Es catedrático de Universidad del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, director de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá y director del Observatorio ISDEFE-UAH en TIC y Avance Digital en la misma Universidad. Doctor ingeniero de telecomunicación por la Universidad de Cantabria.

Antonio Portilla

Profesor e investigador en la Universidad de Alcalá, sus líneas de trabajo se centran en la aplicación de técnicas de soft computing en la planificación y optimización de redes móviles de telecomunicación orientado a la regulación del mercado. Es autor de más de 150 artículos y conferencias y ha participado en más 60 proyectos de investigación y trasferencia con entidades públicas y con empresas del sector, además ha sido mercedor de 11 premios de investigación. Es vocal de la Junta de Gobierno del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación y consultor externo de diversas organizaciones y compañías privadas.

Catedrático de Universidad en la Universidad de Alcalá Director de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá y director del Observatorio ISDEFE-UAH en TIC y Avance Digital







5G: fundamentos de una tecnología QUE CAMBIARÁ EL MUNDO

Antonio Portilla Figueras, Silvia Jiménez Fernández y Sancho Salcedo Sanz*

Cátedra ISDEFE-UAH en TIC y Avance Digital

¿Qué es la tecnología 5G y por qué es tan importante?

as comunicaciones móviles son un hito de nuestro tiempo. Según los informes proporcionados por la GSMA Association, actualmente hay 5 800 millones de usuarios conectados, con una tasa de penetración en la población mundial del 70 % y un crecimiento esperado de 1,9 % en entre 2019 y 2025. El número de usuarios de Internet móvil ha crecido desde 3 800 millones en 2019 a 5 000 millones en 2020, lo que supone un crecimiento anual del 12 %.

Las diferentes generaciones de comunicaciones móviles han servido de catalizador para el crecimiento y expansión de esta tecnología. Desde los años 90 del pasado siglo, donde la denominada 'killer application' de la segunda generación (2G) de telefonía móvil fue la voz, que nos permitía comunicarnos donde quiera que

estuviésemos —si había cobertura, por supuesto—, hasta el momento actual, donde el despliegue casi ubicuo de 4G favorece que, a la mayoría de nosotros, nos suponga un problema el no disponer de "datos" en el móvil en determinados momentos.

Entonces, por qué es tan importante la tecnología 5G? La respuesta la tenemos que dar en dos planos: uno técnico y otro social. Desde el punto de vista técnico, el crecimiento del uso de datos móviles es asombroso. Hemos pasado de 15 Petabytes/mes¹ en el año 2015 a 72 Petabytes/mes en el año 2017 y a 209 Petabytes/ mes en 2019. En 2020 se espera que lleguemos a los 335 Petabytes/mes y, en el año 2025, la estimación es de 110 Exabytes/mes², es decir, 330 veces más que los datos esperados para 2020. La red 4G no puede soportar esta carga de tráfico. Pero no solamente eso, es que tampoco puede soportar, por ejemplo, el número de conexiones simultáneas que generan ese tráfico, ni satisfacer los requisitos de velocidad y tiempo real (latencia) que demandan los nuevos servicios. Esta es la primera razón por la que necesitamos una red 5G.

^{*} Silvia Jiménez Fernández. Subdirectora del Observatorio UAH-ISDEFE en TIC y Avance Digital. Sancho Salcedo Sanz. Catedrático de Universidad, Universidad de Alcalá.

¹ 1 Petabyte/mes supone el intercambio de 10¹⁵ bytes al mes, o lo que es lo mismo, 1 000 000 000 000 000 bytes/mes.

² 1 Exabyte/mes es equivalente a 10¹⁸ bytes/mes o a 1 000 000 000 000 000 000 bytes/mes.

El segundo motivo es social. La manera de comunicarnos entre nosotros y con los dispositivos que están en nuestro entorno ha cambiado radicalmente en los últimos diez años. El terminal telefónico fijo de los domicilios está en desuso, usamos navegadores cuando vamos en el coche e incluso manejamos coches autónomos, obtenemos información del tráfico en tiempo real, interaccionamos mediante redes sociales —en un formato multimedia—, obtenemos recomendaciones de restaurantes y de sitios a visitar, e incluso, cada vez más, queremos tener experiencias inmersivas gracias a la realidad virtual.

Por todo ello es tan importante la 5G, porque es la tecnología habilitante que nos va a permitir dar el siguiente salto en la evolución tecnológica, salto que, en algunos aspectos, se puede convertir, incluso, en una revolución.

2

Las tecnologías claves

in querer entrar en la complejidad técnica del sistema 5G, que es mucha, sí consideramos necesario dedicar algunas líneas a explicar someramente alguno de sus principales fundamentos técnicos.

El primero de ellos se denomina 'Massive MIMO'. Un sistema MIMO (multiple input, multiple output) nos permite mejorar la calidad de las transmisiones instalando múltiples antenas en los dispositivos. Así, en vez de transmitir la información entre dos dispositivos con una única antena transmisora y una única receptora, se transmite la misma información entre múltiples pares de antenas. Las configuraciones básicas son de 2x2 (dos antenas transmisoras y dos receptoras) y 4x4. Pero en Massive MIMO se pueden usar paneles de 64x64 e incluso de 256x256 y todo ello sin un efecto visual alarmante, gracias al avance de las tecnologías de antenas.

Otro pilar tecnológico de la tecnología 5G es la densificación. Estamos acostumbrados a ver estaciones base³ principalmente en las azoteas de los edificios y separadas entre sí varios cientos de metros o kilómetros. Para poder disfrutar de todas las características de la 5G debemos "acercar" la tecnología al usuario, por lo que es necesario instalar muchas más estaciones base transmisoras/receptoras. En la tecnología 5G las estaciones son mucho más pequeñas y están separadas entre sí del orden de decenas de metros o muy pocas

Estamos acostumbrados a ver estaciones base en las azoteas de los edificios y separadas entre sí varios cientos de metros o kilómetros. Para poder disfrutar de las características de la 5G es necesario instalar muchas más estaciones base transmisoras/receptoras

centenas. Estas nuevas estaciones se llaman 'small cells', son muy eficientes y tienen una potencia de emisión muy ajustada.

El último de los pilares tecnológicos que vamos a resaltar es el *Network Slicing* —que podría traducirse por 'lonchas de red'—. Básicamente consiste en que se pueden implementar diferentes redes virtuales en una única red física, con diferentes requisitos de calidad de servicio y, por lo tanto, con diferentes asignaciones de recursos físicos. Estas "lonchas" se pueden dar de alta y de baja de una manera rápida y flexible, lo cual permite la implementación en paralelo de diferentes servicios y modelos de negocio de muy distintas características. Es decir, permite implementar diferentes verticales de aplicación, que analizaremos en secciones posteriores.

Por supuesto existen otros adelantos tecnológicos a remarcar, como puede ser los sistemas no ortogonales de acceso o el *beamforming*, pero que, por su naturaleza más tecnológica, preferimos dejarlo para textos técnicos.

3

El espectro radioeléctrico

s extensamente conocido que las tecnologías móviles se transmiten mediante ondas radioeléctricas. Estas se propagan por el aire transportando la información entre nuestro terminal móvil —nuestro smartphone— y las estaciones base. Hasta 4G, en entornos

³ Las 'estaciones base' es lo que, en lenguaje coloquial, solemos denominar 'antenas de telefonía móvil'.





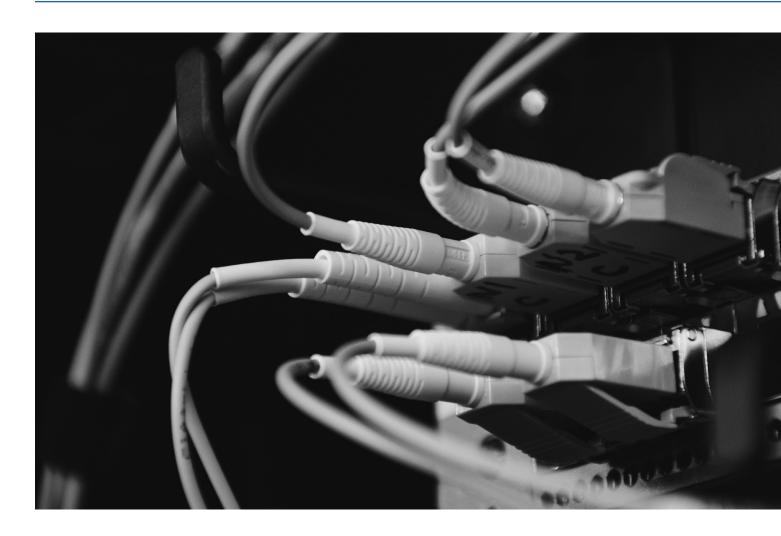


rurales y carreteras, las estaciones base suelen encontrarse en casetas y disponen de altos mástiles contiguos donde se distribuyen las propias antenas. Sin embargo, en entornos urbanos suelen encontrarse en los tejados y azoteas de los edificios. En la 5G, con la densificación y miniaturización, serán tan comunes para nosotros como el mobiliario urbano (semáforos, farolas, etc.) donde, incluso, posiblemente se instalen.

El espectro radioeléctrico, por donde se propagan las ondas radioeléctricas, es un recurso escaso y de dominio público. Este está dividido en lo que denominamos bandas de frecuencia —que se mide en Herzios (Hz) y en sus correspondientes multiplicadores: MHz (1 000 000 Hz) o GHz (1 000 000 000 Hz)—, escalas más comúnmente empleadas en comunicaciones móviles. El espectro es escaso, porque la capacidad del mismo está acotada, por lo que existe un mecanismo supranacional que es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés) que regula el uso de dicho espectro, y tiene establecidas como bandas preferentes para los sistemas de 5G, las bandas centradas en 700 MHz (o 0,7 GHz), 3,5 GHz y 26 GHz. Cada banda de frecuencia tiene unas características propias. Debemos tener en cuenta que la

cantidad de información (bits por segundo) que podemos transmitir en cada Herzio es limitada. Por lo tanto, y de una manera general, cuantos más Herzios (más ancho de banda) tengamos disponibles en una banda, más bits por segundo podremos transmitir y, por lo tanto, mejores prestaciones en términos de velocidad conseguiremos. La banda menor de frecuencia (700 MHz) dispone de menos ancho de banda pero, desde el punto de vista de transmisión de las señales radioeléctricas, permite alcanzar distancias mayores. Por el contrario, a medida que utilizamos bandas de frecuencias más altas (en el rango de GHz) disponemos de más ancho de banda (y, por ende, más velocidad de transmisión) a cambio de, en general, dar cobertura a zonas más limitadas.

En este sentido la banda de 700 MHz, que tiene disponible 30 MHz de ancho de banda, se utilizará preferentemente para proporcionar amplias zonas de cobertura con gran penetración en interiores. Esto permitirá una migración paulatina de los sistemas de 4G a los de 5G y, además, permitirá llevar la 5G con facilidad a zonas rurales, a pesar de que la velocidad de transmisión se vea restringida. La banda de 3,5 GHz, con 400 MHz disponibles, nos proporciona un buen compromiso entre



cobertura y capacidad, permitiendo atender la creciente demanda de servicios de alta velocidad de los usuarios en áreas suburbanas y urbanas. Finalmente, la banda de 26 GHz, nos proporcionará gran velocidad de transmisión, pero a costa de un alcance muy limitado, de pocos centenares de metros.

Aparte de existir una entidad supranacional encargada de regularizar el uso del espectro, en cada uno de los países existe una entidad nacional que se encarga de la gestión del mismo. Al ser un recurso escaso de titularidad pública, los operadores precisan, dependiendo de la banda concreta, de licencias para operar. Las licencias son concedidas mediante diferentes mecanismos, ya sea la asignación directa, el concurso administrativo o, el más usado en la actualidad, mediante la subasta con limitación de participantes, para así evitar la fragmentación del espectro (es decir, si muchos operadores obtienen pocos recursos cada uno, al final resulta imposible ofrecer los servicios esperados).

Como se puede ver, la adecuada gestión del espectro radioeléctrico es fundamental para el éxito comercial de la tecnología 5G, puesto que se precisa la asignación de suficiente espectro contiguo a los operadores para que estos puedan desarrollar y ofrecer aplicaciones de servicio con suficiente calidad de servicio.

4

Las estrategias de migración

e puede decir que la 5G está ya entre nosotros, puesto que, como veremos en la siguiente sección, ya se dispone de despliegues comerciales que implementan verticales de aplicación y servicios concretos. Pero ¿se puede decir que está completamente entre nosotros? La respuesta es claramente no.

La primera razón, y más obvia, es porque el despliegue de la red 5G no tiene la extensión geográfica que tienen sus precedentes. 4G-LTE es prácticamente ubicua en Europa, Asia, América y Oceanía, con 537 redes comerciales en 170 países. El despliegue masivo de tecnología 5G está iniciándose, pero, debido a la actual coyuntura sanitaria provocada por la COVID-19 y la consiguiente crisis económica, posiblemente se retrasará.

El segundo motivo tiene un carácter más técnico. Toda red de comunicaciones móviles está dividida en dos partes, la red de acceso radio (en la 5G denominada 'New Radio' o '5G NR') y el núcleo de la red (llamado '5GC').





El despliegue masivo de tecnología 5G está iniciándose, pero, debido a la actual coyuntura sanitaria provocada por la COVID-19 y la consiguiente crisis económica, posiblemente se retrasará

A diferencia de las generaciones precedentes, en la 5G se pueden integrar elementos de generaciones previas o no, lo que hace posible dos configuraciones denominadas, respectivamente, 'Non Stand Alone' (NSA) y 'Stand Alone' (SA). En la configuración SA tanto la red de acceso radio como el núcleo de la red son nativas 5G, siendo este el escenario ideal, al que se llegará en los próximos años. En el camino, y como estrategia de migración, se implementa la configuración NSA, que permite convivir elementos de 4G y 5G, tanto en el acceso como en el núcleo. Este escenario es necesario para realizar una paulatina —y menos arriesgada introducción de la nueva tecnología, habida cuenta de las importantes inversiones que requiere. Mediante la 5G NSA podremos empezar a disfrutar de mejoras en los servicios, como el aumento de la velocidad de transferencia al orden de 1 o 2 Gbps, la reducción de la latencia por debajo de 25 milisegundos, o el aumento en dos órdenes de magnitud del número de dispositivos conectados a la red simultáneamente. Para ello se hará uso tanto del nuevo espectro radioeléctrico destinado a la 5G, como de algunos de los avances tecnológicos analizados previamente, como Massive MIMO.

Sin embargo, para obtener las funcionalidades completas de la tecnología 5G, como puede ser el *Network Slicing* —que nos permitirá la definición de verticales de aplicación independientes, con distintos niveles de calidad de servicio sobre la misma red física—, todavía deberemos esperar hasta tener desplegada la red 5G SA. ¿Significa esto que la 5G NSA es una 5G descafeinada? Se puede decir que no, dado que la 5G NSA está estandarizado por el 3GPP-ETSI, el organismo encargado de desarrollar y estandarizar las comunicaciones móviles, y dispone

de entidad propia. Lo que ocurre es que los operadores han aprendido de su propia historia y prefieren evitar situaciones de riesgo innecesario, desarrollando la red de manera paulatina y acostumbrando así al mercado a los nuevos servicios.

5

El estado de los despliegues

os operadores, fabricantes y, en general, todos los agentes de mercado están trabajando a marchas forzadas tanto en el desarrollo de pilotos técnicos, como en los despliegues comerciales. Fruto de ese trabajo y según datos de la Asociación GSM, en septiembre del año 2020, 397 operadores en 129 países están realizando desarrollos e inversiones en 5G, que comprenden desde pruebas de campo y adquisición de espectro radioeléctrico, hasta despliegues comerciales. De ellos, 124 operadores han declarado haber instalado tecnología 5G acorde a los estándares del 3GPP y 101 de ellos (en 44 países) han lanzado servicios también acordes a los estándares.

Entrando en detalle en el entorno europeo, a finales de 2019 la 5G estaba presente en 12 países mediante 20 operadores, donde la banda de 3,5 GHz ha sido elegida como preferente en todos los casos. La asignación de espectro en la banda de 700 MHz o bien ha sido ya realizada o está prevista para este año 2020 y los lanzamientos comerciales comenzaron en el año 2019, principalmente por Vodafone, seguido de Deutsche Telekom, Telefónica, Telecom Italia, EE, O2-3 UK. Mención aparte merece Suiza, que es probablemente el país europeo con mayor cobertura 5G, al contar más de 262 localidades con servicio 5G.

En Estados Unidos el despliegue comercial de las redes 5G comenzó también en el año 2019 a manos de los operadores Verizon y T-Mobile, teniéndolo planificado para el 2020 US Cellular y CGI. Estados Unidos, además, también ha realizado la asignación de la banda de 700 MHz para su entrada en servicio. En Japón, se han realizado muchas pruebas piloto, despliegues precomerciales y pruebas de campo, aunque los despliegues comerciales se producirán a lo largo de este año 2020.

Corea del Sur es, posiblemente, el país donde primero y con mayor intensidad comenzó el despliegue de 5G. Los Juegos Olímpicos de invierno de 2018 sirvieron como punto de partida y, entre junio y diciembre de 2018, los tres operadores coreanos empezaron a prestar servicio comercial 5G a empresas. En 2019 proporcionó también servicio a particulares, con un espectacular despliegue de 85 000 estaciones.

Como se ve, el despliegue comercial de la tecnología 5G se podría decir que va viento en popa, o al menos iba, puesto que la incertidumbre asociada a la crisis económica derivada de la pandemia producida por la COVID-19 puede retrasar, que no cancelar, los planes de inversión de algunos operadores.

6

Las verticales de aplicación. ¿Dónde está el negocio?

n el desarrollo de este artículo hemos tratado diversos aspectos técnicos y en la introducción hemos dejado entrever la relevancia de esta nueva tecnología 5G. Sin embargo, hasta ahora, no hemos tratado los aspectos económicos que justifican la gran inversión que tienen que realizar las entidades privadas.

Diversos estudios —llevados a cabo por entidades como Ericsson, IHS Markit y McKinsey— identifican una curva creciente en el impacto económico mundial producido por la 5G, que pasa por generar del orden de 1,8 trillones de dólares americanos en 2025, 3,3 trillones en 2026, 7,6 trillones en 2028 y 13,2 en 2035. Por otra parte, el número de empleos asociados a la tecnología 5G que se estiman en la Unión Europea asciende a 2,3 millones, según estudios realizados por la Comisión Europea. Independientemente de las cantidades, que pueden estar más o menos acertadas, se puede afirmar, sin temor a equivocarnos, que la 5G tendrá un enorme impacto en la economía mundial y que se encuentra entre los principales catalizadores de la misma.

Pero, para conseguir esto, debemos implementar servicios y aplicaciones atractivas tanto para la industria como para los usuarios finales. Estos servicios se suelen agrupar en sectores o verticales de aplicación, entre las que destacamos las siguientes:

- 1. El vehículo conectado y autónomo está llamado a ser el futuro de la generación actual de automóviles y de trenes. Dotar al coche de conexión a través de las tecnologías móviles es el paso previo que todas las grandes marcas están dando hacia el coche autónomo. El desarrollo de este se está convirtiendo en una carrera entre los fabricantes tradicionales (Mercedes, BMW, Audi), nuevos fabricantes (Tesla, Byton) y grandes empresas tecnológicas (Google).
- 2. El turismo inteligente o el entretenimiento inteligente son aquellos servicios orientados a encontrar formas de entretenimiento innovadoras

basadas en tecnologías móviles. Para ello, se recogen y agregan datos procedentes de muy diversas fuentes: infraestructura física, conexiones sociales, gubernamentales o humanas, y se combinan con la tecnología necesaria para transformar estos datos en experiencias enriquecedoras y propuestas de negocio eficientes y sostenibles. Algunos ejemplos que podemos imaginar son los destinados al guiado inteligente en interiores (museos, conferencias, estaciones de metro, tren o aeropuertos, etc.), la gestión de grandes eventos, la realidad aumentada, etc.

- 3. La sanidad 4.0. Estos tiempos de pandemia han demostrado que es necesario un modelo distribuido y centrado en el paciente, en el que el cuidado personalizado y la virtualización del mismo cobren un importante papel. El núcleo de los cuidados sanitarios en el futuro se presume impulsado por las características de la 5G: Network Slicing, baja latencia, computación en la nube, posibilidad de trabajar con grandes cantidades de datos o seguridad avanzada, entre otros.
- 4. La industria 4.0 recoge la transformación que la industria está experimentando para incorporar el uso del llamado 'Internet de las cosas' (IoT por sus siglas en inglés), de la inteligencia artificial, la hiperconectividad, el análisis masivo de grandes bases de datos, la robótica y la realidad virtual entre otros.

Pero también existen otros muchos servicios, como pueden ser aquellos relacionados con los "Smart", ya sean las *Smart Cities, Smart Agriculture, Smart Logistics o Smart Energy,* entre otras.

7

5G y salud, ¿por qué no tenemos que tenerle miedo?

n punto relevante cada vez que se habla de comunicaciones móviles y de nueva generación es, precisamente, el importante debate internacional sobre el potencial impacto de los sistemas de telecomunicación móvil 5G en la salud de las personas. Las posiciones, en algunos casos, se han extremado debido a la pandemia, llegando a defender sinsentidos como, por ejemplo, que la 5G propaga el coronavirus.





Las radiaciones no ionizantes no tienen energía suficiente como para romper los enlaces celulares, por lo que es altamente improbable que puedan causar efectos irreversibles sobre la salud

Excentricidades aparte, existe una gran preocupación entre la población por los efectos que pueden producir las ondas electromagnéticas en las personas, por lo que las autoridades correspondientes deben atender esta realidad.

Para poder arrojar luz sobre este tema, lo primero que debemos distinguir es la radiación ionizante de la no ionizante. La radiación ionizante es aquella que transporta suficiente energía para provocar potencialmente la ruptura de los enlaces de las células y afectar al ADN genético, resultando, por lo tanto, peligrosa. Algunos ejemplos de radiación ionizante son la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Las radiaciones no ionizantes, como las de las ondas electromagnéticas de las telecomunicaciones móviles, no tienen energía suficiente como para romper los enlaces celulares, por lo que es altamente improbable que puedan causar efectos irreversibles sobre la salud. Otros ejemplos de este tipo de radiación serían la wifi o la TDT, dado que utilizan ondas radioeléctricas similares.

Además, existen organismos internacionales, como la Comisión Internacional de Protección de Radiación no Ionizante (ICNIRP por sus siglas en inglés), cuyas directrices están respaldadas por la Organización Mundial de la Salud y que establecen las pautas internacionales que regulan la exposición a las ondas electrómagnéticas no ionizantes para un rango de frecuencias que alcanza los 300 GHz (dentro del cual se encuentran todas las bandas de comunicaciones móviles). Estos organismos establecen los límites máximos, medidos en vatios por metro cuadrado (W/m²), para cada banda de frecuencia, de manera que en la 5G son de 3,5 W/m² en la banda de 700 MHz, 10 W/ m² en la banda de 3,5 GHz y de 10 W/m² en la banda de 26 GHz. Las mediciones obtenidas en numerosos estudios, tanto para los sistemas de 5G como para los sistemas de comunicaciones móviles previos, están muy por debajo de estos valores. Los gobiernos de cada país, mediante sus correspondientes agencias, realizan inspecciones técnicas para verificar que las estaciones móviles radien dentro de los límites establecidos.

La preocupación puede provenir de que la población advierte la proliferación de estaciones base. Como ya hemos detallado en la sección dedicada a las tecnologías, la densificación de estaciones base para proporcionar mejor servicio es una de las características de 5G. En este sentido se debe explicar que a mayor número de estaciones base, menor potencia emitida por cada una de ellas, pues se utilizan de manera más eficiente. Esto implica que los niveles de exposición al público son menores que en otros casos.

En definitiva, no existe evidencia científica de que las tecnologías móviles tengan afección para la salud y, más en concreto, no existe diferencia significativa entre la 5G y las tecnologías anteriores, por lo que podemos estar tranquilos con respecto a este tema.

Conclusiones

lo largo de este artículo hemos intentado explicar en qué consiste la tecnología 5G, cuáles son sus principales características, la importancia de algunos elementos como puede ser el espectro radioeléctrico, su relevancia económica y el estado actual de los despliegues.

Quedan muchos aspectos técnicos, económicos e incluso regulatorios y legales por cubrir, pero requeriría de muchas páginas. Además, llevados por el entusiasmo de los autores por esta tecnología, serían seguramente alguna más de las necesarias, como ha ocurrido en este artículo.

Estamos en un punto crítico del ciclo de vida del desarrollo de la tecnología 5G, ese momento crucial donde una tecnología triunfa o se hunde. Los operadores, los fabricantes de equipos, los proveedores de servicios e incluso los gobiernos nacionales han aprendido de errores pasados y todos ellos están apostando decidida, pero prudentemente, por esta tecnología tan prometedora. Es por ello que las migraciones paulatinas, como el uso de la 5G NSA, nos llevan a un período de implantación largo, donde con alta probabilidad convivan la 4G y la 5G hasta el año 2030 o incluso más.

Finalmente, en algunos foros se critica que la 5G parece que no tenga una killer application, como tenían las tecnologías 2G, 3G y 4G y que mencionamos en la introducción, y puede ser verdad. No parece existir una aplicación clara que sea la que potencie el despliegue y es que, muy posiblemente, la killer application de la 5G sea la propia 5G. Disponer de una tecnología tan superior en todos los sentidos provocará, como ya ha pasado anteriormente, que los usuarios imaginemos nuevas formas de uso para obtener el máximo rendimiento posible. Así ha funcionado siempre la tecnología, y así funcionará ahora.