

Kassimi Farhaoui, M.; Pariente Migoya, A.; Pérez Grau, F.; Viguria Jiménez, A.; Cruces Pérez, J.; Guirado Luna, A.; Aguilar Romero, S. NB-IoT sobre 5G NTN como habilitador de comunicaciones CNPC resilientes para UAVs en operaciones BVLOS

# NB-IoT sobre 5G NTN como habilitador de comunicaciones CNPC resilientes para UAVs en operaciones BVLOS

Kassimi Farhaoui, Mouhsine <sup>1</sup> Pariente Migoya, Alejandro <sup>1</sup> Pérez Grau, Francisco Javier <sup>1</sup> Viguria Jiménez, Antidio <sup>1</sup> Cruces Pérez, Joaquín <sup>2</sup> Guirado Luna, Adrián <sup>2</sup> Aguilar Romero, Sergio <sup>2</sup>

<sup>1</sup> CATEC, España

<sup>2</sup> SATELIOT, España

ORCID:

Correspondencia: [mkassimi@catec.aero](mailto:mkassimi@catec.aero) [apariante@catec.aero](mailto:apariante@catec.aero) [fjperez@catec.aero](mailto:fjperez@catec.aero) [aviguria@catec.aero](mailto:aviguria@catec.aero)  
[joaquin.cruces@sateliot.com](mailto:joaquin.cruces@sateliot.com) [adrian.guirado@sateliot.com](mailto:adrian.guirado@sateliot.com) [sergio.aguilar@sateliot.com](mailto:sergio.aguilar@sateliot.com)

## RESUMEN

Este trabajo presenta un sistema de comunicaciones embarcado, basado en NB-IoT sobre 5G Non-Terrestrial Networks (NTN), y diseñado para soportar comunicaciones CNPC (Command and Non-Payload Communications) de baja tasa en operaciones BVLOS (Beyond Visual Line Of Sight) para UAVs (Unmanned Aerial Vehicles). Dicho sistema opera como un módulo híbrido terrestre-satelital independiente, desacoplado de la aviónica y la carga útil. La solución fue validada experimentalmente mediante vuelos reales en entorno rural con cobertura terrestre limitada. Se evaluaron latencia de extremo a extremo, tasa de entrega de paquetes, estabilidad del enlace y consumo energético. Los resultados muestran latencias de segundos, tasas de entrega superiores al 90–95 % y consumos en el rango de cientos de mW, demostrando que NB-IoT sobre 5G NTN constituye una solución viable y energéticamente eficiente para supervisión BVLOS y comunicaciones de contingencia.

**Palabras clave:** 5G NTN, NB-IoT, UAV BVLOS, CNPC, arquitectura híbrida terrestre-satelital

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 marzo 2026

# NB-IoT sobre 5G NTN como habilitador de comunicaciones CNPC resilientes para UAVs en operaciones BVLOS

Kassimi Farhaoui, Mouhsine <sup>(1)</sup>, Pariente Migoya, Alejandro <sup>(1)</sup>, Pérez Grau, Francisco Javier <sup>(1)</sup>, Viguria Jiménez, Antidio <sup>(1)</sup>, Cruces Pérez, Joaquín <sup>(2)</sup>, Guirado Luna, Adrián <sup>(2)</sup>, Aguilar Romero, Sergio <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> CATEC, España.

mkassimi@catec.aero ; apariente@catec.aero ; fjperez@catec.aero ; aviguria@catec.aero

<sup>(2)</sup> SATELIOT, España.

joaquin.cruces@sateliot.com ; adrian.guirado@sateliot.com ; sergio.aguilar@sateliot.com

**Resumen:** Este trabajo presenta un sistema de comunicaciones embarcado, basado en NB-IoT sobre 5G Non-Terrestrial Networks (NTN), y diseñado para soportar comunicaciones CNPC (*Command and Non-Payload Communications*) de baja tasa en operaciones BVLOS (*Beyond Visual Line Of Sight*) para UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*). Dicho sistema opera como un módulo híbrido terrestre-satelital independiente, desacoplado de la aviónica y la carga útil. La solución fue validada experimentalmente mediante vuelos reales en entorno rural con cobertura terrestre limitada. Se evaluaron latencia de extremo a extremo, tasa de entrega de paquetes, estabilidad del enlace y consumo energético. Los resultados muestran latencias de segundos, tasas de entrega superiores al 90–95 % y consumos en el rango de cientos de mW, demostrando que NB-IoT sobre 5G NTN constituye una solución viable y energéticamente eficiente para supervisión BVLOS y comunicaciones de contingencia.

**Palabras clave:** 5G NTN, NB-IoT, UAV BVLOS, CNPC, arquitectura híbrida terrestre-satelital.

## ***NB-IoT over 5G NTN as an Enabler of Resilient CNPC Communications for UAVs in BVLOS Operations***

**Abstract:** *This paper presents an onboard communications system based on NB-IoT over 5G Non-Terrestrial Networks (NTN), designed to support low-rate Command and Non-Payload Communications (CNPC) in Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) operations for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The system operates as a standalone hybrid terrestrial-satellite module, fully decoupled from the avionics and payload. The solution was experimentally validated through real flight tests in a rural environment with limited terrestrial coverage. End-to-end latency, packet delivery rate, link stability, and energy consumption were evaluated. Results show latencies in the order of seconds, packet delivery rates above 90–95%, and power consumption in the range of hundreds of milliwatts, demonstrating that NB-IoT over 5G NTN constitutes a viable and energy-efficient solution for BVLOS supervision and contingency communications.*

**Keywords:** 5G NTN, NB-IoT, UAV BVLOS, CNPC, hybrid terrestrial-satellite architecture.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las operaciones *Beyond Visual Line Of Sight* (BVLOS) con vehículos aéreos no tripulados o *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) requieren enlaces de comunicaciones fiables que garanticen la supervisión continua, el cumplimiento normativo y la seguridad operacional. En particular, las comunicaciones de mando y control no asociadas a la carga útil, o *Command and Non-Payload Communications* (CNPC), constituyen un elemento crítico para mantener conocimiento de situación y capacidad de intervención ante contingencias.

Las soluciones convencionales, basadas en enlaces radio en línea de vista o en redes celulares terrestres, presentan limitaciones significativas en entornos rurales, marítimos o con infraestructura limitada. Estas restricciones comprometen la disponibilidad y continuidad del enlace en misiones BVLOS de largo alcance.

En este contexto, las Redes No Terrestres o *Non-Terrestrial Networks* (NTN) integradas en el ecosistema 5G permiten extender la conectividad más allá de la cobertura terrestre tradicional. La combinación de 5G NTN con NB-IoT ofrece enlaces de baja tasa, bajo consumo energético y tolerantes a latencias variables, adecuados para telemetría y tráfico CNPC supervisor.

La **Figura 1** ilustra el concepto de UAV equipado con un subsistema de comunicaciones independiente tipo “caja negra”, orientado a proporcionar conectividad de contingencia y supervisión BVLOS mediante un modelo híbrido terrestre-satelital.



Figura 1. Dron volando con sistema de contingencia BlackBox

## 2. REQUISITOS DE COMUNICACIONES PARA OPERACIONES BVLOS CON UAV

Las comunicaciones BVLOS para UAV deben satisfacer requisitos directamente vinculados a la seguridad operacional y las comunicaciones CNPC, priorizando continuidad, robustez y previsibilidad frente a capacidad bruta, con compatibilidad con restricciones estrictas de tamaño, peso y potencia (SWaP).

En términos de calidad de servicio, los enlaces CNPC toleran latencias del orden de segundos y bajo *throughput* (kbps), pero requieren estabilidad temporal, pérdidas no sostenidas y recuperación automática tras interrupciones temporales.

Todo esto anterior se resume en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Requisitos de calidad de servicio.

Requisito	Descripción	Impacto	Requisito
Retardo acotado y consistente	Tolerancia a latencias del orden de segundos; no requiere tiempo real estricto	Permite supervisión estable sin necesidad de ultra-baja latencia	Retardo acotado y consistente
Baja tasa de transferencia efectiva requerida	Desde pocos kbps hasta cientos de kbps según frecuencia y estructura de mensajes	Hace viables tecnologías de banda estrecha (NB-IoT, NTN, etc.)	Baja tasa de transferencia efectiva requerida
Alta, pero no estrictamente perfecta	PLR < ~10 %; pérdidas puntuales tolerables, sostenidas no aceptables	Mantiene conocimiento de situación y control supervisor	Alta, pero no estrictamente perfecta

La naturaleza de estos parámetros hace que tecnologías de banda estrecha como NB-IoT sobre 5G NTN resulten

adecuadas para soportar comunicaciones en entornos con cobertura terrestre limitada.

## 3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

La arquitectura propuesta se basa en un subsistema embarcado, diseñado explícitamente para operar de forma independiente del sistema de control de vuelo del UAV y de los enlaces de datos de la carga útil. Este desacoplamiento está orientado a incrementar la robustez del sistema, simplificar la integración en distintas plataformas UAV y garantizar la continuidad de las comunicaciones CNPC tanto en condiciones de operación nominales como degradadas. La **Figura 2** muestra la arquitectura de la comunicación.

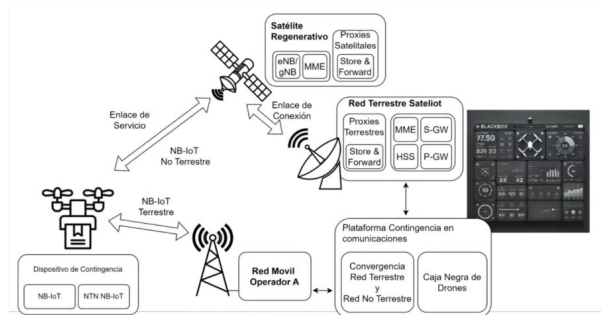


Figura 2. Arquitectura de comunicaciones NB-IoT/5G NTN para UAV, con operación híbrida terrestre-satelital.

### 3.1. Caja negra de a bordo

El subsistema de comunicaciones se implementa como una caja negra embarcada, basada en un Nordic Thingy91x de IoT que cumple con la release 17 de la 3GPP, integrada físicamente en el UAV como un subsistema independiente. Esta integra:

- Módulo de comunicaciones 5G NTN NB-IoT.
- GNSS para generación periódica de posición.
- Procesamiento local para la toma y almacenamiento temporal de mensajes.
- Interfaz serie con el sistema de vuelo.

### 3.2. Modelos de conectividad

Este soporta dos modos principales de operación:

- **Modo híbrido**, con monitorización continua de QoS de enlace y conmutación automática entre NB-IoT terrestre y NTN.
- **Modo exclusivamente satelital**.

La **Figura 3** ilustra este concepto de conectividad.

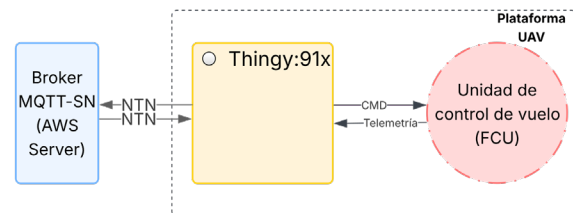


Figura 3. Arquitectura general del sistema de comunicaciones UAV sobre NTN/NB-IoT.

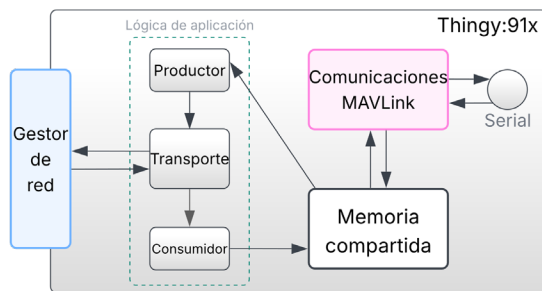
### 3.3. Mecanismos de gestión de latencia y pérdidas

Dado el carácter intermitente de la visibilidad satelital, el sistema implementa mecanismos de store-and-forward y retransmisión automática. Los mensajes CNPC se almacenan localmente cuando la transmisión inmediata no es posible y se reenvían una vez restablecida la conectividad, preservando la secuencia temporal.

Este enfoque prioriza integridad y continuidad del servicio frente a requisitos estrictos de tiempo real, coherentemente con las necesidades de tráfico CNPC en operaciones BVLOS.

## 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Se realizaron ensayos experimentales para evaluar el comportamiento del subsistema de comunicaciones bajo condiciones operativas BVLOS. La arquitectura software implementada en la unidad embarcada se muestra en la **Figura 4**, donde se observa la separación entre lógica de aplicación, gestión de red e interfaz con el sistema de vuelo mediante MAVLink. Esta modularidad garantiza que el procesamiento de comunicaciones no interfiera con funciones críticas de vuelo.



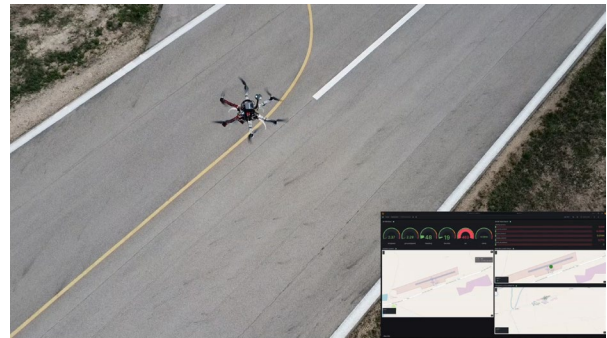
**Figura 4.** Arquitectura de software y comunicaciones de la caja negra embarcada.

### 4.1. Configuración experimental

La plataforma de ensayo consistió en un UAV equipado con la caja negra 5G NTN NB-IoT descrita previamente, integrada como subsistema independiente y alimentada mediante batería propia. La interconexión con el controlador de vuelo se realizó a través de interfaz serie, asegurando acoplamiento mínimo con la aviónica.

Las fuentes de datos embarcadas incluyeron posición GNSS, estado del sistema y mensajes de *heartbeat*. Todos los datos fueron marcados temporalmente en origen y transmitidos a intervalos predefinidos para permitir una evaluación consistente del rendimiento del enlace.

Se realizaron 21 vuelos de aproximadamente 11 minutos de duración cada uno, en un entorno rural con cobertura terrestre limitada y condiciones de visibilidad satelital LEO variables, como se ve en la **Figura 5**. Los vuelos se ejecutaron a baja altitud siguiendo trayectorias predefinidas que garantizaron la exposición del sistema a distintas geometrías de visibilidad satelital.



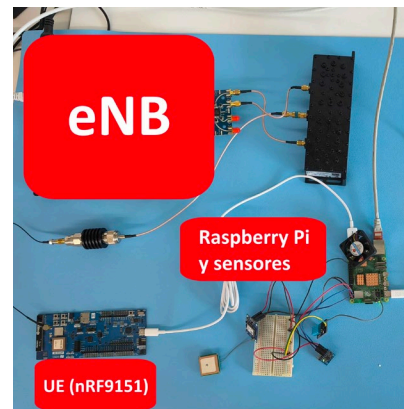
**Figura 5.** Imagen aérea de las pruebas de vuelo experimental en campo de vuelo

### 4.2. Validación NTN y configuración de red

El sistema NTN emplea un modelo extremo a extremo basado en store-and-forward, en el que el terminal NB-IoT embarcado transmite telemetría a la constelación LEO durante ventanas de visibilidad, actuando el satélite como nodo intermedio hasta la descarga en estación terrestre.

La integración del dispositivo IoT 5G NB-IoT en la red requiere un proceso de autenticación distribuido en dos pases satelitales: registro inicial del terminal y posterior asignación de dirección IP tras validación en el Core Network en tierra. Este mecanismo garantiza continuidad del protocolo celular en ausencia de infraestructura terrestre.

La validación inicial se realizó en laboratorio mediante una configuración representativa de la red NTN, utilizando un eNB NB-IoT equivalente al satelital y un terminal comercial validado para la red, como se ilustra en la **Figura 6**.



**Figura 6.** Sistema de validación NTN

### 4.3. Métricas de rendimiento y parámetros de evaluación

Para caracterizar el sistema se definieron las siguientes métricas:

- Latencia extremo a extremo.
- Tasa de entrega de paquetes.
- Estabilidad del enlace durante vuelo.
- Comportamiento ante pérdidas temporales de conectividad.
- Consumo energético del subsistema.

Estas métricas permiten evaluar el rendimiento, la robustez y la adecuación del sistema para tráfico CNPC en escenarios BVLOS reales.

#### 4.4. Resultados experimentales

La campaña experimental confirmó la viabilidad de NB-IoT sobre 5G NTN como canal CNPC para operaciones BVLOS en condiciones reales de vuelo.

Las latencias extremo a extremo observadas se situaron en el rango de segundos, compatibles con tráfico supervisor. La tasa de entrega de paquetes superó el 95% en condiciones nominales, y se mantuvo por encima del 90% en escenarios degradados. Las interrupciones temporales de conectividad, de duración variable según visibilidad satelital, fueron mitigadas mediante los mecanismos de store-and-forward implementados en el subsistema. Los principales indicadores cuantitativos se resumen en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Indicadores clave de rendimiento del sistema.

Métrica	Resultado	Observaciones	Métrica
Latencia PtP	~1 s (5 SNR) – 15 s (-5 SNR)	Compatible con tráfico CNPC	Latencia PtP
Packets/Rate	>95 % nominal, >90 % degradado	Pérdidas aisladas, sin ráfagas prolongadas	Packets/Rate
Interrupciones de conectividad	Segundos a decenas de segundos	Mitigadas mediante store-and-forward	Interrupciones de conectividad
Tasa de datos	Pocos kbps (telemetría y estado)	Alineada con el diseño de NB-IoT	Tasa de datos

#### 5. DISCUSIÓN

Los resultados experimentales confirman que NB-IoT sobre 5G NTN es técnicamente viable para soportar comunicaciones CNPC en operaciones BVLOS, ofreciendo latencias del orden de segundos, altas tasas de entrega y bajo consumo energético compatibles con los requisitos supervisorios.

La arquitectura basada en una caja negra desacoplada mejora la robustez e integración en plataformas heterogéneas, al tiempo que el uso de tecnologías estandarizadas 3GPP facilita escalabilidad e interoperabilidad frente a soluciones satelitales propietarias. Frente a alternativas como Iridium SBD o soluciones SATCOM propietarias, NB-IoT sobre 5G NTN ofrece mayor alineación con estándares 3GPP, menor coste de integración y mejor perspectiva de escalabilidad en el ecosistema UTM/U-space.

No obstante, la consolidación operativa a gran escala dependerá de la evolución de los servicios NTN, sus garantías de cobertura y su integración con futuros sistemas UTM/U-space.

#### 6. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado y validado experimentalmente una caja negra de comunicaciones embarcada basada en NB-IoT sobre 5G NTN para operaciones UAV BVLOS. El sistema, concebido como un módulo CNPC independiente y desacoplado de la aviónica, fue evaluado mediante vuelos reales en entorno rural con cobertura terrestre limitada.

Los resultados demostraron latencias compatibles con tráfico supervisor, altas tasas de entrega de paquetes y bajo consumo energético, confirmando la viabilidad de NB-IoT sobre 5G NTN como solución resiliente para comunicaciones BVLOS.

Estos hallazgos respaldan el uso de arquitecturas híbridas terrestre-satelital basadas en estándares 3GPP como habilitadores prácticos para operaciones UAV más seguras, escalables y reguladas.

#### 7. REFERENCIAS

- 3GPP. (2017). Study on Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT) / enhanced Machine Type Communication (eMTC) support for Non-Terrestrial Networks (NTN) (TR 36.763). 3rd Generation Partnership Project. <https://www.3gpp.org/dynareport/36763.html>
- 3GPP. (2022). Release 17. 3rd Generation Partnership Project. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-17>
- Guidotti, A., Vanelli-Coralli, A., Conti, M., Andrenacci, S., Chatzinotas, S., Maturo, N., Tropeano, A., Cioni, S., & Kodheli, O. (2019). Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(3), 2624–2639. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2894172>
- Kodheli, O., Maturo, N., Chatzinotas, S., Andrenacci, S., & Zimmer, F. (2021). On the random access procedure of NB-IoT non-terrestrial networks. *IEEE Access*, 9, 109130–109143. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3102670>
- Mishra, D., & Natalizio, E. (2020). A survey on cellular-connected UAVs: Design challenges, enabling 5G/B5G innovations, and experimental advancements. *Computer Networks*, 182, 107451. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107451>
- Shayea, I., El-Saleh, A. A., Ergen, M., Saoud, B., Hartani, R., Turan, D., & Kabbani, A. (2024). Integration of 5G, 6G and IoT with Low Earth Orbit (LEO) networks: Opportunity, challenges and future trends. *Results in Engineering*, 23, 102409. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102409>
- ICAO. (2018). Manual on remotely piloted aircraft systems (RPAS) (Doc 10019). International Civil Aviation Organization.
- Kellermann, T., Centelles, R. P., Camps-Mur, D., Ferrús, R., Guadalupi, M., & Augé, A. C. (2022). Novel architecture for cellular IoT in future non-terrestrial networks: Store and forward adaptations for enabling discontinuous feeder link operation. *IEEE Access*, 10, 68922–68936. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184720>