

SORUS

Validación y optimización conjunta de RIS y vRANs

SORUS-RIS A1.2

CASOS DE USO RIS

Revisión	Autor	Fecha de entrega	Cambios
Versión 01	Jose Ayala Romero, Andrés García Saavedra	19/05/2023	Versión Inicial
Versión 02	Luis Roda Sánchez, Jorge San Martin Gomez	22/05/2023	revisión y actualización de tablas y resumen ejecutivo y conclusiones.

Exención de responsabilidad:

El apoyo de la Comisión Europea a la elaboración de esta publicación no constituye una aprobación de su contenido, que refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que se pueda hacer de la información aquí difundida.

CONTENIDOS

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	4
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
1 RESUMEN EJECUTIVO.....	8
1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 OBJETIVOS DEL ENTREGABLE Y ESTRUCTURA.....	9
1.2 DEFINICIONES.....	10
1.3 VENTAJAS DE LA TECNOLOGÍA RIS.....	12
2 ESCENARIOS DE CONECTIVIDAD Y FIABILIDAD MEJORADAS.....	13
2.1 ESCENARIOS CONVENCIONALES (ES DECIR, CON SISTEMAS NO RIS).....	14
2.2 RETOS TÉCNICOS EN LOS ESCENARIOS DE REFERENCIA HABILITADOS POR LA TECNOLOGÍA RIS	14
2.2.1 CONECTIVIDAD Y FIABILIDAD POTENCIADAS POR UN ÚNICO RIS.....	15
2.2.2 MAYOR CONECTIVIDAD Y FIABILIDAD GRACIAS A MÚLTIPLES RISS CONTROLADOS INDIVIDUALMENTE	16
2.2.3 FIABILIDAD DE LA CONEXIÓN GRACIAS A VARIOS RIS	16
2.2.4 CONECTIVIDAD Y FIABILIDAD POTENCIADAS POR UN ÚNICO RIS <i>MULTI-TENANCY</i>	17
2.2.5 MOBILE EDGE COMPUTING (MEC) COMO CLAVE EN LOS ESCENARIOS POTENCIADOS POR LA TECNOLOGÍA RIS	17
3 ESCENARIOS MEJORADOS DE LOCALIZACIÓN Y DETECCIÓN	19
3.1 ESCENARIOS CONVENCIONALES (ES DECIR, CON SISTEMAS NO RIS).....	19
3.2 RETOS TÉCNICOS EN LOS ESCENARIOS DE REFERENCIA HABILITADOS POR LA TECNOLOGÍA RIS	20
3.2.1 RIS EN MODO REFLEXIÓN	22
3.2.2 RIS EN MODO RECEPCIÓN.....	28
3.2.3 RIS EN MODO TRANSMISIÓN.....	32
3.2.4 RIS EN MODO HÍBRIDO	32
4 ESCENARIOS DE SOSTENIBILIDAD Y SEGURIDAD MEJORADAS.....	33
4.1 ESCENARIOS CONVENCIONALES (ES DECIR, CON SISTEMAS NO RIS).....	33
4.2 ESCENARIOS DONDE SE BUSCA LA EFICIENCIA DE EXPOSICIÓN AL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO	35

5 CONCLUSIONES..... 37

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

Tabla 1. Lista de abreviaturas y acrónimos

Abreviatura	Explicación/Definición
AoA	Angle of Arrival
B5G	Beyond-5G
BS	Base Station
CAPEX	Gastos de Capital
DoD	Difference of Departure
EE	Eficiencia Energética
EMFE	Electromagnetic Field Exposure
EMFEE	Electromagnetic Field Exposure Efficiency
ES	Edge Server
GDoP	Geometric Dilution of Precision
H-RIS	Hybrid Reconfigurable Intelligent Surfaces
LOS	Line Of Sight
MEC	Mobile Edge Computing
NLOS	Sin línea de visión directa
OPEX	Gastos Operativos
PoA	Phase of Arrival
QoE	Quality of Experience
RAN	Radio Access Network
RF	Reinforcement Learning
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
Rx	Recepción
SSE	System Spectral Efficiency
ToA	Time of Arrival
TPC	Control de Potencia de Transmisión
UC	Unit Cell

Abreviatura	Explicación/Definición
UCI	Control del Enlace Ascendente
UE	User Equipment
V2X	Vehicle-to-everything
vBS	virtualized Base Station

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. TAXONOMÍA RIS.....	10
FIGURA 2. ARQUITECTURA TÍPICA DE RIS PASIVA: T-RIS/TRANSMITARRAY (A), R-RIS/REFLECTARRAY (B).....	12
FIGURA 3. SISTEMAS CONVENCIONALES DE CONECTIVIDAD Y FIABILIDAD.....	14
FIGURA 4. SOLUCIONES CONVENCIONALES AL PROBLEMA DE LA COBERTURA.....	14
FIGURA 5. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA DE DOWNLINK O UPLINK ASISTIDOS POR LOS RIS, EN LOS QUE LA CONECTIVIDAD Y LA FIABILIDAD ESTÁN GARANTIZADAS POR LOS RIS.	16
FIGURA 6. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA DOWNLINK ASISTIDOS POR RIS CON MÚLTIPLES PARES TRANSMISOR-RECEPTOR, EN LOS QUE LOS RIS PUEDEN SER CONTROLADOS INDIVIDUALMENTE POR CADA PAR.....	16
FIGURA 7. SISTEMAS ASISTIDOS POR RIS EN LOS QUE LA CONECTIVIDAD ESTÁ HABILITADA POR MÚLTIPLES RIS.....	17
FIGURA 8. UN ESCENARIO MULTI-TENANCY CON PARES O BS-UE(S) Y UN RIS COMPARTIDO QUE ESTÁ OPTIMIZADO PARA IMPULSAR SIMULTÁNEAMENTE LA COMUNICACIÓN DE DIFERENTES PARES BS-UE.....	17
FIGURA 9. SISTEMAS MEC POTENCIADOS POR RIS.....	19
FIGURA 10. SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN CONVENCIONALES (ES DECIR, TRILATERACIÓN/POSICIONAMIENTO CIRCULAR). ESCENARIOS 1 Y 2 (A); ESCENARIOS 2 Y 3 (B); Y ESCENARIOS 4 Y 5 (C).....	19
FIGURA 12. EJEMPLO ESCENARIO 1.....	22
FIGURA 13. EJEMPLO ESCENARIO 2.....	23
FIGURA 14. EJEMPLO ESCENARIO 3.....	24
FIGURA 15. EJEMPLO ESCENARIO 4.....	25
FIGURA 16. EJEMPLO ESCENARIO 5 (EN DIFERENTES INSTANCIAS DE TIEMPO T).....	27
FIGURA 17. UAV EQUIPADO CON RIS QUE AYUDA EN OPERACIONES DE BÚSQUEDA Y RESCATE EN SITUACIONES DE EMERGENCIA.....	28
FIGURA 18. EJEMPLO ESCENARIO 7.....	29
FIGURA 19. EJEMPLO ESCENARIO 8.....	31
FIGURA 20. EJEMPLO ESCENARIO 11.....	33
FIGURA 21. EJEMPLO DE SISTEMAS CONVENCIONALES SINGLE-BS BASADOS EN BEAMFORMING.....	34
FIGURA 22. EJEMPLO DE SISTEMAS RIS MEJORADOS DE UNA SOLA BS BASADOS EN LA TECNOLOGÍA BEAMFORMING.....	36

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	4
TABLA 2. PROCEDIMIENTOS DE LOCALIZACIÓN CONVENCIONALES	20
TABLA 3. ESCENARIOS DE LOCALIZACIÓN HABILITADOS POR LA TECNOLOGÍA RIS.....	21

1 RESUMEN EJECUTIVO

Este documento corresponde al entregable A1.2 – Casos de uso de RIS – que se encuentra en la fase inicial de las tareas descritas en el pliego de condiciones técnicas. En este documento se presenta un estudio preliminar de la tecnología y la viabilidad técnica necesarias para abordar el reto de mejorar las redes inalámbricas mediante el uso de superficies inteligentes reconfigurables. Se han definido tres focos principales de mejora: conectividad y fiabilidad, localización y detección o sostenibilidad y seguridad. Se describe teóricamente cómo esta tecnología puede ser útil para superar problemas en entornos urbanos con alta densidad de obstáculos o sin visión directa por parte de las estaciones base (BSs, por sus siglas en inglés). En entornos interiores y exteriores se podría utilizar para la detección de personas a modo de radar pasivo o mapeo del entorno. Y respecto a la seguridad, puede permitir comunicaciones altamente direccionales, lo que resulta en mayor eficiencia energética y evita la captación de la señal por otros agentes.

2 INTRODUCCIÓN

La tecnología RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces, por sus siglas en inglés) representa un punto de inflexión en el diseño de redes inalámbricas de próxima generación. Dada la multitud de oportunidades de negocio previstas y los correspondientes escenarios y casos de uso, hemos llevado a cabo un análisis preliminar para resaltar la motivación detrás de dicho marco novedoso, arrojando luz sobre los requisitos tecnológicos y el estudio de factibilidad. Una caracterización detallada de los escenarios y casos de uso relevantes basados en RIS ayuda a comprender profundamente el potencial de este nuevo campo de investigación con las ventajas y limitaciones correspondientes.

2.1 Objetivos del entregable y estructura

El objetivo general de este entregable es investigar escenarios y casos de uso Beyond-5G (B5G) de alta relevancia en los que la tecnología RIS pueda ser explotada con éxito, marcando la diferencia al ofrecer servicios avanzados.

Los escenarios se dividen en las siguientes categorías:

- **Escenarios de conectividad y fiabilidad mejoradas.** La calidad de experiencia (Quality of Experience o QoE, por sus siglas en inglés) y la calidad de servicio (Quality of Service o QoS, por sus siglas en inglés) de la red inalámbrica pueden estar por debajo de las expectativas, por lo que la tecnología RIS puede permitir la extensión de la cobertura tanto en entornos exteriores (entornos urbanos densos y dinámicos sin *line-of-sight* o escenarios NLOS, por sus siglas en inglés) como interiores (falta de cobertura principalmente debido a objetos metálicos grandes y/o personas), lo cual será beneficioso, implementado en forma de soluciones acordes a las regulaciones y límites de exposición a campos electromagnéticos (Electromagnetic Field Exposure o EMFE por sus siglas en inglés);
- **Escenarios de localización y detección mejoradas.** Se espera que la tecnología RIS habilite técnicas avanzadas de detección y localización para el mapeo del entorno, la detección de movimiento, la exploración oportunista de canales y las capacidades de radar pasivo aplicadas a entornos industriales (por ejemplo, fábricas inteligentes), de alta densidad de usuarios (por ejemplo, estaciones de tren) y entornos interiores (por ejemplo, realidad aumentada/mixta).
- **Escenarios de sostenibilidad y seguridad mejoradas.** Se espera que las redes RISE permitan reducir la energía gastada en radiar la señal móvil, mejorando así la eficiencia energética (EE), la eficiencia de EMFE (EMFEE) y la eficiencia espectral del sistema (system spectral efficiency o SSE por sus siglas en inglés) debido a las comunicaciones altamente direccionales y dependientes de la ubicación. Una red orquestada de dispositivos RIS se puede configurar de manera óptima aquí para apuntar a la energía mínima necesaria para proporcionar servicios avanzados a la QoE/QoS esperada por los usuarios.

En general, para cada categoría mostrada en este entregable, identificamos el escenario de referencia, describimos situaciones y condiciones que podrían requerir la explotación total de la tecnología RIS y mostramos un ejemplo de aplicación de la tecnología RIS en dicho escenario dado.

2.2 Definiciones

Las superficies inteligentes reconfigurables (RIS) son superficies compuestas por un conjunto discreto de elementos de antena que siguen la ley generalizada de Snell y pueden verse como superficies **electromagnéticas reflectantes o transmisivas** en función del modo de operación seleccionado. Específicamente, **una superficie reflectante (R-RIS)** funciona como un espejo electromagnético, donde una onda electromagnética incidente se refleja hacia la dirección deseada, típicamente anómala en el sentido de que esta dirección es no especular, con características específicas de radiación y polarización. Por otro lado, **una RIS transmisiva (T-RIS)** funciona como una lente o una superficie selectiva de frecuencia, donde el campo incidente se manipula (mediante filtrado, polarización, división de haz, etc.) y/o desplazado en fase, y se vuelve a irradiar para controlar la refracción de las ondas planas incidentes. Aunque las RIS tienen un gran potencial para implementar manipulaciones avanzadas de ondas electromagnéticas, solo se han demostrado en la literatura funcionalidades simples, como la dirección de haces electrónicos y la dispersión de múltiples haces. Recientemente, algunos investigadores han abordado la posibilidad de desviar el haz para lograr **RIS de reflexión-transmisión simultáneas (RT-RIS)**¹.

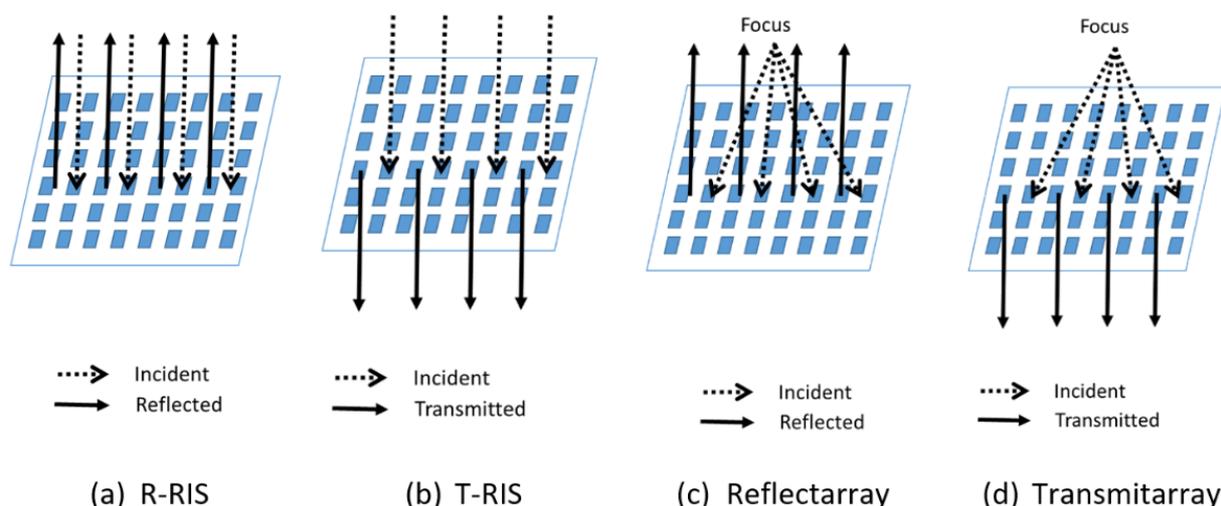


Figura 1. Taxonomía RIS

¹ Xi Wang, Jun Ding, Bowen Zheng, Sensong An, Guohua Zhai & Hualiang Zhang, "Simultaneous Realization of Anomalous Reflection and Transmission at Two Frequencies using Bi-functional Metasurfaces," Scientific Reports volume 8, 1876 (2018).

Hay varias tecnologías de antenas diferentes^{2,3} que se pueden considerar como tecnologías de hardware RIS, incluidos *reflectarrays*⁴, *transmitarrays*^{5,6,7}, así como metasuperficies inteligentes, programables o definidas por software^{8,9,10,11}. Cuando los elementos tienen un tamaño y un espacio **inferiores a 1/10** de la longitud de onda usada para la comunicación, las RIS también se definen como **metasuperficies**¹². Las metasuperficies son materiales artificiales capaces de manipular ondas electromagnéticas, de una manera que no se puede realizar en materiales homogéneos. Las funcionalidades simples habilitadas por metasuperficies incluyen reflexiones o transmisiones anómalas. Es posible lograr una reflexión y refracción anómala perfecta si las metasuperficies son bianisotrópicas con dispersión espacial débil¹³. Las metasuperficies dispersivas espacialmente se realizan como láminas artificiales, que generalmente están compuestas de parches metálicos o grabados dieléctricos en configuraciones planas o multicapa dentro del espesor de sublongitud de onda. La interacción con campos eléctricos y/o magnéticos generalmente es proporcionada por efectos resonantes controlados por la geometría de las celdas unitarias y su distribución, lo que permite mejorar el rendimiento de la antena (conformación de haz), lentes planas, conductores magnéticos artificiales, invisibilidad, absorbentes y reducción de la dispersión. En particular, la introducción de metasuperficies programables podría materializar entornos inteligentes, dando lugar al novedoso concepto de Entorno como Servicio (ENVaaS, por sus siglas en inglés), donde dichos metamateriales actúan como reflectores inteligentes para mejorar la cobertura y abrir nuevas oportunidades técnicas y comerciales para redes más allá de 5G (y 6G).

² S. B. Glybovski, S. A. Tretyakov, P. A. Belov et al., "Metasurfaces: From microwaves to visible," *Phys. Rep.*, vol. 634, pp. 1 – 72, 2016.

³ I. V. Shadrivov and D. N. Neshev, *Tunable Metamaterials*, World Scientific, 2017, chapter 9, pp. 387–418.

⁴ S. V. Hum and J. Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, pp. 183–198, Jan. 2014.

⁵ L. Di Palma, A. Clemente, L. Dussopt, R. Sauleau, P. Potier, and P. Pouliguen, "Circularly-polarized reconfigurable transmitarray in Ka-band with beam scanning and polarization switching capabilities," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, pp. 529–540, Feb. 2017.

⁶ F. Diaby, A. Clemente, R. Sauleau, K. Pham, and L. Dussopt, "2-bit reconfigurable unit-cell and electronically steerable transmitarray at Ka-band," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, accepted for publication, 2020.

⁷ J. R. Reis, M. Vala, R. F. S. Caldeirinha, "Review paper on transmitarray antennas," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94171-94188, Jun. 2019.

⁸ M. Bodehou, E. Martini, S. Maci, I. Huynen, and C. Craeye, "Multibeam and beam scanning with modulated metasurfaces," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1273-1281, Mar. 2020.

⁹ H. Yang, X. Caon F. Yang, J. Gao, S. Xu, M. Li, X. Chen, Y. Zhao, Y. Zheng, and S. Li, "A programmable metasur-faces with dynamic polarization, scattering and focusing control," *Scientific Reports*, 6, 35692, Oct. 2016.

¹⁰ J. P. Turpin, J. A. Bossard, K. L. Morgan et al., "Reconfigurable and tunable metamaterials: A review of the theory and applications," *HINDAWI Int. J. Antennas. Propag.*, vol. 2014, 429837, 18 pages, 2014.

¹¹ C. Della Giovampaola, F. Camminita, G. Labate, E. Martini, and S. Maci, "Reconfigurable metasurface antenna for 5G base stations," in *Proc. EuCAP, Copenhagen, Denmark, 2020*, pp. 1-6.

¹² S. B. Glybovski, S. A. Tretyakov, P. A. Belov et al., "Metasurfaces: From microwaves to visible," *Phys. Rep.*, vol. 634, pp. 1 – 72, 2016.

¹³ V. S. Asadchy, M. Albooyeh, S. N. Tsvetkova, A. Díaz-Rubio, Y. Ra'di, and S. A. Tretyakov, "Perfect control of reflection and refraction using spatially dispersive metasurfaces," *Phys. Rev. B* 94, 075142 – 19 August 2016.

En comparación con las antenas en fase clásicas (phased arrays, en inglés) que requieren desplazadores de fase y amplificadores de potencia, las RIS son generalmente arquitecturas radiantes pasivas que integran interruptores, RF-MEMS, diodos p-i-n, varactores y/o cristales líquidos para controlar electrónicamente el cambio de fase de la superficie local y/o las características de impedancia. Así, según la tecnología de la celda unitaria (unit cell o UC, por sus siglas en inglés), podemos distinguir entre RIS activas, donde la señal reflejada es amplificada por un elemento activo en la UC, y RIS pasivas, donde la UC se realiza con componentes reactivos de baja pérdida que se utilizan para implementar un cambio de fase prescrito, ya sea continuo o cuantizado, dando como resultado un dispositivo de bajo consumo energético.



Figura 2. Arquitectura típica de RIS pasiva: T-RIS/Transmitarray (a), R-RIS/Reflectarray (b)

Finalmente, al igual que con los relés, también podemos distinguir diferentes modos de operación: **RIS regenerativas** que decodifican, regeneran y retransmiten una copia de la señal original; **RIS no regenerativas** que actúan como repetidores analógicos al retransmitir la señal que reciben (en algunos casos amplificada a través de técnicas de conformación de haz o elementos activos). Una RIS receptora (RX-RIS) permite la recolección de mediciones en su sitio, a través de una o pocas cadenas de radiofrecuencia (RF) de recepción (RX) conectadas a todos o un subconjunto de sus elementos unitarios¹⁴. Una superficie híbrida (H-RIS) combina dos de los modos mencionados anteriormente, siendo capaz de reflejar la señal incidente y, al mismo tiempo, detectar/medir una parte de ella^{15,16}.

2.3 Ventajas de la tecnología RIS

La limitada capacidad de comunicaciones en escenarios convencionales de redes al aire libre, el costo extremadamente alto en términos de CAPEX y OPEX para instalar, configurar y mantener

¹⁴ G. C. Alexandropoulos and E. Vlachos, "A hardware architecture for reconfigurable intelligent surfaces with minimal active elements for explicit channel estimation," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Barcelona, Spain, 4–8 May 2020, pp. 9175–9179

¹⁵ G. C. Alexandropoulos, N. Shlezinger, I. Alamzadeh, M. F. Imani, H. Zhang, and Y. C. Eldar, "Hybrid reconfigurable intelligent metasurfaces: Enabling simultaneous tunable reflections and sensing for 6G wireless communications," [Online] <https://arxiv.org/pdf/2104.04690.pdf>, 2021

¹⁶ ZSA21

nuevos puntos de acceso a la hora de implementar la densificación de la red y el deficiente rendimiento en términos de localización impulsan la búsqueda de tecnologías inalámbricas nuevas y avanzadas, como las RIS. El paradigma previsto permite una conectividad inalámbrica mejorada en cuanto a rendimiento, ya que múltiples RIS se pueden implementar fácilmente en exteriores, en *hot spots* interiores y en áreas públicas muy frecuentadas (como estaciones de metro/tren, aeropuertos y centros comerciales), en escenarios residenciales interiores para mejorar tanto las comunicaciones inalámbricas interiores como las de exterior a interior, así como en escenarios verticales, como entornos relacionados con la Industria 4.0 y aplicaciones V2X. En particular, dicho contexto revolucionario adoptará infraestructuras de red casi pasivas y de bajo costo en lugar de implementar puntos de acceso activos adicionales, lo que resulta en la evitación y mitigación de varios problemas de instalación y mantenimiento de la red. Por lo tanto, se esperan ganancias significativas en términos de:

- Minimización de costos y esfuerzos para la instalación y el mantenimiento
- Minimización de demoras debido a la evitación de largos procesos de negociación de sitios
- Reducción del consumo de energía para operar la densa red de celdas libres en comparación con transceptores y relés convencionales

El estado del arte y las contribuciones planificadas en diseño y fabricación de RIS¹⁷ demuestran que las RIS podrían ser dispositivos livianos y estéticamente transparentes, desplegados muy cerca de los clientes y, en algunos casos, capaces de proporcionarles medios ad-hoc para configurarlos proactivamente y ofrecer servicios personalizados. Esta característica única permitirá considerar una gran cantidad de enchufes existentes en áreas urbanas como nodos de red recubiertos de RIS, como fachadas de edificios hechas de vidrio, vallas publicitarias, pantallas publicitarias, paredes con enchufes cerca de clientes sentados en cafeterías, oficinas o salas de espera.

3 ESCENARIOS DE CONECTIVIDAD Y FIABILIDAD MEJORADAS

Los escenarios de red convencionales imponen que la comunicación se logre a través de un medio inalámbrico no controlado. Sin embargo, esto resulta en una ineficiencia en el uso de recursos de radiofrecuencia y una enorme complejidad. Por el contrario, un entorno de radio inteligente basado en RIS permitiría otorgar una alta calidad de experiencia localizada y tipos de servicio específicos a los usuarios finales.

Este paradigma de red pionero tiene como objetivo ir un paso más allá de los casos de uso clásicos de 5G, que requieren que la red esté sintonizada con uno de los modos de servicio disponibles de manera aislada ortogonalmente, ofreciendo áreas no focalizadas de rendimiento en las comunicaciones armonizado y equilibrado. En escenarios basados en RIS podemos ir un paso más allá proponiendo áreas con un rendimiento mejorado como regiones diseñadas dinámicamente que pueden ser altamente localizadas, ofreciendo una manipulación personalizada de alta resolución de la propagación de ondas de radio para cumplir con los KPI seleccionados.

¹⁷ P. del Hougne, M. Fink, G. Lerosey, "Optimally diverse communication channels in disordered environments with tuned randomness," *Nature Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 36–41, 2019.

3.1 Escenarios convencionales (es decir, con sistemas no RIS)

En este subapartado analizamos escenarios convencionales (como escenario de referencia sin tecnología RIS). En la Figura 3 se describe el problema de cobertura convencional. La estación base (Base Station o BS, por sus siglas en inglés), equipada con varias antenas, se comunica con un usuario (User Equipment o UE por sus siglas en inglés), ya sea compuesto de una o varias antenas. Cuando el UE se desplaza a una zona situada detrás de una pared, la señal de la estación base queda bloqueada o muy atenuada por lo que en esta zona no se puede garantizar una cobertura adecuada.

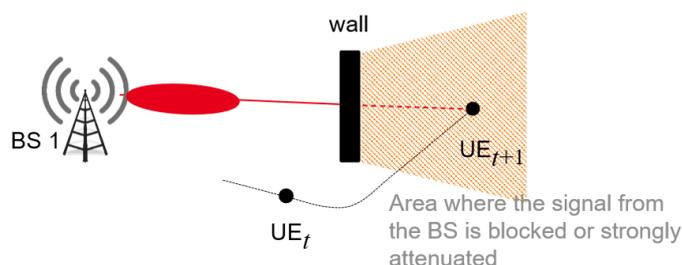


Figura 3. Sistemas convencionales de conectividad y fiabilidad

En la Figura 4 se describen las soluciones más avanzadas a día de hoy al problema de cobertura. En la Figura 4 (a), la BS está equipada con un número de antenas mucho mayor que en el caso de la Figura 3, de modo que la señal recibida por el UE en la zona de bloqueo se amplifica. En la Figura 4 (b), la solución se basa en la densificación de la red, en la que se añade una nueva BS para cubrir la zona, que anteriormente tenía una cobertura débil. El inconveniente de estas soluciones es que pueden resultar muy costosas, ya que hay que actualizar la BS con nuevo hardware o instalar una nueva BS.

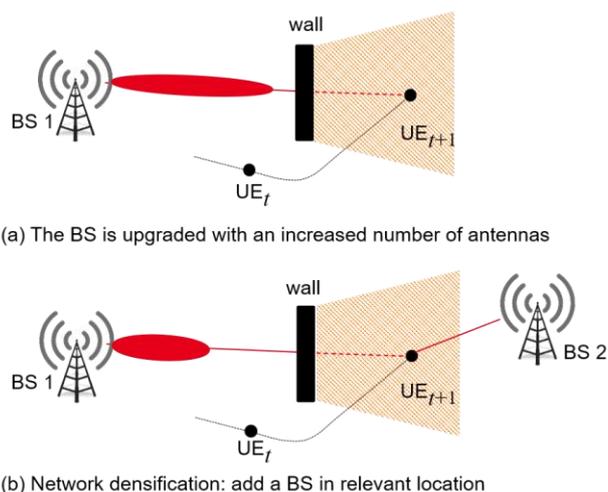


Figura 4. Soluciones convencionales al problema de la cobertura

3.2 Retos técnicos en los escenarios de referencia habilitados por la tecnología RIS

Para los escenarios y estrategias de los sistemas convencionales identificados en la sección 3.1, basándonos en un análisis cualitativo tanto de la viabilidad de la localización (incluidas posibles

consideraciones de identificabilidad de alto nivel) como del rendimiento esperado, determinamos dónde y cómo los RIS podrían mejorar la conectividad en los sistemas convencionales. En todos los casos descritos, consideramos que la RIS se encuentra en modo operativo de reflexión, tal y como se define en la sección 1.2. Opcionalmente, la RIS también puede recibir señales para, por ejemplo, realizar una estimación o localización del canal dentro de la banda.

Para mejorar la conectividad y la fiabilidad, se identifican los siguientes problemas:

- **Estimación del canal:**
 - Mediciones con RIS(s) en modo reflexivo: señales piloto recibidas de la BS en UE(s) (enlace *downlink*) o señales piloto recibidas de UE(s) en BS (enlace *uplink*).
 - Mediciones con RIS(s) capaces de recibir/detectar: señales piloto recibidas de la estación base y de los UEs en las RISs (para RISs con *RF chains*), estas últimas más las señales piloto recibidas de la estación base en los equipos de usuario (enlace descendente), o estas últimas más las señales piloto recibidas de los equipos de usuario en las estaciones base (enlace *uplink*).
- **Diseño de la(s) configuración(es) de fase de la(s) RIS(s):**
 - Para conseguir baja latencia y una estimación precisa del canal.
 - Mediciones para optimizar la conectividad y la fiabilidad: recogida de información de canal (Channel State Information o CSI, por sus siglas en inglés) en un controlador central o un servidor de *Edge computing* (conexiones por cable o inalámbricas con los nodos implicados).

A continuación presentamos todos los escenarios considerados, centrándonos en el caso del enlace *downlink* como ejemplo; el caso del enlace *uplink* puede ampliarse fácilmente siguiendo el mismo planteamiento.

3.2.1 Conectividad y fiabilidad potenciadas por un único RIS

En este escenario, ilustrado en la Figura 5 existen enlaces directos entre la estación base multiantena y el UE con una o varias antenas. La conectividad se potencia aún más mediante un único o varios RIS. Los perfiles de fase (configuración) de las RIS pueden optimizarse para obtener los niveles deseados de conectividad y fiabilidad. Se debe tener en cuenta el despliegue tridimensional de los nodos de la red, así como los canales multihaz y de visibilidad directa.

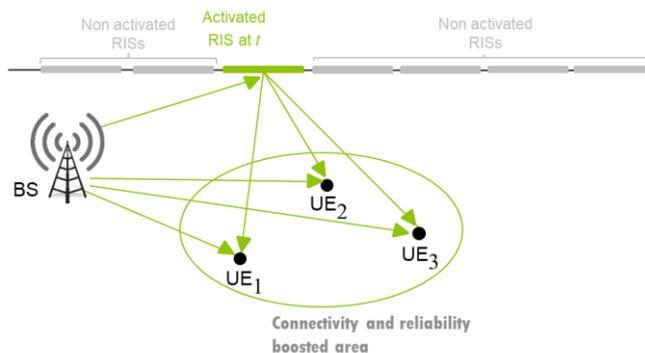


Figura 5. Sistemas de comunicación inalámbrica de downlink o uplink asistidos por los RIS, en los que la conectividad y la fiabilidad están garantizadas por los RIS.

3.2.2 Mayor conectividad y fiabilidad gracias a múltiples RISs controlados individualmente

En este escenario, ilustrado en la Figura 6, varias BSs pretenden aumentar la conectividad y la fiabilidad con sus respectivos UE. Los RIS desplegados se asignan a pares de BS-UE, y cada par es capaz de controlar y optimizar el perfil de fase (configuración) de su(s) RIS individual(es). Por lo tanto, se debe tener en cuenta el despliegue tridimensional de los nodos de la red, así como los canales multihaz y de visibilidad directa.

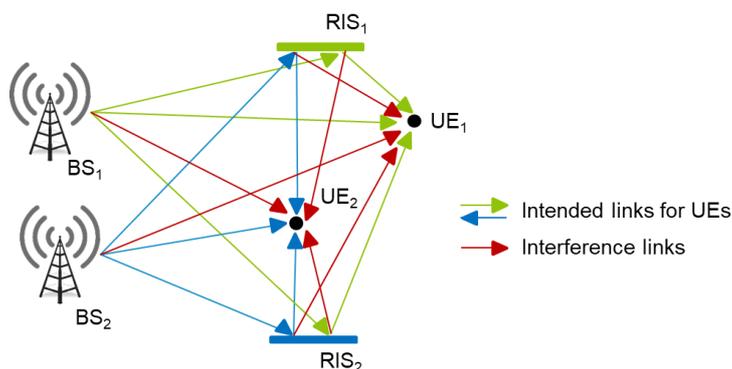


Figura 6. Sistemas de comunicación inalámbrica para downlink asistidos por RIS con múltiples pares transmisor-receptor, en los que los RIS pueden ser controlados individualmente por cada par.

3.2.3 Fiabilidad de la conexión gracias a varios RIS

En este escenario, ilustrado en la Figura 7, se bloquean los enlaces directos entre la estación base multiantena y los UEs con una o varias antenas, y se habilita la conectividad a través de una o varias RIS. Los perfiles de fase (es decir, la configuración) de las RIS pueden optimizarse para los niveles deseados de conectividad y fiabilidad. Al igual que anteriormente, se ha de tener en cuenta el despliegue tridimensional de los nodos de la red, así como los canales con visibilidad directa y multihaz.

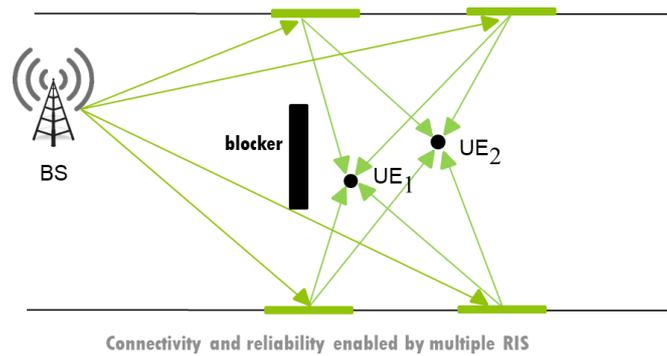


Figura 7. Sistemas asistidos por RIS en los que la conectividad está habilitada por múltiples RIS

3.2.4 Conectividad y fiabilidad potenciadas por un único RIS *multi-tenancy*

Para este escenario, consideramos pares de BS-UE(s) y un único RIS. El RIS se considera ahora un recurso compartido, controlado dinámicamente por la infraestructura a la que acceden comúnmente los pares BS-UE(s). El perfil de fase (configuración) de la RIS puede ser optimizado comúnmente por las BSs para servir a su(s) UE(s) simultáneamente, como se muestra en la Figura 8. Alternativamente, el control de la RIS puede ser compartido en tiempo entre los pares BS-UE(s). Un caso especial de este escenario es el que considera una configuración en la que la comunicación está habilitada por múltiples BS celulares, cada una de las cuales da servicio a un conjunto distinto de UEs. Cuando los UEs se desplazan a través de los límites de la celda de dos o más BSs, pueden cambiar con frecuencia de BS (es decir, se producen *handovers* frecuentes con su respectivo sobrecoste). Los RIS compartidos entre dos o más BSs pueden situarse en los límites de la celda para ampliar dinámicamente la cobertura de las BS de servicio (es decir, reduciendo el número de *handovers*).

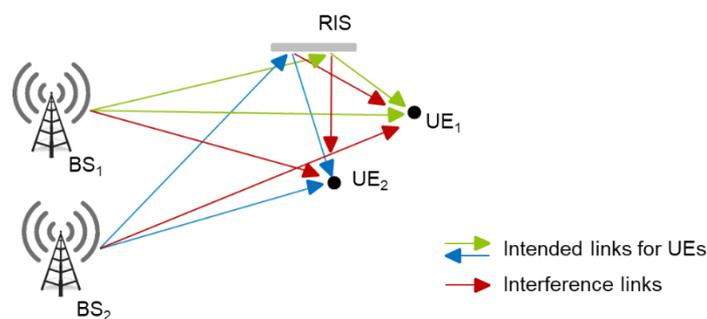


Figura 8. Un escenario *multi-tenancy* con pares o BS-UE(s) y un RIS compartido que está optimizado para impulsar simultáneamente la comunicación de diferentes pares BS-UE

3.2.5 Mobile Edge Computing (MEC) como clave en los escenarios potenciados por la tecnología RIS

Con la llegada de las redes 5G, los sistemas de comunicaciones móviles están pasando de ser un mero marco de comunicación a convertirse en habilitadores de una plétora de nuevos servicios (verticales), como la Industria 4.0, el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y la conducción autónoma. Estos nuevos servicios presentan requisitos muy diversos y, por lo general, implican un procesamiento masivo de datos con bajos retardos de extremo a extremo. En este contexto, un factor clave es el Mobile Edge Computing (o Multi-Access Edge Computing, es decir,

MEC), cuyo objetivo es trasladar las funcionalidades de la nube (por ejemplo, los recursos de computación y de almacenamiento) al borde de la red inalámbrica para evitar latencias relativamente largos y muy variables en los que se incurre para llegar a nubes centralizadas. Las redes habilitadas para MEC permiten a los UEs descargar tareas computacionales en unidades de procesamiento cercanas o servidores en el borde de la red (Edge Servers o ES por sus siglas en inglés), normalmente situados cerca de los puntos de acceso (APs), para ejecutar los cálculos computacionales en nombre de los UE. Sin embargo, al avanzar hacia las comunicaciones con longitudes de onda milimétricas (mmWave) (y más allá), las malas condiciones de los canales debidas a la movilidad, la dinamicidad del entorno y los eventos de bloqueo pueden dificultar gravemente el rendimiento de los sistemas MEC. En este contexto, la llegada de la tecnología RIS, que permiten programar y adaptar el entorno de propagación inalámbrica, puede suponer un fuerte aumento en el rendimiento de estos sistemas, creando dinámicamente áreas de servicio potenciadas en las que la eficiencia energética, la latencia y la fiabilidad pueden intercambiarse para satisfacer los requisitos momentáneos y dependientes de la ubicación de los sistemas MEC.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de este tipo de escenario, en el que se consideran dos dispositivos periféricos (que pueden considerarse UE genéricos), una BS equipada con un servidor en el Edge y dos RIS disponibles. Los dispositivos periféricos pretenden ejecutar aplicaciones sofisticadas descargando cargas computacionales en el ES, explotando el enlace de comunicación inalámbrica con la BS. Suponiendo que el enlace directo entre los usuarios y la estación base pueda verse afectado por la presencia de obstáculos que atenúen o bloqueen la comunicación, como se muestra cualitativamente en la Figura 9, la presencia de las RISs ayuda a contrarrestar este efecto perjudicial al permitir rutas de comunicación alternativas entre los UEs y la estación base, tanto en sentido ascendente (uplink) como descendente (downlink). El tiempo se divide en slots indexados por la variable t . A continuación, en cada slot, los UEs generan nuevas solicitudes de descarga, que se gestionan mediante un sistema de colas dinámico que tiene en cuenta tanto los retardos en la comunicación (tanto en el uplink como en el downlink) como en el procesamiento. En este escenario, el objetivo es optimizar conjuntamente la comunicación (p. ej., potencia de señal, velocidades y configuración de las RISs) y los recursos de computación (p. ej., frecuencias de CPU) para permitir una computación en el borde de la red energéticamente eficiente con requisitos de baja latencia y alta precisión.

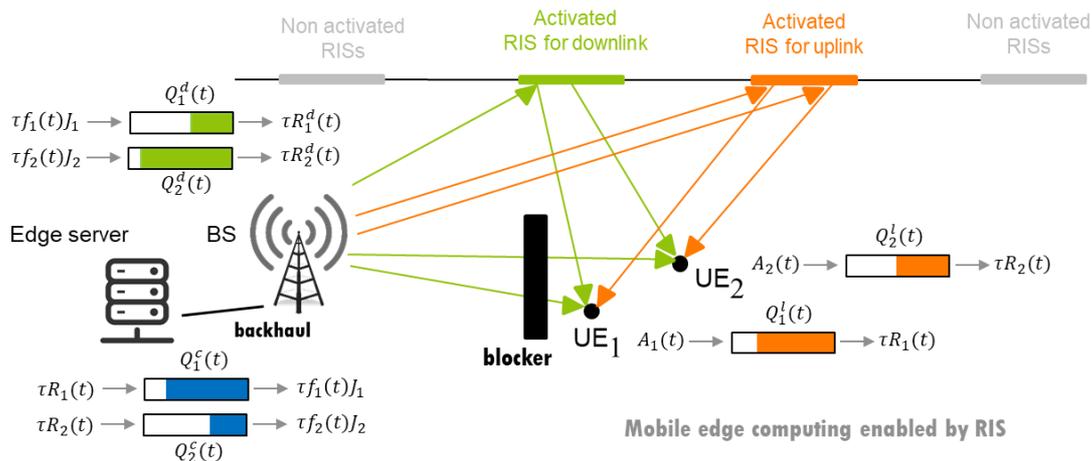


Figura 9. Sistemas MEC potenciados por RIS

4 ESCENARIOS MEJORADOS DE LOCALIZACIÓN Y DETECCIÓN

4.1 Escenarios convencionales (es decir, con sistemas no RIS)

Los sistemas de localización convencionales se resumen visualmente en la **Error! Reference source not found.** y pueden diferenciarse en función de los procedimientos de posicionamiento aplicados que se enumeran en la Tabla 2, donde se presentan sus requisitos previos (en términos de métricas de radio utilizadas, requisitos de sincronización, transacciones UL/DL, número mínimo de EB desplegadas, etc.) y su representación en las versiones estándar existentes/pendientes o en las generaciones de sistemas de comunicaciones móviles (4G, 5G, etc.)^{18,19}.

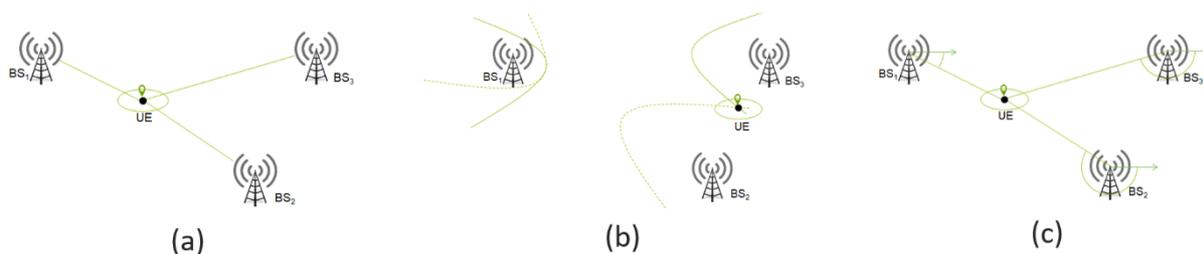


Figura 10. Sistemas de localización convencionales (es decir, trilateración/posicionamiento circular). Escenarios 1 y 2 (a); escenarios 2 y 3 (b); y escenarios 4 y 5 (c)

¹⁸ del Peral-Rosado, José A., Ronald Raulefs, José A. López-Salcedo, and Gonzalo Seco-Granados. "Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1G to 5G." IEEE Communications Surveys & Tutorials 20, no. 2 (2017): 1124-1148.

¹⁹ Keating, M. Säily, J. Hulkkonen, J. Karjalainen, "Overview of Positioning in 5G New Radio," Proc. 16th International Symposium on Wireless Communication Systems 2019 (ISWCS'19), Oulu, Aug. 2019, pp. 320-324

Tabla 2. Procedimientos de localización convencionales

Escenario	Mediciones utilizadas	UL/DL	Requisitos de sincronización	Madurez
1	RSSI, Cell-ID, fingerprinting	UL y/o UL indistintamente	Ninguno (todos excepto el nivel mínimo de sincronización necesario para establecer la comunicación)	2G (fingerprinting in 4G)
2	Real-Time Time-of-Flight (RT-ToF) basado en latecia/Time of Arrival (ToA) (también llamado posicionamiento multi-RTT)	UL & DL	Tanto la BS como el UE (a priori asíncronos al inicio del procedimiento de localización) necesitan aplicar transacciones de alcance multidireccionales entre pares para resolver el desfase de temporización (y posiblemente compensar las desviaciones relativas del reloj).	5G NR
3	TDOA basado en latencias/ToAs en las BS receptoras (también llamado UToA o UL-TDoA)	Sólo UL	BSs sincronizadas (en recepción)	3G
4	OTDOA basado en delays/ToAs en las BS receptoras (también llamado DL-TDoA)	Sólo DL	BSs sincronizadas (en transmisión)	3G
5	DoA en las BS receptoras (también llamado UL-DoA)	Sólo UL	Ninguno (todos excepto el nivel mínimo de sincronización necesario para establecer la comunicación)	5G NR
6	DoD desde las BS transmisoras + RSSI en los UEs receptores (& fingerprinting con una base de datos de patrones de RSSI bajo diferentes haces de transmisión) (también llamado DL-DoD)	DL (+ retransmisiones UL de DL RSSI)	Ninguno (todos excepto el nivel mínimo de sincronización necesario para establecer la comunicación)	5G NR

En todos los casos enumerados en la Tabla 2, las mediciones se utilizan para resolver un problema de optimización no lineal. La calidad del posicionamiento depende de la calidad de las mediciones, así como de las ubicaciones relativas de las estaciones base.

4.2 Retos técnicos en los escenarios de referencia habilitados por la tecnología RIS

Para las configuraciones y estrategias de los sistemas de localización convencionales identificados en la sección 3.1, basándonos en un análisis cualitativo tanto de la viabilidad de la localización (incluidas posibles consideraciones de identificabilidad de alto nivel) como del rendimiento esperado, determinamos dónde y cómo la tecnología RIS podría ayudar o potenciar los procedimientos de localización convencionales. Estas ventajas pueden adoptar diversas formas, dependiendo del modo de funcionamiento de las RIS (es decir, reflejar, refractar, transmitir, retransmitir, etc.; véase la sección 1.2). También pueden clasificarse en función de:

- **Localización habilitada:** haciendo que la localización vuelva a ser factible, siempre que falle el sistema convencional, proporcionando así una mejora en la continuidad del servicio, la cobertura, la resiliencia.
- **Localización potenciada:** mejora puntual y/o local del rendimiento en los procedimientos de localización (en términos de precisión, latencia, etc.), al tiempo que se depende de la misma cantidad de recursos radioeléctricos (es decir, número de dispositivos activos, espectro, etc.) que en los sistemas convencionales. Esto permite ampliar los límites de rendimiento y las prestaciones configurables.
- **Localización de bajo perfil:** alcanzar objetivos predeterminados de rendimiento en los procedimientos de localización, al tiempo que se requieren muchos menos recursos en comparación con el sistema convencional (el rendimiento también está relacionado con la sostenibilidad, el consumo de energía y los costes de despliegue).

Obsérvese que un uso particular de la tecnología RIS (por ejemplo, dada una tupla {modo de funcionamiento de los RIS, despliegue físico de los RIS}) puede permitir cubrir varias de las ventajas anteriores a la vez.

En los siguientes subapartados se definen 11 escenarios genéricos en los que la tecnología RIS proporciona ventajas de rendimiento para la localización, sólo a modo de ejemplo (para una descripción más exhaustiva, consulte la bibliografía técnica^{20,21,22}, que pueden relacionarse con la clasificación según la Tabla 3.

Tabla 3. Escenarios de localización habilitados por la tecnología RIS

Escenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Localización habilitada por RIS	X	X	X		X	X	X	X		X	X
Localización mejorada por RIS				X	X			X	X		X
Localización de perfil bajo ayudada por RIS				X			X			X	

²⁰ K. Keykhosravi, M. F. Keskin, G. Seco-Granados, and H. Wymeersch, "SISO RIS-enabled joint 3D downlink localization and synchronization," arXiv preprint arXiv:2011.02391, 2020.

²¹ Z. Abu-Shaban, K. Keykhosravi, M. F. Keskin, G. C. Alexandropoulos, G. Seco-Granados, and H. Wymeersch, "Near-field localization with a reconfigurable intelligent surface acting as lens," arXiv preprint arXiv:2010.05617, 2020.

²² K. Keykhosravi, M. F. Keskin, S. Dwivedi, G. Seco-Granados, and H. Wymeersch, "Semi-passive 3D positioning of multiple ris-enabled users," arXiv preprint arXiv:2104.12113, 2021.

4.2.1 RIS en modo reflexión

Escenario 1 - Localización inequívoca bajo una geometría favorable con un número mínimo de Estaciones Base activas

En este escenario, la infraestructura convencional es insuficiente para proporcionar una estimación adecuada de localización (típicamente dentro de todos los escenarios convencionales 1 a 5 anteriores). En este escenario, la RIS es la tecnología que permite la localización²³. Más allá de las consideraciones de viabilidad de los mecanismos de localización, incluso si en este escenario sólo se necesita una única reflexión de la RIS además de la ruta directa (line-of-sight), la selección de la RIS más relevante a controlar (típicamente en términos de perfiles de fase) en un escenario de despliegue multi-RIS también puede contribuir a mejorar el rendimiento (típicamente a través del control de lo que se conoce en inglés como Geometric Dilution of Precision (GDoP)).

- **Configuraciones:** estación base de antena única, UE de antena única, RIS planar.
- **Mediciones de señal:** Time-of-Arrival (ToA) medido por la BS, ToA medido por la RIS, Difference-of-Departure (DoD) medido por la RIS.
- **Incógnitas a resolver:** Localización del UE en 3D, desviación del reloj del UE en 1D.
- **Variables conocidas:** Ubicación de la estación base, ubicación y orientación de la RIS, señal transmitida, secuencia de configuraciones de fase de la RIS.
- **Requisitos de la RIS:** ubicación y orientación conocidas, configuraciones de fase de la RIS variables, RIS sincronizados con la estación base.

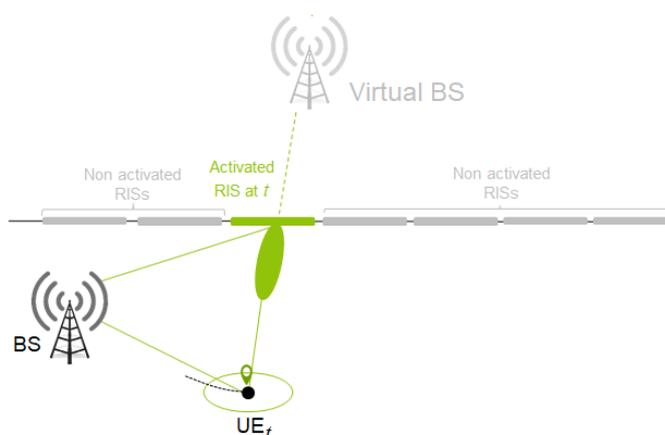


Figura 11. Ejemplo Escenario 1

Escenario 2 - Mitigación sin enlace inalámbrico directo (Non-Line-of-Sight o NLOS) para mejorar la cobertura y continuidad del servicio en condiciones de campo lejano

Al igual que en el escenario anterior, los sistemas convencionales “no RIS” serían insuficientes para proporcionar una estimación de la ubicación (dentro de las aproximaciones 1 a 5 de la tabla anterior) siempre que no se cumpla el número mínimo de BSs en visibilidad (es decir, el número necesario para garantizar una localización inequívoca), mientras que la ubicación 2D del usuario puede

²³ K. Keykhosravi, M. F. Keskin, G. Seco-Granados, and H. Wymeersch, “SISO RIS-enabled joint 3D downlink localization and synchronization,” arXiv preprint arXiv:2011.02391, 2020.

estimarse mediante señales de banda estrecha recibidas de dos RIS en ausencia de line-of-sight (incluso con una única BS sin visibilidad directa, como se muestra en la figura siguiente), dado que los dos haces reflejados resultantes se resuelven adecuadamente en el lado del receptor. Se supone que el usuario y la BS se encuentran en el campo lejano de las RISs.

- **Configuraciones:** una estación base con una sola antena, un UE con una sola antena, dos RIS planos.
- **Mediciones de señal:** DoD de ambos RIS
- **Incógnitas a resolver:** Localización 3D del UE
- **Variables conocidas:** Ubicación de la estación base, ubicación y orientación de las RIS, señal transmitida, secuencia de configuraciones de fase de los RIS.
- **Requisitos de las RIS:** ubicación y orientación conocidas, configuraciones de fase de los RIS variables, configuraciones de fase de los RIS ortogonales, sincronización de los RIS con la estación base.

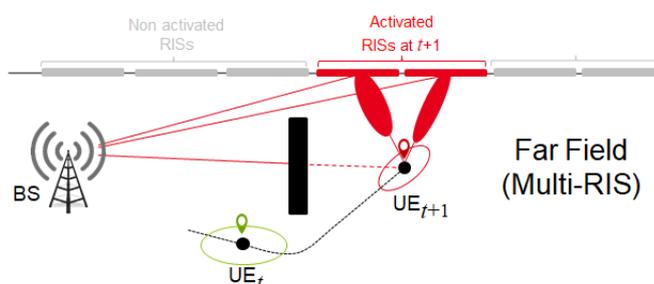


Figura 12. Ejemplo Escenario 2

Escenario 3 - Mitigación sin línea de visión (NLOS) para una mejor cobertura y continuidad del servicio en condiciones de campo cercano

En este escenario, de nuevo, la ubicación del usuario puede estimarse a través de la señal recibida de un RIS en ausencia del haz de señal directo (incluso con una única BS sin visibilidad, como se muestra en la ilustración inferior), pero ahora se asume que el usuario se encuentra en el campo cercano de la RIS. Normalmente, esto permite explotar la curvatura del frente de onda de la señal para el posicionamiento directo^{24,25}, a diferencia de lo que ocurre en campo lejano, donde, por ejemplo, habría que estimar por separado la dirección de salida de la RIS y el tiempo de llegada del haz reflejado por la RIS para estimar la posición del UE.

- **Configuraciones:** una estación base con una sola antena, un UE con una sola antena, RIS planar.
- **Medidas de la señal:** la posición del usuario se calcula directamente a partir de la señal recibida.

²⁴ Z. Abu-Shaban, K. Keykhosravi, M. F. Keskin, G. C. Alexandropoulos, G. Seco-Granados, and H. Wymeersch, "Near-field localization with a reconfigurable intelligent surface acting as lens," arXiv preprint arXiv:2010.05617, 2020

²⁵ M. Rahal, B. Denis, K. Keykhosravi, B. Uguen, H. Wymeersch, "RIS-Enabled Localization Continuity Under Near-Field Conditions", submitted to IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications 2021 (IEEE SPAWC'21), Lucca, Sept. 2021

- **Incógnitas a resolver:** Localización 3D del UE.
- **Variables conocidas:** Ubicación de la estación base, ubicación y orientación de las RIS, señal transmitida, secuencia de configuraciones de fase de los RIS.
- **Requisitos de las RIS:** ubicación y orientación conocidas, configuraciones de fase de las RIS variables, RIS sincronizadas con la BS.

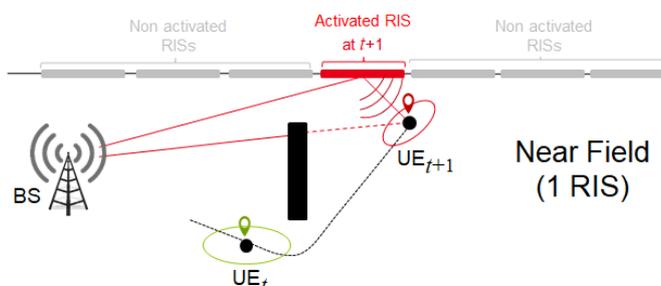


Figura 13. Ejemplo Escenario 3

Escenario 4 - Prestación de servicios multiusuario y multiprecisión a la carta

En un contexto multiusuario, una infraestructura de localización multi-BS convencional requeriría asignar una mayor cantidad de recursos de radio (por ejemplo, en términos de tiempo, frecuencia, potencia...) o incluso un mayor número de BS (es decir, > 3 en 2D) para satisfacer los requisitos de localización a priori de los UE más exigentes, sin posibilidad de controlar con precisión la dilución de la precisión y, por tanto, de garantizar un nivel arbitrario (p. ej., constante) de precisión en la escena, estando esta última totalmente limitada por el despliegue "estático" de esas BS activas.

Por el contrario, el despliegue (y el control selectivo) de múltiples RISs hace posible (i) la provisión (bajo demanda) de varias clases de servicios de localización a diferentes usuarios que comparten el mismo entorno físico, dependiendo de las necesidades que expresen local/temporalmente, mientras (ii) se controla espacialmente tanto la precisión de la localización como la dilución geométrica de la precisión en las diferentes dimensiones (es decir, tanto los tamaños como las orientaciones de las elipses de incertidumbre de localización en la figura mostrada a continuación)²⁶. Esto permite cumplir más fácilmente los criterios de equidad a priori, limitando al mismo tiempo al mínimo estricto la cantidad de recursos necesarios para las transmisiones activas (de nuevo, en términos de tiempo, frecuencia/ancho de banda, potencia). Para ello, en combinación con las estrategias convencionales de asignación de recursos citadas anteriormente, los RIS proporcionan un grado más de libertad, al ofrecer la posibilidad de dedicar a usuarios específicos un subconjunto de los RIS desplegados, o incluso subáreas de estos RIS.

Esto sería especialmente relevante en entornos de aplicación difíciles, como las fábricas inteligentes, donde deben garantizarse varios niveles de autorización y/o seguridad en función de la zona específica ocupada por operadores, robots o móviles, en condiciones de radio muy cambiantes y muy obstruidas.

- **Configuraciones:** BS de antena única, UE de antena única, RIS planares múltiples
- **Mediciones de señal:**

²⁶ H. Wymeersch, B. Denis, "Beyond 5G Wireless Localization with Reconfigurable Intelligent Surfaces", Proc. IEEE International Conference on Communications 2020 (IEEE ICC'20), Dublin, June 2020

- Sólo DL: ToA del haz directo, ToA del haz reflejado por RIS y DoD de RIS (en cada UE).
- DL y UL: ToA de haz directo y ToA del haz reflejado por la RIS (en cada UE); ToA del haz directo, ToA del haz reflejado por la RIS (en cada BS).
- **Incógnitas que deben resolverse:**
 - Sólo DL: ubicación de UE 3D, desviación de reloj de UE 1D.
 - DL y UL: ubicación 3D UE.
- **Variables conocidas:** Ubicación de la estación base, ubicación y orientación de las RIS, señales transmitidas, secuencias de configuraciones de fase de las RIS.
- **Requisitos de las RIS:** ubicación y orientación conocidas, configuraciones de fase variables, sincronización con las BS.

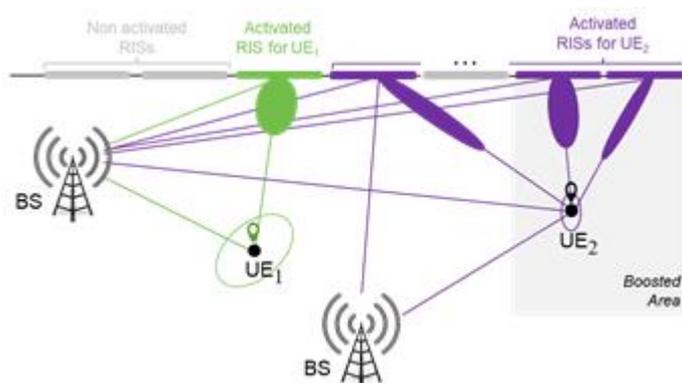


Figura 14. Ejemplo Escenario 4

Escenario 5 - Detección oportuna de objetos pasivos mediante la supervisión de la actividad radioeléctrica multienlace

En este escenario multi-RIS, la idea es permitir la detección oportuna de objetos pasivos tanto estáticos como móviles, monitorizando la evolución temporal de los perfiles multihaz sobre un enlace de comunicación entre la BS y uno o varios UE(s) (DL y/o UL).

Dado que se han desarrollado algoritmos adecuados de estimación de canal y asociación de datos, ampliando el concepto de radar pasivo (multiestático), las correlaciones espacio-temporales observadas, la aparición/desaparición repentina y/o la fluctuación/estabilidad de potencia de los componentes multihaz reflejados por RIS resueltos tanto en el tiempo como en las operaciones RIS pueden explotarse normalmente para indicar la presencia, la posición/actitud e incluso posiblemente el patrón de movilidad de dichos objetos pasivos en el entorno.

En comparación con los enfoques de radar pasivo "sin RIS" más clásicos, cuyo objetivo es detectar y clasificar la actividad física basándose en el análisis estándar de alcance-Doppler²⁷, el control dinámico y selectivo de las RIS (es decir, cambiando con el tiempo tanto las RISs a controlar como sus perfiles de fase, como se ilustra en la figura siguiente) se espera que mejore la diversidad multihaz y proporcione información "geométrica" más rica dependiente de la localización (mientras opera a frecuencias más altas, por ejemplo, a frecuencias de ondas milimétricas) para mejorar el

²⁷ W. Li, R. J. Piechocki, K. Woodbridge, K. Chetty, "Physical Activity Sensing via Stand-Alone WiFi Device", Proc. IEEE Global Communications Conference 2019 (IEEE GLOBECOM'19), Waikoloa, Dec. 2019

rendimiento en términos de detección, clasificación de la actividad y/o incluso estimación de la localización.

En cuanto a las incógnitas que deben resolverse, son posibles varias opciones, dependiendo de si la ubicación del UE es conocida a priori (por ejemplo, como resultado de una fase de localización preliminar) o no. En caso de que las ubicaciones de los equipos de usuario y de los objetos pasivos deban determinarse conjuntamente desde cero, se pueden aprovechar y ampliar al contexto RIS los enfoques de localización y mapeo simultáneos (SLAM, por sus siglas en inglés) existentes (por ejemplo, SLAM de ondas milimétricas²⁸. En este caso, también se contemplan extensiones de monitorización radio cooperativa multiusuario (es decir, tanto en modo cooperativo como no cooperativo).

Sin embargo, en entornos altamente reverberantes que pueden crear ecos multihaz ultradensos, en entornos de propagación irregulares con efectos de dispersión complejos y/o cuando las señales transmitidas sólo pueden ocupar anchos de banda relativamente estrechos (por ejemplo, en comparación con el dominio de ondas milimétricas, donde normalmente se dispone de hasta varios GHz de ancho de banda), la resolución multihaz suele ser muy difícil. En consecuencia, los enfoques de localización paramétrica concebidos anteriormente, que estiman las variables de localización basándose en modelos de señal "geométricos" a priori (es decir, modelos destinados a establecer un vínculo determinista entre las señales de radio de recepción y la información de localización), resultan menos eficaces e incluso poco prácticos. En tales condiciones operativas, pueden aplicarse en su lugar técnicas alternativas de *fingerprinting* para localizar objetos pasivos. Se pueden utilizar múltiples RIS para aprovechar la denominada diversidad configuracional mediante la conformación del frente de onda, incluso con mediciones de una sola antena y una sola frecuencia²⁹.

- **Configuraciones:** BS de antena única o multiantena, UE de antena única o multiantena, RIS planares múltiples.
- **Mediciones de señal:** DL o UL indistintamente: Series temporales de estimaciones de canal multihaz, es decir, ToAs, ganancias y posiblemente muestras de Angle-of-Arrival (AoA) (opcional, en caso de BS multiantena) de todos los componentes multihaz resueltos (incluyendo haz directo -si sólo está presente-, haces reflejados por RIS y haces de dispersión creados por objetos);
- **Incógnitas que deben resolverse:**
 - Opción 1: Presencia, altitud, movilidad y/o ubicaciones 3D de objetos pasivos únicamente (dada la ubicación o ubicaciones de los UE).
 - Opción 2: ubicaciones 3D de los objetos pasivos y de los equipos de observación (SLAM).

²⁸ R. Koirala, B. Denis, B. Uguen, D. Dardari, H. Wymeersch, "Simultaneous Localization and Mapping in Millimeter Wave Networks with Angle Measurements", Proc. IEEE International Conference on Communications 2020 (IEEE ICC'20), Workshop on Advances in Network Localization and Navigation (ANLN), Dublin, June 2020

²⁹ P. del Hougne, M. F. Imani, M. Fink, D. R. Smith, G. Lerosey, "Precise Localization of Multiple Noncooperative Objects in a Disordered Cavity by Wave Front Shaping", Physical Review Letters 121, 063901, 2018

- **Variables conocidas:** Ubicación de la estación base, ubicación y orientación de las RIS, señales transmitidas, secuencias de configuraciones de fase de los RIS, ubicación de los UEs (opcional).
- **Requisitos de las RIS:** ubicación y orientación conocidas, configuraciones de fase variables, sincronización con las BS.

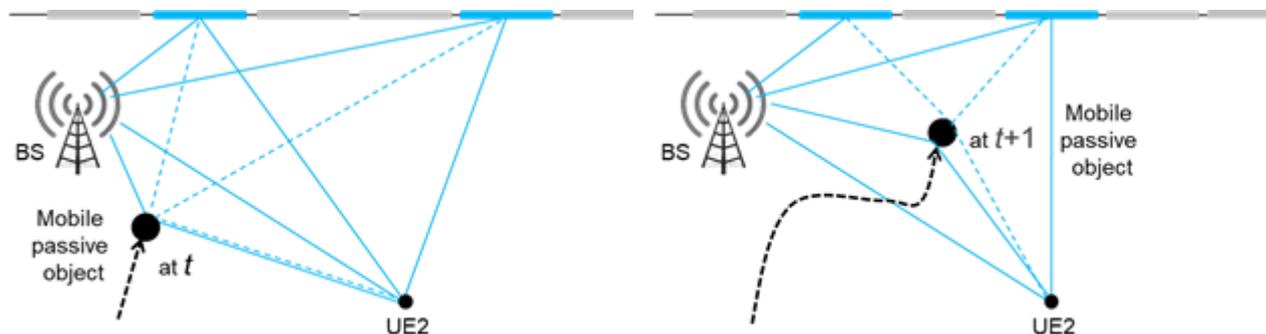


Figura 15. Ejemplo Escenario 5 (en diferentes instancias de tiempo t)

Escenario 6 - Operaciones de búsqueda y rescate asistidas por RIS en escenarios de emergencia mediante vehículos aéreos no tripulados (unmanned aerial vehicles o UAVs, por sus siglas en inglés)

El uso de vehículos aéreos no tripulados en situaciones de emergencia puede ser útil, pero aún debe hacer frente a retos técnicos específicos cuando se trata de la localización de víctimas. Aunque los vehículos aéreos no tripulados pueden aplicar directamente técnicas clásicas de localización celular, estas técnicas se han desarrollado para puntos de anclaje estáticos, como las estaciones base, por lo que se pierden las nuevas oportunidades que ofrecen sus capacidades de movimiento³⁰. La tecnología RIS puede soportar y superar el efectos de desvanecimiento de canal lento (*shadowing*) causados por los escombros en tales escenarios mediante la construcción de condiciones de propagación ad-hoc controlables para las señales celulares empleadas en el proceso de medición.

En concreto, mediante las RIS podemos sortear el bloqueo de line-of-sight (LOS), pero también son posibles aproximaciones más sofisticadas. Debido a la curvatura del frente de onda en el campo cercano de un RIS de gran tamaño, es posible determinar con precisión sesgos de reloj desconocidos combinando información de fase de llegada (Phase-of-Arrival o PoA) y tiempo de llegada (ToA). En entornos difíciles, como los de la industria 4.0 en interiores, los RIS pueden mantener múltiples haces de forma constante, lo que permite tener en cuenta dinámicamente los movimientos de los objetos.

Además, RIS ligeros y poco complejos pueden aprovecharse para hacer frente al problema del consumo energético de los vehículos aéreos no tripulados, que se utilizarán para llevar la conectividad a lugares de difícil acceso, como se muestra en la siguiente figura. Los RIS pueden controlarse automáticamente para enfocar la señal entrante hacia lugares específicos, al tiempo que ayudan al proceso de localización de las víctimas mediante RIS instalados en la pared o en el cristal de la ventana. Esto ayudaría significativamente a los equipos de primera intervención en

³⁰ A. Albanese, V. Sciancalepore, X. Costa-Perez, "SARDO: An Automated Search-and-Rescue Drone-based Solution for Victims Localization", in IEEE Transactions on Mobile Computing 2021

situaciones de emergencia, cuando, por ejemplo, el humo puede impedir la visibilidad normal dentro de un edificio³¹.

- **Configuraciones:** UAV provisto de un único RIS; una única BS en tierra (o furgoneta equipada con una BS portátil).
- **Mediciones de la señal:** Señal entrante (procedente del UAV) en cada usuario de tierra (UE).
- **Incógnitas que deben resolverse:**
 - Localización del UAV, perturbación de la posición.
 - Localización del UE terrestre (es decir, víctimas).
- **Variables conocidas:** Ubicación de la estación base terrestre, área muy extensa en la que se encuentran los UE (es decir, las víctimas).
- **Requisitos de las RIS:** Configuraciones de fase variable, canal de control inalámbrico, consumo de energía limitado (encendido en modo de reflexión).

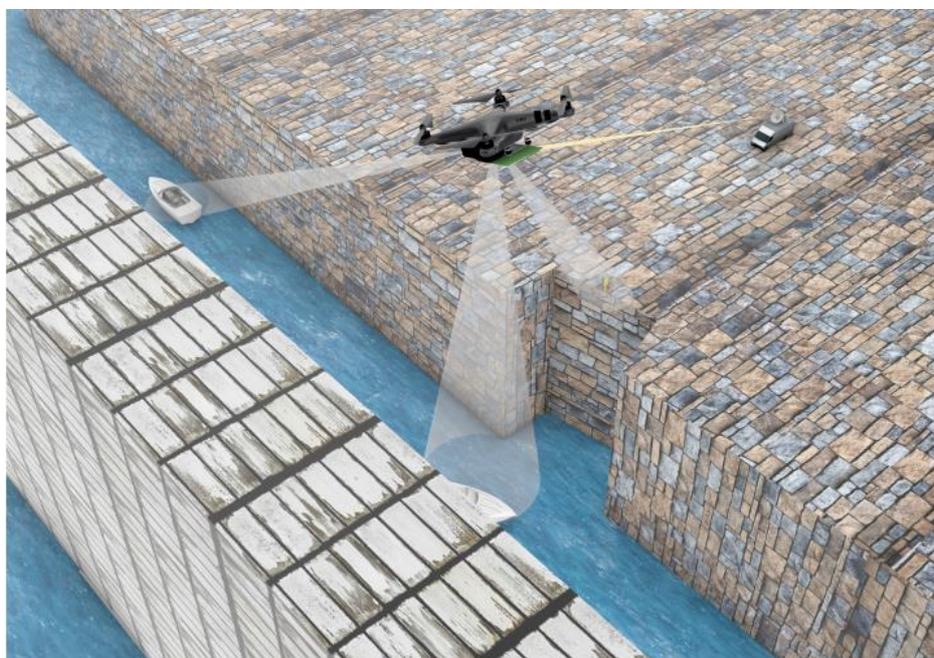


Figura 16. UAV equipado con RIS que ayuda en operaciones de búsqueda y rescate en situaciones de emergencia

4.2.2 RIS en modo recepción

En este subapartado se presentan escenarios que incluyen RISs equipadas con una o varias cadenas de radio frecuencia (RF) de recepción (Rx) (mucho menos numerosas que el número total de elementos unitarios de cada RIS). Una cadena típica de recepción de radiofrecuencia conectada a todos los elementos de un RIS (caso de un RIS de radiofrecuencia de recepción única) o a un subconjunto (caso de un RIS de radiofrecuencia de recepción múltiple) consta de un amplificador de bajo ruido, un mezclador para la conversión de la señal a banda base y un convertidor analógico-digital. Las cadenas de RF Rx de un RIS permiten recoger mediciones en su emplazamiento, que

³¹ P. Mursia, F. Devoti, V. Sciancalepore, X. Costa-Perez, "RISe of Flight: RIS-Empowered UAV Communications for Robust and Reliable Air-to-Ground Networks", in IEEE Open Journal of the Communication Society 2021

pueden utilizarse para la estimación de canales, la localización y la detección de objetos pasivos (mapeo radioeléctrico).

Escenario 7 - Localización sin estaciones base utilizando múltiples RIS

En este escenario, ilustrado en la siguiente figura, las estimaciones de AoA obtenidas en múltiples RIS se pueden combinar para producir la estimación de la(s) ubicación(es) del (de los) UE(s).³²

- **Configuraciones:** Despliegue 3D, UE(s) de una o varias antenas, múltiples RIS.
- **Medidas de la señal:** Señal recibida en cada RIS a través de su configuración de perfil de fase (recepción combinada analógica).
- **Incógnitas a resolver:** Ubicaciones 3D de los UE(s).
- **Variables conocidas:** Ubicaciones y orientaciones de los RIS, señales piloto.
- **Requisitos de los RIS y del sistema:** Configuraciones de fase de RIS variables, capacidad de cálculo para la estimación de AoA en cada RIS, recopilación de todas las estimaciones de AoA en un controlador central (por cable o inalámbrico) que las combina para la estimación de ubicación(es).

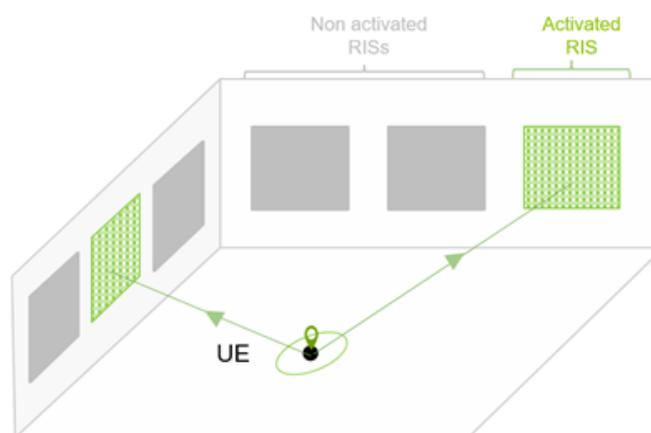


Figura 17. Ejemplo Escenario 7

Escenario 8 - Localización/detección por radar de objetivo(s) pasivo(s)

En este escenario, ilustrado en la siguiente figura, un radar es asistido por múltiples RISs para localizar/detectar objetivos estáticos o en movimiento.³³ En la literatura reciente, diferentes autores han explorado la aplicación de RISs en sistemas de radar para realizar la localización de

³² G. C. Alexandropoulos and E. Vlachos, "A hardware architecture for reconfigurable intelligent surfaces with minimal active elements for explicit channel estimation," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Barcelona, Spain, 4–8 May 2020, pp. 9175–9179.

³³ G. C. Alexandropoulos and E. Vlachos, "A hardware architecture for reconfigurable intelligent surfaces with minimal active elements for explicit channel estimation," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Barcelona, Spain, 4–8 May 2020, pp. 9175–9179.

usuarios³⁴, permitir la localización de usuarios en situaciones non-line-of-sight (NLOS)³⁵ y mejorar el rendimiento del problema de detección de objetivos^{36,37,38}. La novedad del Escenario 8 se encuentra en los RIS receptores que se despliegan (en comparación con los RIS pasivos de la literatura que sólo son capaces de reflejar), dando al sistema la capacidad de localizar usuarios además del propio radar.

- **Configuraciones:** Despliegue 3D, transceptor MIMO full-duplex (radar), objetivo(s) pasivo(s), canales con haz directos o multihaz, múltiples RISs.
- **Mediciones de señal:** Señal recibida en cada RIS a través de su configuración de perfil de fase (recepción combinada analógica), señal recibida en la Rx multiantena del radar, banda estrecha o banda ancha.
- **Incógnitas a resolver:** Detección o localización(es) 3D de objetivo(s) estático(s) o móvil(es), localización 3D del radar.
- **Variables conocidas:** Ubicación y orientación de los RIS, señales piloto.
- **Requisitos de los RIS y del sistema:** Configuraciones de fase de RIS variables, capacidad de cálculo para la estimación/detección de características en cada RIS, recopilación de estas últimas en el radar (por cable o inalámbrica) que las combina para la estimación de la(s) ubicación(es) de objetivo(s) estático(s) o móvil(es).

³⁴ H. Zhang, J. Hu, H. Zhang, B. Di, K. Bian, Z. Han, and L. Song, "MetaRadar: Indoor localization by reconfigurable metamaterials," arXiv preprint: 2008.02459, 2020.

³⁵ A. Aubry, A. De Maio, and M. Rosamilia, "Reconfigurable intelligent surfaces for N-LOS radar surveillance," arXiv preprint: 2104.00456, 2021.

³⁶ W. Lu, B. Deng, Q. Fang, X. Wen, and S. Peng, "Intelligent reflecting surface-enhanced target detection in MIMO radar," IEEE Sensors Letters, 2021.

³⁷ Z.-M. Jiang, M. Rihan, P. Zhang, L. Huang, Q. Deng, J. Zhang, and E. M. Mohamed, "Intelligent reflecting surface aided dual-function radar and communication system," IEEE Sensors Letters, 2021

³⁸ S. Buzzi, E. Grossi, M. Lops, and L. Venturino, "Foundations of MIMO radar detection aided by reconfigurable intelligent surfaces," arXiv preprint: 2105.09250, 2021

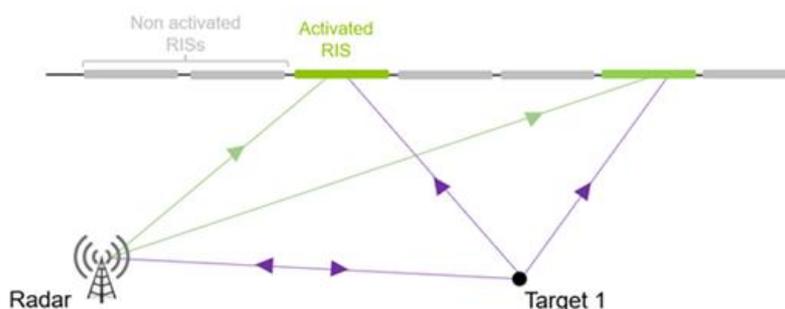


Figura 18. Ejemplo Escenario 8

Escenario 9 - Mapeo del entorno radioeléctrico asistido por RIS para la localización por el método de fingerprinting

En este escenario, un conjunto de RIS activos/híbridos permite cartografiar la densidad espectral de la potencia electromagnética (EM) en un área específica de interés.

Desde el punto de vista de la localización, la capacidad de construir mapas de radiofrecuencia (RF) fiables y "completos" es de suma importancia para los enfoques de posicionamiento basados en métodos de fingerprinting, en los que primero hay que "aprender" los patrones de las señales de radio in situ en ubicaciones de UE conocidas. Estas últimas se recopilan para formar una base de datos previa, que posteriormente se utiliza para compararla con las mediciones de radio actuales a fin de determinar la ubicación desconocida del UE. En la práctica, sin embargo, sólo se suelen recoger sobre el terreno mediciones dispersas y espacialmente no uniformes para construir y calibrar ese mapa RF previo requerido.

En comparación con los enfoques clásicos "sin RIS", el uso de RIS de Rx en unas pocas ubicaciones estratégicas para la cartografía offline de RF podría contribuir a acentuar las características dependientes de la ubicación de los patrones de la señal almacenadas en la base de datos. En última instancia, también se espera que los mapas de RF aprendidos se adapten mejor a las necesidades de los métodos de fingerprinting para mejorar las prestaciones de localización. Esto podría hacerse, por ejemplo, introduciendo más diversidad en las muestras radioeléctricas recogidas, a través de secuencias dedicadas de perfiles de fase RIS Rx que varíen en el tiempo. Por otra parte, el uso de los RIS también debería permitir reducir la cantidad mínima de mediciones de campo necesarias para la calibración del mapa RF (en términos de tiempo y espacio). Sin embargo, este tipo de uso de los RIS, junto con sus ventajas reales, son todavía bastante exploratorios y requerirían investigaciones más profundas.

- **Configuraciones:** varias BS, varios RIS activos.
- **Medición de señales:** Intensidad del campo EM en las ubicaciones de los RIS.
- **Incógnitas a resolver:** Intensidad del campo EM en un conjunto de posiciones discretas en las que no tenemos acceso directo a las mediciones de los RIS.
- **Variables conocidas:** Ubicación de la estación base, ubicación y orientación de los RIS, secuencia de configuraciones de fase de los RIS.
- **Requisitos de las RIS:** Las RIS deben estar dotados de cadenas de receptores de RF en algunos elementos para medir la intensidad del campo EM local.

4.2.3 RIS en modo transmisión

Escenario 10 – Lente basada en RIS

En este escenario, la RIS se coloca delante de un transmisor de antena única. La posición del usuario se estima en el lado del usuario a través de la señal recibida de banda estrecha.

- **Configuraciones:** Despliegue 3D, usuario(s) de antena única, transmisor de antena única y RIS planar en el transmisor.
- **Mediciones:** Señal de banda estrecha recibida en el UE.
- **Incógnitas a resolver:** Ubicaciones tridimensionales de los UEs.
- **Variables conocidas:** Ubicación y orientación de los RIS, ubicación de la antena de transmisión, señales piloto, perfiles de fase de los RIS.
- **RIS y requisitos del sistema:** ubicación y orientación conocidas, configuraciones de fase RIS variables.

4.2.4 RIS en modo híbrido

Escenario 11 - Localización/detección por radar de objetivo(s) pasivo(s)

En este escenario, ilustrado en la siguiente figura, un radar es asistido por múltiples RISs, para localizar/detectar objetivos estáticos o en movimiento.³⁹ En la literatura más reciente, diferentes autores han explorado la aplicación de RISs en sistemas de radar para realizar la localización de usuarios⁴⁰, permitir la localización de usuarios en situaciones de NLOS⁴¹, y mejorar el rendimiento del problema de detección de objetivos os^{42,43,44}. La novedad del Escenario 11 se encuentra en la arquitectura híbrida de los RISs desplegados, que reciben y reflejan simultáneamente (en comparación con los RISs pasivos de la literatura que sólo pueden reflejar), dando al sistema la capacidad de localizar usuarios así como al propio radar.

- **Configuraciones:** Despliegue 3D, transceptor MIMO full-duplex (radar), objetivo(s) pasivo(s), canales con haz directa o multihaz, múltiples RIS.
- **Mediciones de señal:** Señal recibida en cada RIS a través de su configuración de perfil de fase (recepción combinada analógica), señal recibida (reflexiones del objetivo(s) y de los RISs) en la RX multiantena del radar, banda estrecha o banda ancha.

³⁹ G. C. Alexandropoulos, N. Shlezinger, I. Alamzadeh, M. F. Imani, H. Zhang, and Y. C. Eldar, "Hybrid reconfigurable intelligent metasurfaces: Enabling simultaneous tunable reflections and sensing for 6G wireless communications," [Online] <https://arxiv.org/pdf/2104.04690.pdf>, 2021.

⁴⁰ H. Zhang, J. Hu, H. Zhang, B. Di, K. Bian, Z. Han, and L. Song, "MetaRadar: Indoor localization by reconfigurable metamaterials," arXiv preprint: 2008.02459, 2020.

⁴¹ A. Aubry, A. De Maio, and M. Rosamilia, "Reconfigurable intelligent surfaces for N-LOS radar surveillance," arXiv preprint: 2104.00456, 2021.

⁴² W. Lu, B. Deng, Q. Fang, X. Wen, and S. Peng, "Intelligent reflecting surface-enhanced target detection in MIMO radar," IEEE Sensors Letters, 2021.

⁴³ Z.-M. Jiang, M. Rihan, P. Zhang, L. Huang, Q. Deng, J. Zhang, and E. M. Mohamed, "Intelligent reflecting surface aided dual-function radar and communication system," IEEE Sensors Letters, 2021

⁴⁴ S. Buzzi, E. Grossi, M. Lops, and L. Venturino, "Foundations of MIMO radar detection aided by reconfigurable intelligent surfaces," arXiv preprint: 2105.09250, 2021

- Incógnitas a **resolver**: Detección o localizaciones 3D de blanco(s) estático(s) o en movimiento, localización 3D del radar.
- **Variables conocidas**: Ubicación y orientación de los RIS, señales piloto.
- **RIS y requisitos del sistema**: Configuraciones de fase de los RIS variables, capacidad de cálculo para la estimación/detección de características en cada RIS, recopilación de estas últimas en el radar (por cable o inalámbrica) que las combina para la estimación de la ubicación de objetivos estáticos o móviles.

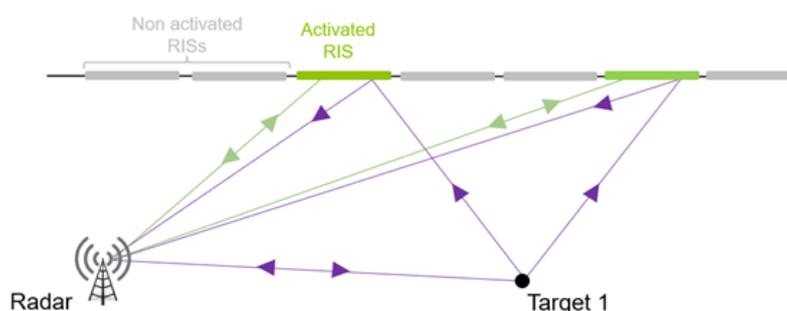


Figura 19. Ejemplo Escenario 11

5 ESCENARIOS DE SOSTENIBILIDAD Y SEGURIDAD MEJORADAS

En cierto modo, este tipo de escenarios tratan el problema de cobertura descrito ya en la Sección 2, pero con un énfasis específico en obtener las mejores prestaciones del sistema de comunicación en términos de Eficiencia Energética (EE), Eficiencia de Exposición al Campo Electromagnético (EMFEE, por sus siglas en inglés) y de Eficiencia Espectral de Secreto (SSE, por sus siglas en inglés).

5.1 Escenarios convencionales (es decir, con sistemas no RIS)

En esta sección, ofrecemos una primera lista no exhaustiva de escenarios de referencia “sin RIS”, en los que el despliegue de RIS(s) para EE/EMFEE/SSE sería significativo por su capacidad para superar las limitaciones actuales debidas al canal de propagación.

En la Figura 20a, describimos la solución convencional para proporcionar un radioenlace energéticamente eficiente desde una BS a un UE previsto. En esta solución, la estación base utiliza tecnología de *beamforming* para maximizar la potencia recibida en el UE de destino, con una potencia de transmisión limitada. Sin embargo, la potencia recibida en el UE está limitada por el número de haces en la señal entre la estación base y el UE considerado. Cuanto menor sea este número, más débil será la señal recibida en el equipo de destino.

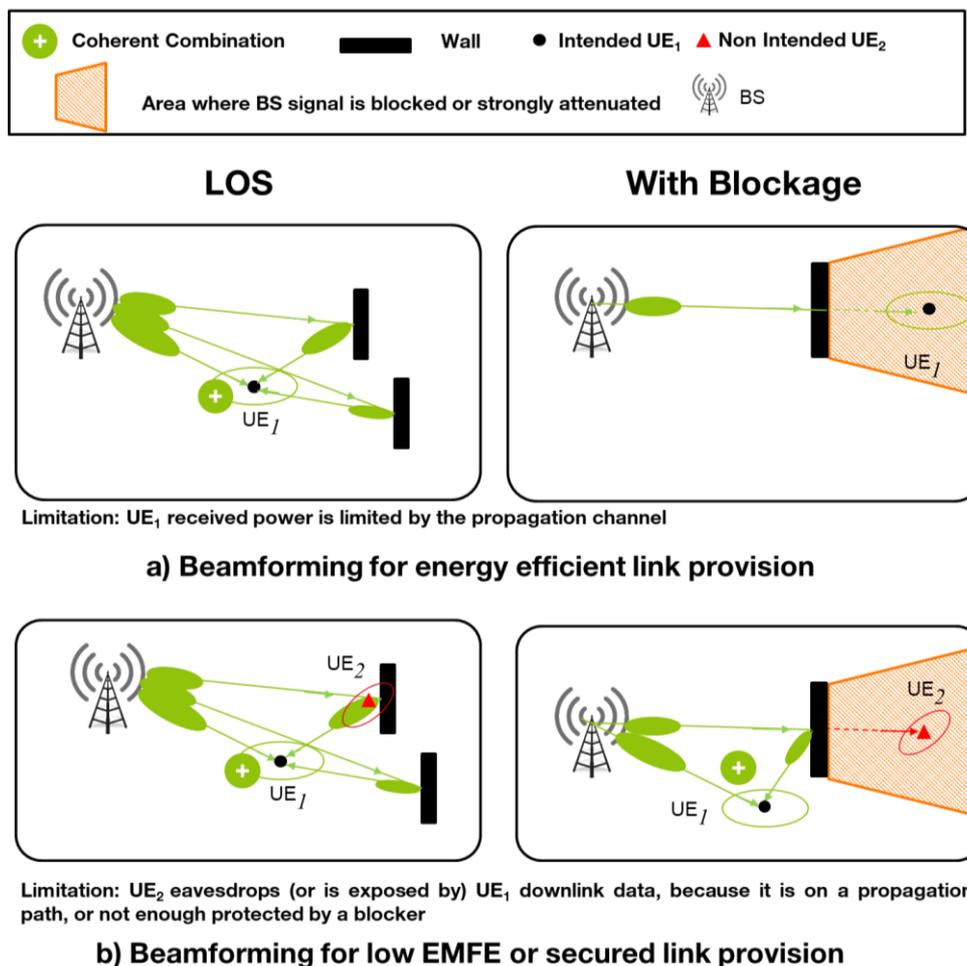


Figura 20. Ejemplo de sistemas convencionales single-BS basados en beamforming

En la Figura 20b), se ilustra la solución convencional para proporcionar un enlace seguro a un UE deseado en presencia de un UE no deseado que espía. De nuevo, la estación base utiliza el método de beamforming para proporcionar la potencia recibida deseada al usuario deseado, con una potencia de transmisión mínima. Con este enfoque, la potencia recibida en el usuario no deseado (sea cual sea su ubicación) se reduce en comparación con el caso sin beamforming. Sin embargo, el contraste entre la potencia recibida en el UE objetivo y la potencia recibida en el UE *espía* está limitado por el número de haces en la señal propagada. Cuanto menor sea este número, más débil será el contraste. En el peor de los casos, el UE no deseado puede incluso encontrarse con uno de estos haces de señal. Como se ilustra en la Figura 20a) y en la Figura 20b), las limitaciones antes mencionadas debidas a la falta de haces múltiples en el canal de propagación se observan tanto en los casos en que el enlace entre la estación base y el UE objetivo está en line-of-sight (LOS) como en los casos en que la señal está bloqueado por un obstáculo.

5.2 Escenarios donde se busca la Eficiencia de Exposición al Campo Electromagnético

En esta sección, reutilizamos los escenarios de referencia “sin RIS”, definidos en la sección anterior, y desplegamos uno o varios RIS.

Más concretamente, en la Figura 21a), se ilustran ejemplos de escenarios de una única BS con RIS, en los que se utiliza la tecnología beamforming de transmisión downlink para optimizar la EE del enlace entre la BS y el UE de destino, explotando la conformación artificial del canal de propagación gracias a las RIS(s). En la Figura 21a), se ilustran las ventajas potenciales que aportan los RIS para aumentar la potencia recibida en el UE de destino para tres tipos de escenarios de propagación:

- El enlace entre la estación base y el UE destino está en line-of-sight (LOS): en este caso, el RIS añade artificialmente un haz de señal al canal, que se combina coherentemente con otros haces "naturales" para aumentar la potencia recibida en el equipo de destino.
- El enlace entre la estación base y el UE de destino está bloqueado por un obstáculo y el equipo de destino se encuentra en el campo cercano de un RIS: en este caso, el RIS crea artificialmente el haz de propagación principal y más potente, para permitir que el equipo de destino reciba potencia de la estación base.
- El enlace entre la estación base y el UE de destino está bloqueado por un obstáculo y el equipo de destino se encuentra en el campo lejano de un RIS: este caso es similar al anterior, salvo que varios RIS pueden ser útiles para concentrar la energía en el equipo de destino.

En la Figura 21b), se ilustran ejemplos de escenarios de un único BS con RIS, en los que se utiliza la tecnología beamforming de transmisión downlink para optimizar el aumento de la potencia recibida en el UE deseado y reducir la potencia recibida en el UE no deseado aprovechando la conformación artificial del canal de propagación gracias a las RIS. Cuando el UE no deseado es un UE expuesto, el enlace retenido es un enlace de baja EMF, mientras que cuando el UE no deseado es un espía, el enlace retenido es un enlace seguro. En la Figura 21b) se ilustran, para tres tipos de escenarios de propagación, las ventajas que aportan las RIS para reducir la potencia recibida en el UE no deseado (ya sea un espía o un UE expuesto) en comparación con la potencia recibida en el UE deseado:

- El enlace entre la estación base y el UE al que va dirigido está en LOS: en este caso, la RIS añade artificialmente haces de propagación al canal, que se combinan de forma coherente con otros trayectos "naturales" para aumentar la potencia recibida en el UE al que va dirigido y se combinan de forma no coherente con otros trayectos "naturales" para reducir la potencia recibida en el UE al que no va dirigido.
- El enlace entre la estación base y el UE previsto está bloqueado por un obstáculo y el UE previsto se encuentra en el campo cercano de un RIS: en este caso, el RIS añade artificialmente un haz de propagación a los haces "naturales" existentes, para reducir la potencia recibida en el UE no previsto.
- El enlace entre la estación base y el UE previsto está bloqueado por un obstáculo y el UE previsto se encuentra en el campo lejano de un RIS: este caso es similar al anterior, salvo que varios RIS pueden ser útiles para reducir la energía en el UE no previsto.

Obsérvese que se pueden obtener escenarios similares para el enlace ascendente con beamforming de recepción en lugar de beamforming de transmisión. La principal diferencia será que la EE se mejorará en el lado del UE en lugar del lado de la BS. Obsérvese que, en estos escenarios, suponemos que:

- Opcionalmente, la RIS también puede recibir señales, por ejemplo, para realizar una estimación del canal dentro de la banda.
- Las RIS pueden utilizar opcionalmente un sistema de posicionamiento, como se describe en la sección 3, incluso para localizar a usuarios imprevistos.

Además, los escenarios descritos anteriormente pueden generalizarse a escenarios multi-BS, donde varias BS sincronizadas y coordinadas realizan beamforming de manera conjunta.

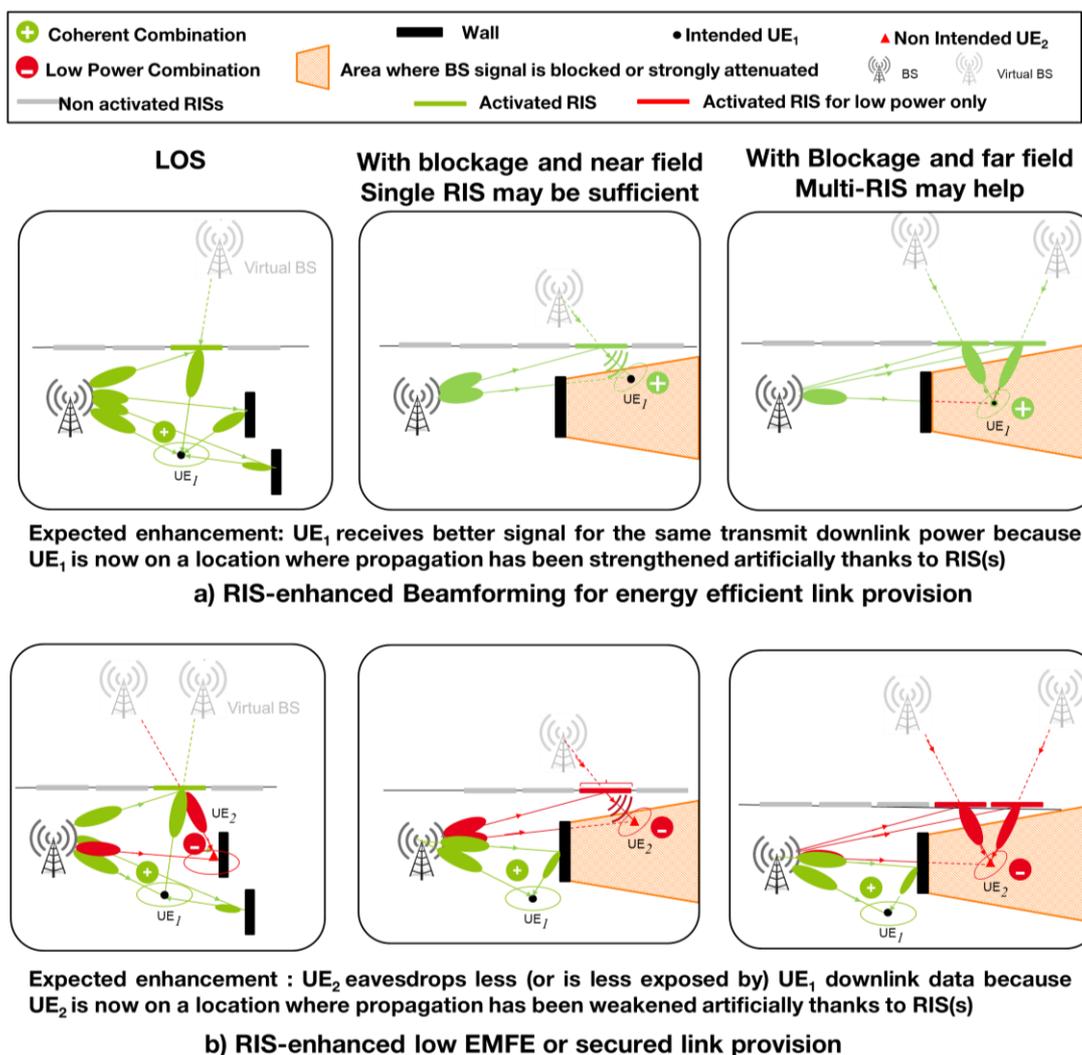


Figura 21. Ejemplo de sistemas RIS mejorados de una sola BS basados en la tecnología beamforming

6 CONCLUSIONES

En este documento, hemos explorado y analizado diversos escenarios y casos de uso Beyond-5G en los que la tecnología RIS tiene el potencial de marcar una diferencia significativa al ofrecer servicios avanzados. Hemos dividido los escenarios en tres categorías principales: conectividad y fiabilidad mejoradas, localización y detección mejoradas, y sostenibilidad y seguridad mejoradas.

A través de nuestro análisis, podemos concluir lo siguiente:

- La tecnología RIS ofrece oportunidades significativas para mejorar la conectividad y fiabilidad en entornos exteriores e interiores. La implementación de RIS puede ayudar a superar los desafíos en entornos urbanos densos y dinámicos, así como en escenarios NLOS y en áreas con falta de cobertura debido a objetos metálicos grandes y/o personas.
- Las capacidades de localización y detección mejoradas permitidas por la tecnología RIS tienen el potencial de revolucionar aplicaciones en entornos industriales, de alta densidad de usuarios y entornos interiores. Estas aplicaciones incluyen el mapeo del entorno, la detección de movimiento, la exploración oportunista de canales y las capacidades de radar pasivo.
- La tecnología RIS puede mejorar significativamente la sostenibilidad y seguridad de las redes inalámbricas al permitir comunicaciones altamente direccionales y dependientes de la ubicación. Esto resulta en una mayor eficiencia energética, eficiencia de EMFE y eficiencia espectral del sistema.
- La orquestación óptima de dispositivos RIS en una red puede apuntar a la energía mínima necesaria para proporcionar servicios avanzados a la QoE/QoS esperada por los usuarios, lo que contribuye al ahorro de energía y a una mayor sostenibilidad en la provisión de servicios inalámbricos.

En resumen, la tecnología RIS tiene un enorme potencial en la evolución de las redes inalámbricas Beyond-5G, proporcionando soluciones innovadoras y eficientes en una variedad de escenarios y casos de uso. Sin embargo, se necesitan investigaciones adicionales y desarrollos tecnológicos para superar los desafíos y limitaciones existentes, y maximizar el impacto de RIS en la próxima generación de comunicaciones inalámbricas.