



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Lote 3: ADV5G-IMM-COCKPIT

Resumen del proyecto

Versión 1.0

Autores principales	Orange Espagne S.A.U, Universitat Politècnica de València
Entregado	31/12/2024

Avanzando-5G-Inmersivo-Háptico (TSI-063000-2021-111)

El proyecto **AVANZANDO-5G-INMERSIVO** (*Advancing 5G for Immersive Holographic, Telepresence and Haptics Communications towards 6G*) ha logrado **crear un laboratorio inmersivo para aplicaciones 5G/6G en la Universidad Politécnica de Valencia** (UPV). Estas aplicaciones permiten la convergencia del mundo físico con el mundo virtual e implican el uso de tecnologías disruptivas como la robótica, la inteligencia artificial, los gemelos digitales, y las comunicaciones avanzadas 5G/6G. **El proyecto ha sido financiado a través de fondos europeos mediante el programa UNICO 5G I+D, dentro del marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.**

En el marco del proyecto AVANZANDO-5G-INMERSIVO, se encuentra el subproyecto **Avanzando-5G-Inmersivo-Háptico (TSI-063000-2021-111)**, el cual se focalizó en investigar e implementar **aplicaciones y/o casos de uso de las comunicaciones táctiles. Una de las actividades comprendidas en este subproyecto era AVANZANDO-5G-INMERSIVO-HÁPTICO-A9: CONDUCCIÓN Y CONTROL REMOTO INMERSIVO.** En concreto, esta actividad investigó e implementó aplicaciones inmersivas de conducción y control remoto de robots para redes 5G avanzadas, así como la optimización de la captura y transmisión de dichas aplicaciones. Las aplicaciones táctiles fueron desarrolladas para verticales como educación, logística e Industria 4.0.

Los principales objetivos alcanzados se detallan a continuación:

- **Identificación de las tecnologías habilitadoras** de las comunicaciones táctiles para conducción y control remoto inmersivos, en el contexto de 5G avanzado y 6G.
- **Diseño e implementación** de un sistema de conducción y control remotos de robots móviles para el Laboratorio Inmersivo de la UPV.
- **Optimización en la transmisión de aplicaciones inmersivas** de conducción y control remoto en tiempo real en redes 5G avanzadas, considerando distintos parámetros de vídeo, tales como formato, resolución espacial, resolución temporal, códec de vídeo, protocolo de Streaming, y protocolo de transporte.
- **Demostraciones y pilotos de casos de uso** sobre conducción y control remoto inmersivo en redes 5G avanzadas.

El caso de uso final consistió en una **carrera de dos robots** que son **conducidos remotamente** mediante **Cockpits (puestos de control) inmersivos** y **una interfaz de usuario** que integra funcionalidades de **realidad aumentada y retroalimentación háptica** para asistir en la experiencia de usuario.



Figura. 1. Caso de uso final.

El laboratorio inmersivo se dotó con dos **Cockpits para el control remoto de los robots**, los cuales **integran cada uno**: un asiento de carreras, un volante, unos pedales, tres pantallas de Gaming, un chaleco háptico, y, unas gafas de realidad virtual.



Figura. 2. Componentes de cada Cockpit inmersivo para el piloto final.

Respecto al **software**, para que los usuarios pudieran controlar remotamente los robots, se desarrolló una **interfaz de usuario en Unity** que se compone principalmente de:

1. **Flujo de video de 360°**, el usuario recibe un flujo de **vídeo de 360° en tiempo real del entorno donde se mueve el robot**, ofreciéndole una visión periférica del entorno.
2. **Objetos de realidad aumentada** u objetos virtuales, estos objetos virtuales **son superpuestos al video en tiempo real** que recibe el usuario. Los objetos virtuales en la **UI fueron implementados para asistir y mejorar la experiencia de usuario inmersiva en la conducción remota**. Permitiendo al usuario interactuar tanto con el mundo físico como virtual. Esta idea es basada en la técnica de aprendizaje llamada Gamificación.

3. **Retroalimentación háptica**, cada **objeto virtual tiene vinculado una retroalimentación háptica** en un chaleco que lleva puesto el usuario al conducir remotamente el robot. Diferentes **patrones o vibraciones han sido configuradas para cada uno de los objetos**. Esta retroalimentación háptica ofrece una mejor experiencia inmersiva, al adicionar una interacción física a lo que está ocurriendo en el mundo virtual y real.
4. **Gemelo digital**, consiste en una **representación virtual** del velódromo y los robots en un mini mapa que **muestran datos del estado del robot en tiempo real**, tales como, la posición, la orientación, velocidad, nivel de batería, y tiempo de última vuelta.

Todas estas funcionalidades permiten ofrecer una experiencia de usuario inmersiva al permitirle interactuar tanto con el mundo físico como el mundo virtual.

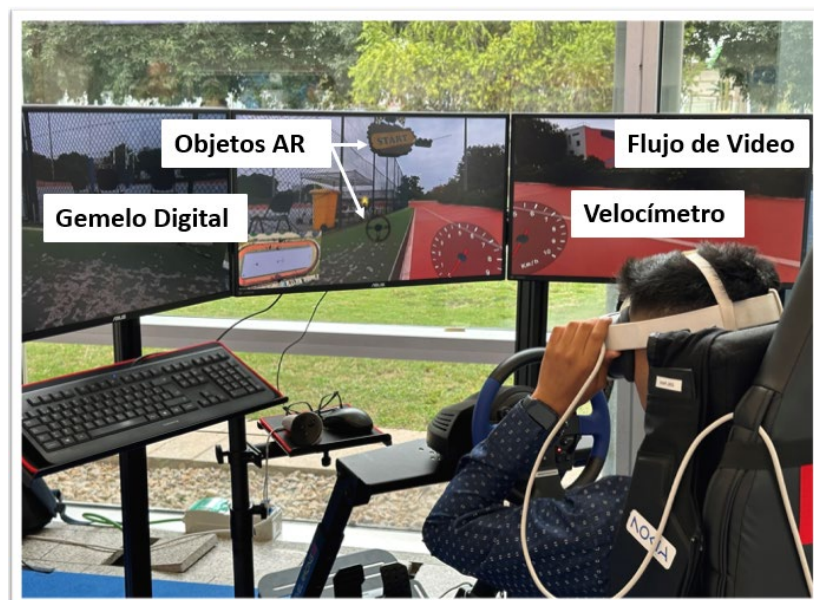


Figura. 3. Interfaz de Usuario inmersiva.

La **arquitectura del Cockpit** de conducción remota inmersiva **se basa en tres nodos principales**, el del usuario, el del robot y el de la red de comunicaciones 5G.

1. **El nodo usuario**, permite controlar remotamente el robot mediante periféricos de entrada (volante y pedales) y una interfaz de usuario inmersiva.
2. **El nodo robot**, son los robots en sí mismos, los cuales reciben los comandos que controlan sus movimientos del nodo de usuario y envían información de su estado.
3. **El nodo de red 5G**, soporta todas las comunicaciones entre el nodo usuario y el nodo robot, garantizando unas comunicaciones fiables, seguras, de baja latencia, y alto Throughput.

Las **demostraciones finales del caso de uso** de conducción remota inmersiva a través de la red 5G han sido testeadas en **condiciones reales de operación** por

decenas de personas en los **eventos V5GDAYS 2023, IEEE PIMRC 2024 y One6G Summit 2024.**

Se llevó a cabo **la difusión del piloto de la carrera inmersiva** de dos robots en diferentes medios de comunicación como prensa, YouTube, redes sociales – LinkedIn, entre otros. A continuación, se muestran algunos de los enlaces de los medios de comunicación:

- ✓ <https://www.upv.es/noticias-upv/noticia-14378-la-upv-capital-es.html>
- ✓ <https://www.iteam.upv.es/2024/09/23/el-iteam-upv-en-colaboracion-con-orange-yerba-buena-vr-y-robotnik-automation-presenta-una-innovadora-carrera-de-robots-5g/?lang=es>

Para las demostraciones se llevaron a cabo **medidas de validación, tanto para la aplicación** como para la **red de comunicaciones 5G** que la soporta. En concreto, se realizaron las siguientes medidas: (1) medidas de calidad a nivel de red 5G, (2) medidas de calidad a nivel de aplicación, y (3) medidas de calidad a nivel de experiencia de usuario.

Las medidas de calidad a nivel de red comprenden medidas tanto de nivel de señal (cobertura) como medidas de velocidad máxima de transmisión (capacidad).

- **Las medidas de nivel de señal** comprenden parámetros como el *Reference Signal Received Power (RSRP)* y la *Signal Interference Noise Ratio (SINR)*. El nivel de cobertura es bueno para las localizaciones del velódromo de la UPV, considerando que el valor medio de RSRP se encuentra alrededor de los -75 dBm. Respecto a los valores medios de SINR, se encuentran alrededor de los 20 dB.

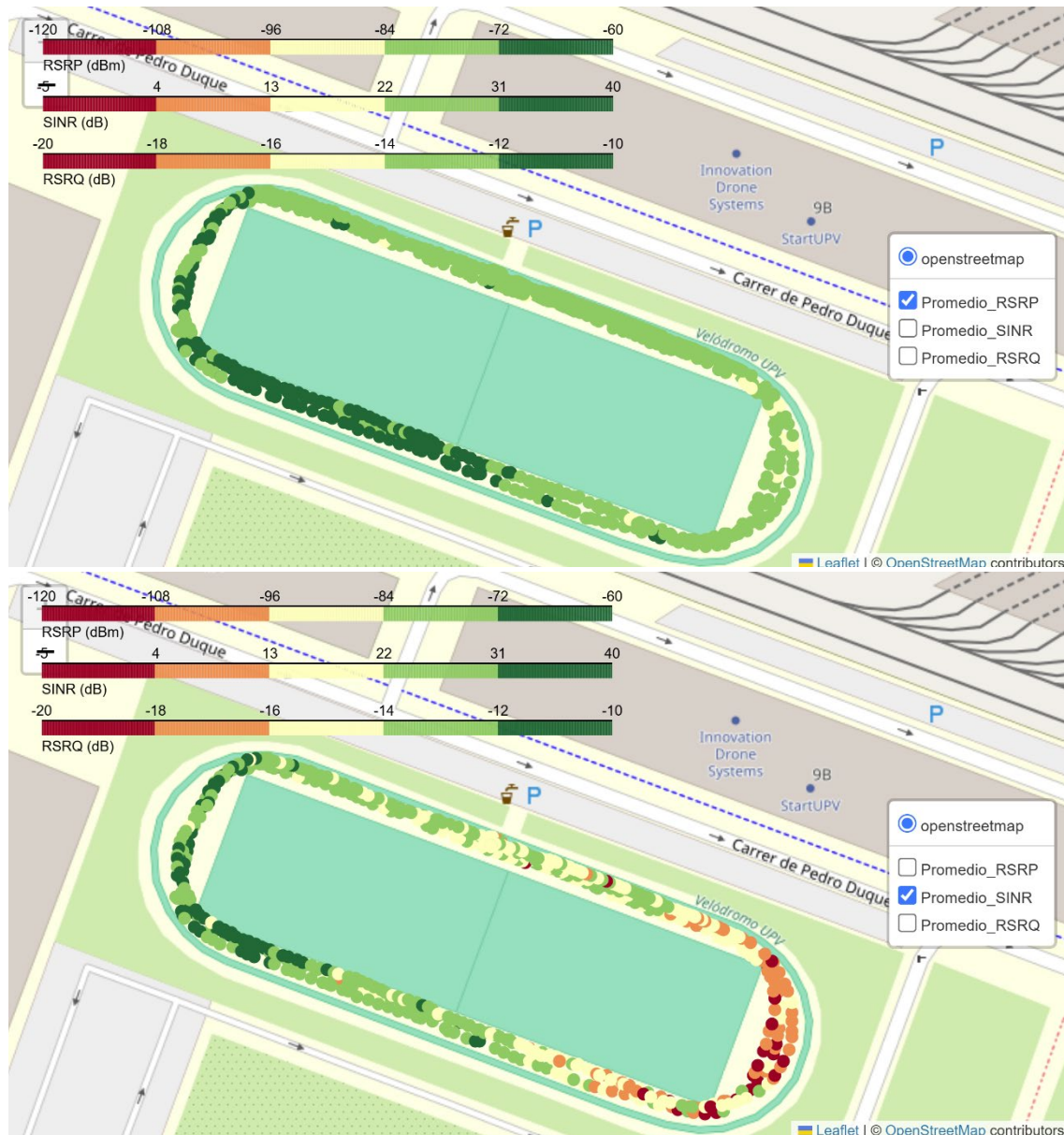


Figura 4. Medidas de cobertura de la red 5G en el velódromo.

- Las medidas de **velocidad máxima de transmisión** han sido realizadas para los dos enlaces radio:
 - **Para el enlace descendente (DL)**, se obtuvieron velocidades de transmisión medias de entre 273 Mbps (Laboratorio de Comunicaciones Inmersivas) y 294 Mbps (Velódromo UPV).
 - **Para el enlace ascendente (UL)**, se alcanzaron velocidades de transmisión medias de entre 39 Mbps (Laboratorio de Comunicaciones Inmersivas) y 45 Mbps (Velódromo).

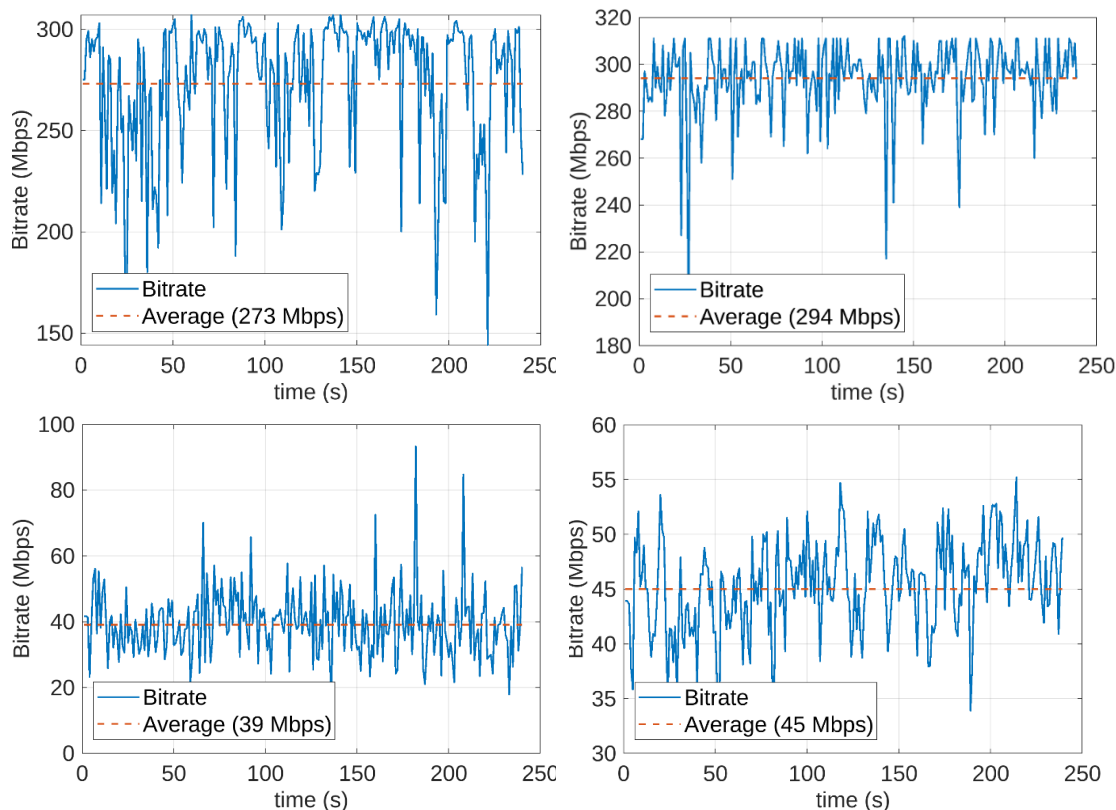


Figura. 5. Throughput de la red 5G.

(arriba izquierdo) laboratorio inmersivo DL. (arriba derecha) velódromo de la UPV DL
 (abajo izquierdo) laboratorio inmersivo UL. (abajo derecha) velódromo de la UPV UL.

Las medidas de calidad a nivel de aplicación cuantifican parámetros como la latencia extremo a extremo, el RTT (Round Trip Time), y el Jitter para los principales componentes de la interfaz de usuario, como son el video 360 ° en tiempo real, el control remoto del robot (volante y pedales), y la interacción entre el robot y los objetos virtuales.

- **Para el video**, se llevaron a cabo medidas de latencia E2E para diferentes resoluciones del video y ancho de banda, tales como: 960p@5Mbps; 1280p@8Mbps; 1920p@15 Mbps.
 - **Para una red de área local cableada**, el valor medio de la latencia E2E de la cámara 360° esta alrededor de 320 ms para las resoluciones de 960p y 1080p. Para la resolución de video de 1920p se incrementa aproximadamente 60 ms, alcanzando una latencia por encima de los 380 ms.
 - **Para la red 5G**, los valores medios de las medidas de la latencia E2E del video 360° se incrementaron entre 150 ms para 960p y 250 ms para 1920p respecto a las medidas con la red LAN. Específicamente, se obtuvo 476ms@960p, 513ms@1080p, y, 640ms@1920p.

La siguiente figura muestra las medidas de latencia para la resolución 1920p.

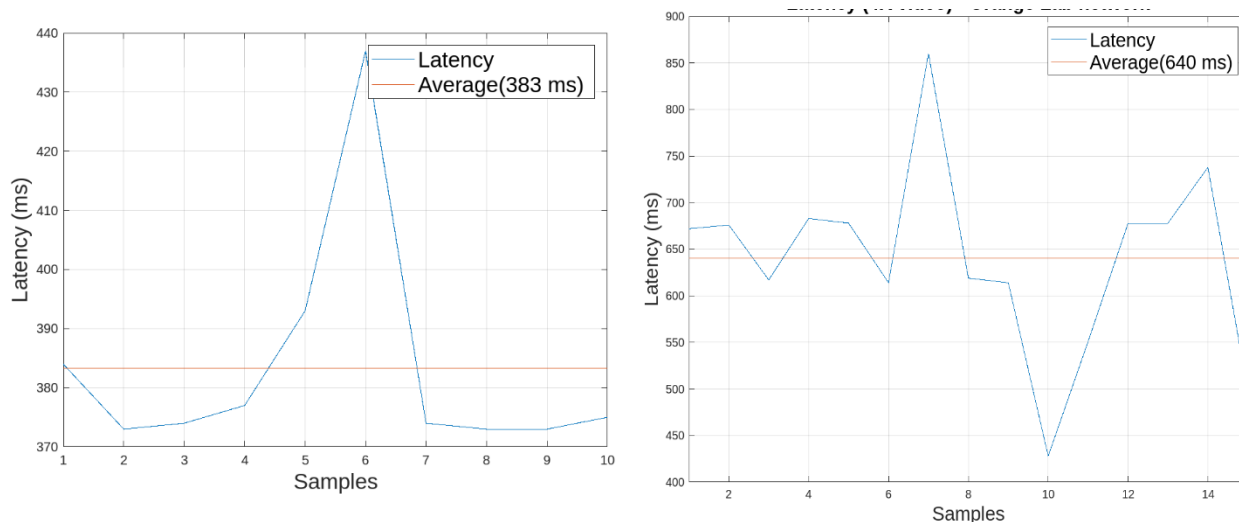


Figura. 6. Medidas de Latencia E2E para el video tiempo real para la resolución 1920p (lado izquierdo) Para red LAN Cableada. (lado derecho) Para red 5G.

- Para la **colisión del robot con las cajas virtuales** se realizaron dos medidas de latencia E2E:
 - La primera, es la **latencia E2E de la colisión entre el robot y la caja virtual**, y, posteriormente, el robot recibe la instrucción de cambio de velocidad (frenado), Para este caso, la latencia E2E es 305 milisegundos
 - La segunda, es la **latencia E2E de la colisión entre el robot y la caja virtual, y, posteriormente, el robot recibe la instrucción de cambio de velocidad y ejecuta la instrucción (frenado)**. Para este caso, se obtiene una latencia E2E de 1330 ms. Es importante aclarar que en la segunda medida se debe considerar el tiempo de frenado real del robot, el cual depende de la velocidad a la que el robot se mueve y la desaceleración configurada en el mismo.

La siguiente figura muestra la caja y señales virtuales que aparecen al usuario en la interfaz de usuario.

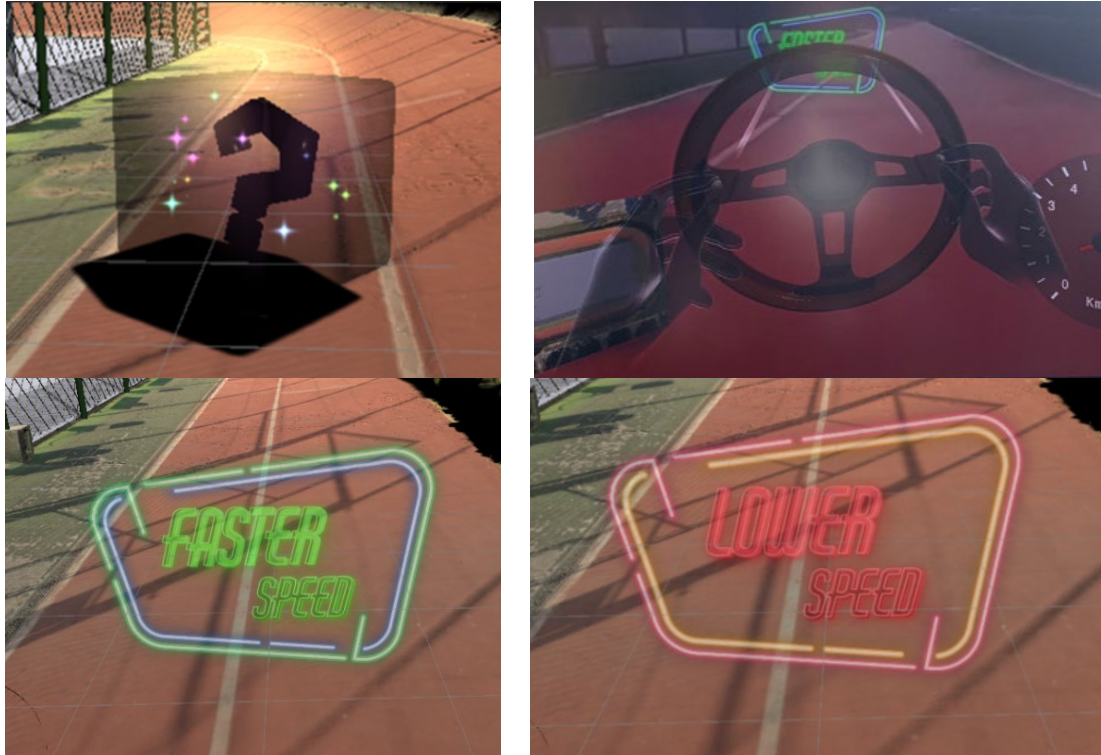


Figura. 7. Caja y Señales Virtuales en la Interfaz de Usuario.

- Para las medidas del RTT para la red 5G**, se observa que este parámetro se incrementa por la transmisión y recepción del video en tiempo real. Si lo comparamos con las medidas de RTT sin ningún tráfico adicional (33 ms), se incrementaron los valores de RTT alrededor de 70 ms. Específicamente, se obtuvo un valor medio de RTT de 103 ms y un valor de Jitter de 50 ms, en función de la resolución y ancho de banda del video en tiempo real que se transmitía en paralelo a estas medidas.

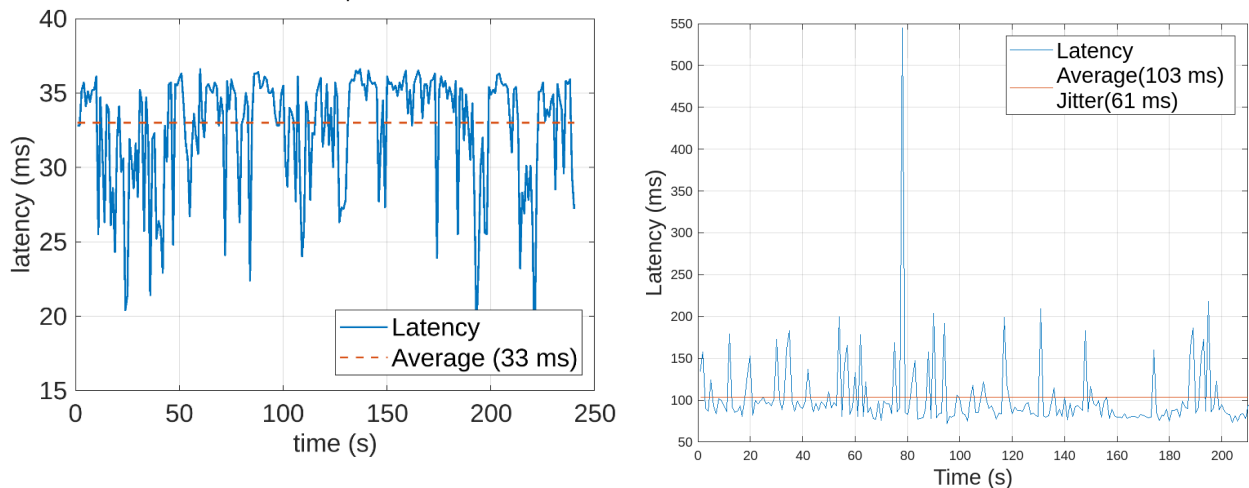


Figura. 8. Medida RTT para la red 5G.
 (lado izquierdo) Sin tráfico. (lado derecho) Con tráfico de video 1920p

Las medidas de calidad a nivel de experiencia de usuario, se llevó a cabo una encuesta de 8 preguntas a 53 asistentes en la demostración final del caso de uso. **La encuesta comprendía las siguientes preguntas:**

1. Rango de edad de la persona que testeaba la demostración del caso de uso.
2. Grado de satisfacción en general en la experiencia inmersiva de conducción remota.
3. En qué medida se sintió físicamente inmerso en el entorno remoto.
4. Grado de implicación de la experiencia inmersiva en la conducción remota del robot durante la carrera.
5. Grado de aceptación respecto al combinar la retroalimentación háptica y visual en la conducción remota con el fin de aumentar la experiencia inmersiva.
6. Grado de control que sentía sobre el robot al conducirlo remotamente.
7. Grado de dificultad mental al conducir remotamente el robot.
8. Probabilidad a corto plazo de despliegues masivos de sistemas ciberfísicos similares.

Se definió una escala entre 1 y 5 para calificar el grado de satisfacción, siendo 1 la mínima puntuación y 5 la máxima puntuación. Las principales conclusiones de la experiencia de usuario se presentan a continuación:

- Respecto al **rango de edad, el 69% de los encuestados tenían entre 18 y 35 años, y el 26% entre 36 y 50 años.** Esto es debido principalmente, porque estos eventos están pensados para estudiantes de doctorado, investigadores y profesionales del sector.
- En general, **el 96% de los encuestados calificaron positivamente (puntuación entre 4 y 5) la experiencia inmersiva en la conducción remota.**
- Respecto al **combinar la retroalimentación háptica y visual** en la conducción remota con el fin de aumentar la experiencia inmersiva, **el 79% de los encuestados calificó positivamente la idea.**
- Respecto al grado de control que sentían sobre el robot al conducirlo remotamente utilizando un volante y pedales, **el 75% de los encuestados lo calificó positivamente.** Sin embargo, **el 20% de los encuestados dieron una calificación de 3 porque sugerían que debería mapearse mejor la sensibilidad del volante y el acelerador.**

- Respecto **al grado de dificultad mental al conducir remotamente el robot, se obtuvieron diferentes respuestas:** el 22% de los encuestados calificó con 2, el 37% de los encuestados calificó con 3 y 4, y el 33% de los encuestados calificó con 5. Las diferentes calificaciones son debidas principalmente a que, al conducir remotamente el robot con unas gafas de realidad aumentada, cuesta al principio acostumbrarse a la experiencia.

El caso de uso presenta un gran potencial de **evolución hacia la integración de tecnologías emergentes** que puedan mejorar la precisión, respuesta sensorial y la autonomía en la interacción usuario-robot. Las siguientes líneas de trabajo futuras han sido identificadas.

1. **Realidad Mixta (XR) para una convergencia total del mundo físico y virtual.** Al integrar e implementar en la interfaz de usuario tecnologías de realidad mixta en lugar de solo realidad aumentada, añade la capacidad de manipularlos y hasta “sentir” objetos virtuales como si fueran parte de la realidad física. Esta integración no solo mejorará la precisión operativa, sino que permitirá experiencias inmersivas más naturales, aumentando la productividad y reduciendo errores operativos.
2. **Sensibilidad Háptica de alta precisión.** Al añadir una retroalimentación mayor con chalecos hápticos de alta precisión o trajes completos permitirá al usuario percibir otros parámetros importantes del entorno en función de la aplicación final, tales como la temperatura del entorno, percibir la orografía donde se mueve el robot, percibir texturas, etc.
3. **Redes 5G/6G: Conectividad en Tiempo Real para Operaciones Críticas.** Se podría focalizar e implementar una “Función de red” en el núcleo de red 5G/6G que optimice la gestión de calidad de servicio de red para la transmisión y recepción de video en tiempo real para tareas de operaciones críticas, donde garantizar una ultra baja latencia y velocidades de transmisión altas y estables temporalmente es fundamental.
4. **Algoritmos de IA para Asistencia Inteligente:** Se requiere avanzar en algoritmos de inteligencia artificial para crear sistemas de asistencia inteligente que ofrezcan sugerencias o ejecuten maniobras conmutando de conducción remota a autónoma o viceversa en situaciones críticas o peligrosas. Algunas funcionalidades podrían ser: (1) AI para detección de obstáculos destinada a implementar mecanismos que optimicen la seguridad en la conducción remota de robots. (2) AI enfocada a conseguir Bitrate adaptativo para el video, lo que permitirá transmitir con mejor o peor calidad el video en función de las condiciones del canal radio de la red 5G/6G. (3) AI para asistencia a la conducción remota. En función del estado de congestión de la ruta que debe hacer el robot o condiciones climatológicas, se podrá sugerir la ruta óptima que debe recorrer el robot.
5. **Integración de Sensores Avanzados y Análisis Predictivo de Datos:** La incorporación de sensores avanzados junto con análisis predictivo de datos permitirá predecir y evitar posibles fallos operativos en la seguridad de las

tareas de los robots. A través del monitoreo continuo, estos sistemas podrían aprender de datos históricos para anticipar problemas y optimizar la experiencia de conducción, adaptándose a las condiciones específicas del entorno. Por ejemplo, usar técnicas de Machine Learning y análisis predictivo para anticipar fallos o detectar patrones de comportamiento inusuales en los datos recopilados por los sensores (LiDAR, GPS, KPIs de red), optimizando así la navegación o la gestión del mantenimiento del robot. Si el robot detecta una pendiente más pronunciada o un terreno irregular (mediante LiDAR o cámaras de profundidad), puede ajustar sus parámetros de navegación, como la velocidad o la dirección.