

La tecnología 5G como catalizadora de una nueva revolución industrial

Autores

M.Vinagre⁽¹⁾, V.J. Calvo ⁽²⁾, R. Suarez ⁽³⁾, C. Serra⁽⁴⁾, G.Munduate⁽⁴⁾

⁽¹⁾LEITAT, ⁽²⁾ Muutech, ⁽³⁾ UPC, ⁽⁴⁾Tigloo

Contenido

Resumen	2
1 La tecnología 5G	3
1.1 Evolución del estándar	3
1.2 Fundamentos	4
1.3 Interfaz de radio 5G NR.....	6
1.4 El núcleo de red 5GC	7
2 La red 5G en la industria	8
2.1 Interconectividad masiva en la industria	8
2.2 Banda ancha 5G ultra-rápida para la industria	10
2.3 Fiabilidad y baja latencia 5G	12
3 Tendencias y desafíos del 5G.....	13
3.1 Computación frontera en robótica	14
3.2 Inteligencia artificial en red.....	17
3.3 Seguridad industrial en redes 5G	18
4 Conclusiones	21
Referencias	22

Resumen

La sigla 5G representa la última generación de tecnología móvil caracterizada por ofrecer un ancho de banda y velocidades de transferencia sin precedentes respecto a las tecnologías predecesoras. En estos últimos años, entidades gubernamentales y grandes compañías han dejado patente su interés en el dominio del 5G, realizando múltiples esfuerzos en diferentes actuaciones y demostrando que se trata de una tecnología estratégica en la transformación digital de nuestra sociedad.

El uso de la tecnología 5G habilita un nuevo porfolio de servicios revolucionarios en sectores de gran relevancia como la salud, industria o el transporte. La capacidad del 5G de gestionar millones de dispositivos en tiempo real abre un abanico de posibilidades inalcanzables hasta la fecha. Se pueden crear redes para la teleoperación de forma segura y en tiempo real de dispositivos como robots de cirugía, o bien redes para la gestión inteligente de sistemas de control distribuidos aplicables en modelos de fabricación flexible, o redes para la gestión activa del transporte y el tráfico mediante vehículos conectados, entre otras.

La implantación de este salto tecnológico no está exenta de adversidades en términos económicos y de sostenibilidad dada la dimensión del cambio a nivel de infraestructura mundial. Por un lado, se requiere un plan de despliegue gradual para la transición desde el sistema actual 4G, cuyo alcance va muy por detrás de la rápida evolución tecnológica en el sector de las telecomunicaciones. Por otro lado, al ser un prometedor habilitador de la innovación digital y gran conectividad, aunque 5G es energéticamente más eficiente que el 4G, se estima un gran aumento de la contaminación derivada de la producción masiva de dispositivos asociados a los nuevos servicios digitales implantados gracias al 5G.

Este artículo pretende introducir al lector a la tecnología 5G, describiendo el proceso de estandarización durante estos últimos años para afrontar los impedimentos de su implantación a medio plazo. A su vez, se describe su capacidad y fundamentos que permiten entender su potencial sobre todo enfocado al sector industrial. También se muestra las tendencias y desafíos vigentes del 5G en el despliegue de entornos industriales, concluyendo como una de las tecnologías con mayor impacto de los últimos tiempos, que abre el camino a una nueva era digital en la industria y en la sociedad en general.

1 La tecnología 5G

La tecnología 5G representa la última generación de redes móviles, que marca un salto significativo en el sector de las comunicaciones inalámbricas. Promete transformar la manera en que nos conectamos e interactuamos con el mundo digital, ofreciendo velocidades de datos ultrarrápidas, una latencia mínima y la capacidad de conectar un número masivo de dispositivos. Más allá de la mejora en la experiencia del usuario móvil, el 5G se erige como una infraestructura fundamental para habilitar una amplia gama de aplicaciones innovadoras en diversos sectores, desde el transporte hasta la industria o la telemedicina, marcando el inicio de una nueva era de conectividad inteligente y ubicua.

En esta sección se realiza un análisis de la tecnología 5G, trazando su desarrollo desde las primeras iniciativas de estandarización hasta las más recientes evoluciones. Se examinan las bases y necesidades que impulsan su concepción, destacando el papel de organismos internacionales como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y la colaboración de entidades clave en el sector de las telecomunicaciones a nivel global. A su vez, se exploran los fundamentos técnicos del 5G, incluyendo sus capacidades principales, así como los elementos arquitectónicos esenciales para su funcionamiento.

1.1 Evolución del estándar

Las primeras bases para la investigación de la tecnología 5G se inician en 2012 con el programa de telecomunicaciones móviles internacionales para el 2020 y en adelante (IMT-2020) por parte del organismo de la ONU llamado Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), bajo el grupo de trabajo 5D en radiocomunicaciones (*ITU-R WP 5D*, del inglés).

Desde ese mismo momento, las instituciones más relevantes en el sector científico en telecomunicaciones a nivel internacional (UIT, 3GPP, GSMA, IEEE, NGMN, WWRF) se lanzan a la carrera hacia el progreso del 5G. A su vez, las grandes compañías fabricantes de equipamiento y sus países asociados de diferentes continentes se unen a la carrera. Se crean diferentes organismos regionales para cumplir con los objetivos propuestos por la UIT a través de iniciativas de financiación I+D y la creación de ecosistemas público-privado del sector industrial y los organismos reguladores. Todo esto ocurre mientras los operadores se encuentran en pleno despliegue del 4G LTE.

En 2013, La Comisión Europea (CE) constituye la asociación público-privada sobre el 5G (5G-PPP) con diferentes grupos de trabajo con el fin de acelerar la investigación y la innovación en tecnología 5G, destinando más de 700 millones de euros dentro del programa Horizonte 2020 (H2020) dividido en tres fases.

La estandarización del 5G comienza sus primeros pasos en 2015 cuando se publica la recomendación ITU-R M.2083-0 que define el marco y los objetivos generales para el futuro desarrollo del programa IMT-2020. En 2016, el organismo de normalización para los sistemas globales de comunicación móvil llamado 3GPP comienza su plan de trabajo para iniciar los estándares enfocados al 5G, separado en dos fases.

En paralelo, la CE publica un documento de la visión europea de la 5G y 5G-PPP en 2015, describiendo los principales casos de innovación y uso de las redes 5G. En 2016 se define un plan de acción 5G para Europa para garantizar el despliegue 5G en toda la Unión Europea. A su vez, en 2018 se establece el Observatorio Europeo 5G como herramienta de seguimiento de los avances del plan de acción, los desarrollos del mercado en Europa y las estrategias nacionales de 5G de los estados miembro.

En 2019, el 3GPP cierra la primera fase de estandarización del 5G en la entrega del lanzamiento 15 (Release 15) de revisiones de estándares de telecomunicaciones. En esta fase se define una nueva red de acceso (en inglés, *Radio Access Network RAN*) y una nueva red troncal (en inglés, *Core Network*). Esta red troncal define dos modos de operación, el modo NSA (*Non-Standalone*) y SA (*Standalone*). El modo NSA aprovecha la infraestructura de red 4G LTE, añadiendo nuevas estaciones base 5G conectadas a la red troncal 4G, mejorando el servicio en velocidad y latencia. El modo SA define una red 5G con una red de acceso y troncal completamente nuevas.

La segunda fase de estandarización se cierra en 2020 en el lanzamiento 16 (Release 16), donde se desarrollan mejoras para las tecnologías existentes como la mejora de la tecnología MIMO o la compartición de espectro dinámico entre 4G y 5G. También se incorporan nuevas funcionalidades con nuevos escenarios para dar respuesta a nuevos servicios.

La tercera fase del 5G termina en 2022 con el lanzamiento 17 (Release 17). Representa una consolidación y mejora de las funcionalidades introducidas en lanzamientos anteriores, a la vez que añade algunas novedades importantes. Su objetivo principal es expandir el alcance del 5G a nuevos dispositivos, despliegues y verticales industriales, además de optimizar el rendimiento de las capacidades existentes. Se introduce avances cruciales, destacando RedCap para IoT y dispositivos portables de menor complejidad con equilibrio entre rendimiento, coste y eficiencia energética. Además, optimiza el *Sidelink* para V2X, seguridad pública y comunicaciones directas, y añade soporte *NR Light* para vehículos autónomos no tripulados. Se expanden las frecuencias milimétricas con el nuevo rango FR2-2, se mejora la precisión y latencia del posicionamiento, y se implementan optimizaciones de eficiencia energética. Finalmente, se incluye soporte para Redes No Terrestres (NTN) como comunicaciones vía satélite, se perfecciona la Computación de Borde Multiacceso (MEC) y se ofrecen mejoras para las Redes Privadas 5G.

El lanzamiento 18 (Release 18) en 2024 junto con el lanzamiento 19 (Release 19) en 2025 representa la estandarización del 5G Avanzado, una evolución significativa del 5G que sienta las bases para el comienzo de la tecnología 6G (ver Figura 1). Su objetivo principal es mejorar el rendimiento existente, con velocidades más rápidas, mayor capacidad y menor latencia, a la vez que expande el soporte a nuevos casos de uso como IoT industrial avanzado y realidad extendida mejorada. Un aspecto clave es la integración de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático para optimizar la red y mejorar la eficiencia energética. Además, se exploran capacidades ampliadas como el posicionamiento mejorado, el *sidelink* avanzado y el soporte para nuevas bandas de frecuencia, para la futura transición hacia el 6G. Para más información sobre los lanzamientos, visitar la página oficial de 3GPP [1]

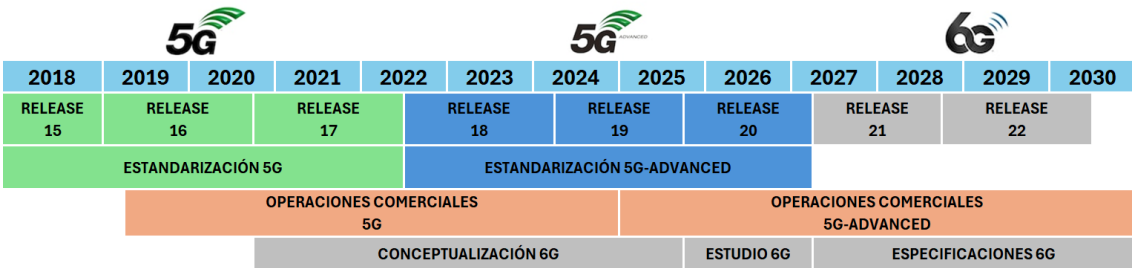


Figura 1. Programa de lanzamientos del 3GPP [1]

1.2 Fundamentos

Las características de la tecnología 5G están enmarcadas por la necesidad de una red de alto desempeño que permita a la sociedad avanzar en la digitalización y la conectividad global. Su

desempeño viene establecido en el programa de comunicaciones IMT-2020 del organismo UIT-T, creando un contexto de diseño global y único de las capacidades que el 5G debe atender. Bajo un consenso a nivel mundial, las capacidades que atienden las necesidades presentes y futuras en las comunicaciones inalámbricas se clasifican según tres servicios principales (ver Figura 2):

- **Banda ancha móvil mejorada** (eMBB – enhanced Mobile Broadband). Define servicios que requieren altas tasa de transmisión de datos.
- **Comunicaciones masivas tipo máquina** (mMTC – Massive Machine-Type Communications). Define servicios que tienen el objetivo de conectividad masiva de miles de dispositivos, aunque todos ellos con transmisiones esporádicas y a baja velocidad de transmisión.
- **Comunicaciones ultrafiabiles y de baja latencia** (uRLLC – Ultra-Reliable Low-latency Communication). Define servicios para aplicaciones que requieren comunicaciones muy fiables y con una muy baja latencia (< 1ms).

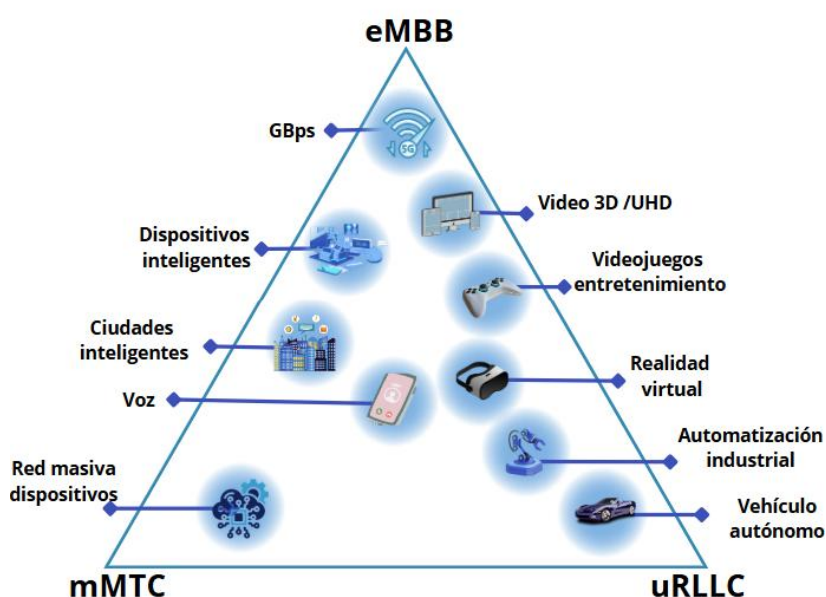


Figura 2. Escenarios de aplicaciones 5G

Con la finalidad de cumplir con las capacidades anteriores, se establece el conjunto de prestaciones de la tecnología 5G:

- Latencia o tiempo de respuesta muy reducida, alcanzando 1 milisegundo.
- Conexión con tasas de velocidad cercanas al 10Gbps.
- Disponibilidad cercana al 100% y posibilidad de cobertura del 100%.
- Conectividad de más dispositivos por kilómetro cuadrado sin que la red se sature, con grandes anchos de banda.
- Reducción al 90% el consumo de energía necesaria de la red, con dispositivos de bajo consumo de una duración de hasta 10 años.

A nivel de arquitectura, la red 5G aporta cambios con la nueva interfaz de radio **5G NR** (5G New Radio) y el nuevo núcleo **5GC** (5G Core), estableciendo una compatibilidad que permite trabajar con sistemas y equipos de generaciones anteriores. Esto permite una migración hacia el 5G de forma gradual, mitigando el impacto del cambio en infraestructuras, de manera que se combina inicialmente la tecnología 4G y 5G.

La implementación del 5G a partir de la infraestructura 4G se denomina **5G NSA** (*Non-Standalone*). Consiste en la adopción del núcleo 4G denominado **EPC** (*Evolved Packet Core*) y el uso de estaciones base 5G NR con antenas de quinta generación llamadas *gNode-B*, que emiten en frecuencias de redes 5G (3500Mhz, 700Mhz, milimétricas entre 25 y 100Ghz). Esto permite un despliegue de una parte de la tecnología 5G, aprovechando las instalaciones e inversiones CAPEX del 4G y aumentando sus prestaciones sin llegar al rendimiento máximo ofrecido por el 5G. En concreto permite disfrutar de una velocidad de hasta 2Gbps, una latencia de 15 milisegundos y una estabilidad de conexión mejorada.

La segunda versión es la llamada **5G SA** (*Standalone*), nombrada comercialmente como 5G+ o 5G real, que funciona sobre una infraestructura totalmente nueva e independiente a la 4G. Esta red utiliza el núcleo de red 5GC y la tecnología de acceso 5G NR, permitiendo disfrutar de la totalidad de las prestaciones de 5G.

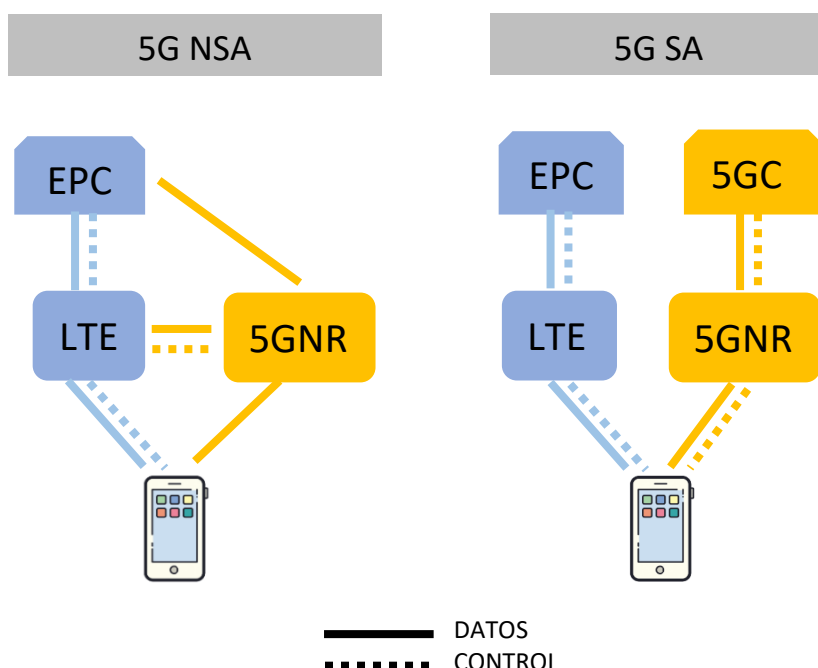


Figura 3. Versiones de Implementación de la tecnología 5G

1.3 Interfaz de radio 5G NR

La tecnología inalámbrica de acceso a radio *5G New Radio* presenta una funcionalidad en una gama extensa de frecuencias:

- Banda baja por debajo de los 7Ghz tipo FDD (dúplex por división de frecuencia), que proporciona una amplia cobertura con capacidad limitada.
- Banda media por debajo de 7Ghz tipo TDD (Dúplex por división de tiempo), que proporciona un amplio ancho de banda con menor cobertura.
- Banda alta por encima de los 24Ghz (ondas milimétricas), que proporciona más ancho de banda, velocidad, menor latencia y menor alcance de cobertura.

El principio básico de modulación de esta interfaz se basa en el esquema OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal) debido a su alta eficiencia espectral, robustez a las interferencias y rendimiento en múltiples rutas. Este esquema divide el flujo de datos en varias subportadoras de diferentes frecuencias y ortogonales entre sí. 5G NR utiliza una

variante llamada **OFDMA** (acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal), distribuyendo subconjuntos de subportadoras por usuarios y permitiendo un acceso concurrente.

En el caso que la cobertura es de mala calidad, en lugar de repartir el espectro en subportadoras ortogonales, se permite un acceso múltiple no ortogonal o esquema **NOMA**, donde los usuarios acceden a toda la banda para conseguir mayor eficiencia espectral. Esto se basa en el principio de las interferencias generadas entre usuarios y la multiplexación en el dominio de la potencia por la distancia física entre usuarios respecto a la antena.

En el caso de cobertura 4G y 5G, a través de la tecnología **EN-DC** (*EUTRA+NR dual connectivity*) se consigue una mejora de la velocidad de transmisión en los terminales gracias a la repartición del tráfico entre las mismas por agregación de portadoras.

Las antenas 5G introducen técnicas de **conformación de haces** (*beamforming*) junto con técnicas de **multiplicidad de antenas masiva** (mMIMO), permitiendo centrar la radiación emitida a los terminales móviles conectados, en lugar de hacerlo de forma omnidireccional, disminuyendo de manera significativa el consumo de energía y mejorando la relación señal ruido.

También se introduce la **comunicación D2D** (*device-to-device*) que permite que dos dispositivos se comuniquen entre sí para acceder al mismo contenido sólo a través de la conexión de red de uno de ellos, reduciendo el tráfico de datos.

1.4 El núcleo de red 5GC

El núcleo 5G (5GC) actúa como gestor de la red y está diseñado para dar soporte a los requisitos del eMBB, URLLC y mMTC. Está basado en una **arquitectura basada en servicios** (SBA) que implementa un conjunto de **funciones de red** (NF) modulares e independientes que se comunican a través de interfaces bien definidas y con una estrategia de separación del plano de control y de datos (CUPS). Esto permite emplear hardware más genérico en el despliegue de las funciones de red, haciendo un núcleo más flexible, interoperable y escalable en la implementación de nuevos servicios. Esta arquitectura permite una adaptación de la capacidad mediante la creación de nuevas instancias de funciones según los requerimientos.

Las funciones de red del 5GC funcionan con un sistema de suscripción/publicación de servicio. Esto es posible gracias a la función de repositorio en red (NRF) que se encarga de dar soporte al descubrimiento de servicios y funciones. Dentro del portafolio de funciones de red, las más destacadas incluyen la función de gestión de acceso y movilidad (AMF) para el registro y la movilidad del usuario, la función de gestión de sesión (SMF) para la gestión de las sesiones de usuario, la función del plano de usuario (UPF) para el enrutamiento de los datos del usuario, y muchas otras que gestionan aspectos como el control de políticas (PCF) o la autenticación (AUSF).

Una de las características más relevantes es la creación de redes flexibles mediante el mecanismo de **virtualización de funciones de red** (NFV) y su gestión a través de las **redes definidas por software** (SDN). Esto permite segmentar la red (*network slicing*) creando servicios de red virtuales dedicados o capas lógicas independientes en una misma infraestructura física.

2 La red 5G en la industria

El uso de redes privadas 5G SA constituyen un cambio significativo hacia la digitalización y automatización avanzada en las fábricas del futuro. Las compañías pueden disponer de su propia red dedicada, segura y personalizada para sus procesos, incluyendo aquellos que son críticos (como pueden ser plantas industriales o centros de logística).

Los sistemas de autenticación, cifrado y control de red de la arquitectura con el núcleo 5G mejora la seguridad y confiabilidad de la red. La posibilidad de particionar los recursos de red mediante la virtualización de servicios (Network Slicing) permiten segmentar conectividades específicas según las necesidades de cada proceso industrial. A su vez, la baja latencia permite el despliegue de aplicaciones en tiempo real para el control remoto de maquinaria, vehículos autónomos o robots. También se habilita una mejora en el uso de sistemas que ofrezcan experiencias inmersivas virtuales o mixtas con aumentación de datos, reduciendo el tiempo efectivo de la presencia física en planta y aumentando la seguridad de los operadores. Todo esto, unido a la alta densidad de dispositivos conectados es ideal para crear fábricas inteligentes de conectividad masiva a partir del paradigma del internet de las cosas en el entorno industrial (IIOT).

En esta sección se revisan las ventajas en la industria de las capacidades que ofrece 5G, una gran densidad de conexión con mMTC, un gran ancho de banda con eMBB y una baja latencia con uRLLC.

2.1 Interconectividad masiva en la industria

La conectividad masiva de dispositivos a través de una red 5G es una revolución en la forma en la que las máquinas se comunican entre sí. La capacidad mMTC de las redes 5G abre la posibilidad de disponer una gran cantidad de dispositivos conectados, permitiendo la implementación de aplicaciones donde existen un conjunto de dispositivos y objetos interconectados a través de una red (privada o internet), con la capacidad de visibilidad e interacción entre ellos. Este tipo de aplicaciones es el término conocido como “Internet de las cosas” (IoT). Aplicado a la industria, es lo que se denomina “Internet de las cosas industrial” (IIoT).

El IIoT sobre 5G ofrece un nuevo ecosistema de servicios alrededor de miles de dispositivos y objetos gestionados en red con una posibilidad de automatización, inteligencia y conectividad sin precedentes. Los servicios en aplicaciones del ámbito industrial compuesta por dispositivos (p. ej. sensores, actuadores, máquinas, robots) y objetos (p. ej. herramientas, útiles, contenedores) aprovechan la captación de la información en tiempo real para mejorar todo tipo de procesos industriales. A su vez, se crean servicios automatizados a través de la interacción directa entre máquinas, sin necesidad de intervención humana, conocido como interacción máquina a máquina (M2M).



La conectividad Máquina a Máquina (M2M) en una planta de fabricación se centra en la interacción autónoma y en tiempo real entre dispositivos industriales. Actualmente, además de 5G existen otras tecnologías que permiten este tipo de comunicaciones. En la Tabla 1 se

describen diferentes tipos de comunicaciones, junto a sus capacidades de red y el uso de aplicaciones más habituales. Como se puede observar, las características técnicas de 5G de alcance, baja latencia, alta capacidad de ancho de banda y capacidad de conexión masiva, la hacen muy adecuada para muchos tipos de aplicaciones frente al resto de alternativas.

Tecnología	Alcance	Ancho de Banda	Latencia	Conexión	Aplicación Ideal
Zigbee	10-100 m	20-250 kbps	30-50ms	Hasta 65,000 dispositivos	Sensores distribuidos en redes mesh
BLE	50-200 m	Hasta 2 Mbps	10-50ms	Cientos de dispositivos	Dispositivos de bajo consumo en tiempo real
Wi-Fi6	30-100 m	Hasta 9.6 Gbps	1-10ms	Decenas por punto de acceso	Aplicaciones de alta velocidad y multimedia
LoRaWAN	1-15 km	0.3-50 kbps	100-1000ms	Miles de dispositivos	Sensores remotos y redes de largo alcance
Sigfox	3-50 km	Hasta 100 bps	1-10s	Millones de dispositivos	Aplicaciones de IoT con transmisión esporádica
NB-IoT	Varios km	Hasta 250 kbps	100-200ms	Miles de dispositivos	Redes IoT en entornos urbanos e industriales
2G/3G/4G	Varios km	40 kbps-300 Mbps	50-300ms	Miles de dispositivos	Comunicación móvil e IoT de banda media
5G	Varios km	Hasta 10 Gbps	1ms	Millones de dispositivos	Comunicación en tiempo real y aplicaciones críticas

Tabla 1. Comunicaciones utilizadas en comunicaciones M2M

El 5G soporta hasta un millón de dispositivos conectados por kilómetro cuadrado, lo que es ideal para fábricas que dependen de sensores IoT distribuidos. Con el mMTC se pueden diseñar redes con millones de dispositivos simultáneos con un bajo impacto en la latencia (se puede degradar hasta 50ms). Esto permite aplicaciones con una monitorización detallada donde cada dispositivo conectado puede transmitir datos a un sistema centralizado sin pérdida de rendimiento, proporcionando una vista granular de los procesos operativos.

Gracias a las redes 5G privadas se puede garantizar una comunicación segura y resiliente para procesos críticos dentro de la factoría. A su vez se puede garantizar un control total de la gestión sobre la infraestructura, permitiendo segmentar la red en distintas secciones virtuales. Esta segmentación facilita la implantación eficiente del IIoT en la industria, pudiendo gestionar y asignar recursos de red según las demandas únicas de las distintas aplicaciones IIoT. Algunas aplicaciones requerirán una transferencia mínima de datos de bajo coste y otras aplicaciones necesitarán un gran ancho de banda y velocidades considerables.

Cabe destacar que en la revisión 17 del 3GPP surge una nueva funcionalidad dentro del estándar 5G, el 5G RedCap (del inglés Reduced Capability). Esta versión ligera de 5G está dirigida a dispositivos IoT que no requieren grandes prestaciones de ancho de banda y latencia. Esto reduce la complejidad del hardware y por defecto el coste del dispositivo. Además, el diseño es energéticamente más eficiente, reduciendo el consumo de energía, lo que lo hace ideal para dispositivos IoT. A pesar de ser una versión reducida, se mejoran las prestaciones de redes anteriores como el 4G IoT, aprovechando algunas características como la segmentación de red. (ver Figura 4)

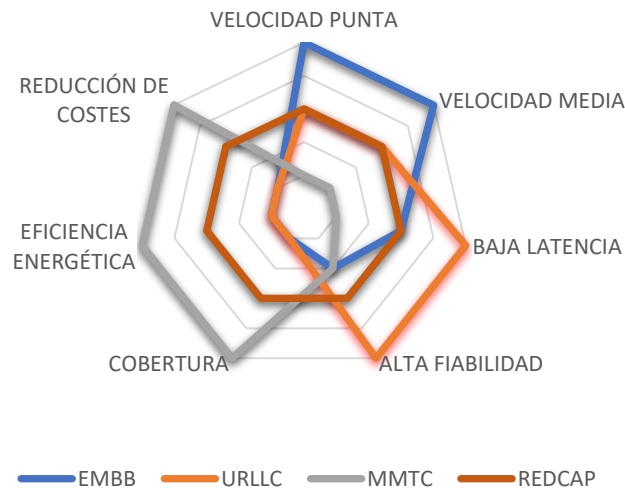


Figura 4. Comparativa de RedCap respecto a los escenarios base para 5G

La primera oleada de dispositivos RedCap se centra en aplicaciones industriales y de IoT debido a los beneficios inmediatos en coste, eficiencia energética y rendimiento para estos casos de uso. Aunque el ecosistema 5G RedCap está en etapas de desarrollo y comercialización, ya se tiene disponibilidad de algunos chipsets como:

- Qualcomm Snapdragon X35. El primer sistema de módem-RF 5G NR-Light(RedCap) del mundo. Es el ejemplo del adaptador de red TCL LINKPORT IK511 para tener conectividad 5G en un ordenador.
- MediaTek T300. MediaTek ofrece este módem 5G RedCap como una solución altamente compacta y de bajo consumo para diversas aplicaciones IoT. Este módulo es utilizado por compañías como Fibocom en su módulo FG332-NA.
- ASR Microelectronics ASR1903. Un chipset 5G RedCap (R17) comercial. Estos módulos son utilizados por Quectel, un líder global en módulos IoT, ha lanzado la serie RG255AA de módulos 5G RedCap que se basan en la plataforma ASR1903

2.2 Banda ancha 5G ultra-rápida para la industria

La posibilidad del 5G para trabajar en una combinación de bandas de frecuencia con un espectro que incluyen las ondas milimétricas y frecuencias más bajas sub-6GHz permite un equilibrio entre velocidad y penetración de señal. Esto es especialmente importante en redes que deban trabajar en entornos industriales con espacios interiores o con infraestructuras que supongan barreras físicas. Por ejemplo, las señales sub-6 GHz tienen mejor penetración en entornos industriales con estructuras densas con maquinaria pesada y paredes metálicas, superando las limitaciones de tecnologías anteriores como Wi-Fi y 4G. Esto sumado al diseño de redes 5G con celdas pequeñas asegura una cobertura homogénea y estable en toda la planta, incluso en zonas difíciles como sótanos o áreas cerradas.

La clave está en la funcionalidad Enhanced Mobile Broadband (eMBB) que busca proporcionar una conexión de banda ancha más consistente y fiable en una cobertura más amplia, tanto en interiores como en exteriores, e incluso en escenarios de movilidad. Esto implica utilizar técnicas avanzadas de asignación dinámica de espectro, agregación de portadoras y el uso de múltiples bandas de frecuencia (bajas, medias y altas, incluyendo ondas milimétricas). También se trabaja en algoritmos para la optimización de la potencia de

transmisión y la interferencia entre celdas para maximizar la capacidad y la cobertura. A su vez, es crucial la optimización de sistemas de antenas avanzadas, incluyendo *MIMO* masivo (*Multiple-Input Multiple-Output*) y *beamforming* (formación de haces), para aumentar la capacidad y la eficiencia espectral de las redes eMBB.

Con un marco teórico de transferencias de hasta 10Gbps y latencias de 5ms, el 5G eMBB ofrece una experiencia de uso intensivo de datos sobre dispositivos móviles tales como canales multimedia en alta resolución (8k) o experiencias inmersivas con dispositivos móviles de realidad aumentada (AR) y realidad virtual (VR). En este sentido, se pueden numerar los siguientes casos de uso para la industria:

- **Aplicaciones de mantenimiento y reparación asistida.** En estas aplicaciones, un técnico puede utilizar unas gafas de RA para mostrar en su campo de visión instrucciones paso a paso y diagramas técnicos para reparar un equipo. Con el 5G se puede ofrecer una experiencia inmersiva compartida, donde el operador y un experto en remoto trabajan en conjunto en la reparación del equipo. El experto, ubicado en otro lugar, puede ver en tiempo real lo que el técnico ve y guiarlo a través del proceso, reduciendo errores y tiempos de inactividad. A su vez, se mejora la información contextual en la supervisión de los equipos, donde el técnico puede enfocarse a un equipo concreto y ver sus alertas o el historial de reparaciones. Supone un incremento de seguridad y operativa, ofreciendo una conciencia situacional y ayuda en la toma de decisiones, sobre todo en situaciones críticas.
- 
- The image shows three workers in an industrial environment, likely a factory or warehouse, wearing VR headsets. They are standing in a line, facing forward, and appear to be engaged in a task that requires visual feedback or training. The background shows industrial equipment and structures. There are '5G' labels on some of the equipment, indicating the use of 5G technology in this application.
- **Aplicaciones de capacitación y formación.** La realidad aumentada impulsada por la capacidad de transmisión de grandes cantidades de datos del 5G facilita la creación de simulaciones inmersivas donde los operarios pueden aprender a manejar maquinaria compleja o realizar procedimientos delicados en entornos virtuales realistas superpuestos en el mundo real, lo que proporciona una formación práctica y segura al evitar los riesgos del uso de equipos reales; además, esta tecnología permite el aprendizaje guiado paso a paso para nuevos empleados en procesos de producción o montaje, mostrando visualmente cada etapa y ofreciendo información adicional según sea necesario. En caso de incidentes, los expertos remotos pueden guiar al personal en el lugar a través de los protocolos de seguridad y los procedimientos de respuesta utilizando la RA.
 - **Aplicaciones de control de calidad.** La alta capacidad del 5G permite a los inspectores superponer criterios de calidad o modelos de referencia directamente sobre los productos, facilitando así la detección eficiente de defectos o desviaciones mediante el procesamiento de imágenes en tiempo real y la superposición de información compleja. Adicionalmente, la RA se emplea para la documentación visual de estos defectos, permitiendo superponer etiquetas, mediciones y anotaciones directamente sobre la imagen del producto defectuoso, creando un registro detallado y visualmente intuitivo.
 - **Aplicaciones de logística.** La RA potenciada por el 5G optimiza las tareas de navegación y picking al superponer rutas óptimas y la ubicación de los artículos directamente en dispositivos inmersivos usados por los trabajadores, lo que incrementa la eficiencia y disminuye los errores. Asimismo, la RA facilita la verificación de inventario mediante el escaneo rápido de códigos de barras o la identificación de objetos, superponiendo

información del inventario en tiempo real para agilizar el seguimiento y la gestión de los productos almacenados.

- **Aplicaciones de diseño y prototipado en metaverso.** El metaverso junto con el 5G ofrece un entorno virtual inmersivo con nuevas formas de colaboración, visualización y experimentación remota. Equipos de diseño ubicados en diferentes lugares pueden colaborar en tiempo real sobre un modelo virtual superpuesto en un espacio físico compartido, facilitando la comunicación y la toma de decisiones sobre posibles comisionados de activos en planta.

La funcionalidad eMBB es un habilitador fundamental para el desarrollo y la implementación del vehículo conectado en el ámbito industrial. Su capacidad para ofrecer velocidades de datos ultra-rápidas y una mayor capacidad de red sienta las bases para una comunicación bidireccional robusta y eficiente entre vehículos no tripulados y la infraestructura circundante, así como con centros de control y otros dispositivos. El eMBB facilita la transmisión de grandes volúmenes de datos en tiempo real generados por los vehículos conectados, incluyendo información de sensores avanzados, cámaras de alta resolución y sistemas de diagnóstico. Esto posibilita la monitorización remota exhaustiva del estado y el rendimiento de la flota, la detección temprana de posibles fallos, optimizando los tiempos de actividad y reduciendo los costos operativos. Además, la alta velocidad de descarga permite la actualización de software y firmware de los vehículos de forma remota y eficiente, asegurando que siempre operen con las últimas funcionalidades y parches de seguridad. Por otro lado, la baja latencia inherente en eMBB, aunque no es su característica principal, resulta crucial para ciertas aplicaciones del vehículo conectado en la industria. Permite una comunicación más ágil y sensible para la coordinación de flotas en tiempo real, la gestión del tráfico en entornos industriales complejos (como puertos o minas), y la habilitación de sistemas de asistencia a la conducción avanzados que requieren una respuesta inmediata del vehículo a la información del entorno.

2.3 Fiabilidad y baja latencia 5G

La capacidad de 5G para alcanzar latencias inferiores a 1 ms es crucial en aplicaciones donde el tiempo de respuesta es determinante. Gracias a la funcionalidad Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC) se garantizan comunicaciones de alta fiabilidad y tiempos de respuesta mínimos. Se abre un mundo de posibilidades para transformar procesos y habilitar nuevos niveles de eficiencia y seguridad en el sector industrial.

En aplicaciones de automatización industrial avanzada, una comunicación inalámbrica de baja latencia facilita el uso de sistemas de control distribuido. Los controladores lógicos programables (PLCs) intercambian datos con múltiples sensores y actuadores en líneas de producción, minimizando el riesgo de desincronización y fallos.

La baja latencia es igualmente vital para operaciones seguras y eficientes con robots colaborativos (cobots), que comparten su espacio de trabajo junto a humanos. Los robots pueden realizar movimientos sincronizados, precisos y seguros para tareas complejas tales como el ensamblaje, la soldadura o la manipulación de materiales. Así mismo, pueden responder en tiempo real a cambios no programados en su entorno. El uRLLC mejora la navegación, la coordinación y la seguridad de flotas de vehículos autónomos (AGV, AMR, UAV) en almacenes,



centros logísticos o plantas de producción. La baja latencia permite reacciones inmediatas ante obstáculos o cambios en el entorno, optimizando rutas y evitando colisiones.

Otras aplicaciones son las de monitorización remota de procesos críticos. En entornos industriales con maquinaria peligrosa, uRLLC posibilita la implementación de sistemas de parada de emergencia inalámbricos con una fiabilidad y latencia que cumplen con los estrictos requisitos de seguridad. uRLLC facilita el control en tiempo real de procesos sensibles en industrias como la química y la petroquímica, con la monitorización y el control altamente fiable, permitiendo ajustes precisos y previniendo situaciones de riesgo. También permite la conexión de una gran cantidad de sensores que transmiten datos críticos en tiempo real con alta fiabilidad, facilitando la monitorización de la salud de los equipos, la detección temprana de fallos y la optimización de la eficiencia energética.

También se mejora las prestaciones de comunicación para asegurar el uso de aplicaciones de teleoperación asistida de forma segura y fiable. En sectores industriales como la construcción o la minería, uRLLC permite el control remoto de máquinas con una precisión y seguridad comparables al control in situ, lo que mejora la seguridad en entornos peligrosos y permite operar desde ubicaciones seguras. Por otro lado, la teleoperación permite a operarios expertos asistir en el control de sistemas en distintas plantas o factorías, evitando costes de desplazamiento, que se traduce a una reducción de emisiones de CO₂.

3 Tendencias y desafíos del 5G

El despliegue actual del 5G está protagonizada por la necesidad de conseguir que las diferentes compañías de telecomunicaciones consigan implantar sus estándares a nivel internacional. La compra de soluciones y equipamientos por parte de los operadores conlleva un despliegue lento e incremental, con la realización de pruebas piloto que permiten analizar las ventajas que la propia tecnología aporta a la industria.

La tecnología 5G está aún en desarrollo, pero su versión final será una realidad en breve y dará paso a la siguiente generación de red 6G. Pero queda un largo camino por recorrer en términos de implantación, requiriendo realizar acciones que permitan que las industrias sean capaces de incorporar el 5G de una manera sólida y ordenada mediante una adopción tecnológica en situaciones realistas de la industria. Esta tecnología aumentará la ventaja competitiva industrial y ayudará a desarrollar el ecosistema de industria 5.0.

Para poder crear una fabricación flexible y descentralizada es necesario crear un habilitador real "en modo de factoría" para poder dar soluciones a las industrias que quieran testear o acelerar de primera mano la tecnología 5G aplicada a su realidad con las características principales del 5G: alta capacidad de datos -ancho de banda- con una ciberseguridad para hardware que lo harán seguro a la vez que se incrementará el número de sensores conectado con su actuación inmediata debido a la baja latencia del sistema completo para ayudar a la modernización del tejido industrial.

La mayoría de los demostradores de tecnología 5G son demasiado parciales y muy orientados al sector de las comunicaciones o son pruebas puntuales de conexión. A pesar de las iniciativas con diversos proyectos H2020, hay pocos entornos de demostración de ámbito industrial.

Existen pocos casos de uso de la implantación de la tecnología 5G en casos reales de producción que permitan dar un salto cualitativo y cuantitativo adopción tecnológica y la validación de las ventajas reales que aporta esta nueva red. Por ello, se debe contar con una

plataforma y un espacio de pruebas reales con una red 5G y con equipamientos industriales con sensores industrial adecuados, para poder probar las soluciones deseadas por las empresas.

En paralelo, es importante crear más ecosistemas y redes de emprendimiento que impulsen la tecnología 5G. Es de suma importancia identificar y validar a los actores, así como coordinar las iniciativas a desarrollar a nivel local e internacional. A su vez, es vital establecer una red que comparta conocimientos (evolución de la tecnología, estándares, proyectos, mejoras prácticas, etc.) de forma periódica para dinamizar la adopción del 5G en la industria y la sociedad en general.

En esta sección se analiza la aparición del 5G como habilitador de la computación distribuida para sistemas de control en la industria, en concreto para sistemas robóticos. También se analiza las ventajas del 5G para la disposición de modelos de IA distribuido en los ecosistemas industriales. Finalmente se aborda el desafío de la seguridad en entornos industriales dotados de redes 5G.

3.1 Computación frontera en robótica

Los robots industriales convencionales son de alta utilidad en la realización de tareas repetitivas para la producción de grandes lotes en espacios de trabajo separados de los operadores humanos por barreras de seguridad. Sin embargo, la demanda de productos personalizados y de ciclos de vida cortos requiere de un sistema de fabricación más flexible, que permita evitar el aumento de los tiempos de inactividad necesarios para la reprogramación de los robots. Para ello, los sistemas de producción están evolucionando de procesos “estáticos y secuenciales” a procesos “flexibles y modulares”, considerando flotas de Robots que deberían ser capaces de realizar tareas diversas y adaptarse a entornos menos estructurados que los necesarios en la robótica convencional.

Esta flexibilidad implica algunos inconvenientes, como que un robot no se pueda conectar por cable a grandes recursos computacionales y de suministro de energía. En este contexto, la computación distribuida ofrece la posibilidad de traspasar la realización de cálculos pesados a un servidor fuera del robot, ahorrando costes de hardware informático montado en el robot y el gasto de batería que este implica.

Dependiendo de la latencia de las comunicaciones y de los requerimientos informáticos de las operaciones, la disponibilidad de los recursos informáticos y su ubicación puede tener diferentes enfoques:

- **Computación en la nube.** La computación en la nube ofrece recursos computacionales bajo demanda prácticamente ilimitados, pero estos recursos están ubicados en centros de datos centralizados, lo que puede producir una gran latencia de comunicación, típicamente de más de 20 ms, debido a las largas distancias que pueden existir entre los recursos y al paso a través de varias redes, incluida Internet.
- **Computación en el dispositivo.** La computación en el dispositivo utiliza los recursos computacionales, posiblemente limitados, existentes a bordo del dispositivo, que actúa sin descargar operaciones computacionales a otros dispositivos cercanos o en la nube. Si bien los recursos son limitados la latencia de comunicación suele estar por debajo de 1 ms.
- **Computación frontera.** La computación frontera utiliza recursos computacionales distribuidos entre los centros de datos centralizados y los propios dispositivos. Estos recursos computacionales son de diferentes tamaños y pueden ser proporcionados tanto por otros dispositivos cercanos como por centros de datos que generalmente se encuentran

cerca. Por lo tanto, reducen la latencia y ancho de banda y permiten mejorar el rendimiento, el coste operativo y la confiabilidad de las aplicaciones y los servicios.

La computación frontera combinada con una potente comunicación inalámbrica como 5G o WiFi 6 que permita la transmisión de datos en unos pocos milisegundos puede dar el rendimiento computacional de un centro de datos pequeño a los dispositivos móviles con recursos limitados, permitiendo latencias generalmente en el rango 1 ms a 20 ms.

La implementación de un control distribuido para robots industriales experimenta una revolución paradigmática con la integración de la tecnología 5G, particularmente en sus vertientes de URLLC y eMBB. Se fundamenta en la posibilidad de descentralizar el control en capas, permitiendo que cada robot o grupo de robots tome decisiones locales basadas en datos sensoriales en tiempo real y en comunicación coordinada con otros agentes a través de la red 5G.

La baja latencia en 5G es crítica para aplicaciones que demandan sincronización precisa y respuestas inmediatas, como la colaboración humano-robot (cobots) y la coordinación de movimientos complejos en líneas de ensamblaje. Esta capacidad permite implementar bucles de control cerrados a nivel inalámbrico con un rendimiento comparable a los sistemas cableados, minimizando el riesgo de desincronización y mejorando la seguridad operativa. Por otro lado, el gran ancho de banda facilita la transmisión de grandes volúmenes de datos generados por los sensores avanzados de los robots (cámaras de alta resolución, escáneres 3D, sensores de fuerza), permitiendo la implementación de algoritmos de percepción avanzada y planificación de movimientos complejos que pueden ejecutarse de forma distribuida. La combinación de URLLC y eMBB también abre la puerta a la teleoperación robótica precisa y en tiempo real por parte de operadores humanos ubicados remotamente, lo cual es crucial para tareas de mantenimiento, intervención en entornos peligrosos o reconfiguración flexible de las líneas de producción.

En este ámbito cabe destacar el uso de la tecnología Multi-access Edge Computing (MEC), que permite que los datos se analicen, procesen y almacenen más cerca del usuario final, dentro de la red de acceso radio (RAN) o en estaciones base. Esto reduce significativamente la latencia, mejora la fiabilidad, disminuye la congestión de la red y permite el procesamiento de datos en tiempo real cerca de la fuente. Se basa en una arquitectura distribuida habilitada por la virtualización (SDN - redes definidas por software, NFV - funciones de red virtualizadas) y conectividad de alta velocidad. Todo esto se gestiona mediante una variedad de algoritmos que optimizan el rendimiento, la latencia, la fiabilidad y la utilización de recursos para ofrecer servicios mejorados a los usuarios en el borde de la red.

La combinación de Multi-access Edge Computing (MEC) y la tecnología 5G representa una poderosa sinergia que está transformando la forma en que se entregan y experimentan los servicios y aplicaciones. 5G proporciona la infraestructura de red de alta velocidad, baja latencia y gran capacidad necesaria para transportar grandes cantidades de datos de manera eficiente. MEC, por su parte, acerca la potencia de computación y el almacenamiento al borde de la red, más cerca de los usuarios y dispositivos.

Las investigaciones actuales se centran en la optimización de los protocolos de comunicación 5G para las exigencias específicas del control robótico distribuido, incluyendo la gestión eficiente de la movilidad, la garantía de calidad de servicio (QoS) diferenciada para el tráfico de control crítico y el desarrollo de arquitecturas de red resilientes ante posibles fallos. Asimismo, se exploran algoritmos de control distribuido y aprendizaje que aprovechan la capacidad de

cómputo de los robots y la conectividad 5G para lograr sistemas más autónomos, adaptativos y eficientes. La validación experimental de estos conceptos en entornos industriales reales es un área activa de investigación, con el objetivo de demostrar el potencial del 5G para transformar la fabricación y la automatización industrial.

El proyecto 5G-ERA [2], financiado por la UE, aprovecha la nueva tecnología 5G para evaluar los desafíos actuales en el avance y el uso de la autonomía robótica y, posteriormente, encontrar soluciones y mejoras. Las pruebas en diferentes sectores en protección pública y ayuda en caso de catástrofes (PPDR), transporte, sanidad y fabricación mediante la creación rápida de prototipos de soluciones de NetApp y la mejora de las experiencias verticales en materia de autonomía demuestran el potencial de la tecnología 5G para aplicaciones robóticas.

En algunos trabajos se ha analizado el uso de la red 5G con uRLLC para la navegación de vehículos autónomos. En la publicación "*Towards a 5G mobile edge cloud planner for autonomous mobile robots*" [3] se expone que la planificación de la navegación y el acoplamiento de un robot móvil autónomo se pueden realizar de manera confiable utilizando la computación de frontera 5G. Los tamaños de los paquetes transmitidos están en un rango entre 64 y 1514 bytes y se utiliza un emulador de 5G para aplicar los retardos de paquetes que se obtienen de una red 5G privada con espectro de 3,7 GHz y ancho de banda de 100 MHz y una red 5G simulada con funcionalidad URLLC. En el primer caso, se logra un promedio de alrededor de 4 ms de latencia unidireccional y en el segundo de 1 ms. Los autores compararon ambas redes 5G con una comunicación por cable en una tarea de navegación y obtuvieron, respectivamente, un aumento del 1,5% y 1,1% del tiempo de ejecución. En el acoplamiento, se compararon las precisiones obtenidas, con el enfoque de computación frontera 5G dando como resultado un desplazamiento respecto a la posición objetivo de 3,09 mm y 1,37 mm, respectivamente, mientras que una conexión por cable logra un desplazamiento de 0 mm. Ambos experimentos muestran una disminución del rendimiento con la comunicación 5G, sin embargo, los autores consideran que es "aceptable para el funcionamiento confiable de los robots móviles autónomos"

La interoperabilidad del 5G con redes deterministas llamadas red sensible al tiempo (TSN, del inglés Time-Sensitive Networking) ha sido analizada para el control cooperativo de robots móviles [4]. Se utiliza un prototipo URLLC 5G con un ancho de banda de 100 MHz en el espectro de 28 GHz para simular los requisitos de comunicación de las tareas de cooperación de robots. Se hace hincapié en la latencia de transmisión, las variaciones de latencia (*jitter*) y la sincronización temporal del sistema. Los paquetes de 32 bytes se transmiten E2E en una media de aproximadamente 0,7 ms y los paquetes de 1420 bytes en aproximadamente 1 ms de media. Las variaciones de latencia medidas oscilan entre 0,5 y 1,2 ms.

También se han evaluado distintas diversas arquitecturas computacionales para la gestión de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) [5]. En concreto se contrasta la eficiencia de la computación en el borde 5G con la computación en la nube (tanto 4G como 5G) y el procesamiento integrado en el propio UAV. Los resultados indicaron que, mientras el estado del UAV se transmitía a una frecuencia de 100 Hz, el control ejecutado en el computador del borde a 40 Hz lograba una latencia media de 20 a 30 milisegundos. Este valor fue notablemente inferior a las latencias observadas con las soluciones de computación en la nube, que superaban los 100 milisegundos en promedio. Esta menor latencia se tradujo en una reducción del error de control, permitiendo al UAV seguir una trayectoria circular de manera más fluida y evitar un obstáculo de forma exitosa, una capacidad que no mostraron las alternativas basadas en la nube. Aunque

la computación a bordo demostró ser la opción con el mejor desempeño global, la computación en el borde 5G presentó un comportamiento comparable.

Otros trabajos han experimentado con el procesamiento de imágenes en frontera para el uso por parte de manipuladores móviles [6]. En este caso, el procesamiento de imágenes se descarga desde un manipulador móvil a un computador en la frontera en una aplicación robótica de recolección de frutas. Las imágenes RGB y de profundidad, con una resolución de 848×480 píxeles, se transmiten a 30 Hz al computador de frontera equipado con una GPU Nvidia RTX-2080. Allí, la detección de las frutas se realiza mediante métodos de segmentación basados en aprendizaje profundo, y las etiquetas se transmiten de vuelta al robot a 50 Hz, donde se lleva a cabo la planificación del movimiento. Los tiempos de procesamiento se aceleraron más de 18 veces en comparación con la arquitectura previa dispuesta por un computador local con una Nvidia Jetson Xavier NX, lo que resulta en una reducción significativa del tiempo total de ejecución.

También se han realizado experimentos y el análisis del uso de la red 5G en robótica colaborativa [7]. En este trabajo, se presenta la implementación de un sistema de control distribuido para robótica colaborativa que descarga el procesamiento de imágenes a un servidor de borde conectado a través de una red privada 5G. El objetivo principal es cuantificar y analizar el impacto de diversos parámetros, como la frecuencia de muestreo de los sensores, la resolución y compresión de las imágenes, y la configuración de calidad de servicio (QoS) de la red, en el tiempo de reacción general del sistema. Además, se aborda la seguridad en la colaboración humano-robot mediante la implementación de mecanismos de control de bajo nivel que detienen el robot en caso de fluctuaciones excesivas en la latencia o detecciones de objetos críticos perdidas con frecuencia.

3.2 Inteligencia artificial en red

El potencial de la inteligencia artificial se ve aumentado gracias a las capacidades de las redes 5G y la computación distribuida. Con ello aparecen nuevas sinergias entre tecnologías, como es el caso de la nueva tecnología AIoT (Inteligencia artificial de las cosas), dotándolos la capacidad de acceder a métodos aprendizaje automático. Esto dota a los dispositivos IoT a ser más autónomos y poder tomar decisiones a través del análisis de datos directo.

Gracias a las capacidades de la red 5G se utilizan nuevas aproximaciones en los procesos de entrenamiento e inferencia de modelos de IA avanzados. La tendencia es generar los modelos IA mediante un entrenamiento en servidores de alto rendimiento, donde el proceso puede durar horas, días o semanas. La disponibilidad de nuevos datos a analizar es inmediata y segura gracias a la red 5G, que transporta los datos desde los sensores a dispositivos frontera y a los servidores de entrenamiento local o en la nube con un protocolo establecido por el experto en IA/ML.

El despliegue de los modelos IA tiene menos requerimientos en recursos computacionales que el entrenamiento, pero exige un tiempo de respuesta muy rápido según se obtienen los datos en tiempo real. Dichos despliegues se pueden asignar a múltiples nodos distribuidos en el borde conectados a través de la red 5G, cerca de la fuente donde se generan los datos.

En el ámbito industrial, esta sinergia facilita la creación de sistemas más inteligentes y autónomos. Los robots y las máquinas equipadas con sensores y capacidades de IA pueden recopilar y procesar grandes cantidades de datos en tiempo real a través de redes 5G. La ingesta masiva de datos en tiempo permite ejecutar modelos de mantenimiento predictivo avanzados, que analizan patrones y anomalías para predecir fallos en la maquinaria, realizando intervenciones proactivas y reduciendo el tiempo de inactividad.

En el proyecto europeo 5G-INDUCE se ha trabajado en una Aplicación de Red (NetApp) habilitada para 5G para el mantenimiento predictivo en infraestructuras críticas relacionadas con el sector de la energía y la manufactura [8]. La NetApp propuesta consta de varios componentes contenerizados responsables de recuperar datos operativos de series temporales de los activos y detectar posibles valores atípicos/anomalías con respecto a su funcionamiento nominal. Los resultados obtenidos indican las ventajas de usar la red 5G para el uso de algoritmos de mantenimiento predictivo debido a la frecuente enorme cantidad de datos que se necesita transferir y analizar.

El uso de IA y red 5G se diversifica en una serie de aplicaciones que antes no eran posibles para entornos de dispositivos móviles conectados, sistemas heterogéneos o sistemas críticos. En sistemas de vehículos conectados (V2X), se pueden compartir datos, compartir la detección de obstáculos, predecir congestiones, crear límites de velocidad dinámicamente, todo ello interactuando en tiempo real mediante la computación en el borde multi acceso (MEC) [9].

También se consideran nuevas aplicaciones de inspección para la industria 4.0, creando sistemas robustos de monitorización automática con la ingesta de datos que requieren gran ancho de banda, como es el uso de video en tiempo real [10]. Estas aplicaciones detectan errores y defectos en la producción, incorporando cámaras de alta resolución que transmiten los datos para ser procesados por modelos IA en tiempo real. La velocidad y el ancho de banda del 5G permiten que los sistemas de análisis detecten anomalías de forma instantánea, reduciendo mermas y mejorando la calidad de los productos

3.3 Seguridad industrial en redes 5G

Cuando se habla de la seguridad de la información, hay que realizar un análisis exhaustivo de los riesgos para comprender las posibles vulnerabilidades que afecten la confidencialidad (evitar el acceso no autorizado), la integridad (garantizar que la información no se altera sin permiso) y la disponibilidad (asegurar el acceso a usuarios autorizados). Se debe identificar las amenazas potenciales para saber cómo implantar las medidas de seguridad que permita:

- Acceso a la información al personal autorizado y garantía que solo las personas autorizadas puedan ver los datos y otros activos corporativos.
- Permisos y accesos a nivel de usuario que limiten el acceso no autorizado.
- Definición de planes de recuperación temprana tras un incidente de seguridad.

Estos mecanismos de seguridad son conocidos en sistemas de tecnología de la información (IT), pero en el entorno industrial se encuentran los dispositivos de campo gestionados bajo el término de tecnología operativa (OT). Hasta el momento, para el diseño o arquitectura de un sistema de control industrial (ICS) se utiliza el modelo Purdue [11]. Este modelo segmenta por capas la parte empresarial y la de infraestructura de procesos, definiendo las interconexiones e interdependencias de todos los componentes del ICS. (ver Figura 5)

Con la llegada del IIoT, este modelo queda comprometido ya que existen dispositivos del nivel 0 que se están comunicando con servidores en niveles superiores e incluso en la nube a través de la red inalámbrica. En primera instancia, estos dispositivos que antes los gestionaba y administraba el departamento de mantenimiento de operaciones OT, han pasado a ser responsabilidad de IT. Con lo que el técnico IT también debe de estar pendiente de securizar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de las maquinas que están en este entorno. En este contexto, está el reto de encontrar a personas cualificadas con experiencia en el sector IT con conocimientos en entornos industriales.

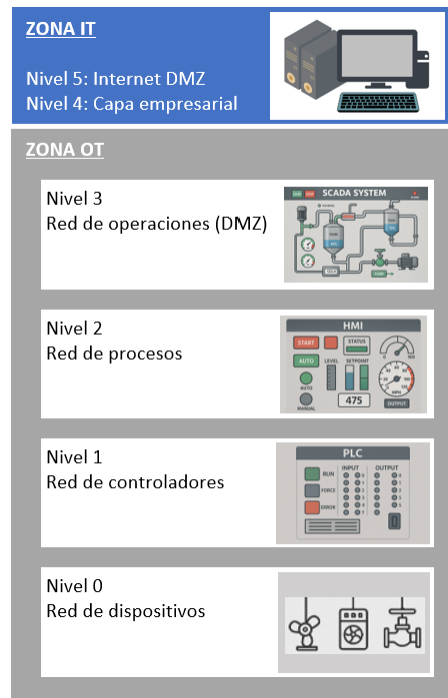


Figura 5. Modelo Purdue

A medida que se estrecha la brecha entre IT y OT se abre otra sobre la seguridad de las redes físicas, hasta ahora desconectadas entre sí, dificultando los ataques y amenazas cibernéticas. Por ello, se crean estrategias de ciberseguridad exclusivas para OT, creando cortafuegos específicos que conocen los protocolos de OT e inspeccionan el tráfico de red en busca de patrones o comandos potencialmente malicioso y que, a su vez, aplican un control de acceso en los niveles OT. Existe un desafío en este tipo de enfoques de seguridad, ya que es un compromiso entre seguridad preventiva y rendimiento del sistema dentro del contexto de operaciones de procesos en entornos industriales.

Desde las empresas del sector industrial, se debe asegurar la disponibilidad y productividad de las máquinas industriales, realizando auditorías periódicas y escaneo de vulnerabilidades para identificar las brechas de seguridad que podrían ser susceptibles de ataques por parte de ciberdelincuentes. Algunas de las medidas a considerar desde el departamento OT son:

- **Monitoreo continuo.** Un monitoreo continuo de la infraestructura OT con una solución de gestión de eventos e información de seguridad (SIEM) permite conocer la procedencia del ataque y protegerse del mismo.
- **Servicio gestionado 24/7.** Disponer de un servicio centralizado 24x7 desde un centro de operaciones de seguridad (SOC) permite actuar en todo momento dado que el cibercriminal no descansa, y los sistemas IoT están 24 horas encendidos.
- **Actualizaciones periódicas.** Parcheo y actualización continua de firmware para mejorar la coordinación y compatibilidad entre diferentes tipos de hardware y software
- **Protección automatizada.** Funcionalidades automatizadas con capacidades de respuesta ante incidencias. Puede ser un detector y respuesta de punto final (ERD), que detecta y responde a amenazas en dispositivos finales. Otra opción es un detector y respuesta extendido (XDR) que integra datos de seguridad de varias capas para una visión y respuesta más amplias. También existe el detector y respuesta administrado (MDR) que ofrece servicios gestionados de ERD o XDR por expertos externos.

- **Segmentación de red.** Se puede segmentar o micro segmentar la red OT, aislando aplicaciones críticas y reduciendo el impacto de posibles ataques.
- **Cifrado de datos.** Utilizar protocolos de cifrado robustos para proteger los datos. Entre ellos tenemos el estándar de cifrado triple de datos (3DES) y estándar de cifrado avanzado (AES).
- **Limitación de acceso.** Implementar autenticación robusta gestión de identidad para prevenir accesos no autorizados.

A pesar de todas estas medidas, la conectividad a través del 5G de multitud de dispositivos industriales en la zona OT amplifica la vulnerabilidad del sistema industrial. Primero, las redes inalámbricas son inherentemente más susceptibles a la interferencia física y la manipulación de la capa física. A su vez, la proliferación de dispositivos conectados IIoT a través de redes 5G expande significativamente las vías de ataque a los ciberdelincuentes. Por otro lado, si los sistemas OT operan con tecnologías antiguas, estos carecen de las características de seguridad modernas, lo que los convierte en blancos fáciles.

Los ataques dirigidos y el ransomware representan riesgos significativos para la continuidad operativa y la seguridad física. La continua evolución de las ciber amenazas ha dado origen a nuevos desafíos, donde se debe garantizar un alto nivel de seguridad de las redes y los sistemas de información, y más si existen servicios expuestos al exterior. Aquí, la seguridad de los componentes y servicios de terceros en la cadena de suministro del 5G es crucial.

Dada la escalabilidad del 5G, se estima un despliegue de un número cada vez mayor de pequeñas celdas eNBs y gNBs que proporcionarán conectividad a un número cada vez mayor de dispositivos. Muchas de estas celdas estarán en el dominio público y, en algunos casos, se conectarán a la red del Operador de Red Móvil (MNO) a través de una red de retorno no confiable. Esto provoca un aumento del riesgo de alteración indebida del tráfico sobre la red. Pueden suceder ataques de "Man in the Middle" (MIM) para interceptar el tráfico de control y plano de usuario en redes 5G. Esto significa que el atacante podría intentar interceptar tanto las señales de control, que gestionan la conexión y la funcionalidad de la red, como el tráfico del plano de usuario, que transporta los datos reales del usuario. A su vez, un aumento de dispositivos conectados a la red conlleva el riesgo de ataques de denegación de servicio distribuido (DDoS), como tormentas de señalización, que pueden degradar los servicios que proporciona la red móvil o incluso interrumpirlos por completo.

Cualquiera de los ataques anteriores tiene el potencial de interrumpir todos los servicios sobre la red. También pueden exponer y modificar datos de los usuarios, comprometiendo la capacidad de los operadores para cumplir con las regulaciones de seguridad y privacidad de los datos. Los operadores y responsables del despliegue de la red 5G deben brindar de forma segura los servicios con una solución de seguridad integral. Para la protección de las comunicaciones en redes de acceso radio (RAN) y su conexión con el núcleo de la red, el 3GPP sugiere implementar Gateways de Seguridad (SecGW/SEG). Estos elementos de seguridad emplean el protocolo IPsec y la administración de certificados digitales para establecer un control de acceso mediante la autenticación de entidades, a la vez que aseguran la privacidad de los datos transmitidos a través del cifrado y verifican su inalterabilidad.

El uso de bandas no licenciadas en 5G como la de 5 GHz, introduce desafíos de seguridad por la coexistencia con otras tecnologías como el Wi-Fi. Esta coexistencia heterogénea en estas bandas permite posibilita ataques que explotan debilidades en los protocolos de acceso al canal, como el CSMA/CA. Un punto de acceso Wi-Fi malicioso y móvil (mmAP) se desplaza por un entorno físico para identificar dispositivos críticos en el IAS, detecta su canal operativo y lanza

ataques en la capa MAC. Un ejemplo de estos ataques es el modelo **PACMAN** [12], diseñado para explotar vulnerabilidades en sistemas de automatización industrial (IAS) habilitados con 5G privado. Este ataque aprovecha tanto la movilidad física como la capacidad de cambiar entre frecuencias para eludir las técnicas tradicionales de detección. Los mismos autores presentan otro modelo denominado **RanCAD** [13], que explota una nueva vulnerabilidad en el mecanismo de acceso al canal. En el ataque propuesto, un punto de acceso malicioso engaña a una estación base 5G víctima para que posponga su acceso al canal compartido, lo que resulta en una mayor demora en el acceso al canal y una menor utilización del espectro.

La arquitectura de red distribuida con computación de borde multiacceso (MEC) en múltiples ubicaciones combinado con una alta densidad de dispositivos conectados crean vulnerabilidades adicionales en la red 5G. Los modelos de ataque DDoS mejoran su rendimiento de ataque tanto en MEC como el núcleo 5G, dejando los servicios de red inutilizados. Los más conocidos son el *SYN flood* y el *UDP flood*. El *SYN flood* envía paquetes SYN (solicitudes de sincronización TCP) a altas velocidades para exceder las limitaciones de capacidad del servicio y derribarlos. Por otro lado, el *UDP flood* utiliza múltiples dispositivos con diferentes direcciones IP para enviar una gran cantidad de paquetes UDP falsos a unos puertos determinados del servidor a atacar.

4 Conclusiones

En este artículo se ha detallado la profunda transformación que protagoniza la tecnología 5G en el panorama de la conectividad móvil y, de manera particular, en el sector industrial. Desde su concepción y las fases de estandarización lideradas por 3GPP, se observa una evolución constante hacia una red más potente, flexible y segura.

Los fundamentos del 5G, basados en la mejora de la banda ancha móvil (eMBB), las comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC) y las comunicaciones ultraconfiables y de baja latencia (uRLLC), sientan las bases para una nueva era de digitalización industrial. La implementación de redes privadas 5G SA, la interconectividad masiva habilitada por el IIoT y el rendimiento superior en términos de velocidad y latencia abren un abanico de posibilidades para la automatización avanzada, la realidad aumentada en procesos industriales y la monitorización crítica, marcando un camino claro hacia la Industria 4.0 y la futura Industria 5.0.

Sin embargo, la adopción masiva y la realización del potencial completo del 5G y su evolución hacia el 5G Avanzado no están exentas de desafíos. Uno de los principales retos radica en la complejidad del despliegue, que requiere una inversión significativa en infraestructura, la gestión de un espectro de radio diverso y la coordinación entre múltiples actores. La interoperabilidad entre diferentes redes y dispositivos, así como la seguridad en un entorno con una cantidad masiva de dispositivos conectados, también son aspectos críticos que deben abordarse. Además, la necesidad de desarrollar nuevos casos de uso que aprovechen al máximo las capacidades del 5G en diferentes sectores sigue siendo un desafío importante para materializar completamente su impacto transformador.

A pesar de estos obstáculos, el comienzo de una nueva era de la conectividad ya se asoma con la llegada de la tecnología 6G. Se espera que el 6G revolucione la conectividad al ofrecer velocidades de datos y latencia exponencialmente mejores que el 5G, gracias a la exploración de nuevas bandas de frecuencia como el THz. La integración de la IA será fundamental para la gestión y optimización de la red, habilitando capacidades como la detección y comunicación integradas (ISAC). Esto impulsará experiencias de realidad extendida inmersivas, un "Internet de Todo" avanzado y la posibilidad de comunicaciones holográficas, transformando la forma en que interactuamos con el mundo digital y abriendo la puerta a aplicaciones hasta ahora consideradas ciencia ficción.

Referencias

- [1] 3GPP, «3GPP Portal,» [En línea]. Available: www.3gpp.org. [Último acceso: 01/05/ 2025].
- [2] C. Lessi, G. Agapiou, M. Sophocleous, I. Chochliouros, R. Qiu y S. Androulidakis, «The Use of Robotics in Critical Use Cases: The 5G-ERA Project Solution,» *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Springer, vol. 652, 2022.
- [3] T. Raunholt, I. Rodriguez, P. Mogensen y M. Larsen, «Towards a 5G mobile edge cloud planner for autonomous mobile robots,» de *Proc. IEEE 94th Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, Sep. 202.
- [4] P. Kehl, J. Ansari, M. H. Jafari, P. Becker, J. Sachs, N. König, G. A. y R. H. Schmitt, «Prototype of 5g integrated with TSN for edge-controlled mobile robotics,» *Electronics. Online journal*, vol. 11, nº 11, p. 166, 2022.
- [5] G. Damigos, T. Lindgren y G. Nikolakopoulos, «Toward 5G edge computing for enabling autonomous aerial vehicles,» *IEEE Access*, vol. 11, pp. 3926-3941, 2023.
- [6] U. A. Zahidi, A. Khan, T. Zhivkov, J. Dichtl, D. Li y S. Parsa, «Optimising robotic operation speed with edge computing via 5G network: Insights from selective harvesting robots,» *J. Field Robotics*, 2024.
- [7] D. Urbaniak, S. B. Damsgaard, W. Zhang, J. Rosell, R. Suárez y M. Suppa, «Distributed Control for Collaborative Robotic Systems Using 5G Edge Computing,» *IEEE Access*, vol. 12, pp. 148706-148718, 2024.
- [8] S. Giannakidou, «5G-Enabled NetApp for Predictive Maintenance in Critical Infrastructures,» de *5th World Symposium on Communication Engineering (WSCE)*, Nagoya, Japan, 2022.
- [9] B. Mendes, M. Araújo, A. Goes, D. Corujo y A. S. Oliveira, «Exploring V2X in 5G networks: A comprehensive survey of location-based services in hybrid scenarios,» *Vehicular Communications*, vol. 52, 2025.
- [10] F. Conceição, «Empowering Industry 4.0 and Autonomous Drone Scouting use cases through 5G-DIVE Solution,» de *Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit*, Porto, Portugal, 2021.
- [11] T. J. Williams, «The Purdue enterprise reference architecture,» *Computers in industry*, vol. 24, nº 2, pp. 141-158, 1994.
- [12] M. R. Rahman, M. Hossain y J. Xie, «PACMAN Attack: A Mobility-Powered Attack in Private 5G-Enabled Industrial Automation System,» de *IEEE International Conference on Communications*, 2023.
- [13] M. R. Rahman y M. Hossain, «RanCAD: Random Channel Access Deterrence Attack against Spectrum Coexistence between NR-U and Wi-Fi on the 5GHz Unlicensed Band,» de *IEEE International Conference on Communications*, Denver, 2024.