

## Redes WiFi sobre drones: Estudio teórico

(Recibido: 29/04/2016; Aceptado: 07/07/2016)

Guillen-Perez, A.; Sanchez-Iborra, R.; Cano, M.-D.

Grupo de Ingeniería Telemática. Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones  
Antiguo Cuartel de Antigones. Plaza del Hospital, N° 1, 30202 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968338872

E-mail: antonio.g.p@outlook.es

**Resumen.** El gran aumento del número de dispositivos inteligentes, hace que la demanda de capacidad de las redes de comunicaciones sea cada vez mayor. En este contexto es donde nacen las redes aéreas con dispositivos UAV (“Unmanned Aerial Vehicle”), conocidos comúnmente como drones. En este trabajo se describe y se analiza el uso de estos dispositivos como nodos inalámbricos WiFi tanto en modo infraestructura como en modo ad-hoc, realizando un estudio teórico previo para después plantear un experimento real.

**Palabras clave.** Redes Aéreas; UAV; WiFi.

**Abstract.** The huge increase in the number of smart devices increases the demand for network capacity. In this context is where aerial networks take relevance by using UAV (Unmanned Aerial Vehicle) devices, commonly known as drones. This paper describes and analyses the use of these devices as WiFi nodes both in infrastructure and ad hoc modes, performing a preliminary theoretical study and, then, conducting real experiments.

**Keywords.** Aerial Network; UAV; WiFi.

### 1. Introducción

Debido a los avances que se están consiguiendo tanto en la miniaturización como en las prestaciones de los vehículos aéreos no tripulados, la utilización de los mismos se está generalizando en distintos campos. Estos dispositivos, comúnmente conocidos como “drones”, aportan interesantes ventajas en el campo militar, la logística o el salvamento de personas en condiciones extremas, ya que, además de permitir el acceso a localizaciones remotas, eliminan la necesidad de presencia humana y, así, el riesgo que algunas de estas actividades conllevan. Un vehículo aéreo no tripulado es una aeronave dirigida a distancia sin necesidad de un piloto a bordo. Estos dispositivos también son conocidos por sus siglas en inglés: UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). A lo largo de este trabajo, se utilizará el primer término, UAV, debido a su uso más extendido. Su nacimiento se remonta al siglo XIX, pero su desarrollo se gestó, como la gran mayoría de la tecnología, en el campo militar, e.g., debido a las necesidades militares en la Guerra del Golfo.

Desde hace unos años, gracias a los avances en la electrónica, estos dispositivos son cada vez más populares y poseen multitud de aplicaciones, tanto profesionales como recreativas (e.g., localización de personas, grabación de eventos, etc.) pudiendo ser controlados incluso desde un teléfono inteligente. En el mundo de las telecomunicaciones, los UAV han sido empleados para desplegar redes aéreas en distintos campos de actuación, como redes militares tácticas (Song and Huang, 2010) o usos más generalistas (Gupta et al., 2016). Así, los drones son utilizados como equipos de apoyo, permitiendo aumentar la capacidad o cobertura de redes inalámbricas mediante el despliegue de una red aérea. Una posible estrategia empleada para lograr este

objetivo, es montar a bordo de un UAV una placa de desarrollo de bajo consumo, e. g., Raspberry Pi (“Raspberry Pi,” n.d.), Intel Galileo (“Intel Galileo,” n.d.), etc., la cual es equipada con los elementos de conectividad necesarios (chip de comunicaciones, antenas, etc.). Así, este dispositivo ejerce de punto central de la arquitectura, creando una red a la que los usuarios pueden conectarse.

Centrándonos en el estándar IEEE 802.11 (WiFi), que es el más extendido entre los usuarios finales para conectarse a redes inalámbricas, éste presenta dos modos de funcionamiento bien diferenciados: el modo infraestructura y el modo ad-hoc, cada uno con sus ventajas y desventajas en diferentes escenarios de aplicación. Ambos modos de funcionamiento son soportados por todas las versiones del estándar WiFi (IEEE 802.11 a/b/g/n/ac), el cual ha ido aumentando su tasa máxima de transmisión casi exponencialmente, utilizando la banda de 2.4 GHz (802.11b/g/n) y la banda de 5 GHz (802.11a/ac), siendo el 802.11ac el último en ser incorporado.

En este trabajo, se presenta un sistema mediante el que se despliega una red WiFi desde una posición aérea. Para este fin, se hace uso de la placa de desarrollo Intel Galileo, la cual se integra en un UAV. Así, en primer lugar, se presenta un estudio de cobertura teórico generado a partir de dos modelos de pérdidas de propagación adecuados para estimar el nivel de cobertura WiFi en ambientes exteriores. Además, se comparan los modos de funcionamiento WiFi, es decir, infraestructura o punto de acceso (*Access Point*, AP) y ad-hoc, con el objetivo de obtener de forma experimental la tasa máxima de transmisión alcanzada en ambos modos y determinar cuál se adecúa más a las necesidades del sistema. Finalmente, se presenta un estudio experimental relacionado con la eficiencia energética de la placa, en el que se muestra el consumo de potencia instantáneo obtenido para los distintos modos de

funcionamiento, tanto en reposo como transmitiendo un flujo constante de datos.

Las recientes contribuciones de la literatura especializada en este campo se han enfocado principalmente en dos vertientes: la aplicación de técnicas de comunicación celular, e.g., LTE D2D (Device-to-Device) (Dalmasso et al., 2012; Mozaffari et al., 2016) o el uso de canales propios de comunicación. La incorporación de dispositivos que puedan proporcionar un mayor ancho de banda, como Wimax o WiFi, no han sido tan estudiados existiendo pocas contribuciones al respecto (Yixin Gu et al., 2015). Según el conocimiento de los autores, en ninguna de ellas se hace un estudio teórico/experimental que abarque las tres métricas referidas en este estudio.

El resto del documento se estructura como sigue. Los equipos empleados como banco de pruebas se detallan en la Sección 2. En la Sección 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos, tanto teóricos como experimentales. Finalmente, se finaliza con las principales conclusiones extraídas de este trabajo.

## 2. Banco de Pruebas

En este apartado se presentan las características principales de los dispositivos empleados para desplegar la red aérea WiFi sobre UAV mencionada anteriormente. Como elemento central del sistema se ha empleado la placa Intel Galileo (“Intel Galileo,” n.d.), una placa de desarrollo basada en el procesador Quark SoC X1000 de 32bits de Intel con una velocidad de 400MHz. En este trabajo, se hace uso de una Intel Galileo generación 1, a la que se le ha instalado una versión modificada de Linux para adaptarse a las necesidades requeridas y así poder trabajar con ella en los distintos modos de operación WiFi nombrados anteriormente. Dicha distribución que otorga funcionalidad a la placa Galileo, se carga a través de una tarjeta microSD, lo cual facilita en gran medida su manipulación y programación.

Para alimentar de forma independiente a la placa Galileo, ya que ésta se instala a bordo de un dron, se emplea una batería externa de 10400 mAh. Esta batería permite hasta 15 h de autonomía, dependiendo del modo de operación en el que se trabaje (ver sección de resultados). La placa Galileo lleva conectada a través de su puerto PCI Express una tarjeta de red Intel Dual Band Wireless-AC 7260 802.11ac, que permite una conexión de hasta 867Mbps, soportando los estándares IEEE 802.11 a/b/g/n/ac. Esta tarjeta inalámbrica permite funcionar como punto de acceso para trabajar en modo infraestructura, o bien, creando una red *mesh* a través del modo ad-hoc. Además, se emplean dos antenas externas omnidireccionales de 5 dBi que proporcionan mayor rango de cobertura.

Por su parte, el adaptador inalámbrico USB Tp-Link Archer T4U (“Tp-Link Archer T4U,” n.d.) es el adaptador de red escogido para la realización de pruebas. Este adaptador permite una comunicación de doble banda (2.4 + 5 GHz) alcanzando una velocidad máxima de 1200Mbps (300 + 867), soportando los

estándares 802.11ac/a/b/g/n. Posee 2 antenas omnidireccionales internas en configuración MIMO 2T2R en las dos bandas y una conexión USB 3.0. El chip WiFi que monta es el RTL8812AU, el cual carece de driver oficial para las distintas distribuciones de Linux, por lo que se ha hecho uso de un driver desarrollado por la comunidad de usuarios de este adaptador (Periasamy, 2015).

Como se comentó anteriormente, en este experimento se han estudiado los dos modos de funcionamiento principales del estándar IEEE 802.11 con el fin de comparar sus características. El modo más habitual de funcionamiento es el modo infraestructura (Fig. 1(a)), implementado en la gran mayoría de los *routers* WiFi comerciales. Permite desplegar una red en la zona de cobertura de un dispositivo central (punto de acceso, AP), siendo éste el que interconecta todos los dispositivos y el que permite la conexión a una red externa (local o Internet). Así, el AP asume todas las tareas de gestión de la red WiFi. Además, existe el modo ad-hoc. Este modo de funcionamiento permite a los distintos equipos interconectarse entre sí para formar una red punto a punto (Fig. 1(b)). Cada nodo actúa como cliente y enrutador simultáneamente, escaneando periódicamente los equipos que tiene alrededor, creando así una malla que conecta a todos los elementos de la red entre sí. Este modo de funcionamiento permite un encaminamiento del tráfico de forma dinámica, eliminando la necesidad a los nodos de estar dentro del alcance de un punto central. Este tipo de redes, también llamadas MANET (*Mobile Ad-hoc NETWORK*) permiten una alta movilidad a los nodos, lo que conlleva que los enlaces entre nodos pueden caer o crearse dinámicamente, pudiendo haber nodos que se incorporan o abandonan la red en cualquier momento. Un gran peso recae en el algoritmo de encaminamiento de este tipo de redes encargado su gestión para lograr un eficiente funcionamiento. Esto es así ya que, debido a la naturaleza dinámica de la topología de la red, se debe evaluar el coste de los enlaces y buscar nuevas rutas escogiendo el camino más óptimo en función del servicio que esté operando sobre la red. En este trabajo, se ha hecho uso del protocolo de enrutamiento ad-hoc BATMAN, el cual ya ha mostrado un funcionamiento superior a otros protocolos de enrutamiento ad-hoc soportando altas cargas de tráfico (Sanchez-Iborra et al., 2014).

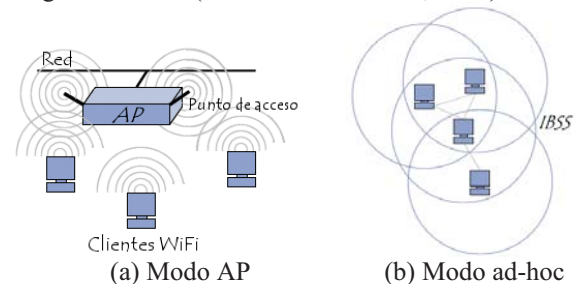


Fig. 1. Modos de funcionamiento WiFi. AP (a) y ad-hoc (b).

### 3. Resultados

Antes del despliegue efectivo de la red, es necesario realizar una evaluación de prestaciones del sistema propuesto. En concreto, se han realizado estimaciones de tres puntos clave en este tipo de sistemas: área de cobertura, tasa de transmisión y eficiencia energética.

#### 3.1. Estudio teórico de cobertura

A continuación se presenta un estudio teórico del área de cobertura que el nodo UAV puede cubrir para dar servicio a los posibles clientes que a él se conecten. Para este estudio, se ha supuesto que el despliegue se hará sobre un escenario abierto, sin rebotes en la señal, llegando como mayor contribución el rayo principal con visión directa y sin apenas contribuciones secundarias. Así, el estudio de las pérdidas de la señal, se realizará con los modelos de propagación de espacio libre (o Friis) (Friis, 1946) y WINNER D1 (Winner and Technologies, 2008) debido a que ambos describen de forma idónea este tipo de entornos. El modelo de espacio libre se emplea para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe línea de visión (*Line of Sight*, LOS) y, por tanto, no existe ningún objeto cercano que pueda afectar a la comunicación. Este modelo queda definido por la expresión (1).

$$P_{PROP} = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \log_{10}(d(m)) + 20 \log_{10}(f(Hz)) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right) = 20 \log_{10}(d(m)) + 20 \log_{10}(f(MHz)) - 27.55 \tag{1}$$

Para poder utilizar este modelo se debe trabajar en campo lejano, condición que se cumple debido a las escasas dimensiones de las antenas empleadas y las largas distancias que cubre el sistema propuesto (por favor, para un análisis más exhaustivo de este concepto, ver (Friis, 1946)).

Por su parte, el modelo de canal de WINNER (*Wireless World Initiative New Radio*) es un modelo estocástico que permite predecir las pérdidas del canal en distintos tipos de entorno. El tipo de modelo escogido para este trabajo ha sido WINNER D1 debido a las características de los escenarios a cubrir: entornos abiertos, sin apenas obstáculos, la “estación base” situada en una posición elevada y, por tanto, existencia de LOS entre ésta y los receptores. El modelo WINNER D1 queda definido por la expresión (2), donde  $A = 21.5$ ,  $B = 44.2$ , y  $C = 20$ .

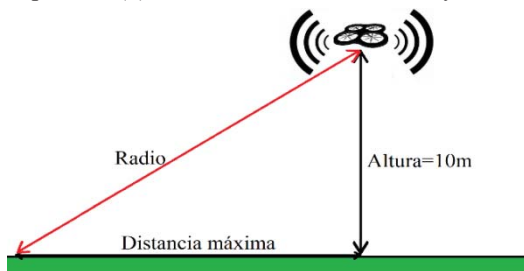


Fig. 2. Montaje con dron.

$$P_{PROP} = A \log_{10}(d(m)) + B + C \log_{10} \left( \frac{f_c[GHz]}{5.0} \right)$$

De esta forma, considerando una potencia de transmisión tanto para el enlace ascendente como el descendente de 20 dBm y las especificaciones de ganancia y sensibilidad que se pueden obtener de las hojas de características de los dispositivos utilizados, se obtienen las distancias máximas de cobertura para las distintas versiones y velocidades de funcionamiento del estándar IEEE 802.11. Estos resultados se muestran en la Tabla 1 (enlace descendente) y la Tabla 2 (enlace descendente). El escenario utilizado para obtener estos cálculos se muestra en la Fig. 2. Observar que el dron se sitúa a una altura de 10 m. En las Tablas 1 y 2, se ha marcado en negrita el caso más restrictivo entre el enlace descendente y el ascendente en aquellos en los que era posible la comparación a igualdad de estándar y tasa de transmisión.

#### 3.2. Velocidades de transmisión

Con el objetivo de estudiar las prestaciones del modo AP y el modo ad-hoc, se ha realizado un experimento situando a la placa Galileo como punto intermedio entre dos nodos (PCs). Mediante el uso de un generador de tráfico (Botta et al., 2012) se han realizado transmisiones entre ambos nodos extremos y se ha realizado una medición del *throughput* alcanzado. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. Observar que el modo AP permite alcanzar una mayor tasa de transmisión que el modo ad-hoc de forma más que notable.

Tabla 7. Comparativa de radios de cobertura. Enlace descendente.

| Estándar              | Mod. De Prop.               | Radio (m)  | D max (m) |         |
|-----------------------|-----------------------------|------------|-----------|---------|
| 2.4GHz                | 802.11b 11Mbps              | Esp. Libre | 6719      | 6718,99 |
|                       |                             | Winner D1  | 4613      | 4612,99 |
|                       | 802.11n HT20 MCS 15 300Mbps | Esp. Libre | 534       | 533,91  |
|                       |                             | Winner D1  | 438       | 437,89  |
| 5GHz                  | 802.11a 6Mbps               | Esp. Libre | 2562      | 2561,98 |
|                       |                             | Winner D1  | 1882      | 1881,97 |
|                       | 802.11a 54Mbps              | Esp. Libre | 362       | 361,86  |
|                       |                             | Winner D1  | 305       | 304,84  |
|                       | 802.11n HT40 MCS 15 300Mbps | Esp. Libre | 115       | 114,56  |
|                       |                             | Winner D1  | 105       | 104,52  |
|                       | 802.11ac HT40 200Mbps       | Esp. Libre | 102       | 101,51  |
|                       |                             | Winner D1  | 94        | 93,47   |
| 802.11ac HT80 866Mbps | Esp. Libre                  | 65         | 64,23     |         |
|                       | Winner D1                   | 62         | 61,19     |         |

Tabla 8. Comparativa de radios de cobertura. Enlace ascendente.

| Estándar | Velocidad (Mbps) | Mod. De Prop. | Radio (m)  | D max(m)      |                |
|----------|------------------|---------------|------------|---------------|----------------|
| 2.4GHz   | 802.11b          | 11            | Esp. Libre | <b>2440</b>   | <b>2439,98</b> |
|          |                  |               | Winner D1  | <b>2227</b>   | <b>2226,98</b> |
|          | 802.11g          | 54            | Esp. Libre | <b>487</b>    | <b>486,90</b>  |
|          |                  |               | Winner D1  | <b>402</b>    | <b>401,88</b>  |
|          | 802.11n          | 72.2          | Esp. Libre | 274           | 273,82         |
|          |                  |               | Winner D1  | 235           | 234,79         |
| 300      |                  | Esp. Libre    | <b>194</b> | <b>193,74</b> |                |
|          |                  | Winner D1     | <b>171</b> | <b>170,71</b> |                |
| 5GHz     | 802.11a          | 6             | Esp. Libre | <b>1475</b>   | <b>1474,97</b> |
|          |                  |               | Winner D1  | <b>1126</b>   | <b>1125,96</b> |
|          | 54               | Esp. Libre    | <b>234</b> | <b>233,79</b> |                |
|          |                  | Winner D1     | <b>203</b> | <b>202,75</b> |                |



Tabla 3. Velocidades de transmisión alcanzadas.

| Nodo 1     | Galileo 7260 | Nodo 2     | Velocidad (Mbps) |
|------------|--------------|------------|------------------|
| Archer T4U | AP           | Archer T4U | 10.5             |
| Archer T4U | Ad-hoc       | Archer T4U | 3                |

### 3.3. Eficiencia energética

Finalmente, se ha realizado un estudio del consumo energético instantáneo de la placa Galileo para ambos modos de funcionamiento (AP y ad-hoc), tanto en reposo, como transmitiendo un flujo constante de datos de 1 Mbps durante 30 s. Para ello, se ha establecido la placa Galileo como nodo intermedio entre dos portátiles equipados con la tarjeta inalámbrica USB descrita anteriormente. Como se muestra en la Fig. 3, el consumo de potencia es mayor en el modo ad-hoc en ambos experimentos, obteniendo una media de potencia instantánea consumida en reposo de 0.1459 W (551 mA) y en transmisión de 0.1479 W (555 mA), frente al modo AP que presenta un consumo medio de 0.1216 W (503 mA) en reposo y 0.1276 W (516mA) cuando se está transmitiendo.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado una de las aplicaciones más prometedoras de los UAV en el campo de las comunicaciones, aumentar la capacidad o cobertura de redes inalámbricas, e.g., WiFi, mediante el despliegue de una red aérea. Para este fin, se hace uso de la placa de desarrollo Intel Galileo, la cual se integra en un UAV. Así, en primer lugar, se ha presentado un estudio de cobertura teórico generado a partir de dos modelos de pérdidas

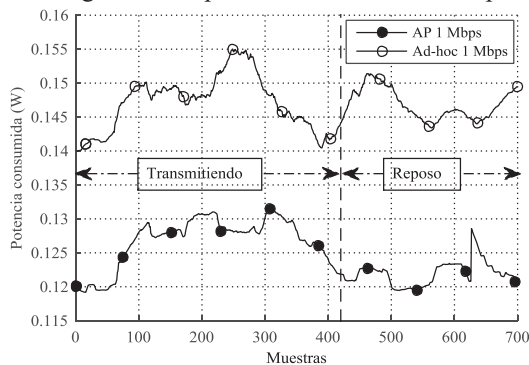


Fig. 3. Comparación de consumo de potencia modo AP vs. ad-hoc.

de propagación adecuados para estimar el nivel de cobertura WiFi en ambientes exteriores, obteniendo unos valores más restrictivos para el modelo Winner D1, pero suficientes para cubrir una extensa área de cobertura. Además, se han comparado los modos de funcionamiento infraestructura y ad-hoc de WiFi, obteniendo unas prestaciones más ventajosas para el modo AP ya que, además de permitir alcanzar mayores tasas de transmisión, éste presenta un menor consumo de potencia.

## Referencias

- [1] Botta, A., Dainotti, A., Pescapé, A., 2012. A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios. *Comput. Networks* 56, 3531–3547. doi:10.1016/j.comnet.2012.02.019
- [2] Dalmasso, I., Galletti, I., Giuliano, R., Mazzenga, F., 2012. WiMAX networks for emergency management based on UAVs, in: *IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL)*. IEEE, pp. 1–6. doi:10.1109/ESTEL.2012.6400206
- [3] Friis, H.T., 1946. A note on a simple transmission formula, in: *IRE'46*. pp. 254–256. doi:10.1109/JRPROC.1946.234568
- [4] Gupta, L., Jain, R., Vaszkun, G., 2016. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* In press. doi:10.1109/COMST.2015.2495297
- [5] Intel Galileo, <<http://goo.gl/cn6IWM>> (accessed 4.12.16).
- [6] Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Debbah, M., 2016. Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: performance and tradeoffs. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 15, 3949–3963. doi:10.1109/TWC.2016.2531652
- [7] Periasamy, A.B., 2015. Driver rtl8821AU, <<https://goo.gl/O7ug7a>> (accessed 4.26.16).
- [8] Raspberry Pi, <<https://www.raspberrypi.org/>> (accessed 4.14.16).
- [9] Sanchez-Iborra, R., Cano, M.-D., Garcia-Haro, J., 2014. Performance evaluation of BATMAN routing protocol for VoIP services: a QoE perspective. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 13, 4947 – 4958. doi:10.1109/TWC.2014.2321576
- [10] Song, L., Huang, T., 2010. A summary of key technologies of ad hoc networks with UAV node, in: *International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems*. IEEE, pp. 944–949. doi:10.1109/ICISS.2010.5657024
- [11] Tp-Link Archer T4U, <<http://goo.gl/cn6IWM>> (accessed 4.22.16).
- [12] Winner, Technologies, I.S., 2008. IST-4-027756 WINNER II. D1.1.2 V1.2.
- [13] Yixin Gu, Y., Mi Zhou, M., Shengli Fu, S., Yan Wan, Y., 2015. Airborne WiFi networks through directional antennae: an experimental study, in: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, pp. 1314–1319. doi:10.1109/WCNC.2015.7127659.