



**SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL DESPLIEGUE DE UNA RED 5G PARA
ENTORNOS INDUSTRIALES EN EL MARCO DEL PROYECTO 5G-SMART**

Autor del Trabajo Fin del Grado

Jaime Romero Huedo

Tutor: Jose Francisco Monserrat del Río

Director Experimental: Saúl Adrián Inca Sánchez

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2021-2022

Valencia, 1 de diciembre de 2021



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación
Universitat Politècnica de València
Edificio 4D. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia
Tel. +34 96 387 71 90, ext. 77190
www.etsit.upv.es

VLC/
CAMPUS
VALENCIA, INTERNATIONAL
CAMPUS OF EXCELLENCE





Resumen

La llegada del 5G ha revolucionado las comunicaciones móviles, no solo para las personas, sino que también la industria. La industria, ha sido una gran beneficiada de esta tecnología, ya que la 5G hace posible el desarrollo del Industrial Internet of Things (IIoT). Sin embargo, estos nuevos escenarios industriales son diferentes a los que, hasta hoy en día, se habían considerado. La presencia de gran cantidad de máquinas, elementos metálicos y todo tipo de estructuras que producen pérdidas y desvanecimientos se han de tener en cuenta para comprender el comportamiento del canal de radio. Para ello, la Third Generation Partnership Project (3GPP) definió nuevos escenarios para el modelo de canal, conocido como Indoor-Factory (InF). En este trabajo fin de grado se propone la implementación y calibración de este modelo de canal planteado por el 3GPP en la Release-16 TR 38.901 considerando los diferentes sub-escenarios que InF tiene definidos hasta el momento. Para la obtención de los resultados, se utiliza el simulador de redes ns-3, un simulador de código abierto que permite simular los protocolos necesarios. Posteriormente, estos resultados se comparan con las compañías como Ericsson, Huawei, Nokia, entre otros, para comprobar si la calibración se ha hecho de manera adecuada. Este trabajo servirá para que futuros estudios puedan simular y estudiar la planificación y dimensionamiento de las redes 5G en escenarios industriales. Finalmente, se analiza un caso de uso para la industria, los AGV (Automatic Guided vehicle), demostración inicial de la contribución al simulador que ofrece este trabajo.

Resum

L'arribada del 5G ha revolucionat les comunicacions mòbils, no només per a les persones, sinó que també la indústria ha estat una gran beneficiada d'aquesta tecnologia, ja que fa possible el desenvolupament de l'Industrial Internet of Things (IIoT). No obstant això, aquests nous escenaris industrials són diferents als que a dia d'avui s'han considerat. La presència de gran quantitat de màquines, elements metàl·lics i tota mena d'estructures produeixen pèrdues i esvaïments que s'han de tenir en compte per comprendre el comportament de canal. Per això, la Third Generation Partnership Project (3GPP) va definir un nou model de canal, conegut com Indoor-Factory. En aquest treball fi de grau es proposa la implementació i calibratge d'aquest model de canal plantejat pel 3gpp a la Release-16 TR 38.901, considerant els diferents subescenaris que hi té definits fins al moment. Per a l'obtenció dels resultats, s'utilitza el simulador de xarxes ns-3, un simulador de codi obert que permet simular els protocols necessaris. Posteriorment, aquests resultats es comparen amb els d'empreses com Erikson i Huawei per comprovar si el calibratge s'ha fet de manera adequada. Aquest treball servirà per a que futurs estudis puguin simular i estudiar el comportament canal de manera correcta i econòmica. Finalment, s'analitza un cas d'ús per a la indústria, els AGV (automatic Guided vehicle), demostració inicial de la contribució al simulador qu' ofereix aquest treball.



Abstract

The arrival of 5G has revolutionised mobile communications, not only for people, but also industry has been a great beneficiary of this technology, as it makes the development of the Industrial Internet of Things (IIoT) possible. However, these new industrial scenarios are different from those that, until today, have been considered. The presence of a large number of machines, metallic elements and all kinds of structures produce losses and fading that must be taken into account in order to understand the behaviour of the channel. To this end, the Third Generation Partnership Project (3GPP) defined a new channel model, known as the Indoor-Factory (InF). In this final degree work we propose the implementation and calibration of this channel model proposed by the 3GPP in Release-16 TR 38.901 considering the different sub-scenarios that InF has defined so far. To obtain the results, the ns-3 network simulator is used, an open source simulator that allows the necessary protocols to be simulated. These results are then compared with those of companies such as Erikson and Huawei to check whether the calibration has been done properly. This work will help future studies to simulate and study the behaviour of the channel correctly and economically. Finally, an industrial use case, the AGV (automatic guided vehicle), is analysed, an initial demonstration of the contribution of this work to the simulator.



Índice

Capítulo 1.	Introducción	4
Capítulo 2.	Estado del Arte	6
2.1	Ns-3	6
2.2	Modelos de Canal.....	7
	Deterministas.....	7
	Estocásticos	8
2.3	Modelo de Canal Indoor Factory (InF)	8
	Parámetros generales.....	9
	Parámetros de pequeña escala	18
	Generación de coeficientes.....	19
2.4	Key Performance Indicator (KPI)	19
Capítulo 3.	Implementación y calibración en ns-3 del modelo InF.	21
3.1	Módulo de propagación.....	21
	Condición de modelo de Canal.	22
	Path-loss and shadowing models.....	22
	Módulo de espectro.	22
	Movilidad.	23
3.2	Calibración	23
3.3	Simulación.....	24
3.4	Comparación de resultados	25
Capítulo 4.	Caso de uso: Escenario industrial AGV	34
4.1	Escenario.	35
4.2	Parámetros.....	36
4.3	Evaluación de los modelos de canal.....	37
Capítulo 5.	Conclusiones y líneas futuras	39
Capítulo 6.	Referencias	41



Índice de Figuras.

Figura 1. Organización del simulador ns-3.	6
Figura 2: Procedimiento para generar los coeficientes de canal	9
Figura 3. Escenario: Indoor Factory High-	11
Figura 4. Escenario: Indoor Factory Sparse-Low	12
Figura 5. Escenario: Indoor Factory Dense-Low	12
Figura 7. Escenario: Indoor Factory Dense-High	14
Figura 8. Estructura de código implementada y propuesta para la nueva versión de ns-3.....	21
Figura 9. Disposición estaciones base en el escenario.	24
Figura 11. Coupling Loss 28 GHz.	27
Figura 12. SINR 3.5 GHz.....	28
Figura 13. SINR 28 GHz.....	29
Figura 14. SIR 3.5 GHz.....	30
Figura 15. SIR 28 GHz.....	31
Figura 16. DS 3.5 GHz.....	32
Figura 17. DS 28 GHz.....	33
Figura 18. Necesidades de la industria 4.0 sobre las prestaciones del 5G	34
Figura 19. Retardo Total de propagación.....	37
Figura 20. Fiabilidad en la transmisión de paquetes.	38



Índice de Tablas.

Tabla 1. Resumen parámetros de distintos escenarios de InF.....	15
Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de path-loss en los distintos escenarios.....	17
Tabla 3. Parámetros generales.....	36
Tabla 4. Parámetros sub escenarios.....	36

Capítulo 1. Introducción

El 5G a día de hoy, es ya una realidad. Esta nueva tecnología supone un cambio radical en la manera en la que concebimos la conectividad; no solo por la mejora de prestaciones que conlleva respecto a su predecesor LTE, sino por su aplicabilidad en muchos otros sectores como la industria, que podrán evolucionar de una forma drástica.

Esta tecnología tiene tres tipos de comunicaciones definidas. En primer lugar, el Internet de Banda Ancha Mejorada o *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), que permite velocidades de datos muy superiores, llegando incluso a ser 100 veces mayor a LTE. Por otro lado, las comunicaciones ultra fiables y de baja latencia o *Ultra-Reliable Low Latency Communication* (URLLC), con la que se consigue que la probabilidad de error sea ínfima, muy cercana a 0 con una latencia cercanas a un milisegundo. Y finalmente, las comunicaciones masivas tipo máquina o *Massive Machine-Type Communication* (mMTC), que permite una conectividad en más de 1 millón de terminales por kilómetro cuadrado.

En cuanto a la aplicabilidad de cada una de las cualidades mencionadas, la eMBB está orientado a mejorar los servicios orientados a los usuarios como *video streaming*, *gaming*, redes sociales, entre otras [1]. Sin embargo, el consumo de personas no será el principal mercado para el 5G; ya que esta tecnología también está enfocada en la IIoT, la industria 4.0, la cual prevé generar en torno a USD 5 trillones de ingresos en 2035 [2]. Ahora bien, para alcanzar estos objetivos, será necesario desarrollar las URLLC, que permitirán el desarrollo de las comunicaciones fiables; haciendo posible, por ejemplo, el uso del coche inteligente; desarrollando la tecnología para el uso médico en intervenciones con robots remotos, o el uso de sistemas inalámbricos para la construcción de reactores de avión. Así mismo, el desarrollo de la mMTC posibilitará la creación de un núcleo inteligente de dispositivos o robots muchísimo más eficientes, con millones de dispositivos interconectados, para que cualquier sistema pueda estar conectado a internet, mediante sensores u otros dispositivos diferentes. Con estas dos características juntas, tendrá lugar esta nueva revolución industrial, que consistirá en la interconexión de máquinas, objetos y personas de toda la industria a tiempo real y generando una enorme cantidad de datos.

Aunque la 5G está en el mercado desde el año 2020, se trata de una tecnología todavía en desarrollo. Es más, tan solo existe la parte enfocada a la conectividad de las personas. Esta parte se ha ido instaurando estos últimos años siguiendo un proceso de 3 fases. Primero, se inició el 5G *non-stand alone* (non-SA), el cual es un híbrido entre LTE y 5G; puesto que usa las estaciones 5G, pero el *core* es el de LTE. En segundo lugar, surgió el 5G (SA), cuya versión fue especificada en junio 2018, en la que se incluía el núcleo de 5G. Finalmente, la última versión permitía que el núcleo 5G también interaccionara con el de 4G.

Una de las principales características del 5G es el uso de la frecuencia en bandas milimétricas; teniendo, por tanto, un espectro disponible mucho mayor. Sin embargo, el uso de las nuevas frecuencias también requiere de un estudio del canal previo, ya que estas se verán afectadas en mayor medida por cualquier tipo de ruido. En ese sentido, el 3GPP en [3] introduce un modelo de canal en donde considera varios escenarios como *Urban Macro* (UMa), *Urban Micro* (UMi) e *Indoor Hotspot* (InH) para las frecuencias de 0.5 a 100 GHz. La novedad de la última actualización del TR 38.901 es la introducción del escenario InF, un nuevo modelo utilizado para la IIoT, y la industria 4.0. Es un modelo estocástico, que define distintos escenarios, con tamaños y características diversas como son: la probabilidad de que haya objetos y que estos produzcan ocultamiento, posición y altura de las antenas, o el movimiento aleatorio de los usuarios.

El coste de los despliegues reales para la evaluación de los escenarios industriales es grande y tedioso. Es por este motivo que [4], se propone el uso de *System-Level Simulation* (SLS) para la evaluación y optimización de redes. Con un correcto modelo de canal, es posible obtener resultados precisos para establecer las prestaciones de las redes 5G.



Teniendo en cuenta todo lo expuesto, la finalidad de este trabajo es realizar la calibración del modelo de canal propuesto por el 3GPP, luego de la implementación desarrollada para el simulador de ns-3 por el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM). Para esto se ha usado los parámetros de calibración de [3]. Estas medidas son las que han aportado compañías como Huawei, ZTE, Nokia y Ericsson, las mismas que han sido comparadas con las mediciones de esta Tesis.

1.1 Planteamiento del problema

Las nuevas necesidades y variaciones en el canal, que supone aplicar el 5G en la industria, hacen necesario estudiar las características de propagación para poder modelarlo y así poder diseñar un sistema eficiente y sin errores en este ambiente industrial. Para esto, se ha desarrollado una extensión para el simulador ns-3 donde incluye el modelo de canal de InF del 3GPP, en donde se hace notar que la calibración y validación es necesaria para determinar si el canal implementado es correspondiente a los escenarios industriales. De esta forma, este trabajo de fin de grado es una importante contribución al campo investigativo de la industria 4.0 en 5G, habilitando módulos de simulaciones que sirvan como prueba para la correcta instalación de un sistema IIoT-5G.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es obtener la calibración para el modelo de canal InF implementado en la plataforma ns-3, mediante la comparación de curvas de los principales indicadores de rendimiento (KPI) con otras compañías. Si es necesario, se modificarán parámetros dentro del modelaje de canal.

A partir de este objetivo principal, se establecen otros objetivos específicos:

- Analizar los modelos de canal que propone 3GPP.
- Comprender los cambios que supone la evolución de InH a InF.
- Calibrar el modelo de canal del escenario InF en la plataforma de ns-3
- Evaluar un caso de uso del sector industrial con el modelo de canal implementado y obtener los principales KPI a nivel de sistema.

Capítulo 2. Estado del Arte

2.1 ns-3

ns-3 es un simulador de redes que se basa en eventos discretos, se trata de un software de código libre que se usa para la investigación y el ámbito educativo. La infraestructura software ns-3 promueve el desarrollo de modelos de simulación lo suficientemente realistas como para ser utilizado como un emulador de red en tiempo real [5].

ns-3 nace en el año 2005, como evolución del ns-2. A partir de ese momento, se han ido haciendo actualizaciones y mejoras hasta llegar a la versión ns-3.34, la cual ha sido la utilizada para el desarrollo de este trabajo. El lenguaje de programación usado por el ns-3 es basado en C++, adicionalmente el lenguaje Python también puede ser utilizado en este simulador.

En cuanto a la organización del simulador, se puede apreciar en la Figura 1 diferentes niveles. En primer lugar, el núcleo, donde se encuentra la base del sistema, que junto al nivel superior forma un núcleo genérico de simulación. En el nivel 3 se encuentran los módulos de Nodo y Movilidad, importantes para diseñar la topología de la red. También está el “*Protocol stack*” (pilas de protocolos), que se encargan de instalar en un nodo la pila protocolos de internet. “*Application*” (aplicaciones), que son las encargadas de generar diferentes tipos de tráfico. “*Net device*” (Dispositivo de red). La finalidad del dispositivo de red es que, al estar instalado en un nodo, este pueda comunicar con otros nodos. “*propagation channel*” (Canal); por donde fluye la información [6]

En la parte superior se sitúan los niveles de auxiliar y análisis que disponen de los comandos para que el núcleo pueda desarrollar las aplicaciones de los niveles superiores.

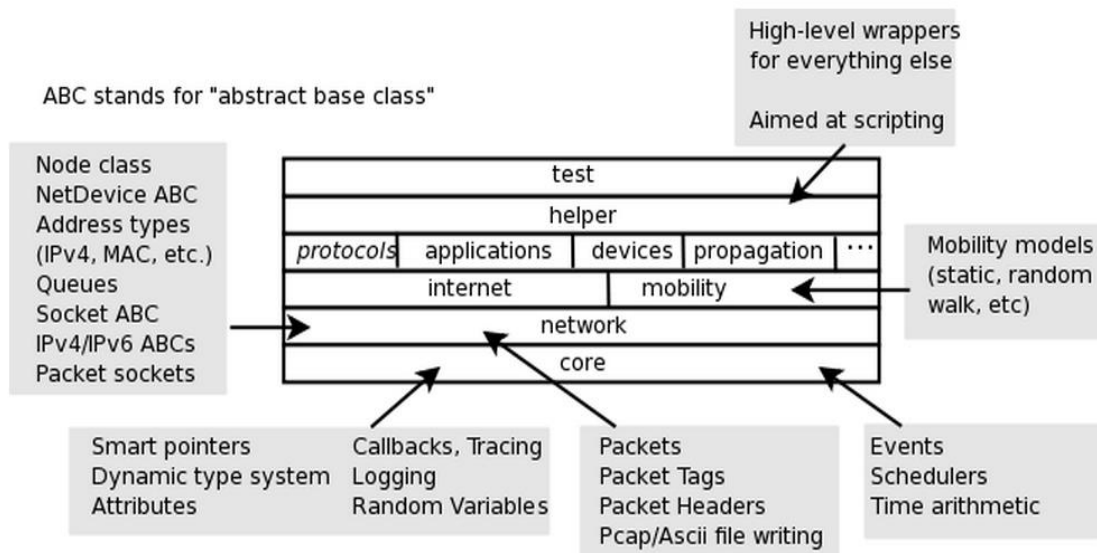


Figura 1. Organización del simulador ns-3. [6]

Ns-3 ha sido de utilidad en multitud de estudios y análisis de redes para tecnologías anteriores. Así, por ejemplo, destacan trabajos como: “Evaluación del desempeño de la herramienta ns-3 en ambientes inalámbricos bajo el estándar IEEE802.11” o “Diseño e implementación de un modelo del protocolo AURP para redes de sensores subacuáticas” [7], [8]. En consecuencia, es por los motivos de utilidad y precio, que se ha escogido la herramienta ns-3 para el desarrollo de este modelado.

2.2 Modelos de Canal

El canal es el medio por el cual se transmite la señal portadora de información desde un emisor hasta el receptor. En los sistemas de comunicación se pueden clasificar los canales, dependiendo del tipo de medio: medios guiados (eléctricos, ópticos, etc.), en los que la señal se propaga a través de un cable o medios no guiados (radiofrecuencia, infrarrojos, ultrasonidos), que son los empleados en comunicaciones inalámbricas [9]

Los sistemas que son objeto de estudio de este trabajo emplean el canal radio, que precisan de movilidad y mayor flexibilidad. En este canal, las señales se propagan mediante ondas electromagnéticas. A diferencia de la propagación a través de un cable, este canal abarca muchas más posibilidades; encontrando grandes diferencias entre dos ambientes en los que se esté propagando una señal radio.

Un modelo se puede definir como la representación de un sistema que se desarrolla para un determinado propósito [6]. En especial, los modelos matemáticos tratan de definir mediante fórmulas el comportamiento de algo específico.

Un modelo de canal es la representación, tanto física como matemática, del medio y las determinadas condiciones de este. El modelado del canal es uno de los elementos más importantes a la hora de estudiar cómo se comporta un sistema inalámbrico y comprender el comportamiento de las redes. En comunicaciones, la principal finalidad a la hora de modelar una canal es poder predecir el nivel de pérdidas para una determinada señal cuando ésta se propaga por dicho medio; para así poder determinar si los nodos inalámbricos tienen o no conexión. Una vez se ha conseguido desarrollar y calibrar adecuadamente, se puede realizar el análisis, diseño y la implementación de la red.

Los modelos de canal dependen de los sistemas y ambientes particulares; por tanto, el primer paso para modelar el canal es clasificarlo dependiendo de sus características. Hasta día de hoy, se han creado multitud de modelos para cada una de las tecnologías en concreto. Sin embargo, con el desarrollo de las nuevas tecnologías, como el 5G, surgen nuevos escenarios. La 3GPP TR 38.901 en la release 16 propone 5 escenarios: UMI, UMA, RMA, *Indoor Office* e InF. En especial, este trabajo trata el modelado del reciente escenario conocido como “*Indoor Factory*”, que es el que presenta la industria 4.0.

Existen distintas alternativas a la hora de realizar el modelado de un canal, dependiendo de la exactitud y flexibilidad que requiera el modelo, o que por ejemplo pueda ser aplicable en un ambiente similar. De esta manera, los modelos se pueden clasificar en dos grandes grupos: deterministas y estocásticos.

Deterministas.

Los modelos determinísticos consisten en una descripción detallada del escenario de propagación y la antena utilizada; se basan en recrear cada detalle de la geometría del escenario. Por un lado, se conocen con exactitud las dimensiones del escenario y la de otros edificios que puedan encontrarse en el mismo. También, se sabe el número de usuarios y su posición en todo momento. Y por último, se debe conocer la cantidad de objetos (maquinas, arboles paredes, etc.)

así como su tamaño y forma. Toda esta información necesaria hace que estos modelos sean desde el punto de vista computacional, muy complejos. Por ejemplo, la técnica de trazado de rayos es un modelo determinístico, en el que es necesario conocer todos los elementos del escenario, el material que los compone y sus propiedades. Este modelo, proporciona una información detallada y exacta de los ángulos de llegada y salida de las ondas. Además, proporciona una estimación muy correcta del “*path-loss*”, el “*shadowing*” y los parámetros de desvanecimiento a pequeña escala.

Estocásticos

Los modelos probabilísticos o estocásticos basan su funcionamiento en funciones de densidad de probabilidad, que sirven para definir las distintas características del escenario. Estos modelos son desde el punto de vista computacional sencillos, y debido a que obtienen unos resultados muy cercanos a la realidad, son los más utilizados para evaluar los sistemas de comunicaciones móviles. Estos modelos calculan los parámetros de fading de gran escala como el “*path-loss*” y el “*shadowing*”, mediante la altura y separación de las antenas, la densidad de objetos y su altura. Por otro lado, los parámetros de fading de pequeña escala como el “*delay spread*” o el “*angular spread*” son generados con distribuciones estáticas sacadas de campaña de medida. Debido a su eficacia y mayor simplicidad, estos serán los modelos utilizados durante el desarrollo del trabajo.

2.3 Modelo de Canal Indoor Factory (InF)

El modelado de canal para la industria aparece en los años 1990. En la primera etapa del modelado, la *Digital European Cordless Telephone* (DECT) 802.4L y la IEEE 802.1 establecieron el primer estándar, demostrando que este reducía la complejidad entre las conexiones de las máquinas. En la segunda etapa, aparece el primer estándar para la conectividad. Finalmente, la última generación surge con la estandarización del 5G y la industria 4.0, que se consigue con el 3GPP. Lo novedoso de esta última generación es que la banda de frecuencias se extiende para el modelado hasta los 100 Ghz y se tienen en cuenta los ángulos 3D de llegada y salida [10].

Existen diferentes modelos de canal para el 5G industrial. Hoy en día, se pueden encontrar modelos en las siguientes compañías: ITU-R, 3GPP TR 38.901, COST 2100, METIS, mmMAGIC, NYU wireless channel model and QuaDRiGa. En este trabajo se eligieron los estándares del 3GPP, porque el programa de simulación ns-3 contiene módulos de canal con la estandarización de 3GPP y por tanto se realizó un proceso mediante una Arquitectura Orientada a Servicios (SOA), para adaptar en el simulador ns-3 los módulos generados para InF.

La implementación de los escenarios de InF surge debido a las características propias de los escenarios del sector industrial como son la presencia de maquinarias, robots, elementos metálicos y otros que no están presentes en el escenario de *indoor Office* dado que éste tan solo tiene en cuenta a personas, paredes y un escenario más reducido. Así pues, con la complejidad que ha de tener un escenario industrial; nace la necesidad de proponer un nuevo modelo de canal. Además, debido al hecho de utilizar las bandas milimétricas, se hace necesario estudiar los posibles bloqueos y atenuaciones atmosféricas; surgiendo así, este nuevo modelo de canal InF.

El modelo de canal utilizado es el planteado por 3GPP TR38.901. Se trata de un modelo de canal 5G estándar. El proceso seguido para la generación de los coeficientes se puede observar en la Figura 2, y está dividido en 3 grandes grupos: primero se establecen los parámetros generales, segundo se obtienen los parámetros de pequeña escala y finalmente en la última sección se obtienen los coeficientes. Dentro de cada módulo, se establecen los distintos parámetros y modelos de cálculo del escenario en cuestión

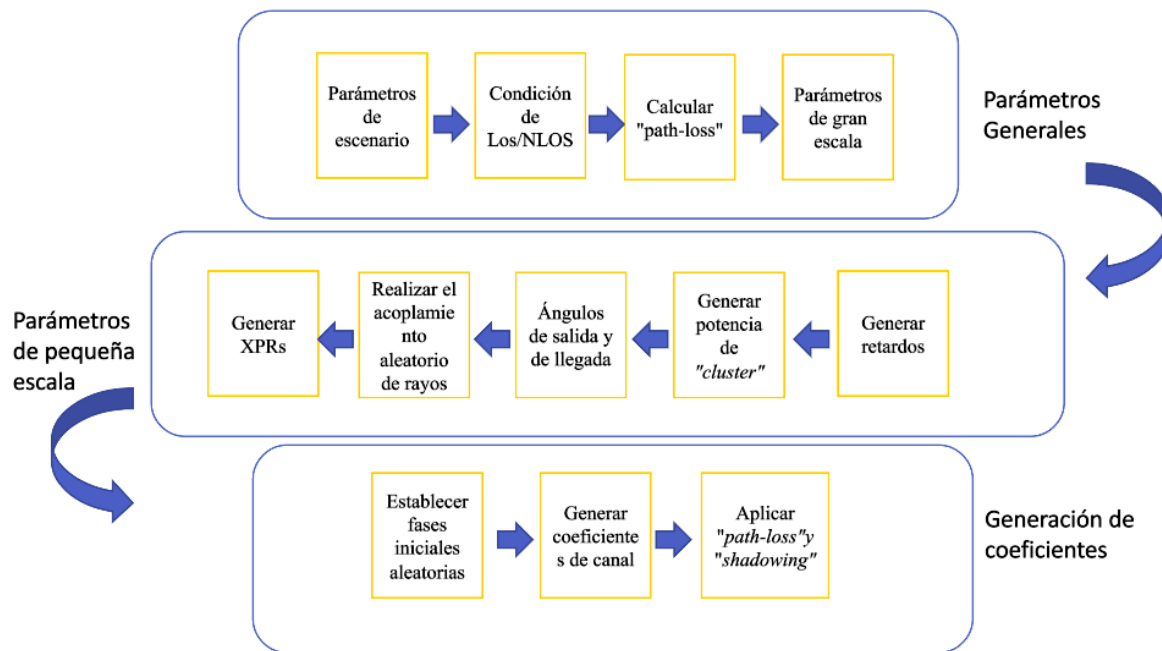


Figura 2. Procedimiento para generar los coeficientes de canal

A continuación, se detallan los procedimientos de cálculo que establece el 3GPP en cada uno de los módulos, como las condiciones del escenario, las ecuaciones para el cálculo de probabilidad de LOS, cálculo del “*path-loss*”, “*Delay Spread*”.

Parámetros generales

2.3.1.1 Escenarios

En este módulo se establecen los parámetros físicos del escenario, el diseño y dimensionado de la red y los parámetros de las antenas.

Parámetros del escenario:

- 1- Dimensiones. Como se puede apreciar en la Tabla 1, se establecen dimensiones distintas para los 5 sub-escenarios generales, para así, englobar todas las situaciones en las que se puede encontrar un escenario Industrial. Estos escenarios se explicarán a continuación con más detalle.
- 2- Objetos. Tanto la cantidad de máquinas y objetos que hay como su altura es variable. Los distintos sub-escenarios que se presentan a continuación tratan de cubrir todas las posibilidades en las que puede verse envuelto un escenario industrial en cuanto a cantidad y tipo de objetos que presentan.

Diseño de red.

Se establece el número de nodos y terminales de los que dispondrá la fábrica. Además, se le asigna a cada uno de ellos una posición inicial y orientación. A los terminales (UT) también se les asigna una velocidad constante.

Sub-escenarios

Como se ha visto, InF contempla muchas variables. Por este motivo, se plantean distintos sub-escenarios, dependiendo la situación en que se encuentre la fábrica o industria. Las variables que conforman estos 5 sub-escenarios son: las dimensiones del escenario, la altura y cantidad de objetos y la altura de las antenas (estaciones base y terminales).

Estos sub-escenarios se clasifican por la disponibilidad de visión directa (LOS), o no visión directa (NLOS).

-Para el caso de LOS, tan solo existe un sub-escenario. Este sub-escenario se conoce como *Indoor-Factory High High* (InF-HH) y se engloba como LOS porque existe un 100% de probabilidad de visión directa.

-Para NLOS surgen 4 sub-escenarios alternativos que dependerán de la altura de las antenas y objetos y la densidad o cantidad que haya de estos últimos. Estos escenarios se catalogan como NLOS, porque no existe siempre un 100% de probabilidad de visión directa, sino que existirán tanto momentos de LOS como momentos de NLOS. El nombre de estos sub-escenarios es: *Indoor-Factory Sparse-Low*, *Indoor-Factory Dense-Low*, *Indoor-Factory Sparse-High*, *Indoor-Factory Dense-High*.

2.3.1.1.1 Indoor Factory High-High (InF HH)

Este sub-escenario solo ocurre cuando, tanto la antena del emisor como la del receptor, tienen más altura que el resto de los objetos que puedan encontrarse en el escenario. Ambas antenas presentan la condición de “*clutter-elevated*”. De este modo, nada interferirá en la línea de visión directa entre ambos en ningún momento y normalmente habrá buena conexión. Como se aprecia en la Figura 3, las dos antenas están por encima del resto de objetos, por lo que habrá un 100% de visión directa independientemente de la posición del usuario.

Se trata de un sub-escenario más genérico que cubre un amplio rango de dimensiones: desde 20 m² hasta 16000 m². Además, el tipo, tamaño y densidad de objetos es independiente, siempre que, se encuentren por debajo de las antenas. Esta forma tan general de definir un conjunto tan elevado de posibles escenarios se debe a su simplicidad, ya que al no haber ocultamientos todos ellos se pueden modelar de forma similar. Este sub-escenario, en particular, no será objeto de estudio, puesto que sus características hacen que se pueda relacionar con los escenarios de *Indoor-Office*, que ya están modelados y calibrados.

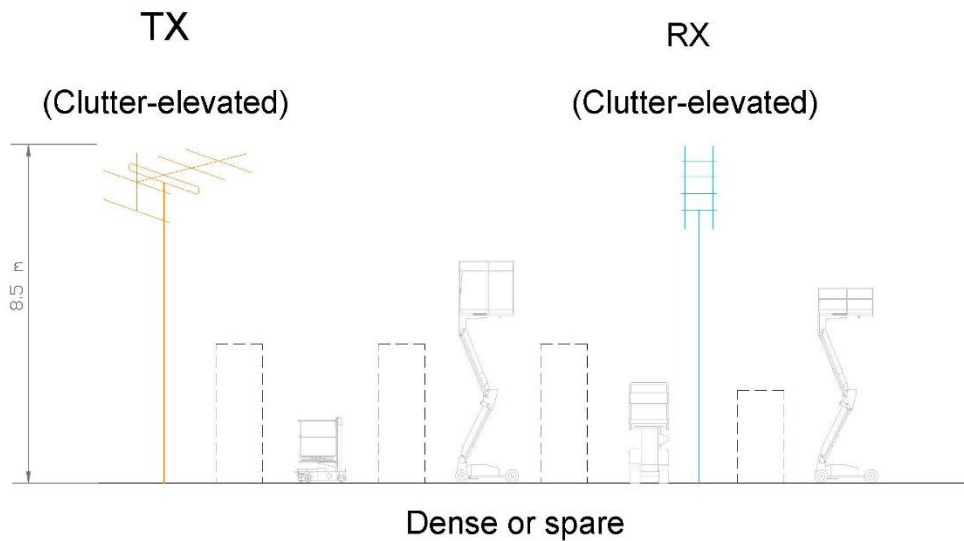


Figura 3. Escenario: Indoor Factory High-High

2.3.1.1.2 Indoor Factory Sparse-Low (InF-SL)

En este escenario, la altura media de las estaciones base es menor que la media de la altura de las máquinas y objetos, esta opción se conoce como “*clutter-embedded*”. Además, la densidad o cantidad de máquinas y objetos que se encuentran en el escenario no es muy grande, descrito como “*sparse-clutter*”. En la Figura 4, se puede ver el caso en el que la altura de las ambas antenas está por debajo del resto de objetos, encontrado se en una situación de NLOS. Sin embargo, este fenómeno no ocurrirá el 100% del tiempo, ya que puede haber posiciones o momentos en los que si haya visión directa. Así pues, existirán momentos de LOS y momentos de NLOS.

En este sub-escenario, el tamaño sí que es fijo y tiene unas dimensiones de 120 m de largo, 60 m de ancho y 25 m de alto. El resto de las variables puede observarse en la Tabla 1.

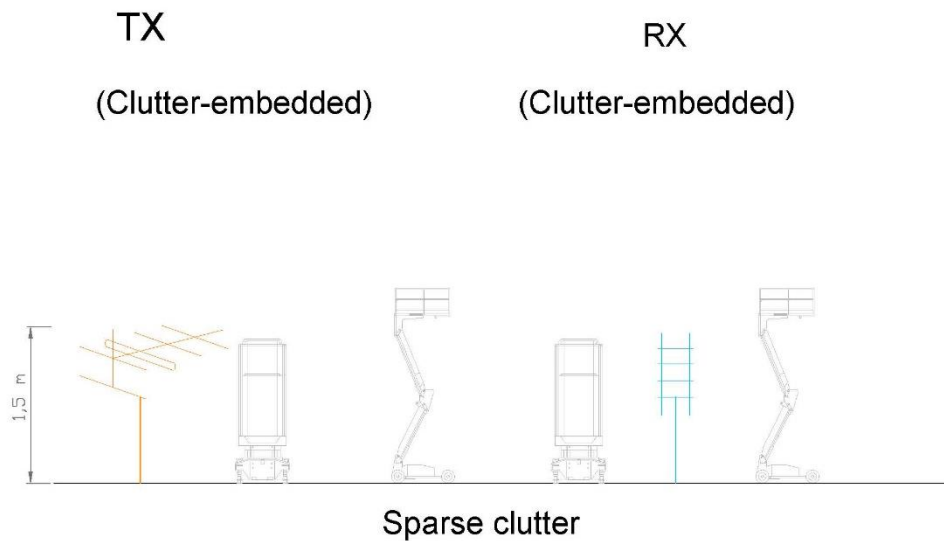


Figura 4. Escenario: Indoor Factory Sparse-Low

Este ejemplo podría encontrarse en un escenario con varias áreas de producción mixtas con espacios abiertos y sección de almacenamiento.

2.3.1.1.3 Indoor Factory Dense-Low (InF-DL)

En esta opción, las estaciones base también tienen una altura media menor que la de las máquinas y objetos “*clutter embedded*”. Sin embargo, la densidad de máquinas y objetos en el escenario es mucho mayor “*dense clutter*”. En la Figura 5, se puede apreciar que la cantidad de objetos es mucho mayor. Por tanto, aunque existirán momentos de LOS y NLOS, los momentos de NLOS serán más frecuentes que en InF-SL.

Las dimensiones de este escenario han sido fijadas en: 300 m de largo, 150 m de ancho y 15 m de alto. El resto de las variables puede observarse en la Tabla 1.

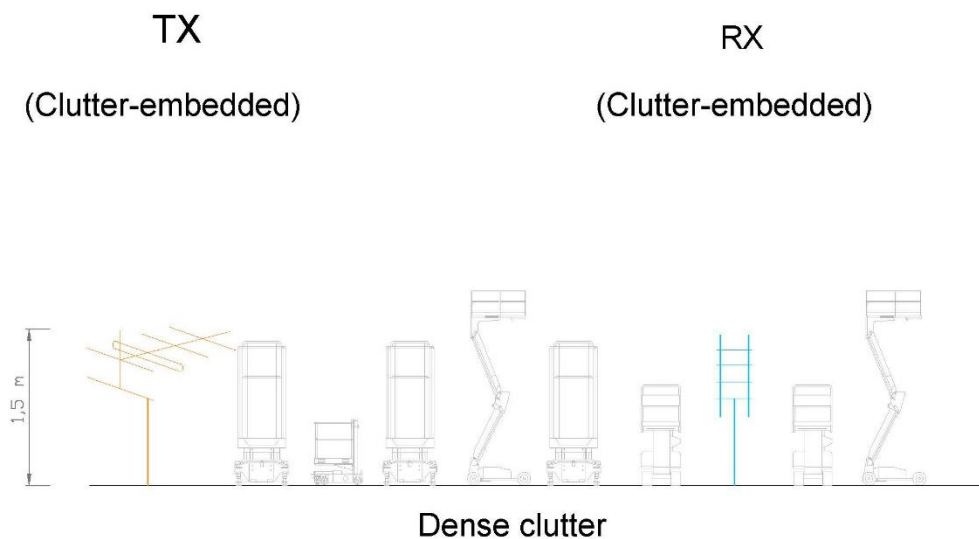


Figura 5. Escenario: Indoor Factory Dense-Low

Un ejemplo: una línea de montaje y producción rodeada de muchas máquinas de tamaño pequeño.

2.3.1.1.4 Indoor Factory Sparce-High (InF-SH)

En este escenario, la altura media de las estaciones base se encuentra por encima de la altura media del resto de objetos “*clutter elevated*”; mientras que, la de los terminales sigue estando por debajo “*clutter embedded*”; siguiendo así la posibilidad de encontrarse situaciones de LOS y NLOS, aunque como ahora la altura de las estaciones base es mayor, las situaciones de LOS serán más frecuentes. Además, la densidad de objetos es pequeña “*sparse clutter*”.

A continuación, en la Figura 6 se puede observar una situación en la que la antena de la estación base transmisora está por encima de los objetos, mientras que la antena receptora está por debajo de alguno de ellos. Esta situación será más habitual que en el escenario InF-SL, por tanto, existirá un mayor porcentaje de LOS que en InF-SL.

En cuanto a las dimensiones de este escenario, son: 300 m de largo, 150 m de ancho y 25 m de alto. El resto de variables se puede apreciar en la Tabla 1.

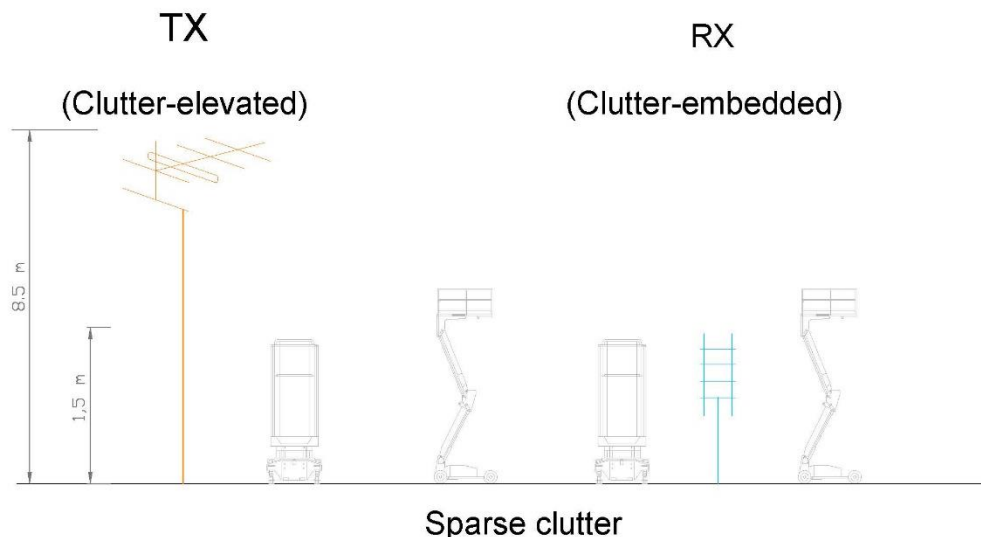


Figura 6. Escenario: Indoor Factory Sparce-High

Por ejemplo, este caso podría caracterizar un escenario con varias aéreas de producción mixtas con espacios abiertos y sección de almacenamiento.

2.3.1.1.5 Indoor Factory Dense-High (InF-DH)

En este último escenario, la altura media de las estaciones base se encuentra por encima de la altura media de objetos “*clutter elevated*”; mientras que la antena receptora sigue estando por debajo “*clutter embedded*”; manteniéndose, de esta manera situaciones de LOS y NLOS. Además, la densidad de objetos es mayor “*dense-clutter*”.

En la Figura 7, se observa la misma situación que en la Figura 6, pero esa vez con un mayor número de objetos.

Las dimensiones de este escenario son: 150 m de largo 60 m de ancho y 15 m de alto. El resto de las variables de puede apreciar en la Tabla 1.

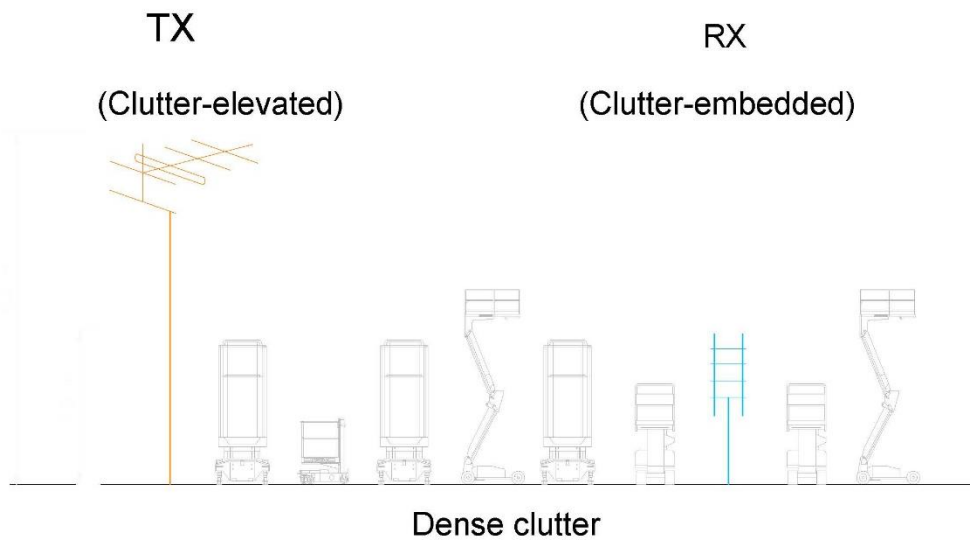


Figura 7. Escenario: Indoor Factory Dense-High

Un ejemplo: Una línea de montaje y producción rodeada de muchas máquinas de tamaño pequeño.

Escenarios		InF				
		InF-SL (sparse clutter, low BS)	InF-DL (dense clutter, low BS)	InF-SH (sparse clutter, high BS)	InF-DH (dense clutter, high BS)	InF-HH (high Tx, high Rx)
Diseño	Tamaño	120*60*25	300*150*15	300*150*25	120*60*15	20-16000m2
	Altura antena	5-25 m	5-15 m	5-25 m	5-15 m	5-25 m
	Altura efectiva del clutter	< Altura del clutter, 0-10 m				
	Pared externa y tipo de celda	Paredes de hormigón y de metal y ventanas recubiertas de metal.				
Tipo de clutter		Máquinas grandes con superficies metálicas regulares.	Máquinas pequeñas y medianas con superficies irregulares.	Máquinas grandes con superficies metálicas regulares.	Máquinas pequeñas y medianas con superficies irregulares.	Cualquiera
Tamaño del clutter		10 m	2 m	10 m	2 m	Cualquiera
Densidad del clutter		(<40%)	(≥40%)	(<40%)	(≥40%)	Cualquiera

BS antenna height [h _{BS}]		Debajo del clutter	Encima del clutter	Encima del clutter
UT	LOS/NLOS	LOS and NLOS		100% LOS
	Height [h _{US}]	Debajo del clutter		Encima del clutter

Tabla 1. Resumen parámetros de distintos escenarios de InF.

En la Tabla 1, se pueden ver resumidos y de manera esquemática, cada uno de los parámetros de cada uno de los escenarios de InF, establecidos por la 3GPP 38.901.

2.3.1.2 Condición de LOS (función de probabilidad de LOS)

La condición de LOS se da cuando existe visión directa entre las dos antenas, la del emisor y la del receptor. Los modelos estocásticos se modulan con una función de probabilidad. La función matemática que modela esta probabilidad es una función por partes, en la que las variables a introducir son: las alturas de las antenas, la densidad de máquinas y la distancia.

Como ya se ha comentado, en el primer sub-escenario, con LOS, existe siempre visión directa. Para el resto de sub-escenarios, en la última versión del 3GPP 38.901, se establece un modelo que depende, tanto de la altura de las antenas y objetos como de la densidad de los objetos. Por esta razón, se ha realizado con anterioridad el análisis de los cuatro sub-escenarios que dependían de estas variables.

La función de probabilidad de LOS se define de la siguiente manera.

$$P_{LOS,subcase}(d_{2D}) = e^{\frac{-d_{2D}}{k_{subcase}}} \quad (1)$$

donde:

$$k_{subcase} = \begin{cases} \frac{-d_{clutter}}{\ln(1-r)}, & \text{for subcase } \{SL, DL\} \\ \frac{-d_{clutter}}{\ln(1-r)} \frac{h_{BS}-h_{UT}}{h_C-h_{UT}}, & \text{for subcase } \{SH, DH\} \end{cases} \quad (2)$$

Como se puede apreciar en la Ecuación 1, la función de probabilidad de LOS decrece exponencialmente respecto a la distancia. Además, esta función también varía dependiendo del escenario. En la Ecuación 2, la r mide la densidad del "clutter". Así pues, el número de máquinas y otros objetos puede tomar un valor del 0 al 1; representando la proporción de espacio del escenario que está ocupado por máquinas, es decir, cuanto mayor sea este valor, menor será la probabilidad de LOS. Si esta ratio es menor al 40% ($r \leq 40\%$), el escenario se define como "sparse clutter" o clutter disperso. En caso contrario, si la ratio es mayor ($r > 40\%$), se define como "dense clutter". Por otro lado, el $d_{clutter}$ representa el tamaño de las máquinas.

En cuanto a la altura de las antenas y clutter, h_{BS} , h_{UT} , h_C son las alturas de la estación base, del terminal y de las máquinas, respetivamente. A diferencia del escenario de Indoor Office, único

escenario modelado para 5G indoor. Las alturas de las antenas han pasado de ser fija (3m en InOff) a variable en InF (5-25m). Al igual que la de las máquinas, que también varía (0-10m). Como se ha visto, esto genera dos posibles situaciones: “clutter- elevated” y “clutter- embedded”. Por tanto, hay dos maneras distintas de modelar el PLOS; diferenciando entre escenarios High y escenarios Low.

Para entender la fórmula, la probabilidad de LOS será mayor si $k_{subcase}$ es mayor. Así pues, en la segunda parte de la fórmula 1.2, para los escenarios High, se añade un coeficiente que es >1 ; ya que en estos casos, la altura media de las estaciones base es superior a la del clutter ($h_{BS} > h_{UT}$). Por tanto, los casos “High” tienen una $k_{subcase}$ mayor, lo que se refleja en una probabilidad de LOS también mayor. Algo que resulta lógico y se había comentado con anterioridad.

El cálculo de PLOS se realiza para cada uno de los enlaces estación base-terminal, ya que depende de la distancia a la que se encuentren. Los resultados obtenidos para diferentes enlaces estarán encorralados, ya que no dependen, en ningún factor, unos de los otros.

2.3.1.3 Parámetros de Gran escala

2.3.1.3.1 Pathloss y Shadowing

El path-loss mide la atenuación de una onda electromagnética que se propaga a través del espacio. Esto puede ser debido a multitud de efectos, como las pérdidas por espacio libre, la refracción, difracción, reflexión, absorción; por lo que, dependerá de la distancia, el canal, la frecuencia, etc. Debido a la complejidad de los escenarios industriales, el path-loss es más difícil de modelar, debido a la gran cantidad de máquinas con tamaños variantes y formas irregulares, que pueden atenuar las ondas de diversas formas.

El path-loss es uno de los KPI más importantes para el modelado y análisis de un canal, supone un alto porcentaje de las pérdidas totales en un enlace y, en consecuencia, tiene una clara influencia tanto en la cobertura como en las tasas de transmisión.

El modelo establecido por la 3GPP para calcular el Path-loss es el Alpha Beta Gamma (ABG) model. En la Tabla 2, se pueden observar las ecuaciones para calcular el Path-loss para cada escenario. Donde d_{3D} , es la distancia 3D y f_c es la frecuencia central normalizada.

InF	LOS	$PL_{LOS} = 31.84 + 21.5 \log_{10} d_{3D} + 19.0 \log_{10} f_c$	$s_{SF} = 4$	$1 \leq d_{3D} \leq 600m$
	NLOS	InF-SL: $PL = 33 + 25.5 \log_{10} d_{3D} + 20 \log_{10} f_c$ $PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS})$	$s_{SF} = 5.7$	
		InF-DL: $PL_{LOS} = 18.6 + 35.7 \log_{10} d_{3D} + 20.0 \log_{10} f_c$ $PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS}, PL_{InF-SL})$	$s_{SF} = 7.2$	
		InF-SH: $PL_{LOS} = 32.4 + 23.0 \log_{10} d_{3D} + 20.0 \log_{10} f_c$ $PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS})$	$s_{SF} = 5.9$	

	InF-DH :		
	$PL_{LOS} = 33.63 + 21.9 \log_{10} d_{3D} + 20.0 \log_{10} f_c$	$s_{SF} = 4.0$	
	$PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS})$		

Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de path-loss en los distintos escenarios [3]

Para cada uno de los enlaces estación-base terminal, se realizará el cálculo del path-loss, de manera independiente; teniendo en cuenta si se encuentran en (LOS/NLOS) y la distancia 3D entre ellos.

Una vez modelado el comportamiento de la Onda electromagnética de forma general y respecto a la distancia, se pueden calcular los parámetros de gran escala.

2.3.1.3.2 Delay Spread

Delay spread (difusión de retardo) es una medida del perfil multi-trayecto de un canal de comunicaciones móviles. Generalmente, se suele definir como la diferencia entre la llegada del primer componente (visión directa, en caso de que existiera) y la llegada del último componente del (multi-camino) [11].

Este parámetro es de gran importancia en las telecomunicaciones, ya que mide la dispersión temporal de los ecos recibidos y marca el límite del periodo de símbolo para que no haya interferencias (“*Frequency selective Fading*”)

En los escenarios industriales se producen reflexiones con mucha más frecuencia, debido a la presencia abundante de máquinas metálicas con formas irregulares. Es por este motivo que este parámetro es mucho mayor para InF, que para escenarios interiores como *Indoor Office*.

Debido a la complejidad y diversidad de escenarios que existen en la industria, el 3GPP ha ido actualizando el modelo para calcular el delay-spread, que se pueden ver en [10] hasta llegar a la versión actual que es la usada en este trabajo. Este modelo sigue una distribución normal, cuya desviación estándar es 0.18 y la media depende de la condición de LOS/NLOS (Ec. 3; 4) y el volumen del escenario. Cabe destacar, que el modelo utilizado varía un poco respecto el modelo inicial propuesto por el 3GPP TR38.901 en la versión 16.0. Ya que se han utilizado las ecuaciones propuestas por Ericsson en [12] las que se proponen unas leves variaciones al modelo. Se ha escogido este modelo, puesto que el objetivo final es comparar los resultados obtenidos con la empresa Ericsson, entre otras.

$$\text{LOS: } uLGDS = \log_{10}(70 * \frac{V}{S} + 10) - 9 - 2.33 * 0.18 + \log_{10}(0.76) \quad (3),$$

$$\text{NLOS: } uLGDS = \log_{10}(70 * \frac{V}{S} + 10) - 9 - 2.33 * 0.18 \quad (4),$$

$$\log DS = \log_{10}(DS/1_S) \quad (5),$$

donde V= volumen total del escenario y S= superficie total del escenario (suelo + techo + paredes)

2.3.1.3.3 Angular Spread

La dispersión angular mide el rango de ángulos con los que pueden salir los rayos transmitidos y los reflejados. Estos ángulos se miden respecto el Azimut (ASA), en caso de llegada y (ASD) en caso de salida y respecto la elevación (ZSA), en caso de llegada y (ZSD) en caso de salida.

A la hora de medir estos parámetros, se establecen unos límites de 52° para la elevación y 104° para el azimut.

2.3.1.3.4 Ricean K factor

El Ricean k factor mide la relación entre la potencia de señal de la onda dominante sobre la componente reflejada y dispersa. Por tanto, este factor determina la amplitud de la señal que se recibe. El uso del k factor puede ayudar a conocer la tasa de error de bits en un canal [13].

2.3.1.3.5 Shadow Fading (SF)

El “fading” o desvanecimiento ocurre cuando las ondas electromagnéticas que se transmiten por diferentes caminos en un mismo medio, concurren en la antena receptora formando una interferencia destructiva. Debido a las condiciones del medio, las ondas viajan por diferentes caminos y sufren diferentes retrasos en algunos puntos; estas ondas pueden sumar en contrafase causando que la señal se atenúe muchos órdenes de magnitud [14].

Existen dos tipos de desvanecimientos: el desvanecimiento lento y el rápido. El lento se produce cuando el tiempo de coherencia es mayor que el tiempo de símbolo. En este caso, la amplitud y fase no varían de forma brusca y se produce debido al “*shadowing*” u ocultamiento, y es causado por objetos, colinas, edificios. Por otro lado, el “*fast fading*” o desvanecimiento rápido se produce cuando el tiempo del símbolo es mayor que el tiempo de coherencia del canal. Esto puede causar cambios en la amplitud y fase de la señal abruptos; lo que puede producir errores en la comunicación, ya que el receptor puede interpretar erróneamente la información.

El *Shadowing* o desvanecimiento lento es un fenómeno que ocurre debido al ocultamiento, produciendo una fluctuación en la envolvente de la señal. Esto sucede cuando un objeto de gran tamaño, comparado con la longitud de onda de la señal, interfiere en el camino entre el transmisor y el receptor. El *Shadowing* sigue una distribución normal, de media cero, con una desviación típica que cambia con el escenario, como se puede ver en la Tabla 2 en la que esta desviación es S_{SF} .

El *fading* ha sido uno de los problemas más importantes en las telecomunicaciones durante mucho tiempo, y por ello, se han creado multitud de métodos para paliar el problema. Los métodos creados se basan en la diversidad, tanto espacial como de canal, que tratan de introducir bits redundantes para que, en caso de error, el receptor pueda interceptarlo y solicitar una retransmisión o el mismos arreglarlo.

El *fading* y los anteriores eventos estudiados como él LOS/NLOS, pérdidas por *path-loss*, *shadowing*, causan problemas o degradaciones a la señal que hacen necesario el estudio de las características de la señal en todo el medio. Esto se lleva a cabo mediante la obtención y medición de los principales parámetros de la señal, conocidos como KPI.

Parámetros de pequeña escala

Los pasos a seguir en la generación de parámetros de pequeña escala es la siguiente:

1. Generación de los retrasos de *cluster*¹.
2. Generación de la potencia de los *clusters*.
3. Generar los ángulos de salida y llegada para la elevación y el azimut.
4. *Coupling Loss*² dentro de un grupo para el azimut y elevación.
5. Generar las ratios de potencia de la polarización cruzada.

En general, el modelado de parámetros de pequeña escala no sufre variación respecto de *Indoor-Office*, exceptuando la generación de retraso de *cluster*, que se verá a continuación con más detalle

¹ Grupos de rayos que llegan al receptor por distintos caminos

² Acoplamiento de los rayos

2.3.1.4 Generación de retraso de clúster

A diferencia de modelos para escenarios anteriores, en los que el retraso de propagación de la primera contribución se fijaba en 0, el tiempo absoluto de llegada cobra una importancia crucial para determinar la posición relativa entre estación base y terminal. Esto se debe a que no tiene una posición fija, sino que sufre un movimiento con velocidad constante.

La generación de cada retraso entre estación-base y terminal según el modelo establecido por el 3GPP se puede encontrar en [10], donde se diferencia entre si hay LOS, o si por lo contrario hay NLOS.

Las ecuaciones 6 y 7, son las utilizadas en cada caso respectivamente.

$$t_{abs,LOS} = \frac{d_{3D}}{c} \quad (6) ,$$

$$t_{abs,LOS} = \frac{d_{3D}}{c} + \Delta t , \Delta t > 0. \quad (7) ,$$

donde Δt se genera mediante una distribución log-normal y unos parámetros que se pueden ver en [10]. Finalmente, una vez establecidos los parámetros de gran y pequeña escala, pueden generarse todos los coeficientes.

Generación de coeficientes.

La generación de coeficientes, se detalla en el 3GPP TR38.901 y como se observa en la Figura 1, consiste en tres módulos:

1. Se establecen de manera aleatoria las fases para cada rayo
2. Se generan los coeficientes del canal para cada cluster y cada pareja estación base- receptor
3. Se aplica el *path-loss* y el *shadowing* a los coeficientes generados.

En este apartado, las únicas diferencias que se introducen en InF es la inclusión de modelos de movilidad dual, ya descritos en el 3GPP TR 37.885 para *vehicle-to-everything* (V2X) escenarios [15]

2.4 Key Performance Indicator (KPI)

Una vez modelado e implementado el modelo de canal, el 3GPP establece las consideraciones que deben tomarse, y las medidas que deben realizarse para realizar la calibración. Para ello se hace uso de un escenario estándar y se mide unos determinados parámetros llamados KPIs. El apartado de calibración será expuesto más adelante. Si bien, a continuación, se presentan los parámetros que serán objeto de análisis profundizando sobre ellos mediante una explicación teórica.

Los “KPI” conocidos como los indicadores clave de rendimiento, son aquellos parámetros que proporcionan información sobre de qué manera ha llegado la información al receptor.

El estudio de estos parámetros servirá para conocer de qué manera se comporta el canal. Mediante la comparación de los KPI obtenidos, con los parámetros de referencia proporcionados por las empresas Huawei, Ericsson y ZTE, se podrá constatar si el canal ha quedado calibrado de manera correcta.

Durante la calibración del modelo de canal de InF, se analizan los siguientes KPIs:

- **Coupling Loss:** El Coupling Loss es un factor que mide la pérdida de acoplamiento que describe la tasa de flujo de energía desde el campo reverberante al campo directo por



unidad de energía, en el campo reverberante. Puede calcularse como la diferencia entre los niveles de potencia conducida, medida entre los puertos de la antena transmisora y receptora. La ganancia de las antenas no se considera para calcular el coupling loss. 3GPP establece un MCL (Maximun Coupling Loss), que sirve como métrica para evaluar la cobertura de una tecnología de acceso radioeléctrico [16]

- **Geometry with noise (SINR):** El geometry with noise, también conocida como la SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio), se define como la potencia de una determinada señal entre la suma de potencias de interferencia de otras señales que interfieren y la potencia de ruido de fondo. Se utiliza en sistemas de comunicación para dar el límite teórico a la capacidad de un canal. [17]. Dada la complejidad y aleatoriedad en las redes celulares y de telefonía móvil, se utiliza modelos de geometría estocástica para modelar la SINR.
- **Geometry without noise (SIR):** Geometry without noise. También conocida como SIR, es el cociente entre la potencia media recibida de la señal transmitida y la potencia media de interferencia recibida, sin tener en cuenta el ruido. A diferencia de la SNR (relación señal a ruido), la I puede ser controlada por la gestión de los recursos radioeléctricos, mientras que, en la SNR, la N hace referencia normalmente a ruido blanco Gaussiano [17].
- **Delay Spread (DS):** Delay spread (difusión del retardo). Es una medida del perfil multi-trayecto de un canal de comunicaciones móviles. Generalmente se suele definir como la diferencia entre la llegada del primer componente (usualmente visión directa, en caso de que existiera) y la llegada de la última componente del multi-camino [11]. Una vez desarrollada toda la teoría del modelado de canal y las características que tiene InF, se procede a realizar la implantación de este canal en ns-3.

Capítulo 3. Implementación y calibración en ns-3 del modelo InF.

En este apartado se detalla la manera en la que se ha implementado el modelo de canal propuesto en [3]. Para ello, se hace uso de la última versión de ns-3 que es la 3.34. En esta versión se incluyen los módulos para InH (*Open and mixed office*), que se tomarán como punto de partida. Además, se han usado algunos componentes de 5G-LENA, un módulo que se puede implementar en ns-3 para 5G y que servirá para el modelado del canal [18]. Aunque se realicen modificaciones en el código y se generen nuevos módulos, se tiene en cuenta que en ningún momento puede verse afectado el contenido o comprometido el funcionamiento de los módulos ya existentes.

El objetivo de esta implementación es que pueda ser utilizada en futuras simulaciones, y pueda ser readaptada a las distintas demandas de posibles escenarios que se presenten en el futuro.

A continuación, se realiza una explicación detallada de los módulos modificados ya existentes y de los módulos nuevos. En la Figura 8, se puede ver un resumen en forma de esquema de los módulos que se han tenido en cuenta durante esta implementación; cuyo orden y función se irán exponiendo a lo largo del capítulo. Estos módulos son principalmente los de propagación y espectro en donde los componentes en azul son los implementados para el escenario InF.

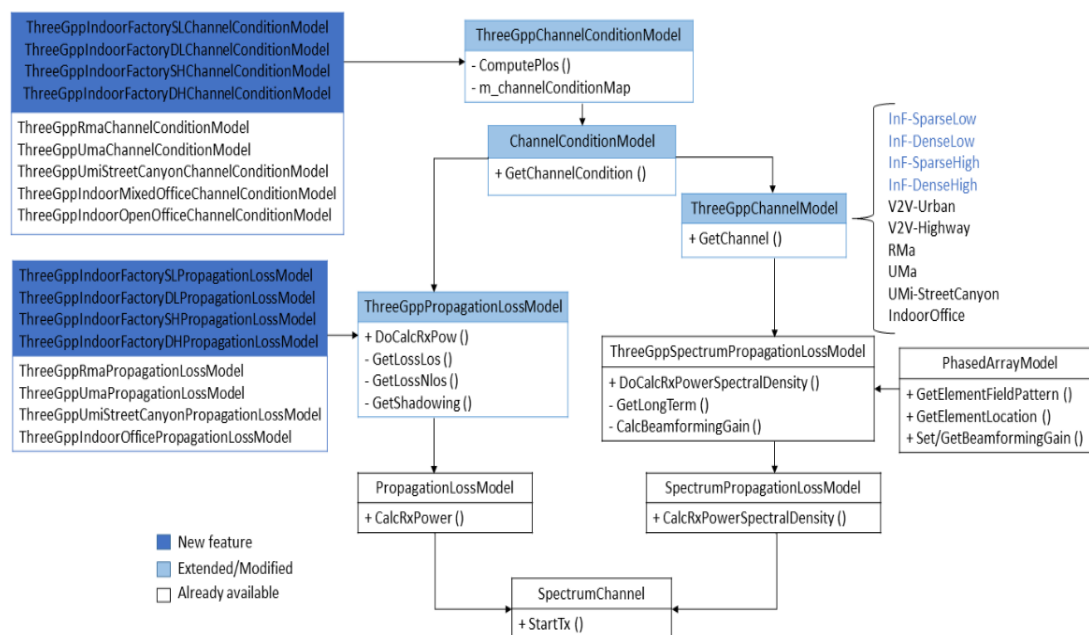


Figura 8. Estructura de código implementada y propuesta para la nueva versión de ns-3 [19].

3.1 Módulo de propagación.

En este apartado se introducen los nuevos modelos para calcular la probabilidad de LOS/NLOS, el *Path loss* y el *Shadow-Fading* en ns-3 en InF, siguiendo las especificaciones que marca el 3GPP TR 38.901.

Condición de modelo de Canal.

Los nuevos módulos encargados de definir las condiciones del canal se establecen en la sección de ChannelConditionModel. En esta sección, partiendo de la base de la clase ThreeGppChannelConditionModel, se han desarrollado 4 nuevas subclases, las cuales se pueden apreciar en la Figura 8, donde aparecen en azul. Estas subclases derminan el cálculo de la condición de canal para los distintos subescenarios: *InF-Sparse Low*, *InF-Dense Low*, *InF-Sparse High*, *InF-Dense High*. En efecto, si hubiera cualquier cambio en la clase principal en futuras actualizaciones, las respectivas subclases también se verían afectadas. Todas las subclases, como sus hermanas (ThreeGppIndorFactoryIndoorOfficeChannelConditionModel), definen los parámetros generales del canal, para calcular la PLOS/PNLOS. Además, estas cuatro subclases incluyen las dos nuevas variables, vistas en el apartado anterior de Marco Teórico, “*clutter density (r)*” y “*clutter height(hc)*”. De esta manera queda definido correctamente el estado del canal.

Path-loss and shadowing models.

Para el cálculo tanto del Path-Loss como el Shadowing, ns-3 utiliza la interfaz de ThreeGppPropagationLossModel, que a su vez se desarrolla a partir del módulo PropagationLossModel. El 3GPP establece la ecuación Alpha Beta Gamma (ABG) (ecuación 8), para el cálculo de la media del Path Loss.

$$PL [dB] = X + A \log_{10}(d_{3D}) + B \log_{10} f_c \quad (8).$$

A partir de esta ecuación y de las 4 formulas vistas para el cálculo del Path-Loss para los diferentes subescenarios en la Tabla 2, se han establecido cuatro subclases encargadas de representar estas nuevas fórmulas. Las subclases generadas aparecen en azul en la Figura 8, colgando del módulo ThreeGppPropagationLossModel:

Así mismo, para el cálculo del Path-Loss, estas clases considerarán shadowing long normal y que la distancia se mide en 3 dimensiones.

Finalmente, para calcular el Path-Loss definitivo, se ha de tener en cuenta en que momentos se encuentra en LOS y NLOS.

En este caso, el proceso que seguirá el programa para calcular el Path-Loss, en los distintos usuarios distribuidos en el canal, seguirá los siguientes pasos:

- 1) Utilizar las funciones GetLoossLos y GetLossNlos, para ver si tienen o no visión directa
- 2) Calcular el Path-Loss con la función del subescenario en el que se encuentren los usuarios, considerando si tienen o no visión directa.
- 3) Incluir el desvanecimiento rápido en el cálculo, mediante la función GetShadowing.

Módulo de espectro.

Las características del modelo estocástico de canal que propone el 3GPP, ya están implementadas en ns-3 en el módulo de ThreeGppChannelModel. En él se han incluido los 4 sub-escenarios analizados para InF.

La matriz de canal se calcula según las distribuciones aleatorias de los parámetros de gran escala. Para el cálculo de dicha matriz se diferencia entre LOS y NLOS, la matriz ha sido generada mediante la descomposición de Cholesky siguiendo las especificaciones de K, SF, DS, ASA, ASD, ZSA y ZSD. Estos parámetros de gran escala se generan también en el módulo

ThreeGppChannelModel y no dependen del tipo de sub-escenario. Los parámetros de pequeña escala no han sido implementados ya que las variaciones de canal de InF son igual que en los escenarios de prueba anteriores.

Movilidad.

Durante el desarrollo del proyecto, se llevó a cabo, también, un módulo para el movimiento de los usuarios por el escenario. Siguiendo las especificaciones del 3GPP, los usuarios debían moverse con un movimiento aleatorio, con velocidad uniforme. Para ello, se hizo uso de un módulo, ya implementado, RandomWalk2dMobilityModel, en el que introduciendo las dimensiones del escenario y el número y posición de los usuarios, a estos se les asignaba una dirección de movimiento aleatoria. La dirección asignada podía variar cada segundo manteniendo velocidad constante. Así mismo, en caso de que los usuarios llegaran al límite del escenario, tan solo rebotarían con un ángulo de salida igual al incidente.

Este módulo no se ha tenido en cuenta a la hora de realizar los resultados, dado que, como se explicará en el apartado siguiente, para medir los KPIs se ha realizado un mapeado de todas las posiciones posibles en el escenario. Sin embargo, ha servido para dotar de realidad a esta implementación, puesto que simula la realidad de lo que ocurriría en una empresa industrial. Además, deja la línea abierta a futuras investigaciones, que puedan diseñar y medir otros factores cruciales para la comunicación como el efecto dopler, *handovers*, etc.

3.2 Calibración

El 3GPP TR 38.901, establece en [3], una serie de características detalladas sobre como tienen que establecerse los parámetros físicos de los escenarios para calibrarlos. Cabe destacar, que solo se detallan las especificaciones para los cuatro escenarios de interés. InF (SL-DL-SH-DH) ya que la calibración de InF-HH no está considerada dentro de la propuesta de calibración por el 3GPP.

Las dimensiones, son las establecidas en la Tabla 1. Sin embargo, cabe recalcar, que la altura de los escenarios era inicialmente en [3] de 10 m para todos ellos. Ahora bien, en [20] donde se encuentran los resultados de las compañías, incluyen una variación en las alturas que ya refleja la Tabla 1.

Las antenas de las estaciones base y los terminales, son antenas isotrópicas polarizadas verticalmente. No disponen de sectorización y el margen de *handover* es de 0 db. En cuanto a sus alturas, los escenarios “*High*” tiene las antenas de las estaciones base a 8.5 m de altura, para los escenarios “*low*”, esta altura se reduce a 1.5 m. En los 4 escenarios los terminales están a 1.5 m de altura.

En cuanto a la disposición 2D de las estaciones base, puede verse detallada en la Figura 9. Donde W = ancho y L = largo y D = espacio entre estaciones base. Esta última será una variable que dependa del escenario. Para los dos escenarios grandes (300x150) la $D = 50$ m, en cambio para los dos escenarios pequeños (120x60) $D = 20$ m. Se despliegan un total de 18 estaciones base para cada uno de los escenarios.

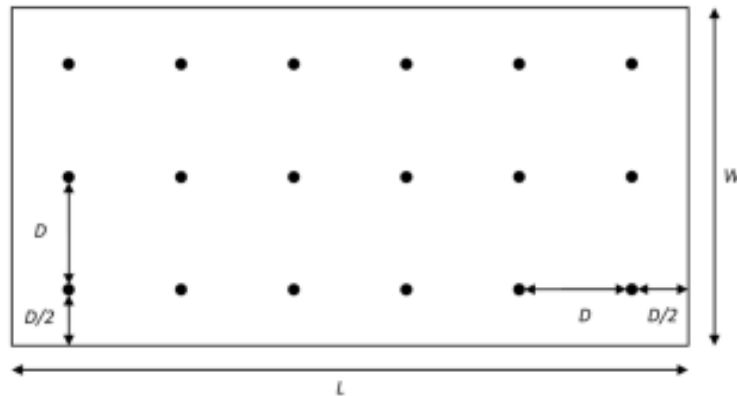


Figura 9. Disposición estaciones base en el escenario.

Los terminales, se repartirán de forma aleatoria por el escenario, de tal manera que cada estación base tenga 10 antenas receptoras (esta unión se realiza mediante el cálculo de *path-loss* del terminal con cada una de las estaciones base para pertenecer finalmente a la estación base cuyo *path-loss* calculado sea el menor), lo que hace un total de 180 terminales por escenario, además la distancia inicial mínima los terminales es de 1m. La Figura de ruido de los terminales es de 9 dB.

Por otro lado, las frecuencias para la señal portadora serán de 3.5 y 28 GHz, con un ancho de banda de 100 Mhz.

Finalmente, la distribución aleatoria de los objetos seguirá las siguientes pautas;

- Para los escenarios “*sparse*”, la densidad de “*cluster*” (r) es del 20%, la altura de los objetos es de 2 m y el tamaño de 10m.
- Para los escenarios “*dense*”, la densidad de “*cluster*” (r) es del 60%, la altura de los objetos es de 10 m y el tamaño de 2m.

El 3GPP establece, 4 métricas que son necesarias para la calibración de estos escenarios:

- 1º Calcular el “*coupling loss*” de la célula de servicio.
- 2º Calcular la geometría con y sin ruido.
- 3º Calcular la CDF del “*delay spread*” y el “*angular spread*”.
- 4º Calcular la CDF del exceso de retardo de la primera contribución para la celda de servicio.

Por otra parte, en [3] se menciona que en el momento que se extrajeron los resultados, el 3GPP aún no había concluido la manera en la que se debía calcular el exceso de retardo de la primera contribución. Por tanto, al no tener datos con los que compararlos, tampoco se ha llevado a cabo en este trabajo.

El resto de resultados se muestran a continuación en el apartado de comparación donde se analizan y discuten los resultados obtenidos, a excepción del “*angular spread*”.

3.3 Simulación.

Una vez implementado todo el código necesario para incluir los 4 sub-escenarios de calibración propuestos por la 3GPP en el código de ns-3, se procede a simular los escenarios para poder comprobar el correcto funcionamiento de los módulos y realizar la calibración necesaria de las métricas obtenidas.

En primer lugar, se hizo uso de la Herramienta NetAnim, la cual permitía una visualización del escenario de forma gráfica y, además se podían obtener las posiciones de los nodos, de los

usuarios, su movimiento con el tiempo, y otros parámetros como la distancia respecto el nodo más cercano.

Una vez comprobado que los parámetros físicos de los 4 sub-escenarios y la implementación del mismo es la correcta, se procede a calibrar los parámetros de gran escala y a compararlos con los datos facilitados por las compañías Huawei, Ericsson, ZTE y Nokia.

Para ello, se incluye en el código implementado, funciones para extraer las métricas requeridas por el 3GPP(KPIs) como outputs para así disponer de los datos calculados de forma numérica y poder graficarlos. De esta manera se obtienen los valores del Coumpling Loss, SINR, SIR y DS calculado para cada uno de los usuarios. Este mismo procedimiento se realiza varias veces, inicializando la simulación con diferentes semillas para obtener una gran cantidad de resultados aleatorios incorrelados.

3.4 Comparación de resultados

Para la comparación de resultados, se ha graficado la función de distribución acumulada (CDF), la cual calcula la probabilidad acumulada del parámetro medido, es decir que probabilidad tiene un parámetro obtenido aleatoriamente de la población de ser igual o menor a cierto valor. Para ello, se ha hecho uso de la función de matlab Cdfplot(), que calcula y dibuja los percentiles mediante 100 escalones.

Los resultados que se compararán en este análisis pertenecen al 3GPP publicados en [20]. En él, las compañías Ericsson, Nokia, ZTE y Huawei, proporcionan todas las métricas que obtuvieron en sus respectivas calibraciones del modelo de canal InF. Estas métricas consisten en los percentiles para calcular la CDF de cada uno de los KPIs que se ha tratado en este trabajo, para los 4 escenarios y para las frecuencias de 3.5 y 28 GHz

A continuación, se presenta un análisis comparativo de cada uno de los KPIs a 3.5GHz y a 28GHz.

3.4.1.1 Coupling Loss

Para sacar los resultados, se ha considerado que la serving cell del terminal usuario esté asociada al gNB con menor path-loss. Además, las ganancias de las antenas, tanto de la transmisora como de la receptora, se ha simulado a 0 dB y la potencia con la que transmiten las antenas es de 30 dB.

3.4.1.1.1 3.5 GHz

En la Figura 10, se puede observar los resultados obtenidos del *Coupling Loss* comparado con los obtenidos por las empresas Ericcson, Nokia y ZTE para los 4 sub-escenarios.

CouplingLoss 3.5 GHz

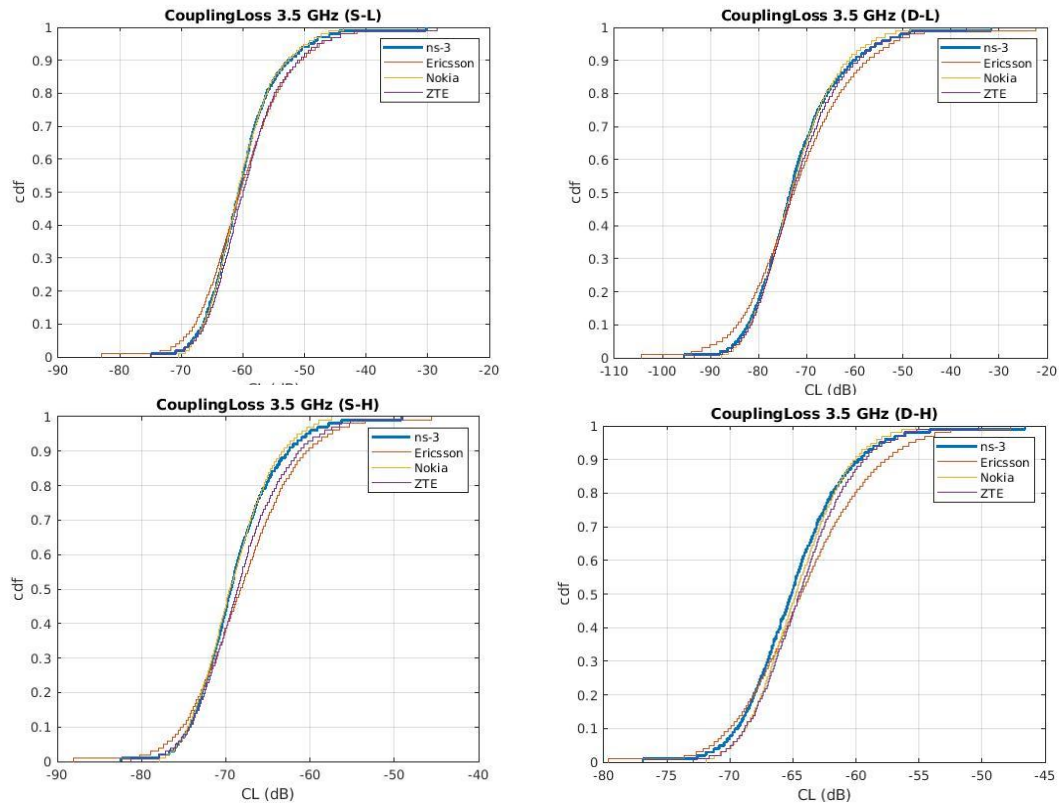


Figura 10. Coupling Loss 3.5 GHz.

Fuente: Elaboración propia con los datos del ITEAMS [21]

Si se observan los resultados expuestos en la Figura 10, se puede apreciar que los peores resultados (Coupling Loss con valores más negativos) ocurren en el escenario D-L, ya que tiene el 70% de la población con resultados inferiores a -70dB. En cambio, S-L obtiene los valores más positivos, donde el 70% de la población tiene un Coupling Loss de hasta -60 dB. Por otro lado, para los escenarios “high” ocurre lo contrario, siendo el Coupling Loss superior en el escenario “dense” respecto al “sparse”.

En cuanto a la comparación de los resultados, en la Figura 10 se puede apreciar que son muy similares al resto de empresas. Es más, si estos resultados se comparan con los de Nokia, resultan ser casi idénticos. Si se comparan con ZTE o Ericsson, para el caso de escenarios “high”, se observa una curva un tanto más inclinada, con valores máximos menores. En cuanto a los escenarios “low”, en el subescenario “sparse” la curva también tiene una inclinación mayor a ZTE y Ericsson. Mostrando la parte de los mínimos parecida a los de ZTE y la parte de los máximos desplazada a la izquierda. En el sub-escenario “dense”, los resultados son casi idénticos a los de ZTE y Nokia, mientras que Ericsson obtiene peores mínimos ligeramente menores y máximos un poco más altos.

En líneas generales, se puede decir que los resultados obtenidos proporcionan Coupling Loss similar a los de Nokia con ligeras variaciones respecto a los obtenidos por las otras dos empresas

3.4.1.1.2 28 GHz

En la Figura 11, se pueden observar los resultados obtenidos del *Coupling Loss* comparado con los obtenidos por las empresas Ericsson, Nokia y ZTE para los 4 sub-escenarios a 28GHz.

CouplingLoss 28 GHz

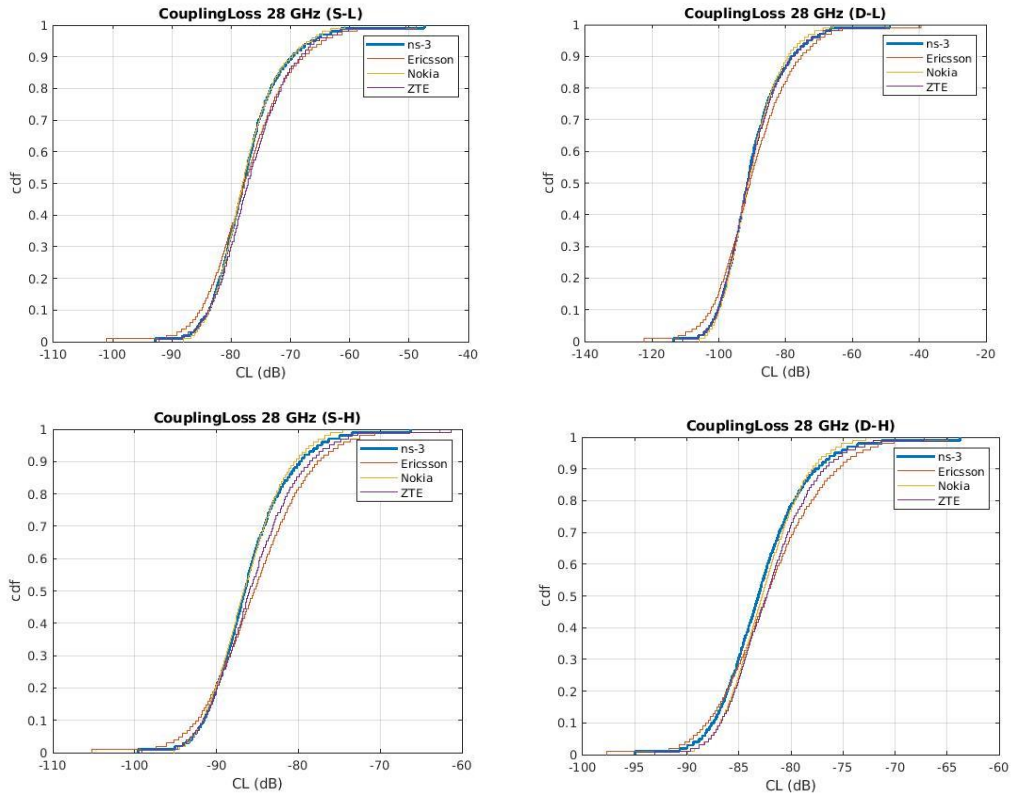


Figura 11. Coupling Loss 28 GHz.

Fuente: Elaboración propia con los datos del ITEAMS [21].

En la Figura 11, se pueden apreciar unos resultados con una tendencia muy similar respecto a los resultados para 3.5GHz, tanto para los resultados obtenidos con ns-3 como su comparación con el resto de empresas. La única diferencia a destacar es que se encuentran desplazadas aproximadamente -20 dB.

3.4.1.2 *Geometry with noise*

En esta sección, se analizarán los resultados obtenidos de la geometría con ruido (SINR), que consiste en medir la potencia de una señal respecto a la potencia de las señales de interferencia más el ruido.

3.4.1.2.1 3.5 GHz

En la Figura 12, se puede observar los resultados obtenidos del SINR comparado con los obtenidos por las empresas Ericsson, Nokia, ZTE y Huawei para los 4 sub-escenarios

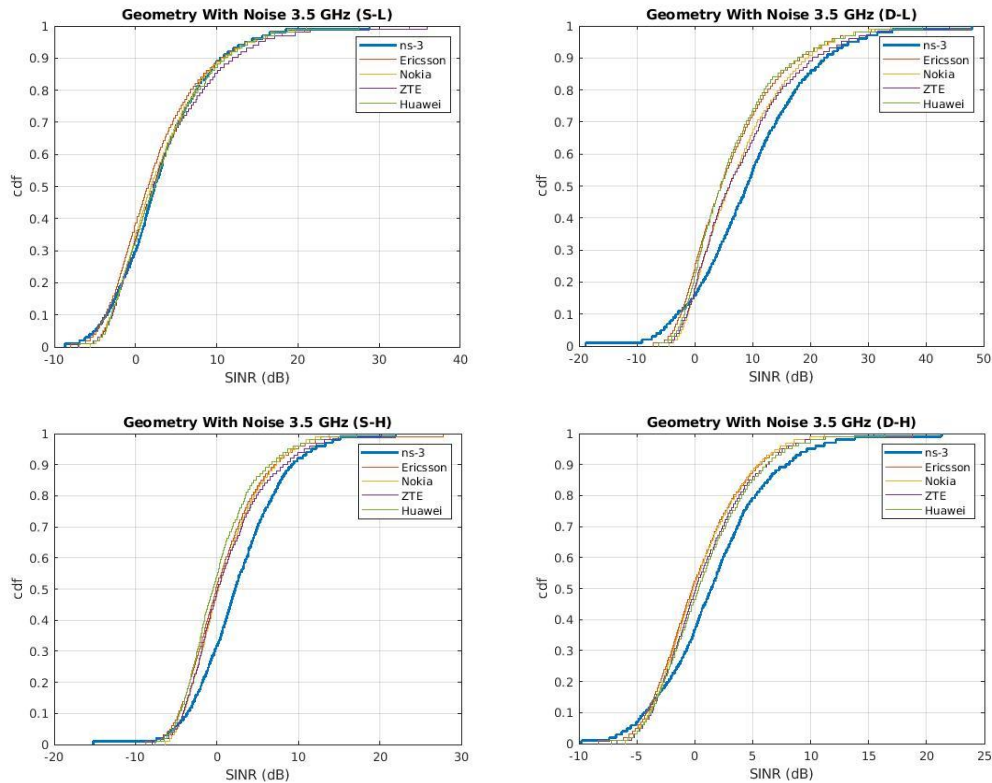


Figura 12. SINR 3.5 GHz.

Fuente: Elaboración propia con los datos del ITEAMS [21].

Mediante un análisis de los resultados obtenidos y representados en la Figura 12, se observa que el escenario con un SINR mayor es el D-L, donde solo un 15% de la población obtiene un nivel de señal de la portadora inferior al de interferencias y ruido. Además, el 50% de la población tiene valores superiores a 50dB. En el caso opuesto se encuentra D-H, que ha obtenido los peores resultados seguido por S-H. Esto puede deberse a la mayor altura de las antenas transmisoras, haciendo que al haber más distancia la señal recibida disminuya y por tanto lo haga el SINR.

En cuanto al análisis comparativo con el resto de empresas, solo el escenario SL ha obtenido unos resultados casi idénticos a los datos facilitados por estas empresas. En los otros 3 escenarios, se observan unos resultados deslizados a la derecha 2dB durante la mayoría de percentiles. Aunque para los escenarios “dense” la curva tiene también más inclinación haciendo que los resultados de los primeros 15 percentiles sean inferiores

3.4.1.2.2 28 GHz

En la Figura 13, se puede observar los resultados obtenidos del SINR comparado con los obtenidos por las empresas Ericsson, Nokia, ZTE y Huawei para los 4 sub-escenarios.

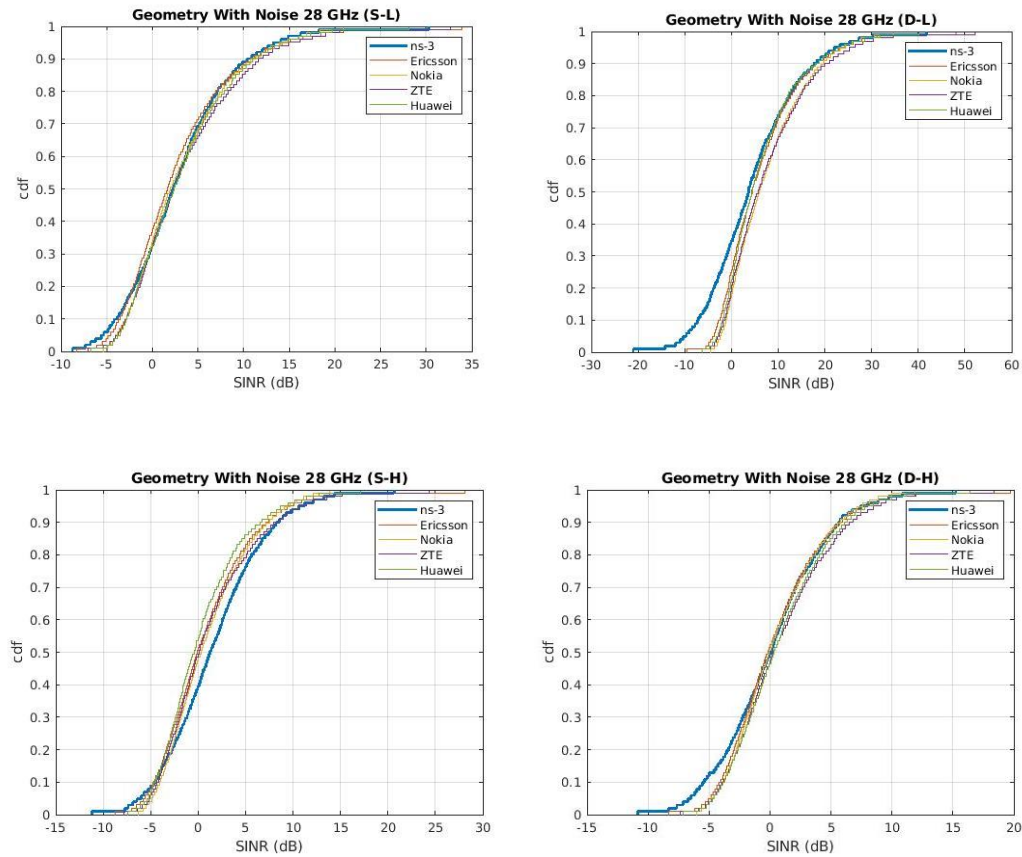


Figura 13. SINR 28 GHz.

Fuente: Elaboración propia con los datos del ITEAMS [21].

En la Figura 13, se puede ver que esta vez, los resultados obtenidos para 28 GHz sí que difieren de los de 3.5GHz. Aunque el escenario D-L sigue obteniendo los valores de SINR más altos y el escenario D-H los más bajos. En el análisis comparativo sí que se observan unos resultados más similares al resto de empresas, exceptuando S-H que sigue estando desplazada, y los 30 primeros percentiles de los escenarios “dense” que obtiene valores menores.

3.4.1.3 Geometry without noise

En la Figura 14, se puede observar los resultados obtenidos del SINR, comparado con los obtenidos por las empresas Ericsson, Nokia y ZTE.

Cabe destacar que la única diferencia respecto los resultados anteriores es la ausencia de ruido, como su propio nombre indica. Por tanto, en la Figura 14, se aprecian unos datos muy parecidos a los de la Figura 12, simplemente desplazados a la derecha.

3.4.1.3.1 3.5 GHz

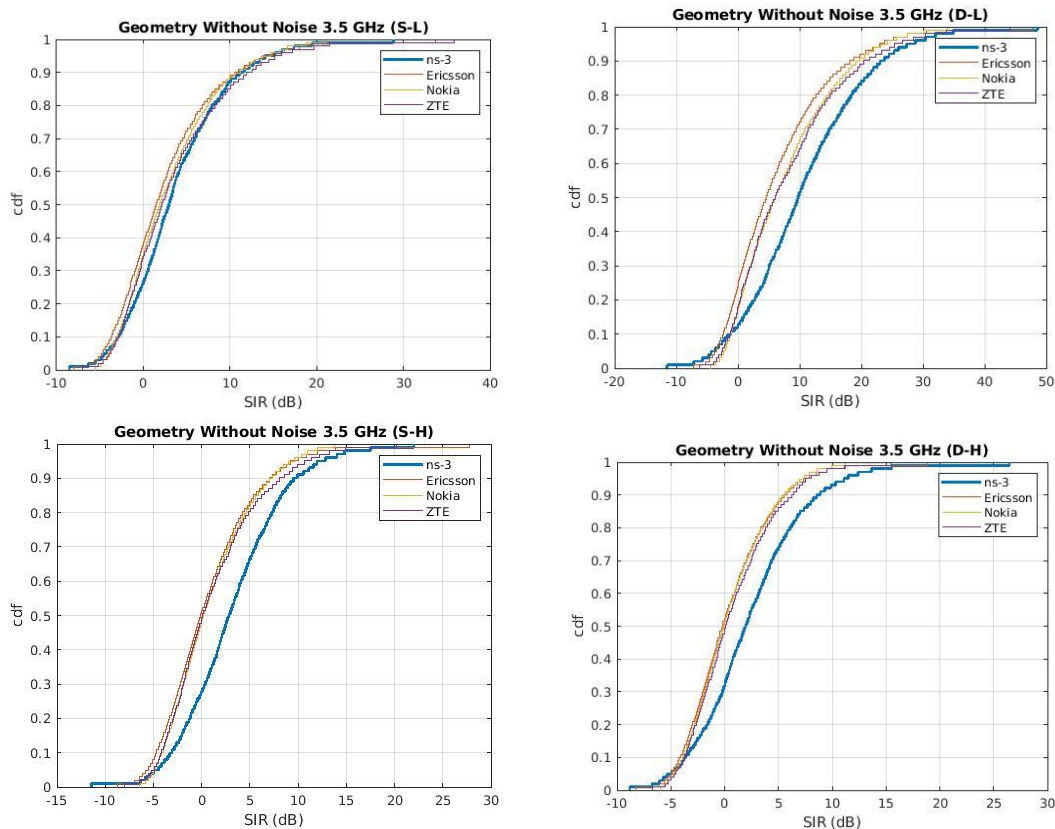


Figura 14. SIR 3.5 GHz.

Fuente: Elaboración propia con los datos del ITEAMS[21].

El análisis comparativo es el mismo al realizado para la Figura 12, destacando que la SIR para el escenario D-L, llega a diferenciarse de las compañías hasta +5dB

3.4.1.3.2 28 GHz

En la Figura 15, se puede observar los resultados obtenidos del SIR comparado con los obtenidos por las empresas Ericsson, Nokia y ZTE.

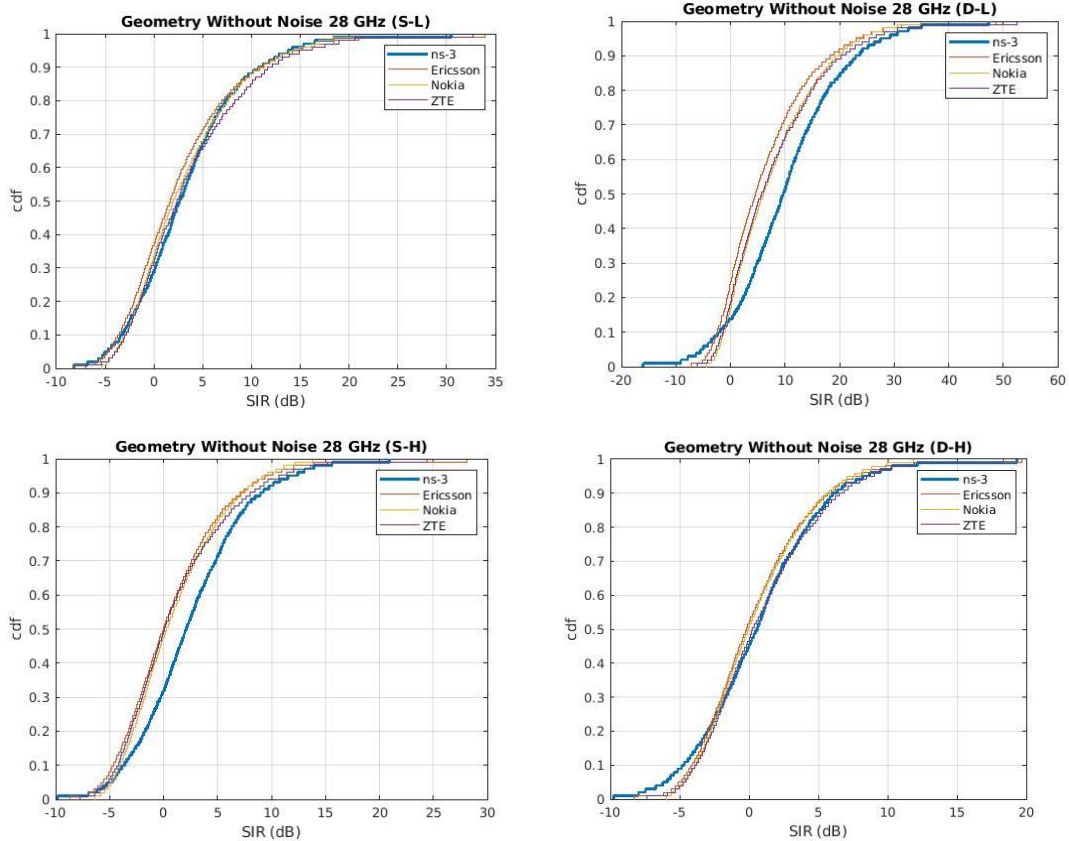


Figura 15. SIR 28 GHz.

Fuente: Elaboración propia con los datos del ITEAM [21].

En la Figura 15 se aprecian las mismas diferencias en el SIR que para la frecuencia de 3.5 GHz para los escenarios S-H y D-L. En cambio, el escenario D-H sí que ha obtenido unos datos con una tendencia similar al resto de empresas.

3.4.1.4 Delay spread

En esta sección se medirán la difusión de los distintos retardos que sufren las ondas debido al multicamino.

3.4.1.4.1 3.5 GHz

El cálculo del Delay Spread ya estaba implementado en ns-3, en la sección de parámetros de gran escala, y tan solo se procede a obtener los outputs para estos nuevos escenarios.

En la Figura 16 se puede comprobar que los resultados obtenidos coinciden con los proporcionados por las otras 4 empresas.

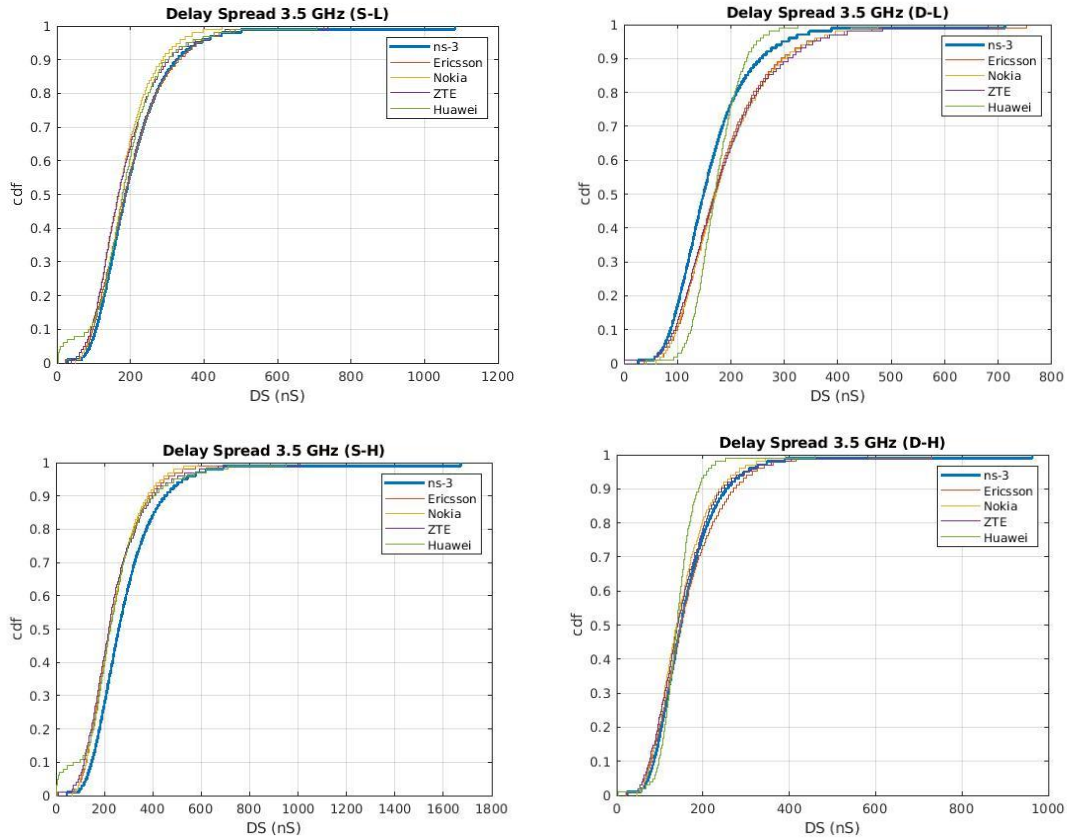


Figura 16. DS 3.5 GHz.

Fuente: Elaboración propia con los datos del ITEAMS [21].

En cuanto al análisis de estos resultados, cabe destacar que para los escenarios “*sparse*” el DS es superior en el escenario “*high*”. Para los escenarios “*dense*” se observan resultados similares, a excepción del percentil 100, que fija el máximo en 963 ns para “*high*” y 712ns para “*low*”.

3.4.1.4.2 28 GHz

En 28 GHz los resultados obtenidos también coinciden con el resto de las empresas, a excepción de Huawei que se desvía del resto.

En cuanto a la comparación con los resultados de 3.5 GHz, en la Figura 17 se puede comprobar que el DS obtenido en los 4 escenarios es ligeramente superior, aunque mantiene las mismas tendencias ya comentadas en el apartado anterior.

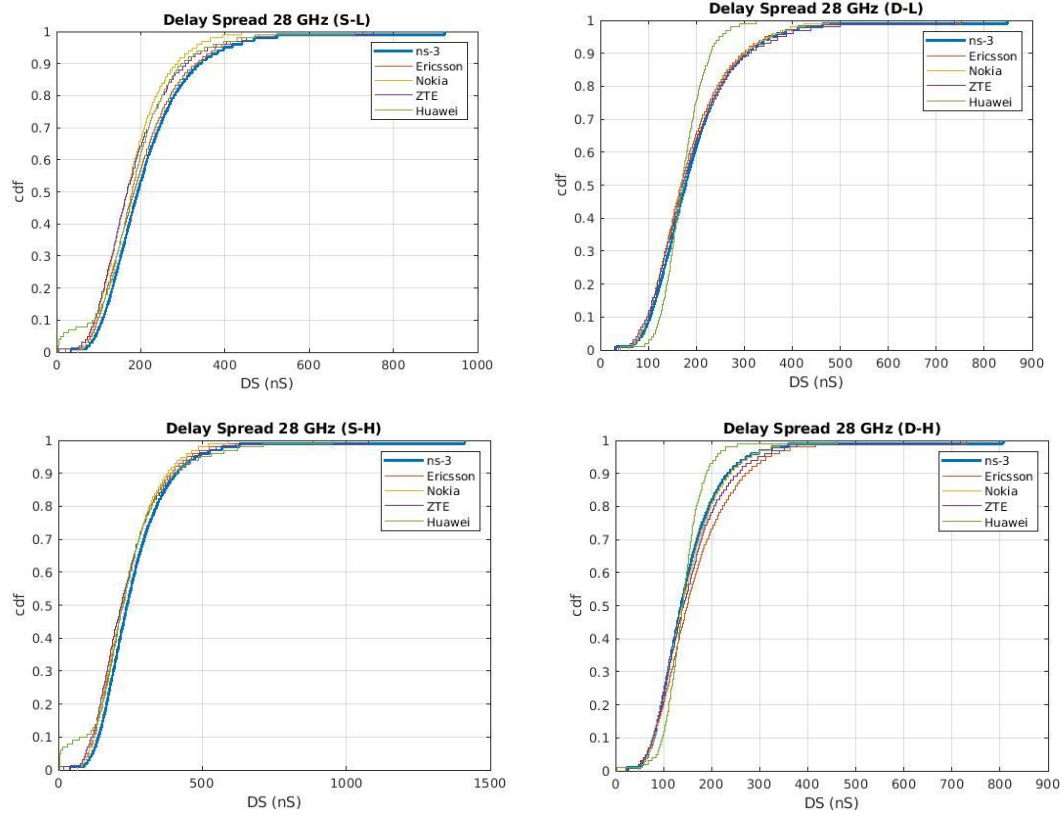


Figura 17. DS 28 GHz.

Fuente: Elaboración propia con los datos del ITEAMS [21].

Capítulo 4. Caso de uso: Escenario industrial AGV

La tecnología de la industria tradicional, basada en grandes líneas de montaje poco flexibles, está siendo desplazada por una industria modular, donde los diferentes módulos pueden cambiar de posición, configurarse y deben estar interconectados entre ellos en todo momento lo que da lugar a una industria inteligente, flexible y capaz de adaptarse a la demanda del consumidor [22]. En esta sección del trabajo se propone un caso de uso para la industria 4.0, centrándose especialmente en la fabricación inteligente.

La fabricación inteligente supone un cambio radical basado en “*Cloud based Wireess Robot Control*” que representan robots automáticos e inalámbricos controlados a través de la nube. Como se ha visto durante el desarrollo del trabajo, el 5G aporta 3 tipos de comunicaciones eMBB, mMTC y urLLC. En la Figura 18, se puede observar, la demanda de características del 5G que supone la industria 4.0; con un el gran número de dispositivos conectados y una fiabilidad de 99,99%. Además, cabe destacar la necesidad de movilidad, ya que es una de las claves para lograr la flexibilización de la industria. Por otra parte, también se debe resaltar el objetivo de redes con una latencia menor a 1ms, la cual requerirán los robots para trabajar a tiempo real.

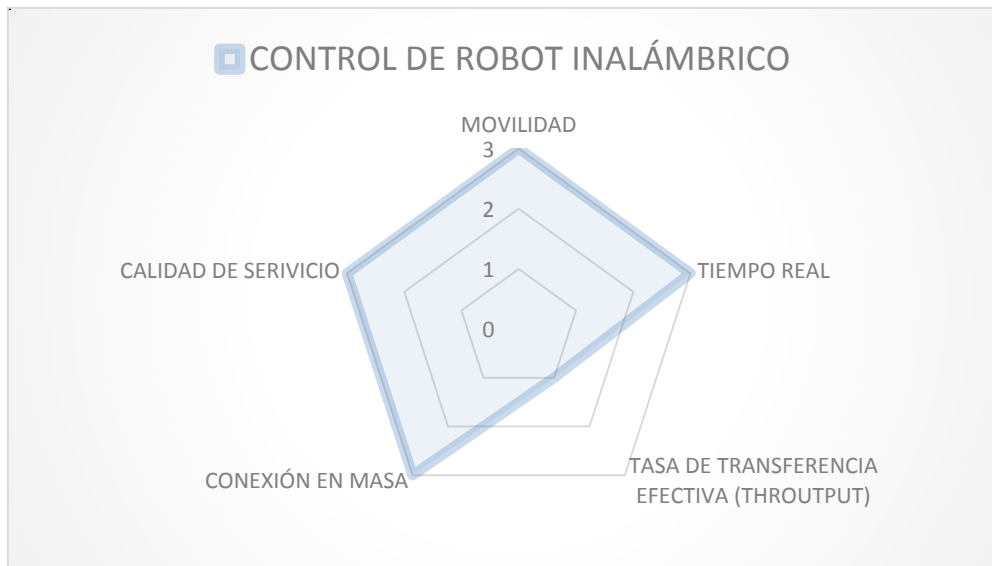


Figura 18. Necesidades de la industria 4.0 sobre las prestaciones del 5G [23]

Además, en [22] *Huawei* especifica los 10 diferentes casos de uso que pueden aplicarse a la fabricación inteligente. Estos pueden clasificarse en 3 grupos dependiendo de las prestaciones que demanden, que coinciden con 1

-Ancho de banda elevado: Instalación de sensores industriales, cámaras industriales inalámbricas, Control remoto y analítica computacional Edge.

-Alta densidad: Monitorización de estado y seguimiento de los activos, gestión de flotas de AGV, monitorización de logística e inventarios

-Baja latencia: “*Programmable Logic controllers*” (PLC) y robótica sincronizada.

Cabe destacar, que estos casos no son independientes, todo lo contrario, en general todos ellos pueden ser complementarios en la Industria 4.0. Sin embargo, para el desarrollo de este caso de uso se ha enfocado en los AGC.

4.1 Escenario.

El caso de uso que se propone consiste en la utilización de los AGV, con el objetivo de disponer de un escenario en el que a través de vehículos, se puedan transportar paquetes, objetos y herramientas alrededor de toda la fábrica, logrando así, una disposición global y mucho más completa de todos los recursos de los que dispone la fábrica.

La prestación utilizada en este caso de uso es la de mMTC, alta densidad de dispositivos conectados. Sin embargo, existe la posibilidad de equipar con cámaras los AGVs, lo que supondría un gran volumen de datos, haciendo necesario el uso de la eMMB. Por otro lado, en caso de que la funcionalidad de los AGV no fuera meramente la del transporte y debieran realizar cualquier otro tipo de tarea que requiriese una alta precisión y una baja latencia, se estaría utilizando la uRLLC. Por todas las necesidades expuestas, no ha sido posible la utilización de tecnologías como la WIFI. Utilizar la conexión por cable tampoco era una alternativa, ya que impediría la funcionalidad de movilidad de estos AGV.

Así pues, gracias al uso del 5G, en este caso se simplifica la infraestructura, se soporta la movilidad industrial y se pueden conectar gran cantidad de dispositivos con muy baja latencia y un volumen de datos elevado.

Las cadenas de producción de automóviles se han caracterizado en los últimos 100 años, por estar enfocadas al producto. Dichas cadenas consistían en rígidas líneas de producción, incapaces de fabricar distintos modelos; teniendo como única opción para añadir extras, la inclusión de maquinaria en la cadena de producción. Esta maquinaria permanecía desactivada en la mayoría de coches sin extras [24]. Este tipo de producción en cadena se pretende sustituir por islas, o bloques de producción, orientadas a la funcionalidad y para ello se necesita un constante transporte de elementos y herramientas entre los bloques. Esta funcionalidad será llevada a cabo por los AGVs.

El escenario a simular es una fábrica de producción de automóviles, con un diseño modular, dividida en secciones. Es un escenario ficticio, no se corresponde con una fábrica real, pero tanto las dimensiones, como la distribución y el funcionamiento representarán una fábrica real. En [25] y [26], se pueden ver casos de uso con características similares sobre la industria inteligente y en concreto al sector del automóvil a partir de los cuales se ha desarrollado este caso de uso.

El escenario tiene unas dimensiones de 120 m de largo, 60 m de ancho y 20 m de alto. En él, se instalará una red privada que aportará cobertura a toda la fábrica. En el interior de la fábrica se colocarán 2 gNB, para proporcionar conexión a un total de 10 AGV. La posición inicial de los AGVs se dispondrá de manera aleatoria, conectando 5 de los AGVs a cada gNB. Estos AGVs tendrán la capacidad de desplazarse por toda la fábrica. En la simulación, realizarán un movimiento aleatorio con velocidad constante. Dicho módulo se corresponde con el de movilidad que se ha comentado anteriormente.

Se procede a realizar las simulaciones para los 4 sub escenarios, contemplados por el 3GPP y estudiados a lo largo de este trabajo (SL, DL, SH, DH). El resto de parámetros de simulación serán detallados en el siguiente apartado.

4.2 Parámetros.

Los parámetros generales comunes para los 4 escenarios, que se han establecido para la comunicación 5G, se pueden apreciar en la Tabla 3:

Tamaño de paquete	250 bytes
Packet rate	1000 paquetes por segundo
Frecuencia portadora	32 GHz
Ancho de banda	400 MHz
Distribución de recursos	TDD
Patrón TDD	DUDU (50%Uplink 50%Downlink)
Numerología	3 (SCS=120 kHz)
Potencia Transmitida	30 dB
Ganancia usuario	21dB
Elementos de antena gNB	1
Elementos de antena AGV	1
Modelo de canal	InF
Sub escenarios	SL,DL,SH,DH

Tabla 3. Parámetros generales.

Además, para realizar la simulación de cada escenario, se han variado la altura de las antenas y la densidad del cluster. En la Tabla 4, se pueden apreciar los parámetros propuestos

	InF-SL	InF-DL	InF-SH	InF-DH
Dimensiones	120x60x20	120x60x20	120x60x20	120x60x20
Altura antena gndB	6m	6m	1,5m	1,5m
Altura antena AGV	1,5m	1,5m	1,5m	1,5m
Densidad de cluster	20%	60%	20%	60%

Tabla 4. Parámetros sub escenarios.

Una vez establecido el escenario y las condiciones, todo está preparado para que se realicen la simulación y así, obtener las métricas necesarias para la evaluación del diseño.

4.3 Evaluación de los modelos de canal.

En este apartado, se evaluarán y compararán las métricas obtenidas para los diferentes subescenarios simulados en la fábrica. Las métricas que se han decidido analizar son el retardo medio y la fiabilidad.

En primer lugar se presenta las medidas del retardo medio de cada transmisión, los resultados aparecen expuestos en la Figura 19, mediante una CDF.

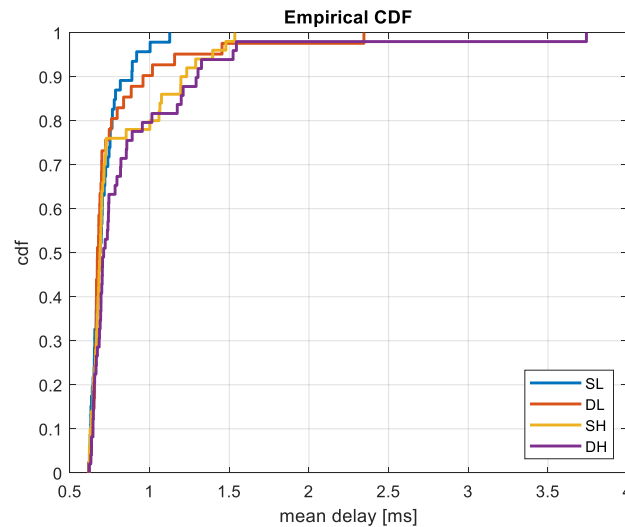


Figura 19. Latencia media por UE.

En los resultados obtenidos en la Figura 19 se aprecia claramente unas latencias medias menores para los escenarios “low” que para los escenarios “high”. Esto es debido a que la altura de las antenas transmisoras es menor y por tanto, el trayecto que debe hacer la onda hasta llegar al receptor es menor. Por otra parte, se observa que los escenarios “sparse” también sufren menores retardos frente a los escenarios “dense”, ya que al haber menos máquinas y objetos por en medio, los retardos son menores.

En segundo lugar, se presenta un estudio de la fiabilidad en la transmisión de los paquetes para los distintos escenarios, diferenciado el “Uplink” y el “Downlink”

SCS	UE/SA	Latency target [ms]	DUDU [Reliability]								
			DL				UL				
			SL	DL	SH	DH	SL	DL	SH	DH	
120 kHz	10	1	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		2	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		5	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		10	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	20	1	B	B	B	B	B	B	B	B	B
		2	A	B	A	B	A	B	A	B	B
		5	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		10	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	30	1	C	C	C	C	C	C	C	C	C
		2	B	B	B	B	B	B	B	B	B
		5	B	B	A	B	A	B	A	B	B
		10	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Figura 20. Fiabilidad en la transmisión de paquetes.

En la Figura 20, se puede observar el estudio realizado para los distintos escenarios de la fiabilidad de transmisión siguiendo un patrón TDD cuando se modifica el número de usuarios y se varía latencia objetivo de 1 a 10 ms. Debido a la numerología escogida, 3, la separación entre sub-portadoras (SCS) será de 120 kHz.

Se ha catalogado la fiabilidad en tres niveles distintos: A, representa una fiabilidad superior al 99,999%; B, representa una fiabilidad superior al 99,99% y C que representa una fiabilidad superior al 99,9%.

Como puede apreciarse en la Figura 20, la fiabilidad es inversamente proporcional al número de usuarios. Además, cuanto menor sea la latencia objetivo, más comprometida se verá, pudiendo pasar de una fiabilidad A (99.999%) con una latencia de 10 ms a una C (99.9%) si se disminuye la latencia objetivo a tan solo 1 ms.

Si se realiza un análisis de los resultados obtenidos, se puede apreciar que el escenario SH es el que proporciona un mayor ratio de fiabilidad, logrando dar a 30 usuarios a la vez una latencia de 5 ms. Por otro lado, se observa que los escenarios “dense” proporcionan menos fiabilidad respecto a sus homólogos “sparse”, ya que por ejemplo para un escenario con 20 usuarios no son capaces de proporcionar una fiabilidad del 99,999% si la latencia objetivo es de 2 ms mientras que los escenarios SL y SH sí.

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

La industria 4.0 va a ser uno de los principales nichos de mercado para el 5G, ya que será un factor clave para la gran revolución en el proceso productivo gracias a todas las nuevas prestaciones que proporciona esta tecnología. Estas prestaciones han sido objeto de estudio durante el desarrollo del trabajo, como son: la monitorización de AGV, sensores industriales, robots sincronizados. etc. Dada la importancia de esta aplicabilidad en la industria, en este trabajo se ha llevado a cabo la calibración de un modelo de canal para la industria. En concreto, el modelo establecido por el 3GPP en la TR 38.901, en su Release 16, conocido como Indoor-Factory. Esta calibración resulta un paso fundamental como comprobación del correcto funcionamiento del sistema para posteriormente poder realizar el despliegue real de la red.

Durante el desarrollo de este trabajo, se ha hecho referencia a los modelos de canal ya existentes, explicando detalladamente la necesidad de un nuevo modelo por las características propias que demanda la Industria. Este novedoso canal industrial (In-F) es un modelo para interior donde se tienen en cuenta las características que puede tener una fábrica real, como son: el tamaño y volúmenes de la maquinaria, la presencia de todo tipo de objetos, diferentes alturas para las antenas y por supuesto, la movilidad de los usuarios. Además, se han detallado y explicado las diferencias de los 4 distintos sub-escenarios que presenta estos modelos, los cuales sirven para abarcar todas las posibilidades que puede tener un escenario industrial real. Los escenarios son InF (SL,DL,SH,DH).

La implementación de los 4 sub-escenarios del modelo de canal ha sido llevada a cabo mediante el software de simulación de redes ns-3 por el equipo de ITEAM. Para la obtención de los resultados y calibración del modelo, se han tomado como referencia las métricas aportadas por las empresas: Ericsson, Huawei, Nokia y ZTE.

En cuanto a los resultados obtenidos, se ha logrado una calibración satisfactoria, en donde los KPIs analizados: *Coupling Loss*, *Geometry without noise*, *Geometry with noise* y *Delay spread*; son cercanos a los datos proporcionados por Nokia y se asemejan al del resto de las compañías.

Finalmente, se ha evaluado un caso de uso para el sector industrial con el modelo de canal que se ha implementado. Este caso de uso consiste en el posicionamiento de diferentes AGVs alrededor de todo el escenario. De este proyecto piloto, se han podido obtener los datos de latencia media y fiabilidad, que son los KPIs que demandaría la característica uRLLC de la 5G. Gracias a este caso de uso, se ha podido ver la aplicabilidad directa de la que goza este trabajo.

Las fortalezas de este trabajo se basan en su aplicabilidad y vanguardia, con un uso real en la implementación de un sistema de red, como se ha visto en el caso de USO. Tratándose de un sector en auge con casi ilimitadas oportunidades de negocio. Además, al hacer la implementación en un software de acceso público, podrá ser reutilizado por todo el mundo para la implementación de su sistema e incluso mejorado en futuras actualizaciones.

En cuanto a las limitaciones del estudio, hay que destacar que el caso de uso que se ha llevado a cabo, tan solo tenía como finalidad el posicionamiento y seguimiento de los AGVs. Sin embargo, se ha visto que las prestaciones de la 5G abarcaban un rango mucho más amplio, teniendo como necesidades las 3 características de la 5G mMTC, eMMB, uRLLC. Por este motivo, en caso de que se quisiera realizar un uso de cámaras en *streaming* que demandaran el envío de una gran cantidad de datos, sería necesario realizar un análisis de *throughput* para ver si la implementación cumple con los requisitos y realizar las modificaciones convenientes en caso contrario.

Las líneas futuras para este trabajo, están abiertas a la calibración de posibles nuevos escenarios y aplicabilidades para la industria.



Este trabajo se enmarca en el proceso de investigación realizado por el ITEAM en la Industria 4.0 el cual ha llevado a la presentación del paper “ns-3 indoor factory channel model” que se puede encontrar en las referencias [21] , del que el autor de este trabajo de fin de grado ha formado parte.

Capítulo 6. Referencias

- [1] Campbell, K., Diffley, J., Flanagan, B., et al. B. M.-I. E. and I., & 2017, undefined. (2017). The 5G economy: How 5G technology will contribute to the global economy. *Sipotra.It*. <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2017/01/The-5G-economy-How-5G-technology-will-contribute-to-the-global-economy.pdf>
- [2] Garcia, V. *El 5G será clave para la automatización de la Industria 4.0*. (n.d.). Retrieved October 31, 2021, from <https://revistabyte.es/actualidad-it/5g-industria-4-0/>
- [3] 3GPP TR 38.901 V16.1.0 (2020)- 5G; *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16)*. <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>
- [4] Amaldi, E., Capone, A., Cesana, M., Networks, I. F.-C., & 2008, undefined. (n.d.). Optimization models and methods for planning wireless mesh networks. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.02.020>
- [5] Ns-3 Network simulation. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3048992>
- [6] Jurado, C. L. (2015). *Construcción, análisis y evaluación de un modelo de simulación de una arquitectura de red de data center usando ns-3*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10345>
- [7] Ricardo, J. (2012). *Evaluación del desempeño de la herramienta ns-3 en ambientes inalámbricos bajo el estándar IEEE802.11* ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
- [8] Marqués, P. C. (2017). *Diseño e implementación de un modelo del protocolo AURP para redes de sensores subacuáticas*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/88608>
- [9] VÁZQUEZ, S. G. (2019). *Elementos de sistemas de telecomunicaciones 2*. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=mKehDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=+Elemento+de+sistemas+de+telecomunicaciones,+1&ots=dt_rrOaqGu&sig=rL8LOARBMNazWqmRg1BesPpyRBY
- [10] Jiang, T., Zhang, J., Tang, P., et al. L. T.-I. I. of, & 2021 (2020). 3GPP Standardized 5G Channel Model for IIoT Scenarios: A Survey. *Ieeexplore.Ieee.Org, PP*. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3048992>
- [11] Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=n-3ZZ9i0s-cC&oi=fnd&pg=PR17&dq=A.+Goldsmith,+Wireless+communications.+Cambridge+university+press,+2005.&ots=AAXHUrma1&sig=pNY0HyyKxmI3QH4ZD-y6-0bc16U>

- [12] Ericsson. *RI-1909704 Summary of email discussion on indoor industrial channel model and calibrations*. (2019)
- [13] *Measuring Rice*. (n.d.). Retrieved October 30, 2021, from <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/ricepdf/measrice.htm>
- [14] *Conceptos básicos de desvanecimiento / tipos de desvanecimiento en la comunicación inalámbrica-Noticias-FMUSER Proveedor único de transmisión de FM / TV*. (n.d.). Retrieved October 31, 2021, from <http://es.fmuser.net/content/?8773.html>
- [15] 3GPP TR 37.885 V 15.3.0 (2019) *Study on evaluation methodology of new Vehicle-to-Everything (V2X) use cases for LTE and NR;(Release 15)*
- [16] *Maximum Coupling Loss (MCL) and Maximum Path Loss (MPL) - Techplayon*. (n.d.). Retrieved October 30, 2021, from <https://www.techplayon.com/maximum-coupling-loss-mcl-and-maximum-path-loss-mpl/>
- [17] *Signal-to-interference-plus-noise ratio - Wikipedia*. (n.d.). Retrieved October 31, 2021, from https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-interference-plus-noise_ratio
- [18] *5G-LENA module / 5G LENA*. (n.d.). Retrieved October 30, 2021, from <https://5g-lena.cttc.es/>
- [19] Ramos, A., Estrada, Y., Cantero, M., Romero, J., Martín-Sacristán, D., Inca, S., Fuentes, M., & Monserrat, J. F. (n.d.). *Implementation and Calibration of the 3GPP Industrial Channel Model for ns-3*.
- [20] Ericsson. *RI-1909704 Indoor industrial channel model calibration results*. (2019).
- [21] <https://gitlab.com/andre.ramos/ns-3-inf-channel-modeling>, “*ns-3 indoor factory channel model*.”
- [22] Observatorio Nacional 5G (ON5G) “*5G e Industria 4.0 Retos y oportunidades de la cuarta revolución industrial*” (n.d.). https://digitalfuturesociety.com/app/uploads/sites/10/2020/09/INFORME-ON5G-Industria4.0_digital.pdf
- [23] Huawei “*A World of Opportunities. Top ten 5G Use Cases*” (2017) <https://www.huawei.com/en/industry-insights/outlook/mobile-broadband/insights-reports/5g-unlocks-a-world-of-opportunities>
- [24] Blackman J. “*Fold-away factories and modular assembly: Two visions of industrial 5G, one dream of digital supply*”. (2021) <https://enterpriseiotinsights.com/20190508/internet-of-things/two-visions-of-5g-factories>



- [25] Telefonica “*Telefónica y Gestamp impulsan la digitalización de la industria con un caso de uso de fábrica conectada 5G - Telefónica.*” (2021).
<https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/telefonica-y-gestamp-impulsan-la-digitalizacion-de-la-industria-con-un-caso-de-uso-de-fabrica-conectada-5g/>
- [26] 5G-Barcelona “*Casos de uso Industria 4.0 y 5G*” (2021).
<https://5gbarcelona.org/es/pilotos/industria-4-0-y-5g/>