

# Esquema de triangulación para detectar drones usando GNU Radio y equipos SDR

R. Jaimes Rico<sup>1</sup>, S. Lazcano Salas<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Centro Universitario UAEM Valle de México, Boulevard Universitario S/N Valle Escondido, Río San Javier, 54500, Cd. López Mateos, México.  
[roger-jr97@hotmail.com](mailto:roger-jr97@hotmail.com)<sup>1</sup>, [slazcanos@uaemex.mx](mailto:slazcanos@uaemex.mx)<sup>2</sup>

**Área de participación:** *Sistemas Computacionales*

## Resumen

Los sistemas de radar se basan en la emisión de ondas electromagnéticas que permite detectar objetos a una determinada distancia, gracias al eco generado por dichas señales. Poseen una extensa gama de aplicaciones, abarcando desde lo militar, aeronáutica hasta apoyo en la meteorología, por citar algunas. Una aplicación que ha cobrado importancia en los últimos años, es la detección de vehículos aéreos no tripulados (drones), gracias al uso en el ámbito civil y a la amplia oferta de modelos, marcas y configuraciones en el mercado. Usar estos dispositivos en algunas zonas restringidas como aeropuertos o helipuertos, puede representar riesgos, sin mencionar las posibles violaciones a leyes y reglamentos vigentes. En este sentido, este artículo se centra en una propuesta para detectar drones, basado en la triangulación de la señal del controlador del mismo, basado en un entorno de radio definida por software (SDR) empleando radios HackRF One y GNU Radio.

**Palabras clave:** *SDR, Radar, GNURadio, Drones.*

## Abstract

The radar systems are based on the emission of an electromagnetic waves that can detected objects, due to echo generated by those signals. These systems can be used in several areas such as the military, aeronautics and to support meteorology. An application that has been important in the recent years, have been unmanned aerial vehicles (UAV). This due to the civil uses and the big offers of models, brands and configuration on the market. The use of these devices is restricted in some zones such as airports or helipads, can be a real risk, not to mention possible violations of the law and regulations in force. In that sense, the article focuses on the proposal of a drone detection system, this is based on triangulation of the controller signal, based on a software-defined radio environment (SDR) that use HackRF One and GNU Radio.

**Key words:** *SDR, Radar, GNURadio, Drones.*

## Introducción

Radar, o en sus siglas originales en ingles *Radio Detection and Ranging* es un dispositivo con la capacidad de detectar objetos en una determinada área, mediante su distancia y rango (de ahí su nombre) de acuerdo a su punto de emisión, esto se logra por medio de pulsos electromagnéticos; esta tecnología se ha ido mejorando y modificando con el pasar del tiempo, tomándose como alternativa cuando el ojo humano no es muy confiable, por otro lado no es capaz de detectar formas o colores, limitándose únicamente a informar de la posición de un objeto [1].

La estructura básica de un radar se constituye por un transmisor, un receptor, un duplexor (que permite usar la misma vía de antena para recibir o emitir señales) y una antena, por último, la información obtenida se procesa y posteriormente se muestra en un monitor [2] como se muestra en la Figura 1.

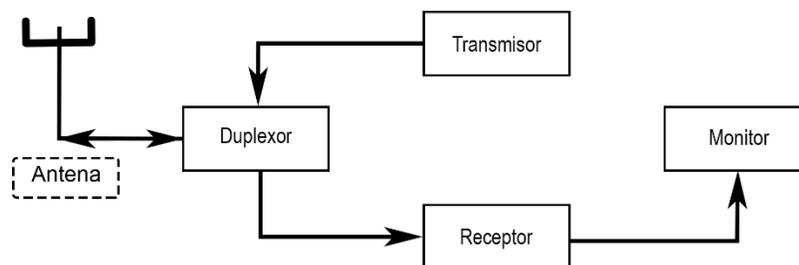


Figura 1. Estructura de un sistema de radar esencial. Elaboración propia.

El principio de operación del radar se basa en la emisión de una onda electromagnética (EM) desde una antena hacia una determinada dirección; si durante su recorrido, la onda EM encuentra un obstáculo, se genera una onda reflejada que regresa al punto de origen. Se analiza entonces la diferencia de tiempo entre la emisión de la onda EM y el reflejo recibido y considerando que la velocidad de la misma es de 300,000 km/s, se puede determinar una distancia aproximada entre el punto de emisión y el obstáculo [2]. Lo anterior se sintetiza en la figura 2.

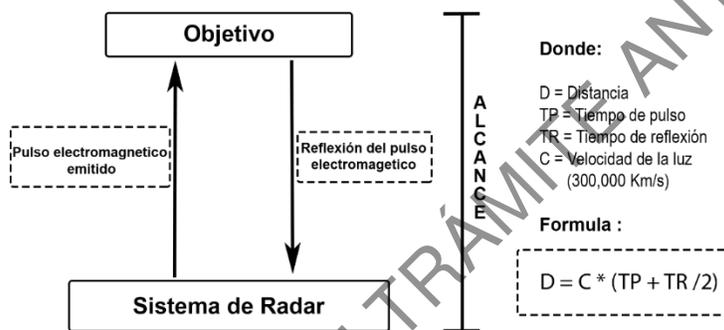


Figura 2. Funcionamiento de un equipo de radar con su fórmula para el cálculo de la distancia. Elaboración propia.

En general, existen dos tipos de radar: el de tipo primario o también conocido en sus siglas en inglés PSR o *Primary Surveillance Radar* (Radar de Vigilancia Primario) y el radar SSR o *Secondary Surveillance Radar* (Radar de Vigilancia Secundario). El radar PSR es capaz de emitir señales en todas direcciones y recibir un eco ocasionado por el objetivo. Sus principales desventajas son, por una parte, que requiere de una gran cantidad de potencia para la emisión de las señales EM y, por otra parte, la señal eco reflejada es altamente vulnerable por el ruido e interferencia de señales en el entorno. Por otra parte, el radar SSR incluye mecanismos que permiten diferenciar el objetivo detectado, esto gracias a lo que se conoce como “sistema activo de señal de respuesta” cuya operación depende en gran medida de un transpondedor. Por otra parte, incluye mecanismos de procesamiento de la señal recibida, que permite conocer información adicional del objetivo detectado (ubicación, estado actual, altura, etc). Gracias al transpondedor, la señal recibida es mucho más estable y menos susceptible a interferencias y ruido comparada con radares de tipo PSR. Su debilidad radica justamente en la dependencia del equipo transpondedor en el objetivo [3].

Una tecnología muy empleada dentro de sistemas de radio frecuencia es la denominada SDR (*Software Defined Radio*), que permite, mediante la combinación de hardware y software, la construcción, simulación y prototipado de sistemas de radio comunicaciones de una manera ágil y rápida. El hardware consiste en un radio transmisor – receptor el cual procesa señales de banda intermedia (recibidas desde la antena o para ser enviadas a través de la antena) y las convierte en señales en banda base para finalmente, realizar la conversión A-D o D-A, según se trate de transmisión o recepción [4]. La operación del radio es programable y controlada desde un equipo de cómputo personal, generalmente mediante puerto USB o Ethernet. La figura 3 muestra el esquema básico de un sistema SDR.

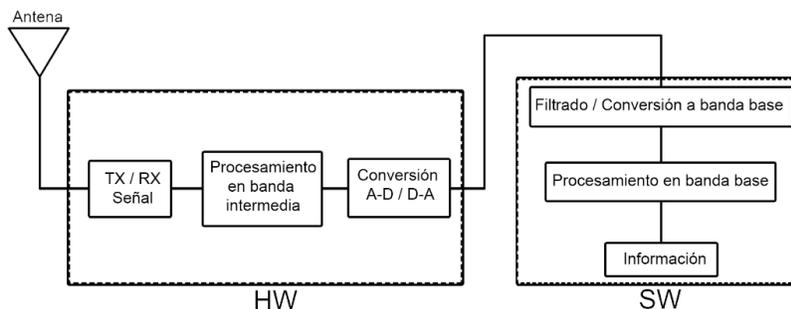


Figura 3. Esquema de un sistema SDR. Elaboración propia.

Existe una gran variedad de radios SDR, para el presente trabajo se elige el radio HackRF One de Great Scott Gadgets, por ser un radio con excelentes prestaciones y su excelente relación calidad / precio [5].

La parte Software corresponde al programa que controla el radio SDR y muestra la información captada por el mismo, la plataforma más empleada es GNU Radio, que cuenta con una interfaz sencilla y por ende fácil de entender, además de implementar un sistema de bloques que se interconectan permitiendo de este modo la construcción de sistemas de comunicación [6], está disponible para la mayoría de sistemas operativos (Windows, Mac OS, Linux), se recomienda el trabajo bajo sistemas basados en Linux por la estabilidad de su operación así como por la gran cantidad de información disponible en ese entorno [7].

El uso de los drones se ha extendido de lo militar a lo civil, pasando por aplicaciones en tareas de seguridad (información de lugares de difícil acceso, apoyo en desastres naturales, etc), toma de video y fotos panorámicos, uso como juguete, etc. [8]. Esta variedad en usos da como consecuencia una rápida propagación, que ha ocasionado accidentes por el uso inadecuado de los mismos usuarios novatos, lo cual ha generado que diversos países hayan reglamentado su uso, como ejemplo las normas aplicadas en la unión europea [9], que en la actualidad poseen algunas de las normas y reglamentos más estrictos en este sentido, siendo necesario en la mayoría de los casos, la obtención de una licencia que avale la experiencia del usuario. En nuestro país, existe la Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019 [10], la cual limita y regula el uso de los drones de acuerdo a peso, tipo y uso, sin embargo, en la práctica dicha norma no es aplicada como debería [11] [12].

En el presente trabajo, se propone la creación de un sistema basado en radios con tecnología SDR y la plataforma GNU Radio, funcionando como radares formando una triangulación que permita la detección de la señal controladora de un dron, esto como un posible apoyo para evitar el uso indebido de estos dispositivos.

## Desarrollo

### Revisión del estado del arte:

La tecnología SDR es atractiva para el desarrollo de proyectos ligados a las telecomunicaciones, esto se debe en mayor medida por su bajo costo, su fácil manejo y la calidad en sus pruebas, teniendo un renombre sólido dentro de la comunidad, resaltando ambos lados de esta tecnología, GNU Radio (un software de uso libre) es compatible con la mayoría de los radios SDR en el mercado, por lo que las posibilidades para trabajar con este son muy variadas, justo este factor lo posiciona por encima de software de paga que se limitan a un puñado de radios SDR, sus usos se extienden más allá de la emisión o recepción de señales de radio entrando en áreas de radar [13].

Dentro del desarrollo de radares usando esta tecnología, está la detección de objetivos en movimiento o estáticos en tiempo real [14] [15], monitoreo de movimiento en espacios cerrados [16], detección de múltiples objetivos [17] y por último, el tema central en este trabajo, se han desarrollado trabajos que comprueban la efectiva detección de drones [18][19][20], que pueden aplicarse en áreas

restringidas (aeropuertos, helipuertos, aeródromos o zonas privadas) donde uno de estos vehículos puede ser considerados un peligro, basándose principalmente en la frecuencia a la que operan (2.4 GHz).

### Simulación en GNU Radio:

Como fase inicial, se realiza una simulación en GNU Radio en la que se plantea el uso de tres radios SDR trabajando simultáneamente, para analizar la factibilidad de triangular las señales de los tres radios y de este modo, lograr la detección del objetivo. El objetivo de esta simulación es coordinar las señales de los tres radios y su procesamiento para la triangulación del objetivo detectado. Figura 4.

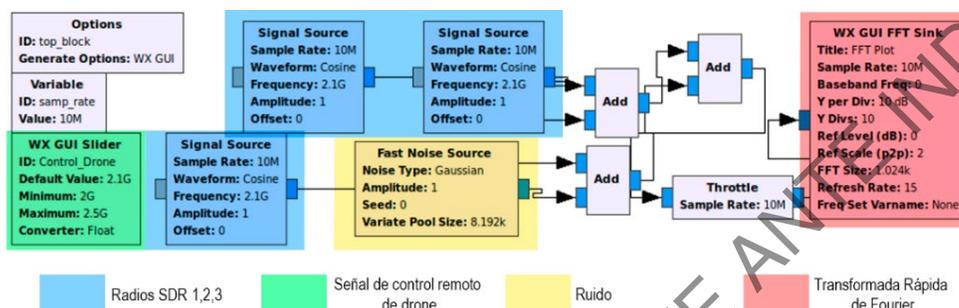


Figura 4. Simulación en GNU Radio del sistema de triangulación para la detección de drones. Elaboración propia.

Cada radio tendrá su respectiva lectura, configurados previamente en el rango a la que operan los drones (2.4 GHz en su mayoría), por cada prueba se tendrá 3 lecturas independientes, tendrán variantes debido a su acomodo, el objetivo y factores del entorno (clima), tras cada prueba se registrará la cantidad de energía captada por cada uno, este factor determinará la distancia a la que se encuentra el objetivo y al apoyarse por tres puntos de detección el trazo del posicionamiento será posible.

### Aplicación real en GNU Radio y SDR:

Cuando el sistema simulado es valorado y aprobado, se construye una pequeña maqueta de pruebas, consistente en 3 radios y un objetivo a ser detectado, consistente en el control remoto de un dron. Dentro de la maqueta de pruebas, se realizan diferentes detecciones ubicando el control remoto en diferentes posiciones, validando la posición calculada contra la posición real del objetivo.

## Resultados y discusión

### Comprobación de la antena omnidireccional

Antes de comenzar con la detección activa del control de dron, se realizó una primera prueba para determinar la energía que era capaz de obtener la antena del radio SDR en distintas direcciones, desde el frente, ambos lados y atrás, por cada posición se tomaron 5 muestras en diferentes tiempos a una distancia de un metro, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Escala de energía captado a distintas posiciones del radio SDR a un metro de distancia.

Posición (m):	Muestras (dB):					Promedio (dB):
Frente	-32	-31	-40	-35	-33	-34.2
Izquierda	-40	-35	-42	-32	-32	-36.2
Derecha	-38	-36	-38	-40	-34	-37.2
Atrás	-33	-37	-41	-40	-36	-37.4
<b>Promedio Total</b>						-36.25

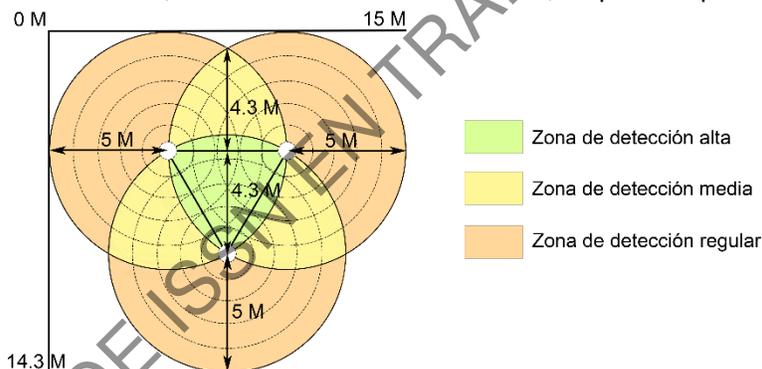
Como se puede notar, la energía capturada en todas direcciones alrededor de la antena es bastante estable, presentando una ligera pero aceptable variación. La estabilidad de las lecturas a corta distancia permite que se aprecie la fiabilidad del sistema.

Para la siguiente fase, las lecturas fueron tomadas de 1 a 5 metros, en cinco instancias de tiempo diferentes, esta funcionara como escala para interpretar las lecturas al momento montar los 3 radios SDR, es decir, trazar la posición de algún objetivo.

**Tabla 2. Escala de energía captada de 1 hasta 5 metros.**

Distancia (m):	Muestras (dB):					Promedio (dB):
	#1	#2	#3	#4	#5	
1-2	-38	-40	-39	-33	-35	-37
2-3	-48	-42	-46	-50	-45	-46.2
3-4	-60	-55	-53	-57	-58	-56.6
4-5	-56	-55	-58	-59	-58	-57.2
5	-60	-60	-62	-63	-59	-60.8

El montaje de los radios fue a una distancia de 5 metros uno de otro, pensado así por la implementación de equipos de baja potencia, creando la formación de un triángulo equilátero con el fin de que cada radio se complemente, como se representa en la Figura 5, la cobertura del radio SDR 1 llega hasta el SDR 2 y 3, mismo que se replica en cada uno, con la formación ya hecha, se crean diferentes áreas que se deben resaltar, comenzando al interior de los tres radios SDR, contando con el porcentaje mas alto de detección, seguido por los laterales de esta zona, donde solo llega la cobertura de dos radios SDR, la detección es más reducida pero aceptable, para terminar con los extremos de cada radio, siendo la detección mas básica, respaldada por un solo radio.



**Figura 5. Áreas de detección en dentro de la triangulación de los radios SDR. Elaboración propia.**

Para la primera prueba en campo, se marcó el centro de la figura, colocando el control de drone, cada radio en su determinada posición realizo la detección en diferentes intervalos de tiempo, dando como resultado los datos mostrados en la Tabla 3.

**Tabla 3. Escala de energía captada desde el centro del área de detección (a la misma distancia).**

Dispositivo:	Muestras (dB):					Promedio (dB):
	#1	#2	#3	#4	#5	
SDR 1	-46	-45	-48	-43	-41	-45
SDR 2	-48	-46	-47	-49	-42	-46.4
SDR 3	-47	-48	-45	-44	-43	-45.4

Como se podría esperar, las muestras captadas fueron muy similares en cuanto a la cantidad de energía, esto por encontrarse a la misma distancia (2.90 m), ahora bien, la forma de cuadrar la posición del objetivo, se muestra en la Figura 6, el color rojo representa al radio SDR 1, azul al SDR 2 y verde al SDR 3, usando la tabla (1 – 5 metros) de escala se puede trazar una distancia aproximada a la realidad.

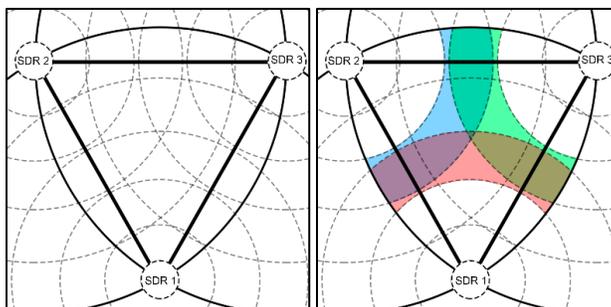


Figura 6. Determinación del área de detección dentro de la triangulación de radios SDR. Elaboración propia.

Una vez limitada una posible área de detección, desde cada radio se puede hacer un trazo auxiliar para determinar la posición, para que este proceso sea más fácil, el punto donde se enciman todos los colores es el área más factible, como en la Figura 7, comparada con la realidad, es una primera prueba exitosa.

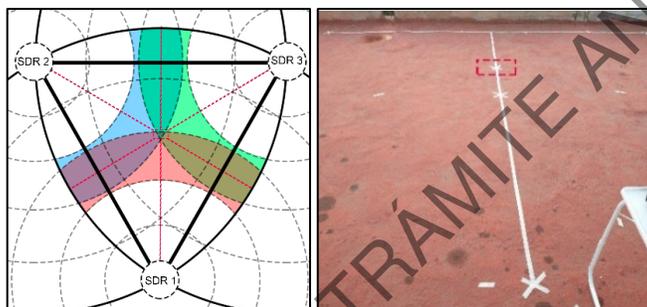


Figura 7. Trazado del objetivo dentro del área de detección en comparación al punto marcado en la realidad. Elaboración propia.

Para la siguiente prueba, se marcó un punto completamente aleatorio, siguiendo la misma metodología que en la prueba anterior, los resultados están en la Tabla 4.

Tabla 4. Escala de energía captada desde un punto aleatorio dentro del área de detección.

Dispositivo:	Muestras (dB):					Promedio (dB):
	#1	#2	#3	#4	#5	
SDR 1	-52	-48	-48	-51	-50	-50
SDR 2	-35	-38	-40	-37	-33	-36.6
SDR 3	-55	-56	-553	-56	-57	-55.4

El área de detección es delimitada, y se traza la ubicación del objetivo que es de nueva cuenta el mismo control de dron, la Figura 8 ilustra que la detección coincide con la marca hecha en la realidad.

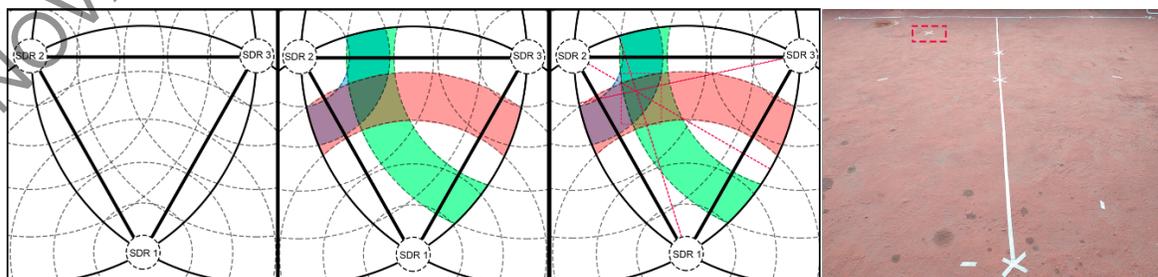


Figura 8. Localización de un objetivo en un punto aleatorio comparado con la realidad. Elaboración propia.

En cuanto a la exactitud de la distancia entre radios SDR y objetivo, la Tabla 5 resume la distancia sugerida por el valor de la energía captada en comparación con una medición en el campo de pruebas real.

Tabla 5. Comparación de medidas en el sistema y en la realidad.

<b>Dispositivo</b>	<b>Medida estimada (m)</b>	<b>Medida real (m)</b>
Punto central		
SDR 1	2 a 3	2.90
SDR 2	2 a 3	2.90
SDR 3	2 a 3	2.90
Punto aleatorio:		
SDR 1	3 a 4	3.76
SDR 2	1 a 2	1.68
SDR 3	3 a 4	3.55

Las medidas captadas en ambos casos no están tan alejadas, por ende, se puede confiar en este sistema y en las lecturas que arroja, por otro lado, la realización de diagramas de posicionamiento es un complemento para ilustrar la ubicación de un objetivo, sin dejar de lado el tiempo de procesamiento de la señal por parte del equipo de cómputo (esto tiende a variar acorde a la capacidades del equipo implementado), para este caso práctico, fue de aproximadamente 1 a 2 segundos, esto quiere decir, que es un estimado de lo que va a tardar para refrescar la información en dado caso el objetivo se mueva y cambie de posición.

### Trabajo a futuro

Este esquema de detección puede extenderse en ambientes en donde la potencia de los radios y la ganancia de las antenas sea mayor, buscando que las distancias a las cuales pueda ser detectado el controlador del dron sean mayores. Por otro lado, se puede mejorar el esquema añadiendo movilidad a los radios y mejorar la eficacia de la triangulación en un entorno real, añadiendo algoritmos de predicción de trayectorias, como el filtrado de Kalman [21].

Otra posible variante que se puede explorar en base a los resultados obtenidos de este trabajo, es el uso de puntos de detección (radios SDR) móviles en lugar de estáticos, así barajando la posibilidad de diferentes resultados sujetos a posiciones distintas.

### Conclusiones

La detección de señales de dron mediante triangulación a cargo de tecnología SDR como se esperaba resultado factible, los resultados obtenidos coincidieron con medidas reales, contando con un pequeño margen de error, que en términos generales son aceptables, por ende, en un sistema mayormente confiable.

El sistema sin ningún problema puede ser llevado a un área práctica, pues los componentes que se requieren son muy fáciles de conseguir, un radio SDR y un equipo de cómputo de gama promedio (pues se encargara del procesamiento de la información), si se desea improvisar, una placa raspberry con entorno Linux puede ser una alternativa económica junto a radios SDR sencillos, lo que lo hace un proyecto sencillo y fácil de replicar.

### Referencias

- [1] López, I. (2011). Introducción al RADAR (Abril 2011). Recuperado el 12 de junio de 2021, de <http://www.ugr.es/~iloes/proyectos/telematica/RADAR.pdf>.
- [2] Rosengaus, M. (enero-abril de 1995). Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos. Ingeniería Hidráulica en México, X(1), 55-74.
- [3] Prasad, N., & GeethaPriya, M. (2016). RADAR and it's Applications. JICTA, 9(28), 1-9.

- [4] Machado, J. R. (2015). Software Defined Radio: Basic Principles and Applications. *Revista Facultad de Ingeniería* (Fac. Ing.), 24(38), 81-82.
- [5] HackRF One: Great Scott Gadgets. (2021). Recuperado el 30 de julio de 2021, de Great Scott Gadgets: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>.
- [6] Acerca de GNU Radio: GNU Radio. (2021). Recuperado el 30 de julio de 2021, de GNU Radio: <https://www.gnuradio.org/about/>.
- [7] InstallingGR : Wiki GNU Radio. (2021). Recuperado el 30 de julio de 2021, de Wiki GNU Radio: <https://wiki.gnuradio.org/index.php/InstallingGR>.
- [8] T. Jones, International commercial drone regulation and drone delivery services, Santa Monica, California: RAND, 2017.
- [9] Comisión Europea. (2019, 11 de junio). REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2019/947 DE LA COMISIÓN de 24 de mayo de 2019 relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas. Diario Oficial de la Unión Europea. Obtenido de <https://www.boe.es/doue/2019/152/L00045-00071.pdf>.
- [10] SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. (2019, 14 de noviembre). NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, Que establece los requerimientos para operar un sistema de. Ciudad de México: DIARIO OFICIAL. Obtenido de <https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo2/nom-107-sct3-2019-201119.pdf>.
- [11] DEDRONE. (s.f.). Worldwide Drone Incidents: DEDRONE. Recuperado el 5 de Septiembre de 2021, de DEDRONE: <https://www.dedrone.com/resources/incidents/all>.
- [12] Robin Radar System. (23 de diciembre de 2020). 5 Biggest Drone Incidents at Airports in 2020: Robin Radar System. Obtenido de Robin Radar System: <https://www.robinradar.com/press/blog/5-biggest-drone-incidents-at-airports-in-2020>.
- [13] Patton, L. K. (2007). A GNU Radio Based Software-Defined Radar. (Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería (MSEgr)). Wright State University, Dayton, Ohio. Obtenido de [https://corescholar.libraries.wright.edu/etd\\_all/91/](https://corescholar.libraries.wright.edu/etd_all/91/).
- [14] Aulia, S. S., & Munir, A. (2015). Stationary and moving targets detection on FMCW radar using GNU radio-based software defined radio. En 2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) (págs. 468-473). IEEE Xplore. doi:10.1109/ISPACS.2015.7432817.
- [15] Sundaresan, S., Anjana, C., Tessa, Z., & Gandhiraj, R. (2015). Real time implementation of FMCW radar for target detection using GNU radio and USRP. En 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP) (págs. 1530-1534). IEEE Xplore. doi:10.1109/ICCSP.2015.7322772.
- [16] Godana, B. E. (2009). Human Movement Characterization in Indoor. (Tesis de maestría). Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science. Obtenido de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A414e1868-dd00-4113-9989-4c213f1f7094>.
- [17] Amin, E. J. B., S. A., & Munir, A. (2014). Accuracy analysis of FM chirp in GNU radio-based FMCW radar for multiple target detection. En 2014 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA) (págs. 115-119). IEEE Xplore. doi:10.1109/IC3INA.2014.704261.
- [18] Musa, S. A., Abdullah, R. S., Sali, A., Ismail, A., Rashid, N. E., Ibrahim, I. P., & Salah, A. A. (marzo de 2019). A REVIEW OF COPTER DRONE DETECTION USING A RADAR SYSTEM. 12, 16-38.
- [19] Abdulkabir, B. (2019). RADIO FREQUENCY TOOLBOX FOR DRONE DETECTION AND CLASSIFICATION. (Tesis de maestría en ciencia). Old Dominion University. Obtenido de [https://digitalcommons.odu.edu/ece\\_etds/?utm\\_source=digitalcommons.odu.edu%2Fece\\_etds%2F160&utm\\_medium=PDF&utm\\_campaign=PDFCoverPages](https://digitalcommons.odu.edu/ece_etds/?utm_source=digitalcommons.odu.edu%2Fece_etds%2F160&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages).
- [20] Fu, H., Abeywickrama, S., Zhang, L., & Yuen, C. (abril de 2018). Low-Complexity Portable Passive Drone Surveillance via SDR-Based Signal Processing. IEEE Communications Magazine. doi:10.1109/MCOM.2018.170042.
- [21] Li, Q., Li, R., Ji, K., & Dai, W. (2015). Kalman Filter and Its Application. En 2015 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS) (págs. 74-77). doi:10.1109 / ICINIS.2015.35.