas 5.4 y 5.5 se muestran los resultados obtenidos después de correr 50 veces la simulación, con el objetivo de observar el efecto de la cobertura en 50 mil usuarios distribuidos en un área de  $1000 \times 1000$  m recibiendo la señal de una ABS a 100 m de altura y observando cuántos usuarios se tenían dentro o fuera en cada corrida y así finalmente conseguir un porcentaje de la cantidad de usuarios que se encuentran dentro del área de cobertura.

Número de simulación	Usuarios inicialmente	Usuarios al terminar	Porcentaje
1	63	62	98.41 %
2	74	71	95.94 %
3	70	70	100 %
4	50	49	98 %
5	71	71	100 %
6	69	68	98.55 %
7	74	74	100 %
8	80	80	100 %
9	55	54	98.18 %
10	62	60	96.77 %
11	77	76	98.70 %
12	62	60	96.77 %
13	58	57	98.27 %
14	69	66	95.65 %
15	53	52	98.11 %
16	61	61	100 %
17	58	57	98.27 %
18	82	81	98.78 %
19	65	63	96.92 %
20	76	75	98.68 %
21	75	75	100 %
22	64	63	98.43 %
23	63	60	95.23 %
24	83	80	96.38 %
25	57	57	100 %

Tabla 5.4: Porcentaje de usuarios dentro del área de cobertura tras realizar 50 simulaciones (simulación 1 - 25)

5.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LA PLATAFORMA UAV CON  
PERTURBACIONES

72

Número de simulación	Usuarios inicialmente	Usuarios al terminar	Porcentaje
26	56	54	96.42 %
27	69	68	98.55 %
28	53	52	98.11 %
29	54	54	100 %
30	66	65	98.48 %
31	83	82	98.79 %
32	67	66	98.50 %
33	75	75	100 %
34	48	47	97.91 %
35	76	74	97.36 %
36	65	65	100 %
37	56	54	96.42 %
38	75	74	98.66 %
39	71	69	97.18 %
40	62	60	96.77 %
41	87	85	97.70 %
42	77	77	100 %
43	63	62	98.41 %
44	59	58	98.30 %
45	61	58	95.08 %
46	56	54	96.42 %
47	75	74	98.66 %
48	71	68	95.77 %
49	55	52	94.54 %
50	74	73	98.64 %

Tabla 5.5: Porcentaje de usuarios dentro del área de cobertura tras realizar 50 simulaciones (simulación 26 - 50)

Al realizar un promedio de los usuarios que se encuentran dentro del área de cobertura inicialmente, se tiene que son 66 usuarios inicialmente y al término 65, por lo que el porcentaje de usuarios dentro del área de cobertura tras 50 corridas de simulación es de 98.48 %. Observando los resultados obtenidos en las Tablas 5.4 y 5.5 se observa que en la mayoría de los casos queda fuera un solo usuario tras el término de la simulación.

Como se demostró en la simulación anterior, en el transcurso de una corrida, el número de usuarios que están dentro del área de cobertura varía, esto da una idea de cuántos usuarios quedarán fuera dentro de un intervalo de tiempo determinado.

# Conclusiones

---

El objetivo del presente trabajo de tesis fue realizar un análisis de cobertura proporcionada por una estación base aérea (ABS), para lo cual se utilizó el modelo matemático de un cuadrirrotor, incluyendo un transreceptor con una antena isotrópica para proporcionar dicha cobertura. Para analizar la cobertura en tierra proporcionada por la ABS, se utilizó un modelo de propagación de espacio libre, como primera aproximación para obtener los niveles de potencia recibidos.

Asimismo, se realizó una simulación en donde existe una perturbación aleatoria en el cuadrirrotor, la cual desplaza la ABS y afecta la cobertura proporcionada a los usuarios que se encuentren dentro de ella, la cual puede mejorar o empeorar.

Las perturbaciones de este tipo no se pueden predecir de forma inmediata, ya que son aleatorias: una vez que alteran la posición y orientación de la ABS el control realizará el trabajo de mantenerlo estable, aunque no es de manera inmediata si la perturbación es muy abrupta, ya que tomará un tiempo al UAV volver a su posición deseada.

El estudio cuantitativo de la cobertura proporcionada por una ABS es de gran importancia debido a su integración en redes de comunicación 5G. En este trabajo se realizaron simulaciones para observar cómo varía el área de cobertura al introducir perturbaciones aleatorias a la ABS para afectar el ángulo  $\alpha$  de la ABS.

Al utilizar un viento fuerte como perturbación, los niveles de potencia para usuarios que se encuentran en las orillas del área de cobertura se ven más afectados que los que se encuentran en el centro, ya que el UAV se desplaza de forma aleatoria en el plano XY. Ahora bien, los niveles de potencia recibidos por los usuarios en el borde no empeoran de manera muy drástica, lo cual se observó en las simulaciones a través del porcentaje de usuarios que se mantiene dentro del área de cobertura (siempre fue mayor al 90 %).

En cuanto a la altura de la ABS, ésta tiene mayor impacto en la cobertura, por ejemplo, para viento moderado, al estar el UAV más cerca del suelo no se observa una pérdida de cobertura mayor al 5 %, mientras que a mayor altura del UAV, se tiene 6 % como máximo de pérdida de cobertura. Por otro lado, la velocidad del viento cuando es mayor genera más desplazamientos en el UAV, aun así el porcentaje de usuarios dentro de la cobertura se mantiene arriba del 90 %.

Al tener en cuenta cómo está siendo afectado el porcentaje del área de cobertura, en un trabajo

posterior se pueden considerar otras características del UAV en términos de tamaño, peso y potencia (SWAP), ya que éstas son las características básicas para los casos de uso de un UAV funcionando como ABS.

Adicionalmente, como trabajo futuro a este proyecto se propone la implementar una ABS que tenga que cubrir una zona en la que se tenga cierta cantidad de usuarios distribuidos y observar si existe una perturbación que logre desplazar al drone a tal punto que no pueda cubrir el servicio para algún usuario.

De igual forma, el modelo de propagación puede incluir obstáculos para obtener una simulación para estos escenarios si se considera que el UAV operando como ABS se encuentra en una zona boscosa en donde la cobertura proporcionada por una BS convencional es tenue o inexistente de tal forma que los niveles de potencia recibida a lo largo de un plano no serían uniformes.

Pasaría algo parecido a lo que se mostró con el uso de una antena con ganancias proporcionadas por algún fabricante, donde la distribución de niveles de potencia recibidos dependería del entorno. Así es como se podría seleccionar de mejor forma qué antena utilizar en dado caso.

---



# Bibliografía

---

- [1] Huamán Palma. R. A. Diseño de un sistema de ampliación de cobertura celular para las bandas de frecuencia en 850 MHz y 1900 MHz. 2018.
- [2] Rossmann. M. R. A. El espectro de frecuencias y sus aplicaciones. *Asociación de docentes pensionistas universidad nacional mayor de san marcos ASDOPEN-UNMSM*, page 3, 2014.
- [3] Pino. D. R. Aguilera. M. J. F, Paz. H. R. S. Diseño de la cobertura celular para brindar servicios de telefonía móvil. *Tono, Revista Técnica de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba SA*, 9(2):18–24, 2012.
- [4] Sam Allison, He Bai, and Balaji Jayaraman. Estimating wind velocity with a neural network using quadcopter trajectories. In *AIAA Scitech 2019 Forum*, page 1596, 2019.
- [5] Himanshi Babbar, Shalli Rani, Ahmad Ali AlZubi, Aman Singh, Nidal Nasser, and Asmaa Ali. Role of network slicing in software defined networking for 5G: Use cases and future directions. *IEEE Wireless Communications*, 29(1):112–118, 2022.
- [6] Zhu. Q Li. H Chen. X Zhong. W. Bai. F, Pang. M and Ahmed. N. A 3GPP-based height-dependent LoS probability model for A2G communications. In *2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pages 1–5. IEEE, 2021.
- [7] Van Veen. B.D. and Buckley. K.M. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Magazine*, 5(2):4–24, 1988.
- [8] Luca Chiaraviglio, Marco Fiore, Edouard Rossi, Marco Ajmone Marsan, Nicola Blefari Melazzi, and Stefano Buzzi. 5G technology: Which risks from the health perspective. *The 5G Italy Book*, 2019.
- [9] Bao. D. The truths and myths of 5G deployment – a technical perspective. *Insights, Mobile Technologies*, 2019.
- [10] Pérez. D. L. Ding. M. Please lower small cell antenna heights in 5G. In *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6. IEEE, 2016.

- 
- [11] Méndez Gómez, J. E. et al. Comportamiento y rendimiento de las comunicaciones directas aire–tierra de banda ancha (BDA2GC) basadas en las nuevas tecnologías de radio 5G. 2018.
- [12] Riofrío Vaca, A. E. Análisis del estado del arte e innovación en las tecnologías de sistemas de comunicaciones inalámbricas 5G. B.S. thesis, 2016.
- [13] Jose R Fermin and Jairo Beltrán. Modelos de propagacion electromagnetica para telefonía móvil. 2012.
- [14] Cárdenas Soto, A. M. Fernández McCann, D. S and Marín Lopera, G. A. Telefonía móvil celular: sistemas AMPS y TACS: estudio comparativo. 1997.
- [15] Azade Fotouhi, Haoran Qiang, Ming Ding, Mahbub Hassan, Lorenzo Galati Giordano, Adrian Garcia-Rodriguez, and Jinhong Yuan. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(4):3417–3442, 2019.
- [16] Ding, M. Fotouhi, A and Hassan, M. Dronecells: Improving 5G spectral efficiency using drone-mounted flying base stations. *arXiv preprint arXiv:1707.02041*, 2017.
- [17] Fabio Alfonso Gonzalez, ME Afanador Cristancho, and EF Niño López. Modelamiento y simulación de un quadrotor mediante la integración de simulink y solidworks. *Maskay*, 9(1):15–24, 2019.
- [18] Michael H Gorn. *Hugh L. Dryden's Career in Aviation and Space*. Number 5. NASA History Office, 1996.
- [19] Teuku Mohd Ichwanul Hakim and Ony Arifianto. Implementation of dryden continuous turbulence model into simulink for LSA-02 flight test simulation. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1005, page 012017. IOP Publishing, 2018.
- [20] Mario Patricio Herrera Holguín and Juan Carlos Inclán Luna. Estudio y metodología de diseño de antenas utilizando geometría fractal (antenas fractales). B.S. thesis, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2004.
- [21] year=2017 Hortelano Sancho, C. B. Caracterización de dispositivos wi-fi comerciales para su aplicación en comunicaciones entre UAVs y dispositivos de tierra.
- [22] José Manuel Huidobro. Antenas de telecomunicaciones. *Revista digital de acta*, 4, 2013.
- [23] Huamantuma Anco, A. J. Estudio de la aplicabilidad de redes inalámbricas formadas por vehículos aéreos no tripulados para dar soporte de comunicaciones ante un desastre natural. *Pontificia Universidad Católica del Perú*, 2020.
- [24] Matolak, D. W Fiebig, U-C Khawaja, W, Guvenc, I and Schneckenburger, N. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3):2361–2391, 2019.
-

- 
- [25] Benjamin D Levine and James Stray-Gundersen. “living high-training low”: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of applied physiology*, 1997.
- [26] Miramá-Pérez. V. F Londoño-García. J. E, Velasco-Arcos. R and Hernández. C. M. Cobertura de un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico con control ideal de potencia y movilidad en los usuarios. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(4):557–567, 2018.
- [27] Dilip Mandloi and Rajeev Arya. Seamless connectivity with 5G enabled unmanned aerial vehicles base stations using machine programming approach. *Expert Systems*, 39(5):e12828, 2022.
- [28] Fakhreddine. A Luque. J. L Emini. D Muzaffar. R, Raffelsberger. C and Bettstetter. C. First experiments with a 5G-connected drone. In *Proceedings of the 6th ACM Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications*, pages 1–5, 2020.
- [29] Bai. F Li. Z Li. H Mao. K. Pang. M, Zhu. Q and Tian. Y. Height-dependent LoS probability model for A2G mmWave communications under built-up scenarios. *arXiv preprint arXiv:2109.02263*, 2021.
- [30] Shah. V Patel. S and Kansara. M. Comparative study of 2G, 3G and 4G. 3:2456–3307, 09 2018.
- [31] Anders Persson. The coriolis effect. *History of Meteorology*, 2:1–24, 2005.
- [32] Fang. F Pham. Q-V, Le. M Le. L. B Hwang. W-J Ha. V. N, Piran. M. J, and Ding. Z. A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art. *IEEE Access*, 8:116974–117017, 2020.
- [33] Manuel J Reinoso, Luis I Minchala, Paul Ortiz, Darwin F Astudillo, and Diego Verdugo. Trajectory tracking of a quadrotor using sliding mode control. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5):2157–2166, 2016.
- [34] Bhandarkar. S. and Kammar. R. 4G technology. 01 2016.
- [35] Markovskii. V. S, Fominykh. A. A., and Matveev. N. V. Simulation of air-to-ground based on cellular network. In *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, pages 1–4. IEEE, 2021.
- [36] Chiranjib Saha, Mehrnaz Afshang, and Harpreet S. Dhillon. Integrated mmwave access and backhaul in 5G: Bandwidth partitioning and downlink analysis. In *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, 2018.
- [37] Tabassum. H. Sekander. S and Hossai. E. Multi-tier drone architecture for 5G/B5G cellular networks: Challenges, trends, and prospects. *IEEE Communications Magazine*, 56(3):96–103, 2018.
- [38] Lin. S Ono. F Tsuji. H Takizawa. K, Kagawa. T and Miura. R. C-band aircraft-to-ground (A2G) radio channel measurement for unmanned aircraft systems. In *2014 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pages 754–758, 2014.
-

- [39] Chen. S. Tang. Q, Wei. Z and Cheng. Z. Modeling and simulation of A2G channel based on UAV array. In *2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pages 500–506. IEEE, 2020.
- [40] Tipos de Antenas y Funcionamiento. <https://www.wni.mx/index.php?option=comcontent-view=articleid=62:antenasoportecatid=31:generalitemid=79: :text=patrones %20de %20radiaci %c3 %b3n %3a,y %20el %20patr %c3 %b3n %20de %20azimuth.>, Revisado el 21 de Abril 2022.
- [41] T\_C Tozer and David Grace. High-altitude platforms for wireless communications. *Electronics & communication engineering journal*, 13(3):127–137, 2001.
- [42] Finnish Transport and Communications Agency. Definitions for communications services and networks used in traficom’s statistics and requests for information.
- [43] Hazardous Weather Phenomena Turbulence. <http://www.bom.gov.au/aviation/knowledge-centre/>. Revisado el 21 de Abril 2022.
- [44] Sheng. M Zhao. N. Xie. Z, Liu. J and Li. J. Exploiting aerial computing for air-to-ground coverage enhancement. *IEEE Wireless Communications*, 28(5):50–58, 2021.
- [45] Huo. Y. and Dong. X. Millimeter-wave for unmanned aerial vehicles networks: Enabling multi-beam multi-stream communications. *arXiv preprint arXiv:1810.06923*, 2018.
- [46] Li. Y. Yang. G, Lin. X, Wu. D Rydén. H. Cui. H, Xu. M, and Redhwan. S. B. A telecom perspective on the internet of drones: From LTE-advanced to 5G. *arXiv preprint arXiv:1803.11048*, 2018.
- [47] Lyu. J. Zeng. Y and Zhang. R. Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies. *IEEE Wireless Communications*, 26(1):120–127, 2018.
- [48] Wu. H Qiu. C Zhu. J, Wei. Z and Feng. Z. Capacity of uav-assisted air-to-ground communication with random perturbation of uav platform. In *2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pages 275–279. IEEE, 2020.
-