

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

***ANÁLISIS Y AJUSTE DE UN MODELO DE  
PROPAGACIÓN GEOMÉTRICO ESTOCÁSTICO PARA  
COMUNICACIONES INALÁMBRICAS***

<b>Estudiante</b>	<i>Blanco, Andrade, Gonzalo</i>
<b>Director/Directora</b>	<i>Angueira, Buceta, Pablo Montalbán, Sánchez, Jon</i>
<b>Departamento</b>	<i>Ingeniería de Comunicaciones</i>
<b>Curso académico</b>	<i>2021-2022</i>

*Bilbao, 18, septiembre, 2022*

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>12</b>
1.1. Evolución de los sistemas de comunicaciones industriales . . . . .	13
1.2. Retos y dificultades en las comunicaciones inalámbricas industriales . . . . .	13
1.3. Modelos de canal actuales para comunicaciones inalámbricas en entornos industriales . . . . .	14
1.4. Modelos geométrico-estocásticos: 3GPP SCM, WINNER y QuaDRiGa . . . . .	16
<b>2. Objetivos</b>	<b>18</b>
<b>3. Beneficios</b>	<b>19</b>
3.1. Beneficios técnicos . . . . .	19
3.2. Beneficios económicos . . . . .	20
<b>4. Metodología</b>	<b>21</b>
4.1. Resumen de la metodología . . . . .	21
4.2. Materiales . . . . .	22
4.3. Fase I: Definición del proyecto y estudio del estado del arte . . . . .	22
4.3.1. Definición del problema . . . . .	22
4.3.2. Estudio del estado arte . . . . .	23
4.3.3. Elección del modelo de propagación . . . . .	24
4.4. Fase II: Análisis del modelo de WINNER II . . . . .	24
4.4.1. Funcionamiento del modelo . . . . .	24
4.4.2. Implementación y simulación del modelo . . . . .	27
4.5. Fase III: QuaDRiGa: estudio e implementación del modelo . . . . .	30
4.6. Fase IV: Estudio y selección de una base de datos . . . . .	31
4.7. Fase V: Ajuste del modelo . . . . .	32
4.8. Fase VI: Validación y resultados . . . . .	32

<b>5. Análisis del modelo de partida</b>	<b>33</b>
5.1. Principios físicos del modelo . . . . .	33
5.1.1. Multitrayecto: definición y caracterización . . . . .	34
5.1.2. Variabilidad temporal y espacial del canal . . . . .	35
5.1.3. Correlación de parámetros: <i>drifting</i> y suma de sinusoides (SoS) . . . . .	36
5.2. Estructura del modelo . . . . .	37
5.2.1. Descripción de clases y métodos . . . . .	37
5.3. Diagrama de flujo del modelo . . . . .	42
<b>6. Datos empíricos</b>	<b>44</b>
6.1. Descripción de la base de datos . . . . .	44
6.1.1. Estructura de la base de datos . . . . .	45
6.1.2. Metodología de la campaña de medidas . . . . .	46
6.1.3. Procesado de las medidas . . . . .	48
<b>7. Ajuste del modelo</b>	<b>50</b>
7.1. Motivación del ajuste y validación del modelo . . . . .	50
7.2. Análisis del escenario a simular . . . . .	50
7.3. Construcción del modelo . . . . .	52
7.3.1. Parámetros generales de simulación . . . . .	52
7.3.2. Configuración de las antenas . . . . .	54
7.3.3. Definición del layout . . . . .	54
7.3.4. Definición de la trayectoria y los segmentos . . . . .	55
7.3.5. Configuración de los archivos de escenario . . . . .	60
7.4. Validación del modelo. Resultados . . . . .	65
<b>8. Planificación del proyecto</b>	<b>70</b>
8.1. Definición de paquetes de trabajo y tareas . . . . .	70
8.2. Diagrama de Gantt . . . . .	71

<b>9. Conclusiones</b>	<b>73</b>
<b>10. Bibliografía</b>	<b>74</b>

# Índice de figuras

1.	Clasificación de modelos de comunicación inalámbricos. . . . .	12
2.	Evolución histórica de las comunicaciones industriales. [5] . . . . .	13
3.	Modelos de canal ajenos a 3GPP. [7] . . . . .	15
4.	Comparación cualitativa de familias de modelos de canal en función de tres criterios: precisión, generalidad y simplicidad. [8] . . . . .	16
5.	Evolución de los modelos geométrico-estocásticos. [1] . . . . .	17
6.	Resumen de la metodología. . . . .	21
7.	Generación de los coeficientes de canal en WINNER. [4] . . . . .	26
8.	Matriz de coeficientes de canal en WINNER. . . . .	26
9.	Layout de una configuración MIMO en el modelo de WINNER. . . . .	29
10.	Respuesta impulsional del canal en el modelo de WINNER. . . . .	30
11.	Esquema del modelo de QuaDRiGa. [1] . . . . .	34
12.	Modelo de Saleh-Valenzuela. [10] . . . . .	34
13.	Segmentos en la trayectoria de un terminal en movimiento. [1] . . . . .	36
14.	Transición entre segmentos en QuaDRiGa. [1] . . . . .	37
15.	Parámetros para la creación de una antena parabólica. [1] . . . . .	38
16.	Visualización de un layout con un transmisor y un receptor. La posición del transmisor fija está marcada en rojo. Las diferentes posiciones que toma el receptor en su trayecto se marcan en azul. . . . .	40
17.	Proceso de generación y actualización de parámetros. . . . .	41
18.	Clases del modelo de QuaDRiGa. . . . .	41
19.	Diagrama de flujo del modelo de QuaDRiGa. [1] . . . . .	42
20.	Archivo de configuración del escenario Berlin UMa LOS. [1] . . . . .	42
21.	Estructura de la base de datos del NIST. . . . .	45
22.	Instrumentación y configuración para la toma de medidas. . . . .	46
23.	Contenido de un archivo de medidas: (a) IQData , (b) IQData Range, (c) IQData Timing, (d) Strct Metadata. . . . .	47

24.	Resultados del post-procesado de las medidas. [17]	49
25.	Plano de la planta de ensamblaje de vehículos, «outer loop». [17]	51
26.	Ficheros de medidas correspondientes a la planta de ensamblaje de vehículos [15]. Recuadrado en rojo, el archivo seleccionado para el ajuste del modelo.	52
27.	Resumen del proceso de construcción del modelo.	52
28.	Recorrido real y aproximado del receptor en QuaDRiGa.	55
29.	Posibles transiciones entre segmentos.	57
30.	Contenido del archivo AAPlantD2_5GHz_TX1_vpol_run1_pp_channel_stats.mat	58
31.	Clasificación LOS/NLOS de cada respuesta realizada por el NIST.	58
32.	Contenido de un archivo de medidas: (a) Tamaño de ventana: 17 muestras , (b) Tamaño de ventana: 51 muestras, (c) Tamaño de ventana: 171 muestras, (d) Tamaño de ventana: 511 muestras.	59
33.	Layout compuesto por 11 segmentos.	60
34.	Layout compuesto por 40 segmentos.	61
35.	Medidas de path loss extraídas del NIST.	64
36.	Resultados de la 1 <sup>a</sup> aproximación: (a) Factor K en LOS, (b) Factor K en NLOS, (c) Delay spread, (d) Mean delay	66
37.	Modificación del escenario de NIST para mejorar la estimación del factor K.	67
38.	Resultados de la 2 <sup>a</sup> aproximación: (a) Factor K en LOS, (b) Factor K en NLOS, (c) Delay spread, (d) Mean delay	68
39.	Path loss en función de la distancia TX-RX: (a) Simulación , (b) Medidas empíricas	69
40.	Diagrama de Gantt.	72

## Índice de tablas

1.	Parámetros tabulados según el escenario. [4]	25
2.	Comparativa de las principales características de las bases de medidas de campo.	32
3.	Parámetros de un archivo de configuración de escenario.	61
4.	Resumen de resultados procedentes del NIST.	62
5.	Distribuciones estadísticas de los ángulos.	63
6.	Parámetros del modelo para el archivo de escenario.	63
7.	Distancias de decorrelación.	64
8.	Comparativa de estadísticos entre datos empíricos y resultados de las simulaciones.	68

## Lista de acrónimos

<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>5G NR URLLC</b>	5G New Radio Ultra-Reliable Low Latency Communications
<b>ASA</b>	Azimuth angle Spread of Arrival
<b>ASD</b>	Azimuth angle Spread of Departure
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>CRAWDAD</b>	A Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth
<b>DS</b>	Delay Spread
<b>EHU</b>	Euskal Herriko Unibertsitatea
<b>ESA</b>	Elevation angle Spread of Arrival
<b>ESD</b>	Elevation angle Spread of Departure
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>ISM</b>	Industrial Scientific Medical
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>KF</b>	K Factor
<b>LOS</b>	Line of Sight
<b>LSP</b>	Large Scale Parameters
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>mmWave</b>	Milimetre Wave
<b>NIST</b>	National Institute of Standards and Technology
<b>NLOS</b>	Non Line of Sight
<b>O2I</b>	Outdoor To Indoor
<b>PL</b>	Path Loss
<b>PROFIBUS</b>	Process Field Bus
<b>QuaDRiGa</b>	QUasi Deterministic RadIo channel GenerAtor
<b>SCM</b>	Spatial Channel Models
<b>SCME</b>	Spatial Channel Model Extended
<b>SF</b>	Shadow Fading



**SoS** Sum of Sinusoids  
**SSP** Small Scale Parameters  
**TR** Technical Report  
**UCA** Uniform Circular Array  
**UMa** Urban Macro Cell  
**UWB** Ultra Wide Band  
**WINNER** Wireless World Initiative New Radio  
**XPR** Cross Polarization Ratio

---

## Resumen

En este trabajo se ha analizado, implementado y ajustado un modelo de propagación para comunicaciones inalámbricas en entornos industriales. El proyecto se ha basado en el modelo de canal de QuaDRiGa [1], un modelo de tipo geométrico-estocástico cuyas características se alinean con los modelos de canal definidos por 3GPP para comunicaciones 5G entre 0.5 y 100 GHz. Esta clase de modelos están llamados a jugar un rol esencial en la definición y estandarización de futuros canales de propagación. Sin embargo, por el momento, el uso de estos modelos no se encuentra del todo extendido, debido a la ausencia de una metodología clara y a la existencia de otros modelos más sencillos pero no tan completos.

En este proyecto, se define la naturaleza de estos modelos así como las ventajas que ofrecen frente a otros más convencionales. Además, se establece una metodología para la implementación, ajuste y validación de un modelo geométrico-estocástico como lo es QuaDRiGa. Finalmente, se ha calibrado dicho modelo mediante medidas de campo extraídas de escenarios industriales, disponibles en bases de datos abiertas. Mediante la simulación del modelo implementado, se ha conseguido determinar la efectividad y precisión del mismo.

**Palabras clave:** QuaDRiGa, propagación, geométrico-estocástico, medidas de campo, Industria 4.0

---

## Laburpena

Lan honetan, industria-inguruneetan hari gabeko komunikazioetarako hedapen-eredu bat aztertu, inplementatu eta doitu da. Proiektua QuaDRiGaren kanal-ereduan oinarritu da. Eredu geometriko-estokastikoa da, eta 3GPP-k 0.5 eta 100 GHz arteko komunikazioetarako definitutako kanal-ereduekin lerrokatzen dira haren ezaugarriak. Eredu mota horiek funtsezko rola dute etorkizuneko hedapen-kanalak definitzeko eta estandarizatzeko. Hala ere, oraingoz, eredu horien erabilera ez dago erabat zabaldua, metodologia argirik ez dagoelako eta beste eredu sinpleago batzuk daudelako, baina ez hain osoak.

Proiektu honetan, eredu horien izaera definitzen da, baita beste eredu konbentzionalagoen aurrean eskaintzen dituzten abantailak ere. Gainera, metodologia bat ezartzen da Quadriga bezalako eredu geometriko estokastiko bat inplementatzeko, doitzeko eta baliozkotzeko. Azkenik, eredua kalibratu da, datu-base irekietan eskuragarri dauden industria-agertokietatik ateratako landa-neurrien bidez. Inplementatutako ereduaren simulazioaren bidez, ereduaren eraginkortasuna eta zehaztasuna zehaztea lortu da.

**Gako-hitzak:** QuaDRiGa, hedapena, geometriko-estokastikoa, landa-neurriak, Industria 4.0

---

## Summary

This project consists in the analysis, implementation and tuning of a propagation channel model for wireless communications in industrial environments. This work is based on the QuaDRiGa channel model, a geometry-based stochastic model, well aligned with the characteristics of 3GPP 5G channel models in the 0.5 -100 GHz frequency range. This kind of models are meant to play a key role in the definition and standardization of future propagation channel models. However, at this moment, the use of these models is not as spread as it should, probably due to the lack of a clear methodology and the existence of simple, yet not that accomplished models.

In this project, not only the nature of this model is defined but also the advantages over more conventional propagation models. Moreover, this work establishes a methodology for implementing, tuning and validating a geometry-based stochastic model of the likes of QuaDRiGa. Finally, this model has been calibrated using field measurements extracted from industrial environments, available via open source databases. By simulating the implemented model, it has been possible to determine the effectivity and precision in performance of such model.

**Keywords:** QuaDRiGa, propagation, geometry-based stochastic, field measurements, Industry 4.0

# 1. Introducción

Los modelos de propagación son una parte esencial en el diseño de los sistemas de comunicaciones, permitiendo estimar el canal por el cual se transmite la señal de interés. Esto hace que se puedan diseñar sistemas adaptados a las circunstancias de cada medio.

Los modelos de canal cobran especial relevancia en las comunicaciones inalámbricas, donde el canal presenta una mayor variabilidad que en las comunicaciones cableadas. Factores como las pérdidas por espacio libre, el multitrayecto, las interferencias y el efecto Doppler afectan a la calidad de las comunicaciones y deben ser, por tanto, estudiados y compensados a través de un diseño eficiente de nuestro sistema. Además, la llegada de nuevas tecnologías inalámbricas, como el 5G, plantean nuevos escenarios y casos de uso que requieren de modelos de propagación novedosos. En la actualidad, existen diferentes familias de modelos de canal para comunicaciones inalámbricas. A grandes rasgos, los modelos de propagación se pueden agrupar en tres tipos: empíricos, geométrico-estocásticos y deterministas.

- Modelos empíricos: modelos de propagación basados en medidas de campo in-situ. A partir de datos empíricos, se desarrollan un conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento del canal. Los modelos de Okumura-Hata [2][3] para entornos urbanos son un ejemplo de modelos empíricos.
- Modelos geométrico-estocásticos: basados en características geométricas abstractas del entorno y en funciones de densidad de probabilidad que describen las características del canal, véanse los modelos de WINNER[4] o los modelos de COST entre otros.
- Modelos deterministas: basados en una descripción detallada del entorno físico. En los modelos de *ray-tracing*, se simula la trayectoria de los rayos a lo largo de un escenario minuciosamente definido. Este tipo de modelos se conocen como *site-specific*, es decir, para cada escenario es necesario redefinir el entorno por completo.

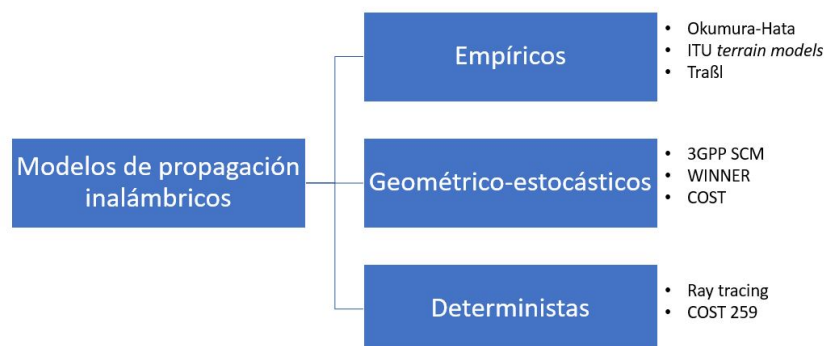


Figura 1: Clasificación de modelos de comunicación inalámbricos.

## 1.1. Evolución de los sistemas de comunicaciones industriales

La evolución de las comunicaciones en entornos industriales ha estado inevitablemente ligada a las tendencias tecnológicas de la época y al desarrollo de los protocolos de comunicaciones. Inicialmente, los sistemas de comunicaciones industriales eran cableados, desde los primeros sistemas de buses de campo como PROFIBUS hasta la llegada de las redes Ethernet. Los sistemas de transmisión por cable han sido la solución más adoptada por la falta de alternativas viables y por ofrecer múltiples ventajas como fiabilidad, velocidad, seguridad y una mayor resistencia ante las inclemencias del medio. En cambio, este tipo de comunicaciones presentan un coste de instalación y mantenimiento elevados, problemas en términos de escalabilidad y una flexibilidad reducida.

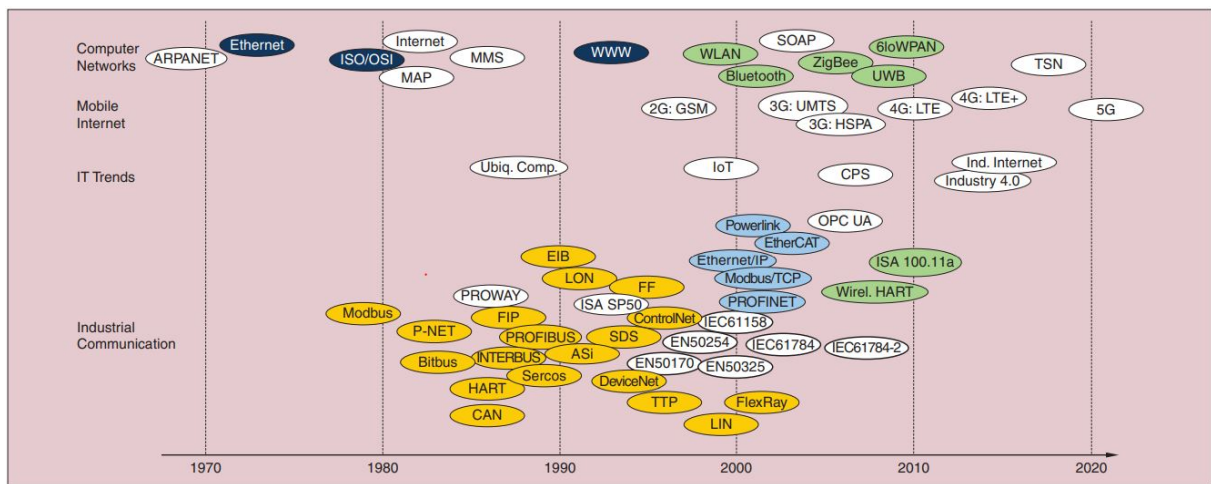


Figura 2: Evolución histórica de las comunicaciones industriales. [5]

Por el contrario, las comunicaciones inalámbricas poseen una serie de ventajas sobre las cableadas. Son flexibles, escalables y adaptables a un amplio rango de escenarios. No obstante, también presentan varias desventajas como una menor fiabilidad y seguridad, factores críticos en cualquier sistema de transmisión. Además, las señales que viajan por un medio inalámbrico son más susceptibles al entorno de propagación. Sin embargo, el avance de las tecnologías inalámbricas y los casos de uso planteados en la Industria 4.0 están abriendo nuevos horizontes hacia el uso de comunicaciones *wireless* en entornos industriales.

## 1.2. Retos y dificultades en las comunicaciones inalámbricas industriales

Actualmente, la industria se encuentra en un período de transición hacia las tecnologías inalámbricas. Sin embargo, por el momento, siguen existiendo dificultades a la hora de su implementación debido a varios factores. En primer lugar, los sistemas industriales establecen requisitos muy estrictos en términos de seguridad y fiabilidad<sup>1</sup>. Esto se traduce

<sup>1</sup>En inglés, se distingue entre *security* y *safety*. En este caso, *security* está relacionado con la ciberseguridad de los sistemas, mientras que *safety* se refiere a la fiabilidad y prevención de riesgos.

en umbrales de latencia y fiabilidad difíciles de alcanzar con los protocolos de capa física actuales. Además, las comunicaciones inalámbricas son más vulnerables a ataques externos, poniendo en peligro la integridad de los sistemas. Otro de los retos a superar son las condiciones del entorno donde se despliegan los sistemas inalámbricos. Como se ha mencionado anteriormente, el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas depende en gran medida del medio. En particular, los entornos donde se desarrolla la actividad industrial (fábricas, plantas, naves industriales, etc.) son especialmente hostiles, dificultando la implementación de cualquier sistema inalámbrico. Una dependencia mayor del medio de propagación revela la importancia de modelar de manera más precisa el entorno. Por este motivo, otro de los desafíos es desarrollar modelos de propagación precisos para el diseño y validación de los sistemas. Dicho esto, las comunicaciones cableadas siguen siendo la opción más apropiada en ciertos casos. Esto no solo ralentiza la adopción de los sistemas *wireless* sino que obliga a una compatibilidad entre sistemas cableados e inalámbricos.

Por estos motivos, existe una carencia de sistemas inalámbricos establecidos para su aplicación en la industria. Algunos de los principales candidatos son la familia de protocolos IEEE 802 o el proyecto WirelessHP, que aspira a desarrollar un sistema que cumpla con las especificaciones requeridas [6]. Asimismo, otro de los sistemas candidatos es el estándar 5G New Radio Ultra-Reliable Low Latency Communications (5G NR URLLC). Esta variante de 5G ha sido diseñada para aplicaciones que requieran de comunicaciones fiables y de baja latencia. En un principio, este protocolo podría cubrir los casos de uso planteados en la industria. Sin embargo, las labores de estandarización no están lo suficientemente avanzadas para validar esta tecnología. Este trabajo explora la implementación de un modelo de canal que ayude a la validación y futura estandarización de un sistema de comunicaciones inalámbrico basado en 5G NR URLLC en entornos industriales.

### 1.3. Modelos de canal actuales para comunicaciones inalámbricas en entornos industriales

En el apartado anterior, se alude a la importancia de modelar de forma precisa el medio de propagación. Actualmente, no son muchos los modelos de canal que cubran los casos de uso industriales de forma rigurosa. En un esfuerzo por estandarizar los modelos de canal para 5G, 3GPP ha elaborado el informe técnico TR 38.901, titulado «*5G study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*». El objetivo de este informe es «ayudar a modelar y evaluar el rendimiento de técnicas de capa física empleando los modelos de canal apropiados»[7]. En el documento se detallan las características del modelo de canal propuesto. Además, se hace una recopilación de modelos de propagación ajenos a 3GPP. En la Figura 3 se enumeran dichos modelos.

**Groups and projects with channel models:**

- METIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society)
- MiWEBA (Millimetre-Wave Evolution for Backhaul and Access)
- ITU-R M
- COST2100
- IEEE 802.11
- NYU WIRELESS: interdisciplinary academic research center
- Fraunhofer HHI has developed the QuaDRiGa channel model, Matlab implementation is available at <http://quadriga-channel-model.de>

Figura 3: Modelos de canal ajenos a 3GPP. [7]

Por tanto, ahora la pregunta radica en qué modelo elegir. Para ello, viene bien recordar la clasificación de modelos de canal al principio de esta introducción. En líneas generales, se puede distinguir entre modelos empíricos, geométrico-estocásticos y deterministas. Analizando primero estas familias, se reduce el número de posibles modelos a considerar. Ferrand *et al.* [8] expone tres criterios a tener en cuenta a la hora de elegir un modelo de propagación.

- Precisión. ¿Cómo de exacto es el modelo frente a la realidad?
- Generalidad. ¿Cómo de típica es la representación del modelo respecto a un escenario?
- Simplicidad. ¿Cómo de simple es simular el modelo? ¿Cuántos parámetros hacen falta?

Teniendo estos criterios en cuenta, se debe reflexionar acerca de las características que debe tener nuestro modelo de canal. En primer lugar, este modelo pretende caracterizar entornos industriales. Por su naturaleza, estos entornos son muy variables: máquinas que se cambian de sitio, personas que se mueven, objetos metálicos reflectantes, etc. Los modelos deterministas deben trazar un mapa exacto del entorno, definiendo la posición, los materiales y las propiedades eléctricas de los diferentes objetos. Obviando el esfuerzo que se debe llevar a cabo para capturar y modelar todos estos parámetros, es fácil deducir que este modelo funcionará mejor para entornos poco variables y que cuanto más cambie el entorno que se ha definido inicialmente, más se alejará el modelo de la realidad. Por tanto, se descartan los modelos deterministas por su poca generalidad y su elevada complejidad.

En la actualidad, existen pocos modelos empíricos diseñados para la caracterización del medio industrial y los que existen, no siguen las pautas recomendadas por 3GPP para la definición de modelos de propagación en 5G. Aún más, el modelo de canal definido por 3GPP es una extensión de los modelos 3GPP Spatial Channel Models (SCM), precursores de los modelos geométrico-estocásticos actuales. Además, esta familia de modelos poseen un equilibrio entre los tres criterios de elección: cuentan con el suficiente número de



parámetros para representar el medio de manera precisa, están basados en distribuciones estadísticas que describen los escenarios de forma más abstracta dando lugar a modelos más generales y son relativamente simples en su uso e implementación. Por estos motivos, centraremos la atención en este conjunto de modelos. En la Figura 4, se representan diferentes familias de modelos en términos de los criterios descritos.

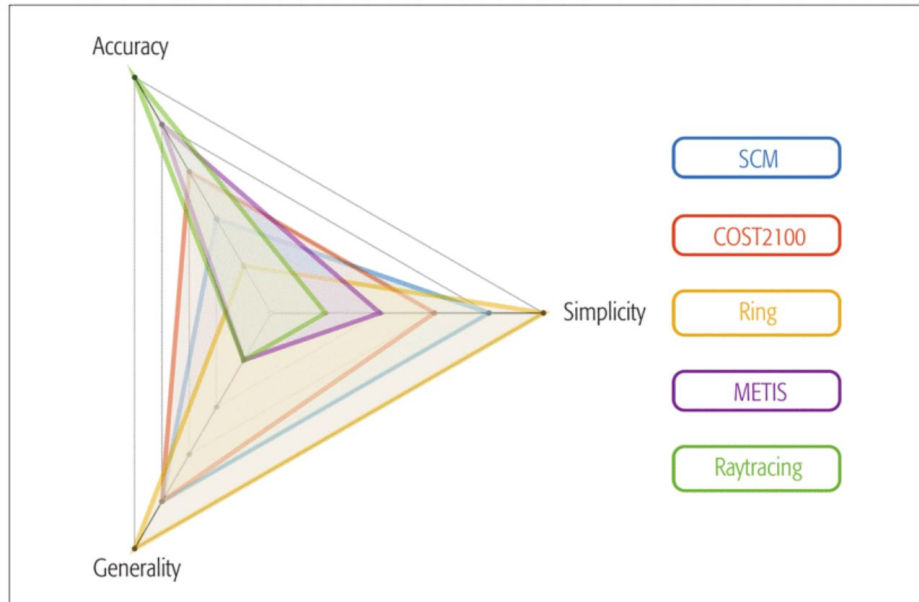


Figura 4: Comparación cualitativa de familias de modelos de canal en función de tres criterios: precisión, generalidad y simplicidad. [8]

#### 1.4. Modelos geométrico-estocásticos: 3GPP SCM, WINNER y QuaDRiGa

Actualmente, existen una variedad de modelos geométrico-estocásticos entre los que elegir. En este caso, se ha decidido profundizar en aquellos basados en los modelos desarrollados por 3GPP.

En el año 2004, 3GPP definió el primer modelo para comunicaciones más allá de 3G (Beyond 3G). Este modelo conocido como Spatial Channel Model (SCM) y su extensión Spatial Channel Model Extended (SCME) sentarían las bases de los modelos actuales. Todos ellos parten de los mismos conceptos fundamentales. La respuesta impulsional del canal se calcula a través del método de suma de sinusoides y se definen componentes individuales de multitrayecto cuyas propiedades vienen dadas por una serie de parámetros espaciales: ángulos de salida desde el transmisor y de llegada al receptor, retardos y potencia. Además, estos parámetros son extraídos de distribuciones estadísticas, lo que confiere el carácter estocástico al modelo. Estas distribuciones vienen asociadas a medidas en escenarios concretos. En años posteriores, se han ido desarrollando una serie de modelos derivados de SCM. Del proyecto WINNER, resultan los modelos WINNER I, WINNER II y WINNER +. Esta familia de modelos mejora los modelos SCM, incorporando nuevos escenarios y funcionalidades.

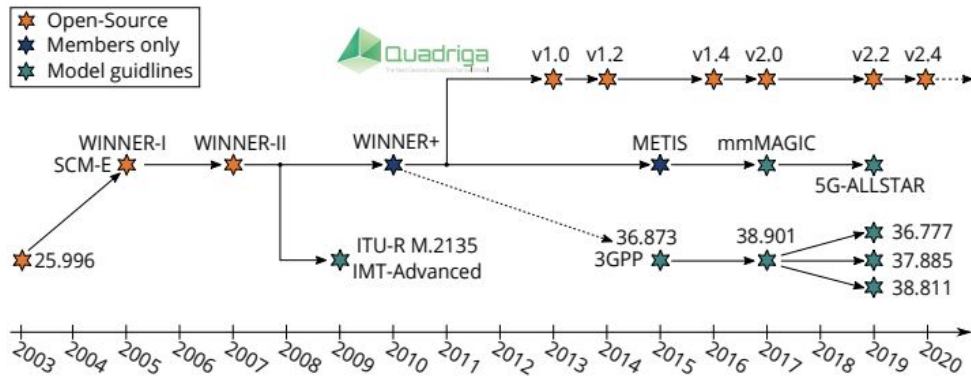


Figura 5: Evolución de los modelos geométrico-estocásticos. [1]

Sin embargo, la nueva generación de protocolos de comunicaciones requiere de modelos de canal más complejos. A partir de WINNER+, surge el proyecto QuaDRiGa, impulsado por el Fraunhofer Heinrich Hertz Institute. Este modelo está fuertemente basado en los modelos de 3GPP más recientes. De hecho, QuaDRiGa se define como la implementación de referencia para el modelo 3GPP 38.901, cubriendo las deficiencias de modelos anteriores e incorporando entre otras cosas: un modelo de canal completamente tridimensional, un mayor rango de frecuencias y anchos de banda, un mayor número de escenarios (entre ellos uno de entorno industrial), consistencia espacial y temporal, etc.

En resumen, en este trabajo se ha seleccionado QuaDRiGa como modelo de referencia a implementar debido a su fuerte relación con los modelos de 3GPP, por sus funcionalidades que permiten la simulación de nuevos protocolos de comunicación como 5G NR URLLC y la existencia de escenarios basados en medidas en entornos industriales.

## 2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo el estudio y definición de un modelo de canal para comunicaciones inalámbricas en entornos industriales basado en bases de datos de medidas de campo.

Este objetivo general se puede especificar a través de un conjunto de objetivos técnicos específicos que se deben cumplir para la consecución del trabajo. Estos objetivos técnicos son los siguientes:

- En primer lugar, se busca disponer de una visión completa y exhaustiva de las diferentes familias de modelos de propagación existentes para comunicaciones inalámbricas.
- Entre todos los modelos disponibles en la bibliografía, se debe identificar el conjunto de modelos más apropiado para nuestro caso de uso, es decir, comunicaciones en entornos industriales.
- Es asimismo esencial disponer de un análisis detallado del modelo seleccionado, tanto de los principios físicos en los que se basa como en las opciones de implementación del mismo, identificando los bloques de funcionamiento correspondientes. En línea con la lista de modelos candidatos, es igualmente relevante disponer de criterios objetivos que permitan elegir la herramienta adecuada de simulación.
- Se pretende realizar una búsqueda de alternativas de bases de datos de medidas empíricas en abierto para poder seleccionar una base de datos abierta con medidas de campo en entornos industriales.
- Se busca definir una metodología de optimización que ajuste el modelo de canal según los datos empíricos de la base de datos.
- Finalmente, es necesario validar el modelo de canal con las medidas de campo extraídas de la base de datos correspondiente.

Como resultado final del proyecto se espera disponer de una herramienta en MATLAB que implemente el modelo de canal que se haya validado con datos empíricos, obtenidos de las mismas bases de datos que han permitido optimizar el modelo.

## 3. Beneficios

Las comunicaciones inalámbricas en entornos industriales están experimentando un auge en los últimos años y se presentan como la siguiente gran aplicación de las tecnologías inalámbricas [6]. En las primeras fases de diseño, es crucial disponer de modelos teóricos que representen de manera precisa el sistema. Un modelo de propagación adecuado puede reportar grandes beneficios tanto técnicos como económicos.

### 3.1. Beneficios técnicos

QuaDRiGa es un modelo geométrico estocástico y, como tal, se trata de un modelo flexible, permitiendo simulaciones tanto a nivel de sistema como a nivel de link. Además, QuaDRiGa se considera un modelo intermedio entre los modelos empíricos y los modelos más deterministas como el *ray-tracing*. Esto significa que es posible modelar tanto efectos de canal (*multipath*, *delay*, *fading*, etc.) como el escenario en sí (trayectoria, posición de los terminales, configuración de las antenas, etc.). Sin embargo, no es necesario conocer el escenario con tanto detalle como en los modelos deterministas. Esto implica que la complejidad y el coste computacional del modelo se reducen considerablemente.

Asimismo, QuaDRiGa cuenta con una gran variedad de escenarios basados en campañas de medidas en diferentes entornos (O2I, Indoor, Urban, Satellite, etc.). Esto permite simular un número elevado de casos de uso, combinando varios escenarios en una misma simulación. Además, QuaDRiGa cuenta con un escenario específico para entornos industriales basados en medidas de campo hasta 6 GHz. Es más, el modelo incluye una serie de funcionalidades enfocadas hacia la nueva generación de comunicaciones inalámbricas, en las que se enmarca este trabajo.

Otro de los beneficios a considerar es una mayor concordancia entre el modelo y la realidad, que conlleva una mayor precisión en el diseño del sistema. Esto se traduce en una menor probabilidad de retorno a la fase de diseño por el uso de un modelo teórico poco acertado. Por último, QuaDRiGa se trata de un software libre cuya implementación se ha desarrollado tanto en MATLAB como para Octave <sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>La última versión de QuaDRiGa se encuentra disponible en: <https://quadriga-channel-model.de/>

## 3.2. Beneficios económicos

Los beneficios técnicos anteriormente mencionados derivan en una serie de beneficios económicos.

En primer lugar, disponer de un modelo flexible y rápidamente adaptable a cambios en el escenario supone un ahorro en tiempo y por tanto en costes. En segundo lugar, la fase de conversión a producto tiene más posibilidades de llevarse a cabo de manera exitosa ya que los modelos teóricos con los que se trabajan son más precisos. De la misma forma, esto implica un menor coste en la producción del sistema. Además, la misma herramienta de simulación puede ser adaptada rápidamente para cubrir una variedad de escenarios. No es necesario desarrollar una nueva herramienta o paradigma de simulación para cubrir nuevos casos de uso, ahorrando de nuevo en tiempo y costes. Por último, QuaDRiGa es código abierto por lo que no es necesario el pago de una licencia para su uso, siempre que sea para fines educativos, de investigación o de estandarización [1].

## 4. Metodología

### 4.1. Resumen de la metodología

En primer lugar, tras definir el problema a resolver, se ha llevado a cabo un estudio del estado del arte, tanto de los modelos de canal para comunicaciones inalámbricas actuales como del contexto de las comunicaciones en el ámbito industrial. Acto seguido, se han seleccionado algunos modelos que puedan ser empleados en entornos industriales. A continuación, como paso preliminar al estudio e implementación del modelo de QuaDRiGa, se ha decidido estudiar el modelo de WINNER II, por ser un modelo menos complejo con unas características similares a nuestro modelo de referencia. Esto ha requerido de un análisis exhaustivo de los principios físicos en los que se basa este modelo y la implementación que se hace de los mismos. Asimismo, ha sido necesaria la identificación y comprensión de los diferentes bloques funcionales de los que se compone el modelo. Esto ha sido de gran ayuda a la hora de comprender la implementación que propone QuaDRiGa de su modelo. Seguidamente, se ha analizado el funcionamiento de QuaDRiGa de forma análoga al modelo de WINNER II, es decir, comprendiendo la base teórica del modelo así como la implementación que se procura. La complejidad del modelo ha obligado a un estudio más profundo del mismo. Una vez comprendido el funcionamiento del modelo, se han establecido una serie de objetivos a alcanzar con el modelo, acotando los diferentes casos de uso y escenarios a abarcar con QuaDRiGa, limitando así el gran número de parámetros y funciones a configurar. El ajuste y validación del modelo se han llevado a cabo empleando bases de datos abiertas de medidas de campo. Previamente, por tanto, se han examinado las diferentes bases de datos disponibles y se ha elegido una acorde a nuestros intereses. El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EEUU (NIST) pone a disposición una base de datos con medidas de campo así como el software necesario para su posterior procesado. Por último, el trabajo se ha concluido con una comparativa entre las medidas de campo extraídas de la base de datos y el modelo implementado para determinar la validez del mismo.

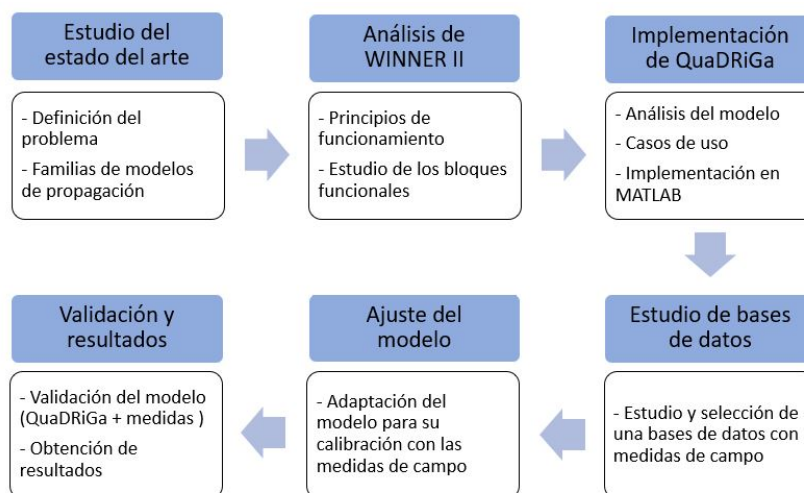


Figura 6: Resumen de la metodología.

## 4.2. Materiales

En esta sección se recogen los materiales utilizados durante el desarrollo del proyecto. Al tratarse de un trabajo basado en software, los materiales empleados son esencialmente las herramientas de simulación y los programas relacionados así como los recursos bibliográficos necesarios para el avance del proyecto.

En primer lugar, la herramienta de simulación que se ha decidido emplear ha sido MATLAB. Este programa es un software de pago cuya licencia de uso se ha conseguido a través de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) con una cuenta de estudiante. Por otra parte, la implementación del modelo de QuaDRiGa ha sido publicado para su libre uso por el Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, con la condición de no ser empleado con fines comerciales. Otras implementaciones abiertas que se han utilizado de la misma forma son la implementación del modelo de WINNER y el código para el procesado de los resultados de las campañas de medidas llevadas a cabo por el NIST.

Además, durante este trabajo ha sido necesario el acceso a un gran número de recursos académicos y publicaciones científicas. El acceso a plataformas como IEEE ha sido otorgado, de nuevo, a través de la EHU. En cuanto a materiales propiamente físicos, solamente ha sido necesario un ordenador personal donde desarrollar el software.

Existen algunas alternativas a los softwares con licencia de pago como MATLAB. La alternativa más extendida es un software libre llamado GNU Octave. La principal ventaja es su similar sintaxis y su licencia gratuita. Además, desde su versión 2.0, QuaDRiGa cuenta con una implementación en Octave, por lo que el desarrollo del proyecto podría llevarse a cabo sin problema con esta herramienta. La gran popularidad de MATLAB, la experiencia previa de uso y contar con la licencia de pago proporcionada por la EHU hace que se haya optado por esta opción para desarrollar el proyecto.

## 4.3. Fase I: Definición del proyecto y estudio del estado del arte

La primera fase del proyecto consiste en definir el problema que se quiere resolver. Es importante definir el alcance que va a tener el trabajo, diseñar una solución factible y acorde con los recursos de los que se dispone y plantear una metodología de trabajo adecuada. Esta fase es especialmente importante durante las primeras semanas de trabajo aunque son factores recurrentes a lo largo de todo el desarrollo del proyecto. Por este motivo, se han celebrado reuniones periódicas entre alumno y directores del proyecto para ir redefiniendo los aspectos clave de este trabajo.

### 4.3.1. Definición del problema

El primer paso es, como se ha dicho, la descripción de un problema que requiera de una solución. En el caso que nos ocupa, existe una carencia de modelos de canal para comunicaciones inalámbricas en entornos industriales. Esto hace que sea necesario diseñar

nuevos modelos de propagación que permitan modelar el medio industrial. Por el momento, existen soluciones parciales pero no se ha dado con un modelo que consiga representar de manera precisa las características del medio de interés. Por otra parte, 3GPP ha descrito un modelo de canal en 5G para comunicaciones entre 0.5 y 100 GHz. La idea, por tanto, es diseñar un modelo de propagación que permita modelar las comunicaciones inalámbricas en entornos industriales. Adicionalmente, se quiere validar el modelo diseñado con una serie de medidas de campo tomadas en entornos industriales. De esta forma, se puede comprobar la efectividad del modelo diseñado a la hora de modelar un escenario industrial. Una vez definido el problema a resolver, se extraen una serie de objetivos primarios y secundarios que ayudarán a evaluar el progreso del proyecto. Estos objetivos se recogen en el apartado 2.

#### 4.3.2. Estudio del estado arte

Un estudio cuidadoso de los precedentes del proyecto es esencial por diversos motivos:

- Entender el contexto del problema y establecer el conocimiento propio que se tiene sobre el tema. ¿En qué ámbito se enmarca el problema? ¿Tengo los conocimientos adecuados para la resolución del mismo?
- Descubrir potenciales soluciones al problema. ¿Existen ya soluciones al problema que se plantea? ¿Qué avances se están llevando a cabo en el campo de estudio? ¿Qué beneficios puede tener la solución que se plantea?
- Encontrar las herramientas adecuadas. Una vez se tiene una idea general de la resolución del problema, ¿de qué herramientas se dispone para atacar el problema? ¿Es factible una solución con los recursos disponibles?

Todas estas cuestiones deben resolverse en las fases iniciales del proyecto para garantizar el éxito del trabajo. No obstante, es habitual la corrección de algunas de las suposiciones efectuadas en el planteamiento inicial del proyecto.

En el caso que nos ocupa, lo primero ha sido hacer un repaso de los diferentes efectos de canal presentes en las comunicaciones inalámbricas y las diferentes maneras de modelarlos: *delay spread*, *fading*, efecto Doppler, etc. Uno de los principales efectos a modelar en entornos *indoor* es el multitrayecto o *multipath*. El modelo de Saleh-Valenzuela es uno de los modelos más comunes para representar este efecto. Una explicación más detallada del modelo se incluye en el apartado 5.1.1.

Tras el estudio de los efectos de canal, se ha procedido a estudiar el contexto del problema. Es decir, comprender por qué es necesario resolver el problema y cuál es la situación actual del mismo. Para el primer punto, se han estudiado los requisitos que se imponen sobre los sistemas de comunicaciones inalámbricas industriales. En [6], se explican los potenciales beneficios de las comunicaciones inalámbricas y se enfatizan los exigentes requisitos en términos de seguridad, latencia y fiabilidad. Esto sirve para comprender que el desarrollo



de sistemas inalámbricos en estos entornos no es trivial y que una implementación exitosa pasa por una definición precisa del medio de propagación. Asimismo, para encontrar un modelo que cumpla con las especificaciones necesarias, se ha realizado un estudio del estado del arte de los principales modelos de propagación. Para esta parte, el documento de referencia ha sido el informe técnico TR 38.901 publicado por 3GPP. En este documento se detalla el modelo de canal definido por 3GPP y se sugieren algunos modelos de canal para su implementación. En el apartado 1.3 se enumeran los criterios para la elección de un modelo de canal que cumpla con los objetivos del proyecto.

### 4.3.3. Elección del modelo de propagación

Tras el estudio de los diferentes candidatos, se elige un modelo de canal para su implementación y validación. En este trabajo se ha seleccionado el modelo de QuaDRiGa con su correspondiente implementación en MATLAB. Entre las ventajas de QuaDRiGa frente a otros modelos se encuentra su gran flexibilidad, gran variedad de escenarios y las diversas mejoras que incorpora frente a modelos anteriores de similares características. Además, QuaDRiGa es la implementación de referencia para el modelo de canal de 3GPP en 5G. Esto convierte a QuaDRiGa en un modelo atractivo y con potencial en futuras estandarizaciones.

## 4.4. Fase II: Análisis del modelo de WINNER II

Uno de los modelos candidatos es el modelo de WINNER II. Este modelo es la extensión de los modelos 3GPP SCM, los predecesores de los modelos geométrico-estocástico actuales. Además, tanto el modelo de canal de 3GPP TR 38.901 como QuaDRiGa, están claramente basados en la familia de modelos de WINNER. Por lo tanto, aunque el modelo a implementar sea QuaDRiGa, se ha decidido analizar primero el modelo de WINNER II con la idea de asentar los principios básicos de este tipo de modelos, antes de proceder con modelos más complejos. Asimismo, a través del paquete «WINNER II Channel Model for Communications Toolbox», MATLAB ofrece una implementación de este modelo.

### 4.4.1. Funcionamiento del modelo

El funcionamiento del modelo se recoge en el documento «IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 v1.2 WINNER II channel models»[4]. El objetivo de este apartado no es describir en profundidad el modelo en sí, sino exponer los conceptos fundamentales que han sido de utilidad para la comprensión del modelo de WINNER y posteriormente, del modelo de QuaDRiGa.

WINNER se define como un modelo geométrico-estocástico a nivel de sistema, capaz de generar múltiples realizaciones de uno o varios canales de radio. En este modelo, se definen el entorno, los transmisores y receptores y las antenas empleadas. El principio básico del modelo es que una señal que atraviesa un medio, interactúa con los objetos que se

encuentran a su alrededor. De estas interacciones, se generan componentes adicionales de la señal, que llegan al receptor con un retardo, un ángulo y una potencia determinada. Este efecto se conoce como multitrayecto o *multipath*. A partir de esto, se puede derivar la respuesta impulsional del canal para un instante determinado.

WINNER considera que su modelo contiene «tres niveles de aleatoriedad». En primer lugar, los Large Scale Parameters (LSP) o parámetros de gran escala (*delay spread, shadow fading, angular spread, etc.*) se extraen de forma aleatoria de distribuciones estadísticas tabuladas para cada escenario. En segundo lugar, los Small Scale Parameters (SSP) o parámetros de pequeña escala (*delays, ángulos y potencias de cada componente de multitrayecto*) son también extraídos aleatoriamente a partir de los LSP. Finalmente, lo único sin fijar son las fases iniciales de los *scatterers* que, variándolas de manera aleatoria, generan diferentes realizaciones del canal. En la Tabla 1 se muestran los diferentes parámetros tabulados en función de los escenarios (A1, B1, B3, etc.). Cada escenario se corresponde con un entorno diferente: A1 *indoor*, A2 *indoor to outdoor*, B1 *micro-cell* urbano, etc.

Scenarios		A1		A2/B4/C4 <sup>a</sup>		B1		B3		C1		C2		D1		D2a
		LOS	NLOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	LOS
Delay spread (DS) log <sub>10</sub> (s)	$\mu$	-7.42	-7.60	-7.39/ -6.62 <sup>b</sup>	-7.44	-7.12	-7.53	-7.41	-7.23	-7.12	-7.39	-6.63	-7.80	-7.60	-7.4	
	$\sigma$	0.27	0.19	0.36/ 0.32 <sup>b</sup>	0.25	0.12	0.12	0.13	0.49	0.33	0.63	0.32	0.57	0.48	0.2	
AoD spread (ASD) log <sub>10</sub> (°)	$\mu$	1.64	1.73	1.76	0.40	1.19	1.22	1.05	0.78	0.90	1	0.93	0.78	0.96	0.7	
	$\sigma$	0.31	0.23	0.16	0.37	0.21	0.18	0.22	0.12	0.36	0.25	0.22	0.21	0.45	0.31	
AoA spread (ASA) log <sub>10</sub> (°)	$\mu$	1.65	1.69	1.25	1.40	1.55	1.58	1.7	1.48	1.65	1.7	1.72	1.20	1.52	1.5	
	$\sigma$	0.26	0.14	0.42	0.20	0.20	0.23	0.1	0.20	0.30	0.19	0.14	0.18	0.27	0.2	
Shadow fading (SF) [dB]	$\mu$	3	4	7	3	4	3	4	4/6 <sup>c</sup>	8	4/6 <sup>c</sup>	8	4/6 <sup>c</sup>	8	4	
	$\sigma$	7	N/A	N/A	9	N/A	2	N/A	9	N/A	7	N/A	7	N/A	7	
K-factor (K) [dB]	$\mu$	6	N/A	N/A	6	N/A	3	N/A	7	N/A	3	N/A	6	N/A	6	
	$\sigma$	6	N/A	N/A	6	N/A	3	N/A	7	N/A	3	N/A	6	N/A	6	
Cross-Correlations *	ASD vs DS	0.7	-0.1	0.4	0.5	0.2	-0.3	-0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	-0.1	-0.4	-0.1	
	ASA vs DS	0.8	0.3	0.4	0.8	0.4	-0.4	0	0.8	0.7	0.8	0.6	0.2	0.1	0.2	
	ASA vs SF	-0.5	-0.4	0.2	-0.5	-0.4	-0.2	0.2	-0.5	-0.3	-0.5	-0.3	-0.2	0.1	-0.2	
	ASD vs SF	-0.5	0	0	-0.5	0	0.3	-0.3	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	0.2	0.6	0.2	
	DS vs SF	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.7	-0.1	-0.2	-0.6	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	
	ASD vs ASA	0.6	-0.3	0	0.4	0.1	0.3	-0.3	0.1	0.3	0.3	0.4	-0.3	-0.2	-0.3	
	ASD vs K	-0.6	N/A	N/A	-0.3	N/A	0.2	N/A	0.2	N/A	0.1	N/A	0	N/A	0	
	ASA vs K	-0.6	N/A	N/A	-0.3	N/A	-0.1	N/A	-0.2	N/A	-0.2	N/A	0.1	N/A	0.1	
	DS vs K	-0.6	N/A	N/A	-0.7	N/A	-0.3	N/A	-0.2	N/A	-0.4	N/A	0	N/A	0	
	SF vs K	0.4	N/A	N/A	0.5	N/A	0.6	N/A	0	N/A	0.3	N/A	0	N/A	0	
Delay distribution		Exp	Exp	Exp	Exp	Uniform s800ms	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	
AnD and AoA distribution																
Delay scaling parameter $r_r$																
		3	2.4	2.2	3.2	—	1.9	1.6	2.4	1.5	2.5	2.3	3.8	1.7	3.8	
XPR [dB]	$\mu$	11	10	9	9	8	9	6	8	4	8	7	12	7	12	
	$\sigma$	4	4	11	3	3	4	3	4	3	4	3	8	4	8	
Number of clusters		12	16	12	8	16	10	15	15	14	8	20	11	10	8	
Number of rays per cluster		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Cluster ASD		5	5	8	3	10	5	6	5	2	6	2	2	2	2	
Cluster ASA		5	5	5	18	22	5	13	5	10	12	15	3	3	3	
Per cluster shadowing std $\zeta$ [dB]		6	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Correlation																
distance [m]	DS	7	4	21/10 <sup>b</sup>	9	8	3	1	6	40	40	40	64	36	64	
	ASD	6	5	15/11 <sup>b</sup>	13	10	1	0.5	15	30	15	50	25	30	25	
ASA	2	3	35/17 <sup>b</sup>	12	9	2	0.5	20	30	15	50	40	40	40		
SF	6	4	14/7 <sup>b</sup>	14	12	3	3	3	40	50	45	50	40	120	40	
K	6	N/A	N/A	10	N/A	1	N/A	10	N/A	12	N/A	40	N/A	40		

Tabla 1: Parámetros tabulados según el escenario. [4]

WINNER introduce también los conceptos de segmento y gota o *drop*. Si un terminal se encuentra en movimiento, el entorno de propagación irá cambiando. Los segmentos son tramos del espacio donde el terminal experimenta el mismo escenario y por lo tanto, los LSP se mantienen constantes. Sin embargo, los SSP (las propiedades individuales de cada componente de la señal), pueden ir cambiando. Por otro lado, un *drop* es la abstracción de un segmento, un instante de tiempo donde todos los parámetros se mantienen fijos, menos las fases de los rayos. WINNER es un modelo de simulación basado en gotas, donde se simulan gotas consecutivas incorreladas. Esto supone una desventaja a la hora de mantener la correlación espacial de los parámetros y modelar la evolución temporal del canal de forma precisa. Estos inconvenientes son resueltos por el modelo de canal de QuaDRiGa. En el apartado 5.1 se explica cómo se soluciona la variabilidad espacio-temporal en QuaDRiGa.

Recordemos, el objetivo del modelo de WINNER es generar coeficientes de canal para cada

conexión o *link* transmisor-receptor. Si el terminal se mueve, se calculan los coeficientes del canal para cada posición del terminal a lo largo de su trayectoria. El proceso para calcular estos coeficientes se muestra en la Figura 7.

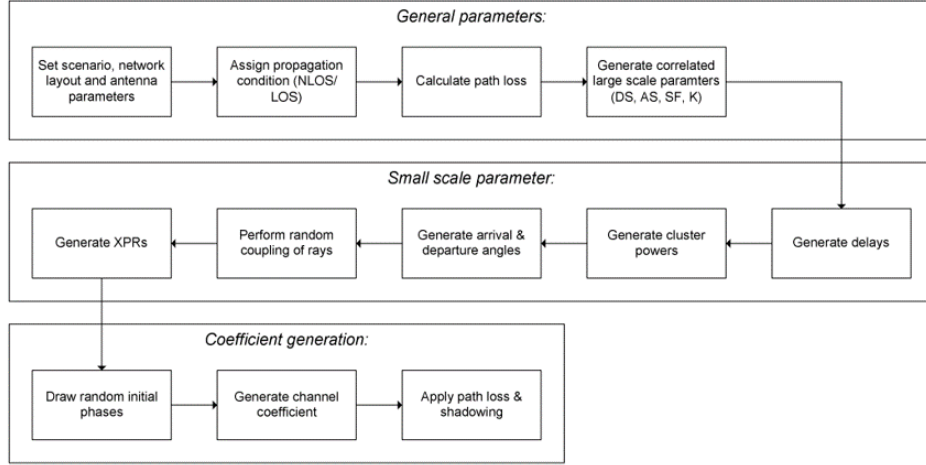


Figura 7: Generación de los coeficientes de canal en WINNER. [4]

A continuación, se resume el procedimiento para la generación de los coeficientes del canal. Primero, se comienza por configurar el *layout*, donde el usuario introduce el número y posición de los transmisores y receptores, las antenas que emplean, la velocidad del terminal (opcional) y el escenario. Tras esto, se calculan los LSP, que se extraen del escenario elegido. Después se generan los SSP, que describen las propiedades de las componentes de multitrayecto de la señal. En WINNER, al igual que en QuaDRiGa, las componentes o rayos se agrupan en grupos llamados *Zero Delay Spread Clusters*. Los rayos de un mismo *cluster* tienen el mismo *delay* y potencia pero diferentes ángulos. Una vez generados los SSP, se procede al cálculo de los coeficientes del canal. Estos coeficientes, expresados por la matriz  $H(t)_{u,s,n}$  se calculan para cada par de elementos de antena transmisora y receptora (u,s) y para cada *cluster* (n). En la Figura 8 se expresa dicha matriz.

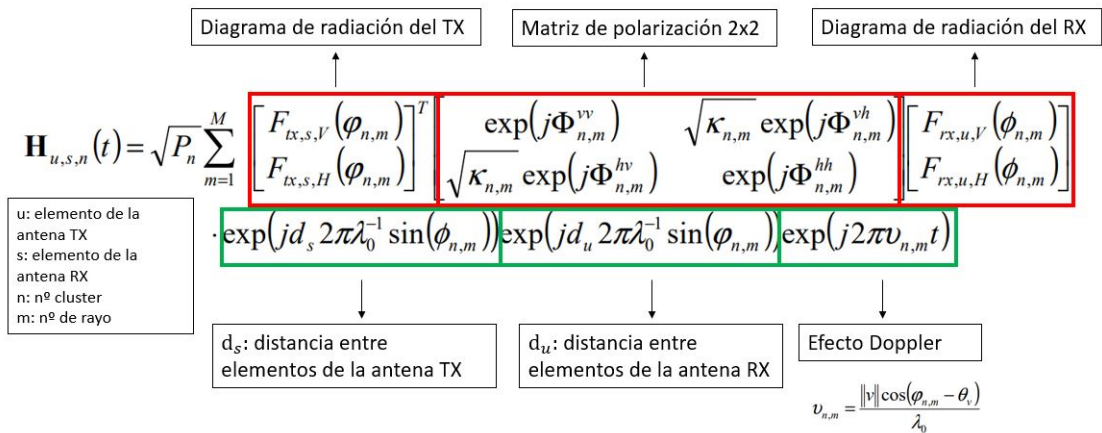


Figura 8: Matriz de coeficientes de canal en WINNER.

Como se puede observar, se calcula el sumatorio de las contribuciones de los M rayos de

cada *cluster* y se escala por la potencia del *cluster*  $\sqrt{P_n}$ . Cada contribución de cada rayo se calcula teniendo en cuenta 6 factores:

- Diagrama de radiación de la antena transmisora: se toma el diagrama de radiación del elemento  $s$  de la antena transmisora. El diagrama de una antena es la combinación de los diagramas de cada elemento individual de dicha antena. Depende del ángulo de salida  $\varphi_{n,m}$ . En el caso de trabajar con polarización cruzada (vertical y horizontal), este elemento se convierte en un vector columna, donde  $F_{tx,s,V}$  se corresponde con la componente vertical y  $F_{tx,s,H}$  con la componente horizontal de polarización.
- Diagrama de radiación de la antena receptora: con la antena en recepción se procede de forma análoga. Esta vez, el diagrama depende del ángulo de llegada  $\phi_{n,m}$ .
- Matriz de polarización: esta matriz solamente está presente en los casos donde se utilice polarización cruzada. Se tienen en cuenta las fases de las combinaciones de polarización posibles: v-v, v-h, h-v, h-h. Los términos v-h y h-v se escalan con el factor de polarización cruzada  $\sqrt{\kappa_{n,m}}$ .
- Distancia entre elementos de la antena transmisora: se tiene en cuenta la distancia entre elementos de la antena transmisora  $d_s$ .
- Distancia entre elementos de la antena receptora: de la misma forma se incluye la distancia entre elementos  $d_u$ .
- Efecto Doppler: el efecto Doppler se calcula tomando el módulo de la velocidad  $\|v\|$  y dirección del terminal  $\theta_v$ . También se tiene en cuenta el ángulo de llegada  $\phi_{n,m}$ .

Finalmente, WINNER toma los coeficientes y construye la respuesta impulsional del canal.

#### 4.4.2. Implementación y simulación del modelo

Tras comprender los aspectos básicos del funcionamiento del modelo, se ha decidido simular un escenario MIMO, con tres antenas transmisoras y cinco receptoras<sup>3</sup>. El objetivo es familiarizarse con las diferentes clases y parámetros del modelo dado que la implementación en QuaDRiGa guarda cierto parecido con la de WINNER. Esto también permite observar las carencias del modelo de WINNER y apreciar las ventajas que conlleva el uso de QuaDRiGa, tanto a nivel teórico como a nivel de implementación.

Inspeccionando la implementación del modelo de WINNER II en MATLAB, se puede ver que existen cuatro clases diferentes: «AntennaArray», «layoutparset», «wimparset» y «wim». A continuación, se describe brevemente el cometido de estas clases haciendo uso del ejemplo MIMO mencionado. La explicación se acompaña de fragmentos de código para ilustrar el proceso de simulación del modelo.

<sup>3</sup>Este ejemplo se encuentra disponible en <https://es.mathworks.com/help/comm/ug/simultaneous-simulation-of-multiple-fading-channels-with-winner-ii-channel-model.html>

## Clase «AntennaArray»

El primer paso es configurar las antenas que se van a emplear en transmisión y recepción. Esto se hace de manera independiente a la definición del canal mediante la clase «AntennaArray». En este caso, se crean cuatro antenas diferentes. Todas ellas están formadas por elementos dispuestos de forma circular (UCA, *Uniform Circular Array*). El segundo parámetro indica el número de elementos del array, en este caso, 16, 12, 8 y 4 elementos respectivamente. Por último, se especifica el radio de las antenas. Las antenas se almacenan en un array de objetos que contiene las propiedades de las antenas creadas.

```

AA(1) = winner2.AntennaArray('UCA',16,0.3);
AA(2) = winner2.AntennaArray('UCA',12,0.3);
AA(3) = winner2.AntennaArray('UCA',8,0.3);
AA(4) = winner2.AntennaArray('UCA',4,0.05);
  
```

## Clase «layoutparset»

Una vez configuradas las antenas, se debe crear el entorno de simulación o *layout*. La clase «layoutparset» permite asignar a cada transmisor y receptor una de las antenas configuradas anteriormente. En este caso, a cada antena transmisora se le asigna una antena distinta (1,2,3). En cambio, los cinco receptores cuentan con la misma antena (4).

```

BSIdx    = {1; 2; 3}; % Index in antenna array inventory vector
MSIdx    = [4 4 4 4 4]; % Index in antenna array inventory vector
numLinks = 6; % Number of links
range    = 300; % Layout range (meters)
cfgLayout = winner2.layoutparset(MSIdx,BSIdx,numLinks,AA,range);
  
```

Además, mediante esta clase se asignan las conexiones entre transmisores y receptores, el escenario y la condición de línea de vista que se experimenta en cada conexión. Esto se muestra en el siguiente fragmento de código.

```

cfgLayout.Pairing = [1 1 2 3 3 4; 6 7 8 8 9 10]; % Index in ...
                cfgLayout.Stations
cfgLayout.ScenarioVector = [6 6 13 13 11 11]; % 6 for B4, 11 for C2 ...
                and 13 for C4
cfgLayout.PropagConditionVector = [0 0 0 0 0 0]; % 0 for NLOS
  
```

Por último, se fijan las posiciones de todos los transmisores y receptores. También es posible asignar velocidades a los terminales, teniéndose en consideración al calcular el efecto Doppler. Evitando ser redundantes, se muestra solamente la configuración de uno de los terminales. En la Figura 9 se visualiza el *layout* resultante.

```

cfgLayout.Stations(1).Pos(1:2) = [50; 150];
cfgLayout.Stations(6).Pos(1:2) = [10; 180]; % 50m from 1st BS
% Randomly draw MS velocity
cfgLayout.Stations(1).Velocity = rand(3,1) - 0.5;
  
```

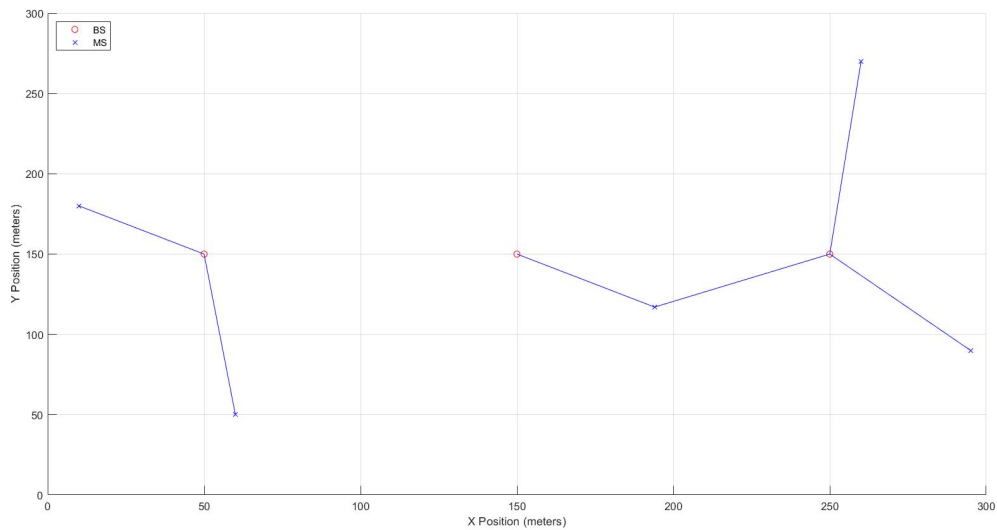


Figura 9: Layout de una configuración MIMO en el modelo de WINNER.

### Clase «wimparset»

Una vez configurado el *layout*, se establecen algunos parámetros adicionales de la simulación como el número de muestras, la frecuencia de trabajo o el modelo de *path loss* empleado. Todos estos parámetros se configuran a través de la clase «wimparset».

```

frameLen = 1600; % Number of samples to be generated
cfgWim = winner2.wimparset;
cfgWim.NumTimeSamples      = frameLen;
cfgWim.IntraClusterDsUsed = 'yes';
cfgWim.CenterFrequency     = 5.25e9;
cfgWim.UniformTimeSampling = 'no';
cfgWim.ShadowingModelUsed  = 'yes';
cfgWim.PathLossModelUsed   = 'yes';
  
```

### Clase «wim»

Por último, la clase «wim» es la encargada de generar los coeficientes. Una forma de llamar a esta clase es mediante la creación de un objeto *WINNER II Channel System Object*. La creación de este objeto requiere de los parámetros creados por las clases «layoutparset» y «wimparset».

```

WINNERChan = comm.WINNER2Channel(cfgWim, cfgLayout);
chanInfo = info(WINNERChan)
  
```

Una vez hallados los coeficientes, se puede representar la respuesta impulsional tal y como se muestra en la Figura 10.

El estudio del modelo de WINNER ha servido para entender el principio de funcionamiento de un modelo geométrico-estocástico sencillo. Además, mediante el análisis de

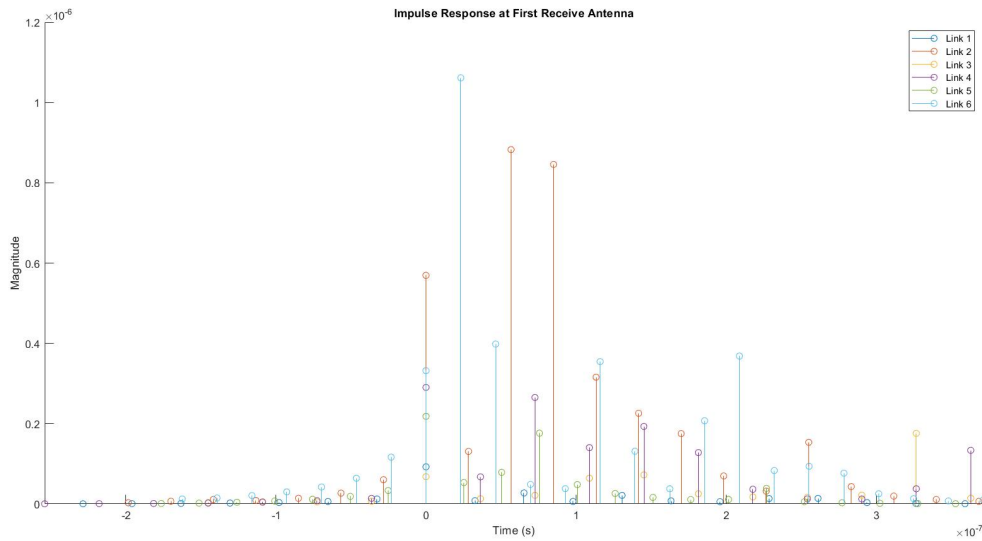


Figura 10: Respuesta impulsional del canal en el modelo de WINNER.

su implementación, se han podido comprender los diferentes bloques necesarios para la implementación de un modelo de estas características. Este análisis facilita enormemente la comprensión del modelo de QuaDRiGa, tanto los principios teóricos en los que se basa como la implementación de MATLAB que se hace del mismo. Existen, sin embargo, algunas diferencias clave que sitúan a QuaDRiGa por delante de WINNER. Estas diferencias se tratan en el siguiente apartado, donde se recalcan los motivos por los cuales se ha elegido el modelo de QuaDRiGa frente a otros modelos geométrico-estocásticos.

#### 4.5. Fase III: QuaDRiGa: estudio e implementación del modelo

Una vez analizado el modelo de WINNER, resulta más sencillo el estudio de un modelo más complejo como lo es QuaDRiGa. La complejidad de este nuevo modelo se debe justamente al intento de remediar las carencias de WINNER, implementando soluciones más complejas que ayuden a modelar el canal de forma más realista. A pesar de estas diferencias, ambos modelos siguen los mismos principios básicos de funcionamiento. En el apartado anterior ya han quedado descritos los fundamentos de WINNER, mientras que en el apartado 5 se describen los de QuaDRiGa. Por este motivo, en este apartado se concretan las particularidades que han decantado la balanza en favor de QuaDRiGa.

En primer lugar, WINNER trabaja en un rango limitado de frecuencias, hasta 6 GHz. QuaDRiGa extiende este rango hasta los 100 GHz con anchos de banda de hasta 100 MHz. La creciente demanda de un mayor ancho de banda en comunicaciones inalámbricas y la tendencia a trabajar en frecuencias cada vez más altas, hacen de este rango extendido una ventaja considerable. Por otra parte, QuaDRiGa incorpora una amplia variedad de escenarios. En este caso, es de especial interés el escenario de «QuaDRiGa Industrial», basado en campañas de medidas en entornos industriales. Lo más parecido a este escenario en WINNER es el escenario B3, que modela un entorno *indoor* en un *hall* de grandes



dimensiones.

Sin embargo, una de las mayores ventajas de QuaDRiGa es la incorporación de mecanismos para preservar la correlación espacial entre parámetros (tanto de gran escala LSP como de pequeña escala SSP). El modelo de WINNER simula instancias del canal de forma independiente y a pesar de intentar incorporar una correlación entre parámetros LSP, la consistencia espacial no está soportada.

Además, mediante la funcionalidad de *drifting*, QuaDRiGa consigue una respuesta del canal continua y coherente en el tiempo. Es cierto que en el modelo de WINNER se describe un proceso por el cual generar una respuesta continua en el tiempo mediante la combinación de los coeficientes del canal, no obstante, en la documentación de QuaDRiGa se especifica que esta funcionalidad nunca se llegó a implementar realmente en WINNER. Adicionalmente, existen una multitud de funcionalidades que incorpora QuaDRiGa pero que escapan del alcance de este trabajo. Por citar algunas, QuaDRiGa permite simulaciones multifrecuencia, movilidad dual (tanto el transmisor como el receptor están en movimiento simultáneamente), velocidad variable de los terminales, etc.

Estos motivos han sido, principalmente, los que han hecho que se decida emplear QuaDRiGa frente a WINNER u otros modelos similares. En lo que respecta a la implementación, QuaDRiGa hereda la programación orientada a objetos de WINNER, haciendo uso de clases, métodos y propiedades. Una descripción detallada de la estructura de la implementación se encuentra en el apartado 5.2.

#### 4.6. Fase IV: Estudio y selección de una base de datos

Después de haber seleccionado el modelo, se ha querido realizar un ajuste del mismo basándose en medidas de campo en entornos industriales. El objetivo es ajustar el modelo y contrastar los resultados con medidas experimentales, para comprobar cómo de preciso es el modelo configurado.

Por este motivo, es clave la elección de una base de datos que cumpla con los criterios establecidos en este trabajo. Tras considerar varias alternativas, se ha decidido hacer uso de la base de datos proporcionada por el NIST. Los motivos tras esta elección son varios. Primero, la base cuenta con una gran cantidad de medidas en diferentes escenarios de ámbito industrial. En segundo lugar, la base de datos viene acompañada de documentación que explica de forma exhaustiva la metodología seguida durante la campaña de medidas así como el posterior procesado aplicado sobre los datos. Esto es un signo de transparencia que garantiza la reproducibilidad de los resultados. Además, todo ello cuenta con el respaldo del NIST, un centro tecnológico de referencia a nivel mundial. En la Tabla 2 se recogen varios de los criterios de elección mencionados, comparando el NIST con otras fuentes de datos disponibles. En el apartado 6 se describe de manera más detallada la base de datos seleccionada.



	Industrial UWB channels	mmWave in industrial settings	CRAWDAD	NIST
Acceso abierto	NO	NO	SI	SI
Bandas de frecuencia de interés	NO	NO	SI	SI
Variedad de escenarios	NO	NO	SI	SI
Metodología detallada	SI	SI	NO	SI
Software de post-procesado	NO	NO	NO	SI

Tabla 2: Comparativa de las principales características de las bases de medidas de campo.

#### 4.7. Fase V: Ajuste del modelo

Una vez analizado el modelo a implementar y la base de datos a emplear, se ha procedido al ajuste del modelo. En primer lugar, se ha seleccionado uno de los escenarios presentes en la base de datos del NIST. Cada escenario lleva asociado una serie de características, desde las dimensiones del entorno hasta propiedades físicas del canal como el *delay spread* o el factor K. Por lo tanto, antes de implementar el modelo en QuaDRiGa, se han estudiado las características del escenario a replicar y se ha trazado un plan para traducir estas propiedades a elementos concretos en el modelo de QuaDRiGa. Una vez hecho esto, se ha implementado el modelo en cuestión, siguiendo la estructura de clases de la que se compone QuaDRiGa. Se han definido todos los posibles parámetros extraídos del NIST, desde el recorrido trazado por el receptor a lo largo de la planta hasta el tipo de antenas empleadas, pasando por la definición de parámetros clave como el *delay*, los ángulos de llegada y salida y demás parámetros de gran y pequeña escala.

#### 4.8. Fase VI: Validación y resultados

Por último, con el modelo implementado y ajustado con los datos del NIST, se han realizado un conjunto de simulaciones para la validación del mismo. Para ello, se han determinado los parámetros a observar y se han recopilado los resultados de las simulaciones para ser comparados con las medidas reales de campo. Durante las simulaciones, se han realizado los ajustes pertinentes en el modelo para aproximar la respuesta del canal de la mejor manera posible. Este proceso iterativo de simulación-ajuste-simulación ha servido para ver qué parámetros son especialmente relevantes en la respuesta global del modelo. Para terminar, se han extraído una serie de conclusiones, tanto del ajuste del modelo como de los resultados obtenidos.

## 5. Análisis del modelo de partida

Como se ha descrito en apartados anteriores, el modelo de canal seleccionado para este trabajo es el propuesto por el proyecto QuaDRiGa (QUAsi Deterministic RadIo channel GenerAtor). Este modelo pertenece a la familia de modelos geométrico-estocásticos y está estrechamente relacionado con los modelos de WINNER. Además, se califica como la implementación de referencia para el modelo de canal 3GPP 38.901, que define un modelo de canal para el rango de frecuencias entre 0.5 y 100 GHz para 5G. Asimismo, QuaDRiGa ha sido implementado en MATLAB y es esta implementación, precisamente, la que se emplea en este trabajo.

En esta sección, se explica con detalle los principios en los que se basa el modelo de propagación de QuaDRiGa así como los diferentes bloques de los que se compone.

### 5.1. Principios físicos del modelo

QuaDRiGa es un modelo geométrico-estocástico que «permite la creación de un canal bidireccional de radio arbitrario» [1]. El canal es independiente de las antenas empleadas y estas pueden tomar múltiples configuraciones. La respuesta del canal se calcula teniendo en cuenta los rayos que llegan al receptor. Estos rayos son producto del multitrayecto, un fenómeno que causa reflexiones de la señal transmitida al interactuar con elementos del entorno, denominados *scatterers*. Las reflexiones de la señal llegan al receptor y se describen por el tiempo que tardan en llegar (*delay*), su potencia y los ángulos de salida (desde el transmisor) y llegada (al receptor). Estos parámetros, junto con otros como el desvanecimiento (*shadow fading*) o el factor de polarización cruzada (*XPR*), se extraen de distribuciones estadísticas, de ahí el carácter estocástico del modelo. Estas distribuciones son construidas a partir de medidas de campo de escenarios reales.

Por otra parte, el modelo tiene en cuenta la posición de los *scatterers*. Los *scatterers* o *scattering clusters* son aquellos objetos que se encuentran en el entorno y provocan reflexiones de la señal (multitrayecto). Sin embargo, las posiciones de estos objetos no están determinadas de antemano sino que son generadas de forma aleatoria. En la Figura 11, se muestra un esquema simplificado del modelo. El trayecto libre de obstáculos por el que llega un rayo directo se llama línea de vista (LOS Line of Sight) y el trayecto en el que el rayo rebota en un obstáculo y llega al receptor se conoce como trayecto sin línea de vista (NLOS Non Line of Sight). Intuitivamente, se puede deducir que el rayo directo tardará menos tiempo en llegar y lo hará con mayor potencia, mientras que el rayo indirecto llegará más tarde y con menor potencia ya que una parte de su energía es absorbida por los objetos contra los que rebota. Este concepto es esencial para interpretar de forma correcta la respuesta impulsional del canal.

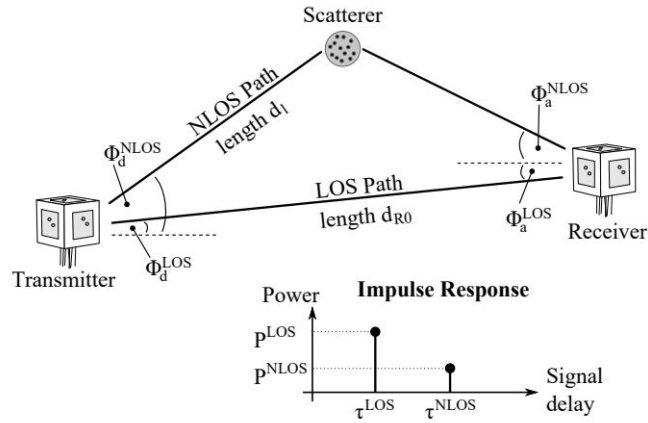


Figura 11: Esquema del modelo de QuaDRiGa. [1]

### 5.1.1. Multitrayecto: definición y caracterización

Tal y como se ha explicado anteriormente, el receptor detecta varias componentes de una misma señal, fruto del multitrayecto. Este fenómeno es especialmente relevante en entornos *indoor* y más aún en entornos industriales, donde existen una gran cantidad de objetos reflectantes.

Uno de los modelos más extendidos para caracterizar el multitrayecto en *indoor* es el modelo de Saleh-Valenzuela [9]. En este modelo se asume que los rayos llegan en grupos llamados *clusters*. Los rayos de un mismo *cluster* comparten una serie de propiedades. El tiempo de llegada entre *clusters* y entre rayos de un mismo *cluster* siguen una distribución de Poisson. Además, la potencia de los rayos de un mismo *cluster* y la potencia entre *clusters* decae de manera exponencial. La Figura 12 ilustra el modelo de Saleh-Valenzuela.

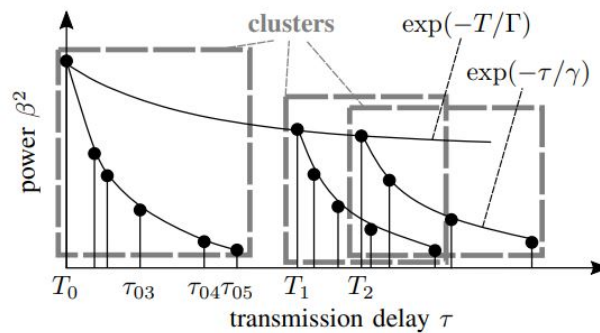


Figura 12: Modelo de Saleh-Valenzuela. [10]

En el modelo de QuaDRiGa, sin embargo, la caracterización del multitrayecto toma otro aspecto. Se introduce el concepto de *Zero Delay Spread Cluster* o lo que es lo mismo, *clusters* cuyos rayos tienen un *delay spread* nulo. Esto quiere decir que, en QuaDRiGa, un *cluster* se compone de rayos que tienen el mismo *delay* y la misma potencia. Los rayos de un mismo *cluster* se distinguen únicamente por sus ángulos de salida y llegada.

### 5.1.2. Variabilidad temporal y espacial del canal

Otro aspecto clave a modelar en QuaDRiGa es la variabilidad del canal, tanto en tiempo como en espacio. Objetos que cambian de posición, terminales que se mueven, etc. hacen que la respuesta del canal varíe. Por tanto, es necesario encontrar una forma de representar esta variabilidad espacio-temporal. Para ello, definamos primero algunos conceptos que se emplean de forma recurrente en el modelo:

- **Escenario:** se dice de un entorno concreto definido por una serie de parámetros de gran escala. Cada escenario representa un entorno real distinto: industrial, satélite, *indoor*, *outdoor-to-indoor*, etc.
- **Parámetros de gran escala:** en QuaDRiGa, los parámetros de gran escala o LSP (del inglés, Large Scale Parameters) son un conjunto de parámetros que definen el canal de propagación: *delay spread*, factor K, *shadow fading*, factor de polarización cruzada y dispersión de los ángulos de salida y llegada. Estos parámetros se definen por medio de distribuciones estadísticas basadas en medidas de campo.
- **Parámetros de pequeña escala o SSP (Small Scale Parameters):** describen las propiedades de los rayos y *clusters* en un instante concreto: *delay*, potencia, ángulos de llegada y salida y fase inicial.
- **Segmento:** cuando un terminal se mueve a lo largo de un recorrido, el escenario puede variar. Un segmento es un tramo de la trayectoria del terminal donde el escenario permanece constante y la posición de los *scatterers* son fijas. Es decir, en un segmento, los parámetros de gran escala se mantienen constantes.
- **Gota o *drop*:** es la representación de un segmento de longitud nula. En un *drop*, todos los parámetros de pequeña y gran escala permanecen fijos, excepto la fase de los rayos.

Resumiendo, si un terminal se mueve en el espacio, el canal puede ser dividido en segmentos. Cada segmento se corresponde con un escenario concreto, que a su vez está definido por una serie de parámetros LSP. Asimismo, cada segmento se divide en múltiples *drops*. En esencia, el modelo simula una serie de *drops*, que son instancias del canal para un instante y posición concretos. En la Figura 13 se representa el concepto de segmento a lo largo de una trayectoria.

Las simulaciones basadas en *drops* no son nada nuevo. Es más, la mayoría de conceptos descritos ya fueron implementados en los modelos de WINNER, con la intención de modelar esta variabilidad espacio-temporal. Sin embargo, WINNER dejó sin implementar varios recursos clave para conseguir una evolución fiel del canal. QuaDRiGa recoge los principios fundamentales de WINNER y añade una serie de mejoras para una implementación más cercana a la realidad.

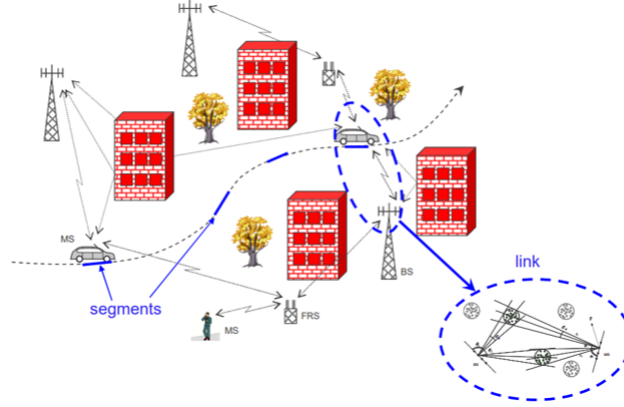


Figura 13: Segmentos en la trayectoria de un terminal en movimiento. [1]

### 5.1.3. Correlación de parámetros: *drifting* y suma de sinusoides (SoS)

Cuando un terminal está en movimiento, es importante comprender que existe una correlación entre las diferentes instancias de canal que se van generando. Es lógico pensar que, en puntos cercanos entre sí, las propiedades del canal guarden cierto grado de similitud. Esto hace que no se puedan simular *drops* consecutivos de forma independiente; debe existir una correlación entre parámetros de puntos contiguos. Por otra parte, el generar instancias de canal de forma independiente, hace que dos terminales próximos entre sí puedan experimentar respuestas de canal diferentes, cuando no debería ser así. Esta correlación espacial de los parámetros de pequeña y gran escala es una de las mejoras que incorpora QuaDRiGa.

El principal problema al generar diferentes instancias del canal es la aleatoriedad intrínseca de los parámetros que definen el propio canal. Por tanto, para conseguir que dichos parámetros estén correlados a lo largo del espacio, es necesario encontrar un método de generación de variables aleatorias correladas. En QuaDRiGa, se propone el método de suma de sinusoides (SoS). En este método, partimos de que un proceso gaussiano correlado espacialmente genera números aleatorios normalmente distribuidos. Esta variable aleatoria que llamamos  $k$  tiene que depender de la posición del terminal, por tanto,  $k(x, y, z) = \mathcal{N}(0, 1)$ . Además, se puede definir una función de autocorrelación (normalmente exponencial) que describe la variación de  $k(x, y, z)$  a lo largo del tiempo. El objetivo de este método es encontrar una suma de sinusoides que aproxime  $k(x, y, z)$ . Para ello, se deben hallar las amplitudes  $a_n$  y las frecuencias  $f_n$  de cada senoide. Estos coeficientes son los que se emplean para generar las variables aleatorias correladas. La fase de las sinusoides se considera aleatoria y al alterar esta fase se genera un nuevo conjunto de variables aleatorias correladas espacialmente. La ecuación 1 expresa la aproximación de la función  $k(x, y, z)$  a través del sumatorio de sinusoides.

$$\hat{k}(x, y, z) = \sum_{n=1}^N a_n \cos \{2\pi(f_{x,n}x + f_{y,n}y + f_{z,n}z) + \psi_n\} \quad (1)$$

Por otra parte, el proceso por el cual se actualizan los parámetros a lo largo del recorrido de un terminal se conoce como *drifting*. En este proceso, se toman los parámetros calculados para las posiciones iniciales del transmisor y receptor y se calculan las posiciones de los *scatterers* cercanos. A partir de aquí, la generación de los parámetros de posiciones consecutivas tiene en cuenta los instantes anteriores. Es decir, el *drifting* se encarga de la actualización de los parámetros dentro de un mismo segmento. Para una transición suavizada entre segmentos, se emplea el concepto de «nacimiento y desvanecimiento de clusters», donde se asume que un terminal que se mueve en el espacio verá la aparición y desaparición de diferentes *scatterers* causada, por el movimiento del propio terminal. En QuaDRiGa, se deja un espacio entre segmentos consecutivos donde se lleva a cabo una transición progresiva entre segmentos. En la Figura 14 se representa este concepto.

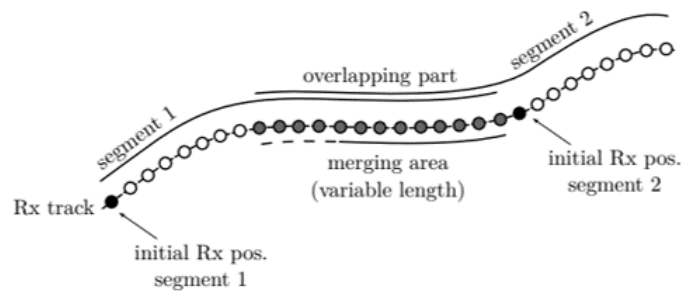


Figura 14: Transición entre segmentos en QuaDRiGa. [1]

## 5.2. Estructura del modelo

Tras el análisis de los principios físicos que rigen QuaDRiGa, en este apartado se describen en detalle los diferentes bloques de los que se conforma el modelo, cuya implementación ha sido realizada en MATLAB siguiendo un paradigma de programación orientada a objetos. QuaDRiGa define una serie de clases con parámetros y métodos para configurar el modelo. A continuación, se describen las diferentes clases existentes.

### 5.2.1. Descripción de clases y métodos

La estructura del código se organiza en una serie de clases. Estas clases permiten definir todos los aspectos del modelo, desde la configuración de las antenas hasta la trayectoria de los terminales, finalizando con la generación de los coeficientes del canal. La lista de todas las propiedades y métodos de cada clase se encuentra disponible en la documentación de QuaDRiGa por lo que, en esta sección, solo se mencionan las más relevantes.

#### Clase «`qd_simulation_parameters`»

A través de esta clase, se establecen los parámetros generales de simulación del modelo. El usuario puede modificar el valor de las propiedades de esta clase para ajustar variables como la frecuencia de trabajo o la densidad de muestras. Además, el parámetro

«use\_3GPP\_Baseline» permite activar o desactivar algunas mejoras que introduce QuaDRiGa pero que no han sido especificadas en el modelo de 3GPP. Por ejemplo, la consistencia espacial, las simulaciones multifrecuencia o el uso de ondas esféricas en ambos extremos son funciones propias de QuaDRiGa, inexistentes en modelos de 3GPP. Por ello, si la intención es generar un modelo que cumpla con las especificaciones de 3GPP, se deshabilitará este parámetro. Si, por el contrario, se desea un modelo más ajustado a la realidad, se fijará este parámetro a 1.

### Clase «qd\_arrayant»

La clase «qd\_arrayant» (*array antenna*) es, como su nombre indica, la clase en la cual se crean las antenas empleadas en las simulaciones. Recordemos que, en QuaDRiGa, el canal y las antenas se generan de forma independiente. Esta clase crea objetos que representan antenas de diferentes tipos. Estas antenas son almacenadas y pueden ser utilizadas en una variedad de escenarios sin tener que ser configuradas de nuevo cada vez.

En QuaDRiGa, las antenas se definen como un array de elementos individuales, cada uno con su diagrama de radiación y dispuestos en una configuración geométrica concreta. La combinación de estos elementos individuales da lugar a la antena propiamente dicha. Si no se quiere configurar la antena desde cero, QuaDRiGa incluye varios modelos de antena predeterminados. A través del constructor de la clase «qd\_arrayant», se llama al método «qd\_arrayant.generate(array\_type, varargin)» que permite elegir una de las configuraciones de antena predeterminadas. Algunas de las opciones disponibles son: antena omnidireccional, dipolo, antena de parche, etc. Cada una de estas antenas requiere una serie de parámetros extra que se introducen a través del elemento *varargin* del método. En la Figura 15 se muestran los parámetros necesarios para configurar una antena parabólica.

Por último, QuaDRiGa permite importar configuraciones de antena de fuentes externas así como visualizar el diagrama de radiación de las antenas generadas.

par = qd_arrayant.generate ( array_type, Ain, Bin, Cin, Din, Ein, Fin, Gin, Hin, Iin, Jin )	
parabolic	<p>An ideal parabolic reflector antenna with input parameters:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ain - Radius of the antenna aperture in [meters]</li> <li>Bin - Center frequency in [Hz]</li> <li>Cin - Min. sidelobe power relative to directivity in [dB] (default: -40 dB)</li> <li>Din - Polarization indicator               <ol style="list-style-type: none"> <li>1. vertical (E-theta) polarization (default)</li> <li>2. horizontal (E-phi) polarization</li> <li>3. LHCP</li> <li>4. RHCP</li> <li>5. dual-polarized two-port antenna (LHCP, RHCP)</li> </ol> </li> <li>Ein - Number of beams for as defined by 3GPP TR38.821 (Default: 1)</li> <li>Fin - Beam separation in degrees (Default: FWHM width)</li> <li>Gin - Satellite Tx max Gain in [dBi]</li> </ul>

Figura 15: Parámetros para la creación de una antena parabólica. [1]

### Clase «qd\_track»

Como se explicaba en anteriores apartados, en QuaDRiGa un terminal tiene la capacidad de trazar un recorrido. Esta clase es la que define dicha trayectoria como una lista de



posiciones ordenadas. Durante la simulación, cada una de estas posiciones lleva asociada una respuesta de canal. Con la ayuda de unos pocos parámetros, es posible describir la ruta de un terminal.

- Posición inicial del terminal: posición del comienzo de la trayectoria en coordenadas cartesianas  $(x,y,z)$ .
- Segmentos: se fija el número de segmentos y en qué punto del recorrido comienza cada uno.
- Trayecto: la trayectoria del terminal se puede especificar como una serie de puntos en el espacio. Si se quieren incorporar giros durante el recorrido, basta con especificar el ángulo de giro en un punto concreto de la trayectoria. Cuando el móvil alcance ese punto, se desviará con el ángulo especificado y seguirá ese rumbo hasta el final de la ruta o hasta que se le indique otro ángulo de giro. De nuevo, QuaDRiGa ofrece algunas opciones predeterminadas de trayectoria como línea recta o circular.
- Perfil de movimiento: adicionalmente, se puede modelar la variación de la velocidad del terminal durante su recorrido. Para ello, se define un «perfil de movimiento». Este vector permite asociar puntos del espacio con instantes de tiempo. De esta asociación, se deduce la velocidad que debe llevar el terminal en cada momento.
- Escenario: en ocasiones, el movimiento de un terminal puede provocar un cambio del entorno. Por este motivo, QuaDRiGa permite asociar segmentos de la trayectoria con escenarios concretos.
- Interpolación: en algún caso puede ser necesario interpolar los coeficientes del canal para satisfacer el teorema de Nyquist. Esta función calcula el número de muestras necesarias y las coloca de manera equidistante a lo largo del recorrido. Recordemos que, por cada punto de la trayectoria, se calcula una respuesta del canal. Por lo tanto, el número de puntos vendrá determinado por la longitud de la trayectoria y el número de muestras por metro que se especifique.

### Clase «qd\_layout»

QuaDRiGa es un modelo a nivel de sistema. Esto significa que no solo se pueden parametrizar las propiedades del canal sino que también es necesario establecer el entorno. Esto se hace determinando el número de transmisores y de receptores así como sus posiciones, las antenas empleadas en cada caso, la trayectoria del terminal (si hay movimiento) y los diferentes canales en caso de haber múltiples transmisores y receptores (se indican qué transmisor(es) se comunican con qué receptor(es) y se calcula el canal para cada asociación).

La clase «layout» permite crear los transmisores y receptores que sean necesarios, asignar las conexiones entre ellos y determinar sus posiciones en el espacio. Por otra parte, esta clase permite asociar un tipo de antena a cada transmisor y receptor. Para ello, recibe como *input* los objetos de antena generados por la clase «qd\_arrayant». Asimismo, se recibe la trayectoria de la clase «qd\_track» y se asigna al terminal deseado.



En resumidas cuentas, esta clase recopila los parámetros necesarios de otras clases para una completa descripción del entorno. En la Figura 16 se muestra un ejemplo de un layout con un transmisor y un receptor que se mueve en línea recta. Al comienzo de cada segmento, se marca el escenario que experimenta el receptor en cada caso.

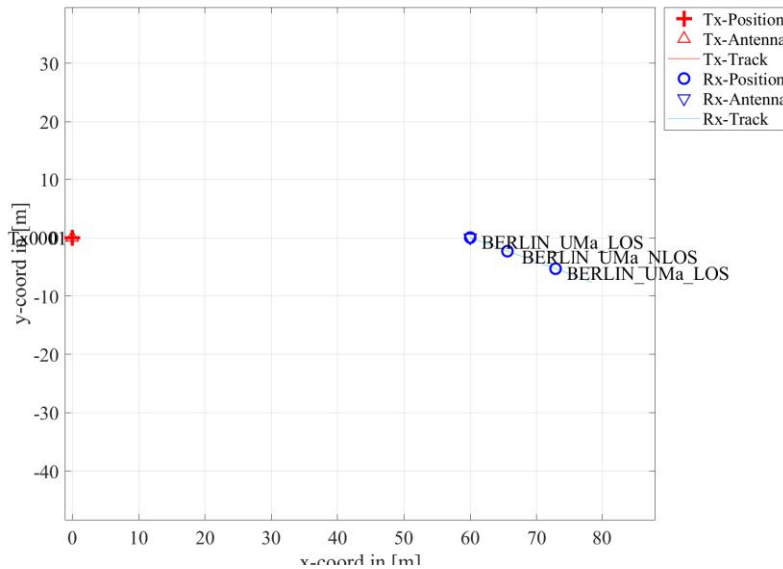


Figura 16: Visualización de un layout con un transmisor y un receptor. La posición del transmisor fija está marcada en rojo. Las diferentes posiciones que toma el receptor en su trayecto se marcan en azul.

### Clase «qd\_satellite»

Esta clase ha sido específicamente diseñada para la creación de constelaciones de satélites. En este trabajo no procede el uso de esta clase, por lo que se omite una explicación más profunda de la misma.

### Clase «qd\_builder»

La clase «builder» es la encargada de generar los coeficientes del canal. En primer lugar, se generan los parámetros LSP. Estos parámetros se extraen de las distribuciones estadísticas propias de cada escenario, almacenadas en archivos de configuración .conf. Además, se emplea un generador de suma de sinusoides (SoS) para que las variables aleatorias que se generen estén correladas. De esta forma, se mantiene la correlación espacial en el caso de que el terminal se desplace. A partir de los parámetros LSP, se calculan los parámetros SSP. Una vez calculados los SSP, se obtienen las posiciones de los *scatterers*. Este proceso se hace una primera vez como forma de inicializar los parámetros. Una vez calculadas las posiciones de los *scatterers*, se invierte el sentido de los cálculos. Es decir, a partir de las posiciones ya conocidas de los *scatterers*, se generan los SSP de nuevo, y una vez generados los SSP, se calculan los LSP. Esto hace que los LSP sean consistentes con los SSP y que los coeficientes calculados guarden una correlación cuando el terminal se desplace. Para cada punto de una trayectoria, los parámetros se van recalculando cuando sea necesario. Los LSP se consideran constantes durante un segmento mientras que los SSP pueden variar para cada punto. En la Figura 17 se presenta un esquema que ilustra el proceso de

generación y actualización de los parámetros correspondientes.

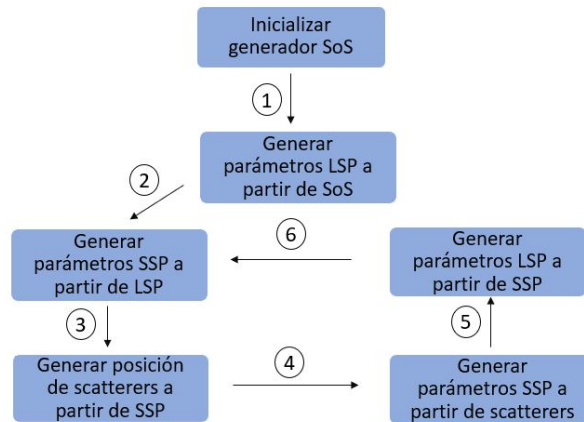


Figura 17: Proceso de generación y actualización de parámetros.

**Clase «qd\_sos»** Esta clase implementa el método de suma de sinusoides. Este método se emplea para la generación de variables aleatorias correladas en el espacio, especificando una función de autocorrelación (exponencial, gaussiana o una combinación de ambas). Los coeficientes de la función que genera el método SoS se emplean para generar las variables aleatorias correladas.

### Clase «qd\_channel»

Esta clase recibe los coeficientes de canal de la clase «qd\_builder». Estos coeficientes vienen dados en el dominio del tiempo y expresados por un *delay* y una amplitud compleja. La clase «qd\_channel» contiene métodos para el procesado de estos coeficientes. Por ejemplo, se pueden transformar al dominio de la frecuencia, interpolar los coeficientes en el dominio del tiempo o combinar los coeficientes para formar segmentos de mayor longitud.

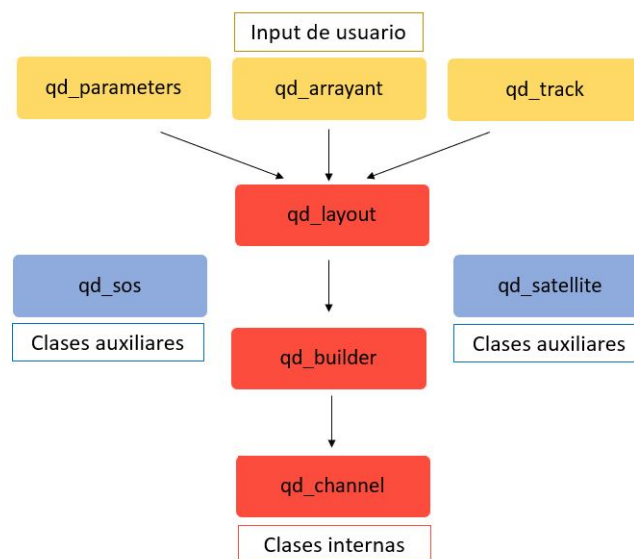


Figura 18: Clases del modelo de QuaDRiGa.

### 5.3. Diagrama de flujo del modelo

En este último apartado, se hace un resumen de los diferentes pasos que se llevan a cabo para la generación de los coeficientes de canal. El diagrama de flujo de la Figura 19 muestra un esquema del proceso, desde la definición del escenario hasta la obtención de los coeficientes, pasando por el cálculo de los LSP correlados.

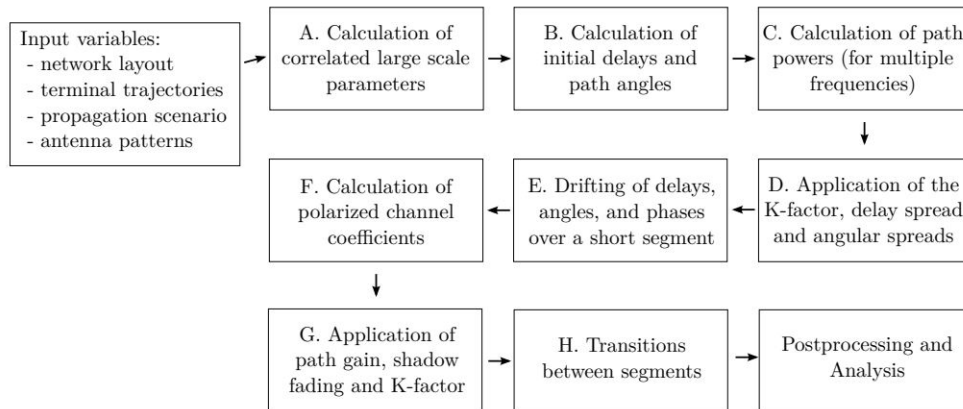


Figura 19: Diagrama de flujo del modelo de QuaDRiGa. [1]

En primer lugar, el usuario debe configurar el entorno del modelo. Esto incluye definir el número y posición de transmisores, las trayectorias de los terminales, los diferentes escenarios y las antenas. Una vez se ha configurado todo esto, se procede al cálculo de los parámetros LSP correlados: factor K, *delay spread* y los ángulos de salida y llegada. Los LSP se extraen de los archivos de configuración de cada escenario. En la Figura 20 se puede ver uno de estos archivos, en este caso, correspondiente al escenario «Berlin UMa LOS», un entorno *macro-cell* urbano con situación de línea de vista. Como se puede observar, las distribuciones de los LSP se definen con una mediana y una desviación típica. Por ejemplo, en este entorno se ha medido un *delay spread* que se ajusta a una distribución de mediana  $DS_{\mu} = -6.69$  y una desviación típica  $DS_{\sigma} = 0.3$ .

```

% Config file for scenario "BERLIN_UMa_LOS"
% See: Jaeckel et. al.; QuaDRiGa: A 3-D Multicell Channel Model Enabling Virtual Field Trials

% Valid frequency range:      2.6 to 2.7 GHz
% Valid distance range:      50 to 750 m
% Valid BS antenna height:   25 to 85 m
% Valid MT antenna height:   1.5 to 2.5 m

% =====
% Large scale distributions
% =====

% DS = -6.69 + Xds * ( 0.3 )
% KF = 2.7 + Xkf * ( 2.3 )
% SF = Xsf * ( 3.7 )
% ASD = 0.65 + Xasd * ( 0.23 )
% ASA = 1.61 + Xasa * ( 0.17 )
% ESD = 0.7 + Xesd * ( 0.2 )
% ESA = 1.16 + Xesa * ( 0.14 )
% XFR = 9 + Xxpr * ( 4.3 )

DS_mu = -6.69      % delay spread [log10(s)]
DS_sigma = 0.3    % delay spread STD [log10(s)]

KF_mu = 2.7       % Ricean K-factor [dB]
KF_sigma = 2.3    % Ricean K-factor STD [dB]

SF_sigma = 3.7    % Shadow Fading STD [dB]
  
```

Figura 20: Archivo de configuración del escenario Berlin UMa LOS. [1]

Tras calcular los parámetros de gran escala, se obtienen los parámetros SSP. Para ello, primero se calculan el *delay*, los ángulos de salida y llegada y la potencia para cada componente de multitrayecto. Después, se ajustan los SSP calculados para que sean coherentes con los LSP previamente obtenidos. Posteriormente, si el terminal está en movimiento, se procede a actualizar los parámetros SSP de cada componente. Para ello, se calculan las posiciones de los *scatterers* a partir de los *delays* y fases calculados al comienzo. Una vez determinadas las posiciones de los *scatterers*, se pueden calcular los nuevos parámetros SSP ya que las posiciones de los *scatterers* se mantienen fijas. Tras esto, se aplican otros factores de gran escala que no habían sido tenidos en cuenta hasta ahora, como el *shadow fading* y la ganancia del canal. Finalmente, se obtienen los coeficientes del canal. Si ha sido necesario separar la trayectoria en varios segmentos, se combinan los coeficientes para dar lugar a una secuencia más larga.

## 6. Datos empíricos

Una parte importante de este trabajo consiste en el ajuste y validación del modelo mediante medidas de campo. Recordemos que el objetivo de un modelo de canal es simular un escenario de la forma más realista posible. Una manera de comparar nuestro modelo con la realidad es obtener medidas reales de un entorno y comprobar cuánto se ajusta el modelo a estas. Sin embargo, realizar una campaña de medidas es costoso en términos de tiempo y dinero. Por tanto, es necesario buscar campañas de medida ya finalizadas y cuyos resultados sean accesibles. Además, los escenarios de la campaña deben adecuarse al entorno de interés: fábricas, plantas industriales o similares.

Recientemente, se han realizado varias campañas de medidas en entornos industriales para diferentes propósitos. Por ejemplo, en [11] llevaron a cabo una campaña para comunicaciones milimétricas en el ámbito industrial. En [12], presentan una campaña de medidas en dos escenarios industriales diferentes para canales de banda ultra ancha. Asimismo, otra fuente de información interesante es la base de datos que pone a disposición la Universidad de Dartmouth, conocida como CRAWDAD (*A Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth*). En esta base de datos se recopila información de campañas de medidas de comunicaciones inalámbricas. En concreto, se identifican dos campañas de medidas [13] [14] en el ámbito industrial. Ambas ofrecen medidas de respuesta impulsional del canal en entornos industriales.

Por último, el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EEUU (NIST) efectuó una extensa campaña de medidas específicamente enfocada hacia las comunicaciones inalámbricas en entornos industriales. En la página web del NIST [15] se puede encontrar toda la información relativa a la campaña de medidas y un informe detallado de la metodología y los resultados. Adicionalmente, un repositorio de Github recoge el código empleado para el post-procesado de las medidas. El código ha sido desarrollado en MATLAB y es de libre acceso [16].

Tras considerar las opciones disponibles, en esta ocasión se ha decidido optar por la base de datos del NIST. Los datos que se recogen son relativamente recientes, hay una variedad de escenarios entre los que elegir, tanto las medidas como el software para procesarlas están abiertos al público y todo ello cuenta con el respaldo del NIST, una institución de experiencia contrastada. Queda para futuros proyectos el empleo de otras bases de datos para afinar el ajuste del modelo de propagación.

En este apartado se describe la base de datos tal y como es presentada por el NIST. Para el posterior ajuste del modelo, ha sido necesario el procesado de estas medidas así como aplicar unos criterios de selección para elegir los datos convenientes. Este análisis de los datos se desarrolla de forma exhaustiva en el apartado 7.

### 6.1. Descripción de la base de datos

A continuación, se explica de forma detallada la composición de la base de datos del NIST. Es importante comprender el contexto en el que se realizan estas medidas, la estructura

de la base de datos, su contenido y el posterior procesado aplicado a dichas medidas.

### 6.1.1. Estructura de la base de datos

A través de la página web principal del NIST, se accede al espacio dedicado al proyecto *Wireless Systems for Industrial Environments*[15], donde se presenta toda la información relativa a la campaña de medidas en entornos industriales. Una breve descripción del proyecto da paso al informe técnico *NIST Technical Report 1951* [17]. Este documento incluye:

- Descripción de los escenarios: breve descripción de los cuatro escenarios medidos (Automotive Factory, Steam Generation Plant, Machine Shop y NIST Open Area Test Site).
- Metodología y análisis: instrumentación empleada, adquisición, almacenamiento y procesado de las medidas y análisis de las métricas relevantes.
- Resumen de los resultados: recopilación de los resultados obtenidos tras el post-procesado de las medidas.

Por otra parte, se incluyen las medidas en bruto para cada escenario<sup>4</sup>. En este directorio, se encuentra una selección de medidas clasificadas por escenario. Cada conjunto de medidas se corresponde con un archivo descargable en formato .mat o .csv. Además, para cada escenario hay múltiples medidas según la frecuencia, polarización o transmisor empleado. También se incluye un documento Excel con detalles adicionales de los escenarios y recorridos realizados. Por último, el código disponible en Github correspondiente al post-procesado de las medidas garantiza la reproducibilidad de los resultados expuestos en el informe técnico.



Figura 21: Estructura de la base de datos del NIST.

<sup>4</sup>Los archivos que contienen las medidas de campo en bruto se pueden descargar desde: <https://www.nist.gov/ctl/smart-connected-systems-division/networked-control-systems-group/measurement-data-files>

### 6.1.2. Metodología de la campaña de medidas

Hay cuatro escenarios donde se han llevado a cabo las medidas de campo. Tres de ellos son escenarios industriales de diferentes dimensiones. Cada escenario tiene unas características distintas que pretenden representar entornos típicos donde se desarrollan actividades industriales. Por ejemplo, la fábrica automovilística (Automotive Factory) tiene una superficie extensa, techos altos y maquinaria pesada. Sin embargo, el taller (Machine Shop) es de dimensiones reducidas y las distancias entre transmisor y receptor son menores. El cuarto escenario (NIST Open Area Test Site) es un espacio abierto empleado por el NIST para la calibración de las medidas. Por tanto, a efectos prácticos, se dispone de tres escenarios (Automotive Factory, Steam Generation Plant y Machine Shop).

En cuanto a la instrumentación, la Figura 22 muestra la configuración elegida para la toma de medidas. Se trata de un *channel sounder*, donde transmisor y receptor están sincronizados por un reloj de rubidio. El transmisor envía de manera constante una secuencia de símbolos PN modulados en BPSK. El receptor recibe y almacena estas señales para su posterior procesamiento.

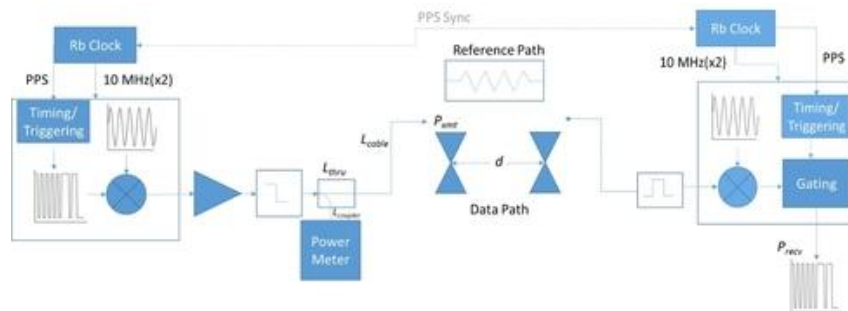


Figura 22: Instrumentación y configuración para la toma de medidas.

Las frecuencias seleccionadas han sido 2.25 y 5.4 GHz ya que se evitan interferencias con otras comunicaciones inalámbricas y además se encuentran cerca de las bandas no licenciadas que se emplean en aplicaciones industriales, conocidas como bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical).

Por otra parte, para cada escenario se definen recorridos predeterminados por donde se mueve el receptor a velocidad constante. El transmisor queda fijado en un punto determinado y la ruta comienza y termina cerca del mismo. Para cada escenario y configuración se repite el recorrido varias veces. A cada uno de estos intentos se les llama *run*. Cada *run* se divide en adquisiciones y *records*. Las adquisiciones son puntos concretos del recorrido y los *records* son las medidas tomadas entre adquisiciones. En esencia, los *records* son los valores complejos de la señal que recibe el receptor y que se procesan para calcular la respuesta impulsional del canal en cada punto. Estas respuestas impulsionales (de valor complejo también) son las que se encuentran en los archivos descargables de la base de datos. El nombre de los archivos da información del contexto en el que se han realizado las medidas. Por ejemplo: AAPlantD1-2GHz-TX1-hpol-run4-pp.mat.

- AAPlantD1: medidas tomadas en la planta automovilística (Active Automotive



Plant) en el día 1 (D1).

- 2 GHz: frecuencia de trabajo de 2.25 GHz
- TX1: se utiliza el transmisor 1. Esto es importante porque los transmisores se colocan en posiciones diferentes a lo largo de la planta.
- hpol: la polarización elegida es polarización horizontal.
- run4: se trata del *run* número 4.

En la Figura 23 se observa un ejemplo de un archivo de medidas. Al tratarse de un *.mat*, se utiliza MATLAB para abrir el archivo. Dentro encontramos 4 variables: IQData, IQData Range, IQData Timing y Strct Metadata.

- IQData: contiene los valores complejos de respuesta impulsional para cada punto del recorrido.
- IQData Range: muestra las coordenadas x, y, z correspondiente a cada *record* (dónde se toma cada medida).
- IQData Timing: recoge el tiempo correspondiente a cada *record* (en qué instante se toma cada medida).
- Strct Metadata: incluye información adicional como la potencia de transmisión, ganancia de las antenas, frecuencia de muestreo, etc.

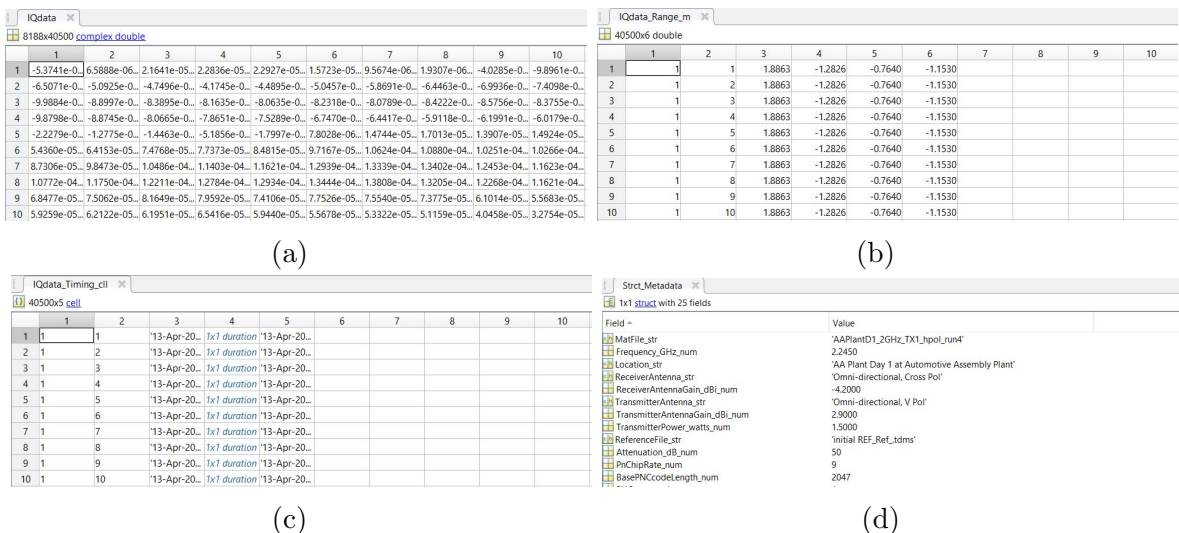


Figura 23: Contenido de un archivo de medidas: (a) IQData , (b) IQData Range, (c) IQData Timing, (d) Strct Metadata.

En resumidas cuentas, estos archivos contienen toda la información necesaria para comprender las medidas realizadas por el NIST. El siguiente paso es el post-procesado de estas medidas para extraer una serie de características del canal.



### 6.1.3. Procesado de las medidas

Una vez obtenidas las medidas, el NIST aplica un procesado a estas para extraer algunas propiedades representativas del canal. En este caso, se calcula la ganancia del canal, el *delay spread*, el factor K y se clasifica cada medida según se haya producido en una situación de línea de vista (Line Of Sight LOS) o sin línea de vista (Non Line of Sight NLOS).

#### Preselección de las muestras

Previo al procesado correspondiente de las medidas, se realiza una selección de coeficientes. El criterio es que las muestras deben estar 10 dB por encima del umbral de ruido y a  $\pm 30$  dB del máximo. Las muestras que no cumplen con estos criterios son descartadas. La ecuación (2) se corresponde con el cálculo del umbral de ruido.

$$N = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T |x(t)|^2 \quad (2)$$

#### Clasificación LOS/NLOS

Para saber si una medida se ha tomado en condiciones de línea de vista o sin línea de vista se aplica el siguiente criterio. Si el primer máximo de la señal es también el máximo absoluto, se cataloga como LOS, donde la primera componente de la señal se corresponde con el camino directo sin reflexiones entre el transmisor y el receptor. Si esta condición no se cumple, se establece la condición de NLOS.

#### Ganancia del canal

Para calcular la ganancia del canal, simplemente se evalúan las pérdidas para cada distancia, incluyendo las ganancias de cada antena

$$G(\text{dB}) = 10 \log \sum_{t=0}^T |x_m(t)|^2 - G_{tx}(\text{dB}) - G_{rx}(\text{dB}), \quad (3)$$

donde  $G_{tx}$  y  $G_{rx}$  son las ganancias en transmisión y recepción respectivamente y  $x_m$  son las muestras resultantes tras la preselección.

#### Delay spread

El *delay spread* describe el multitrayecto en un canal teniendo en cuenta el tiempo de llegada de las componentes de la señal. Para ello, primero se calcula el retardo medio (4) y posteriormente el *delay spread* por medio de la expresión (5).

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{t=0}^T t |x_m(t)|^2}{\sum_{t=0}^T |x_m(t)|^2} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^T (t - \bar{\tau})^2 |x_m(t)|^2}{\sum_{t=0}^T |x_m(t)|^2}} \quad (5)$$

## Factor K

En cuanto al factor K, se define como el ratio entre la potencia de la componente LOS y la potencia media del resto de componentes,

$$K(\text{dB}) = 10 \log \frac{\hat{x}_1^2(t)}{\frac{1}{I-1} \sum_{i=2}^I \hat{x}_i^2(t)} \quad (6)$$

donde  $x_1$  es la componente LOS,  $x_i$  el resto de componentes e I el índice de la última componente.

En el informe técnico previamente mencionado, se recogen los resultados de varias medidas diferentes. Los resultados se recogen en forma de tablas y gráficos tal y como se muestran en la Figura 24.

Table A.4: Statistics of Channel Estimates. Outliers are removed using a significance test of 0.95.

Estimate	min(·)	median(·)	mean(·)	max(·)	std(·)	mad(·)	outlier info
$K$ (dB), NLOS	-19.9	0.1	0.7	20.3	4.4	3.2	N: 22393
$K$ (dB), LOS	0.0	3.9	5.1	20.3	4.3	3.5	N: 5689
$\tau$ (ns)	53.8	569.8	559.3	1311.6	159.7	121.2	N: 24823
$S$ (ns)	0.0	117.4	106.6	377.9	58.2	47.7	N: 24766

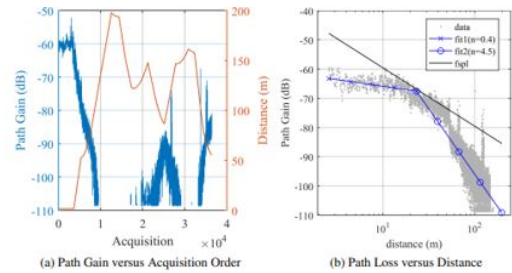


Figura 24: Resultados del post-procesado de las medidas. [17]

Todo el procesado se ha realizado empleando MATLAB y está disponible en el repositorio de Github del NIST [16]. El repositorio cuenta con la documentación pertinente para su comprensión y uso por lo que en este apartado se omitirá una explicación en profundidad del mismo. Remarcar, sin embargo, que este código ha sido analizado y empleado durante este proyecto y se indicará de tal forma cuando sea conveniente.

## 7. Ajuste del modelo

En esta sección se explica el ajuste del modelo que se ha llevado a cabo así como la validación que se ha hecho del mismo, a partir de las medidas de campo obtenidas de las bases de datos del NIST. En otras palabras, se explica el procedimiento completo desde la construcción del modelo, pasando por el tratamiento de las medidas para su integración en las simulaciones y finalmente, los resultados del modelo ajustado.

### 7.1. Motivación del ajuste y validación del modelo

Una de las tareas clave en este trabajo es comprobar el alcance del modelo a la hora de simular un entorno industrial concreto. Para ello, se ha seleccionado uno de los escenarios representados en la campaña de medidas del NIST y se ha extraído la información relevante para ajustar el modelo de QuaDRiGa. La idea es responder a una serie de preguntas que surgen en el momento de emplear este tipo de modelos.

- ¿Cómo de preciso es el modelo representando un escenario concreto?
- ¿Cuántos parámetros debo ajustar para conseguir la respuesta deseada?
- ¿Son todos los parámetros del modelo igual de relevantes?
- ¿El modelo representa de manera fiel el canal real extraído de las medidas de campo?

Todas estas preguntas son resueltas en los siguientes apartados, explicando de forma detallada los pasos que se han seguido para la construcción del modelo y el cómputo de los resultados.

### 7.2. Análisis del escenario a simular

El primer paso para la definición del modelo es conocer el escenario que se desea replicar. En este caso, la campaña de medidas del NIST recopila datos de tres escenarios distintos. Estos tres escenarios se corresponden con tres plantas industriales de diferente tamaño y características. En este trabajo se ha escogido el escenario denominado «Automotive Factory», es decir, una planta de ensamblaje de vehículos. Una vez seleccionado el escenario, el primer paso es estudiar las características del mismo. La fábrica es una superficie *indoor* de grandes dimensiones (400 metros x 400 metros) y con techos de 12 metros de altura. La planta contiene máquinas de diferentes tipos y tamaños así como estructuras más pequeñas dedicadas al almacenaje. Todos los objetos relevantes han sido debidamente marcados en el plano de la fábrica.

En cuanto a la captura de las medidas, se han definido dos recorridos diferentes a lo largo de la planta. El primer recorrido denominado «outer loop», representa el camino que tomarían

vehículos autónomos y demás plataformas móviles para el transporte de inventario. El segundo recorrido o «inner loop» representaría áreas donde existe una cantidad elevada de objetos metálicos reflectantes y maquinaria, impidiendo que se den condiciones de línea de vista a lo largo del trayecto. En esta ocasión, se ha optado por tomar el primer recorrido ya que permite analizar situaciones de línea de vista y sin línea de vista. Adicionalmente, el recorrido es algo menos complejo de reproducir en QuaDRiGa y da una mejor idea de las propiedades del canal en toda la planta. En la Figura 25 se muestra el mapa o «layout» de la planta. En negro se marca el recorrido realizado durante las medidas. Como se puede observar, el recorrido es un *loop* cerrado que comienza en el punto 1 y termina en el punto 13. El receptor es el que se mueve a lo largo de la planta mientras que el transmisor se mantiene estático. Como se puede observar, hay dos transmisores marcados como TX1 y TX2. Se han realizado medidas empleando uno u otro transmisor y en cada fichero de medidas se especifica cuál de ellos ha sido utilizado en cada caso. Por último, cada cuadrado representado en el plano tiene unas dimensiones de 15.2 m x 15.2 m.

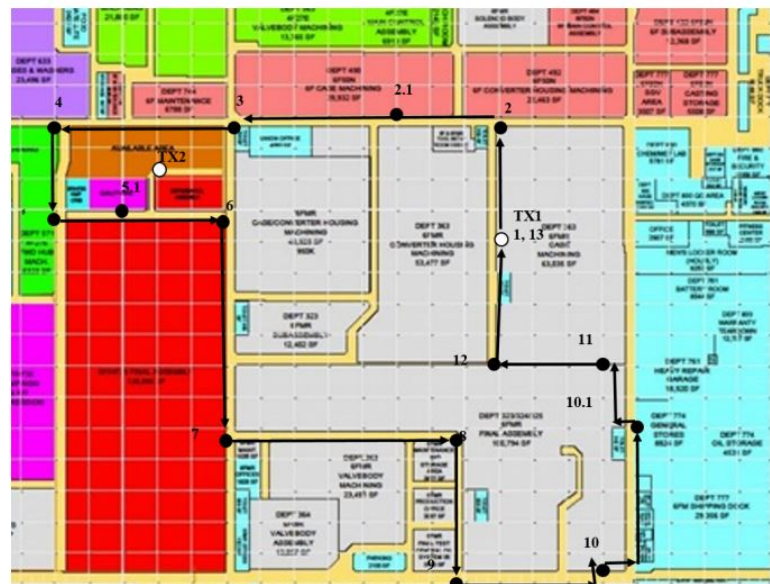


Figura 25: Plano de la planta de ensamblaje de vehículos, «outer loop». [17]

Por otra parte, como se ha explicado en apartados anteriores, para cada escenario se efectúan varias iteraciones de captura de medidas, donde se van modificando algunas características de la transmisión. Por ejemplo, si atendemos a la Figura 26 se puede ver que, para el «outer loop», se realizan diversas iteraciones o *runs* con combinaciones de frecuencia, polarización y transmisor diferentes. Para el ajuste del modelo, se ha elegido una de estas configuraciones, a saber, el archivo «AAPlantD2\_5GHz\_TX1\_vpol\_run1\_pp.mat». Las medidas seleccionadas se corresponden con el uso del transmisor TX1, antenas con polarización vertical y una frecuencia de trabajo de 5.4 GHz.

```

AAPlantD1_2GHz_TX1_hpol_run4_pp.mat ... AAPlantD1_2GHz_TX1_vpol_run3_pp.mat ... AAPlantD2_2GHz_TX1_vpol_internal_runF_pp.mat ... AAPlantD2_2GHz_TX1_hpol_internal_runE_pp.mat ... AAPlantD2_2GHz_TX1_vpol_internal_runF_pp.mat ...
AAPlantD2_5GHz_TX1_hpol_internal_runB_pp.mat ... AAPlantD2_5GHz_TX1_hpol_run2_pp.mat ...
AAPlantD2_5GHz_TX1_vpol_internal_runA_pp.mat ... AAPlantD2_5GHz_TX1_vpol_run1_pp.mat ...
AAPlantD3_2GHz_TX2b_hpol_internal_run36_pp.mat ... AAPlantD3_2GHz_Tx2b_hpol_run34_pp.mat ...
AAPlantD3_2GHz_TX2b_vpol_internal_run33_pp.mat ... AAPlantD3_2GHz_TX2b_vpol_run32_pp.mat ...
AAPlantD3_5GHz_TX2b_hpol_internal_run39_pp.mat ... AAPlantD3_5GHz_TX2b_hpol_run38_pp.mat ...
AAPlantD3_5GHz_TX2b_vpol_internal_run40_pp.mat ... AAPlantD3_5GHz_TX2b_vpol_run37_pp.mat ...
  
```

Figura 26: Ficheros de medidas correspondientes a la planta de ensamblaje de vehículos [15]. Recuadrado en rojo, el archivo seleccionado para el ajuste del modelo.

Por supuesto, no es esta toda la información que se puede extraer del escenario seleccionado. En apartados posteriores, se explica de donde se obtienen los datos necesarios para modelar el entorno de la forma más precisa posible, desde las coordenadas de la trayectoria hasta parámetros más concretos como el *delay spread* o el factor K.

### 7.3. Construcción del modelo

La configuración del modelo de QuaDRiGa se ha realizado por fases, siguiendo la estructura de bloques del modelo. Es decir, por cada clase definida, se han analizado los parámetros que se pueden alterar, en función de la información que se ha podido extraer del NIST en cada caso. En resumen, en este apartado se expone, paso a paso, la implementación del modelo basado en los datos del escenario «AAPlantD2\_5GHz\_TX1\_vpol\_run1\_pp.mat». La Figura 27 muestra un resumen del proceso que se explica a continuación.

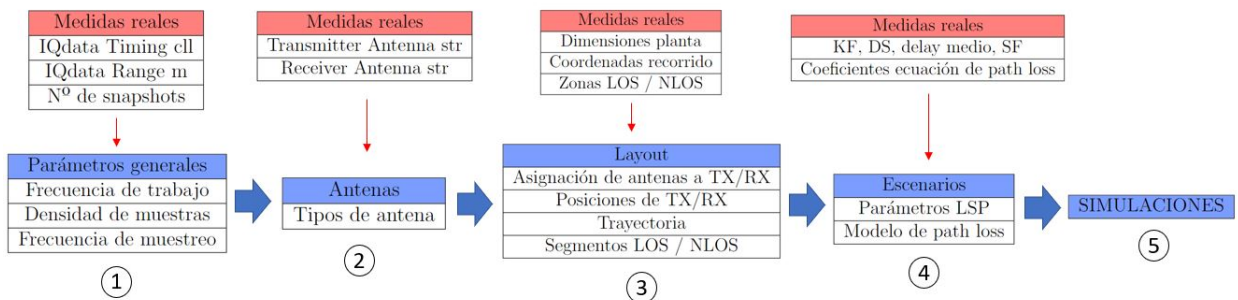


Figura 27: Resumen del proceso de construcción del modelo.

#### 7.3.1. Parámetros generales de simulación

En primer lugar, se procede a la configuración de los parámetros generales de la simulación. Entre estos se encuentran la frecuencia central o el uso de ciertas mejoras que introduce QuaDRiGa. Sin embargo, el parámetro clave es la densidad de muestras o «sample density», definido como el número de muestras por media longitud de onda. El valor de este parámetro determina, a través de la ecuación 7, el número de muestras por metro en la simulación,

siendo las muestras, en realidad, las respuestas impulsionales que se calculan en cada punto del recorrido,

$$f_s = 2 \cdot f_c \cdot \frac{SD}{c} \quad (7)$$

donde  $f_s$  son las muestras por metro,  $f_c$  es la frecuencia de trabajo en Hz,  $SD$  es la densidad de muestra y  $c$  es la velocidad de la luz.

El número de muestras se puede extraer de los datos del NIST, pudiendo determinar si estas muestras o *snapshots* han sido tomadas de manera constante a lo largo de la trayectoria. Para conocer esta información, se accede a la variable «IQdata\_Timing\_cll», contenida en «Strct\_Metadata», dentro del fichero «AAPlantD2\_5GHz\_TX1\_vpol\_run1\_pp.mat». Este fichero se ha descargado desde la página web del NIST y ha sido abierto mediante MATLAB<sup>5</sup>. Esta variable contiene el número total de muestras tomadas así como el instante de tiempo en el que se han medido estas muestras. En total, el número de *snapshots* asciende a 36300. Además, observando el tiempo de captura de las muestras, se ha podido observar que cada 300 muestras se produce un parón. Esto se debe a que, durante la metodología de medidas se decidió separar las medidas en grupos de 300. En total se han capturado 121 grupos o adquisiciones de 300 muestras (o *records*) cada uno<sup>6</sup>.

Adicionalmente, se ha examinado otra de las variables llamada «IQdata\_Range\_m». En esta variable, se recogen los puntos del espacio en los que se ha capturado cada muestra. Esto ha permitido comprobar que hay una serie de medidas que se han realizado de forma estática, tanto al principio como al final del recorrido. Estas medidas han sido tomadas para la calibración de los sistemas y por tanto, no deben tenerse en cuenta a la hora de incluirlas en el modelo. En conclusión, restando las medidas estáticas:

$$n^{\circ} \text{ de muestras a simular} = 36300 - 3300 - 900 = 32100 \text{ muestras} \quad (8)$$

Volviendo al parámetro de interés, «sample density», se nos plantean dos condiciones. La primera es que debemos fijar un valor para obtener 32100 muestras a lo largo del recorrido del terminal. Con un recorrido de 902 metros aproximadamente<sup>7</sup>, es necesario un valor de 35.6 muestras por metro. La segunda condición es el teorema de Nyquist. QuaDRiGa especifica que, cuando solo uno de los terminales está en movimiento, se recomienda una densidad de muestra como mínimo de 1. Esto supone un inconveniente, ya que el número de muestras por metro viene fijado por la densidad de muestra por la ecuación 7. Si se fija un valor de densidad de muestra igual a 1 (que es el mínimo para que se cumpla Nyquist), el número de muestras por metro asciende a 36.025. Si multiplicamos por la longitud total del recorrido, se obtienen 32495 muestras en total. Dado que la diferencia no es sustancial, se ha optado por simular este valor, cumpliendo así el teorema de Nyquist y aproximando de la mejor manera posible el número de muestras real y simuladas.

<sup>5</sup>Para más información acerca del contenido de este fichero, referirse al apartado 6.1.2

<sup>6</sup>Más información sobre la metodología en el apartado 6.1.2

<sup>7</sup>Este valor se computa más adelante, una vez definida la trayectoria mediante la clase «qd\_track»



```
s = qd_simulation_parameters;  
%Fijamos la densidad de muestra minima para cumplir el teorema de Nyquist.  
s.sample_density = 1;  
%Fijamos la frecuencia central en 5.4GHz.  
s.center_frequency = 5.4e9;
```

### 7.3.2. Configuración de las antenas

A continuación, se procede a la creación de las antenas del transmisor y receptor respectivamente. El tipo de antena viene especificado en la variable «Strct\_Metadata», bajo los campos «TransmitterAntenna\_str» y «ReceiverAntenna\_str». Ambos terminales, transmisor y receptor, cuentan con una antena omnidireccional con polarización vertical. Por tanto, a través de la clase «qd\_arrayant», se configura un solo tipo de antena que posteriormente se asignará a transmisión y recepción. A continuación, se muestra el código correspondiente a este paso.

```
%Generamos una antena omnidireccional  
a1 = qd_arrayant('omni'); %Polarizacion vertical por defecto  
  
%Establecemos la frecuencia de trabajo de la antena  
a1.center_frequency = 5.4e9;
```

### 7.3.3. Definición del layout

Una vez definida la antena a utilizar, se define el *layout* del escenario. Esto incluye asignar a cada terminal una antena y una posición en el espacio en coordenadas cartesianas.

En cuanto a las antenas, se asigna el mismo objeto «a1», que contiene la antena omnidireccional, al transmisor y receptor. Sin embargo, la definición de las posiciones de los terminales no es tan inmediata. El transmisor, al mantenerse fijo en el espacio, se le puede asignar de forma estática una posición, tal y como se ve en el siguiente recuadro. En cambio, la posición del receptor es variable y por tanto debe ser definida más adelante a través de la clase «qd\_track».

```
%Asignamos la antena creada a TX y RX  
l.rx_array = copy(a1);  
l.tx_array = copy(a1);  
  
%Definimos la posicion del transmisor  
l.tx_position = [274.2;151.6;3.07];
```

Las posiciones del transmisor y receptor se pueden encontrar en «Strct\_Metadata», en los campos «Rx\_xyz\_m\_ell» y «Tx\_xyz\_m\_ell». Estos campos incluyen 16 puntos con coordenadas x, y, z. Para el transmisor, estas coordenadas son siempre las mismas. Para el

receptor, estas coordenadas van cambiando y sirven para definir la trayectoria del terminal alrededor de la planta.

### 7.3.4. Definición de la trayectoria y los segmentos

Las coordenadas que se encuentran en los datos del NIST no son suficientes para definir de forma totalmente precisa la trayectoria del terminal. Esto ocurre debido a la manera en la que se determinan los recorridos en QuaDRiGa. Aparte de las posiciones en coordenadas cartesianas, es necesario indicar la dirección del movimiento del terminal para llegar de un punto a otro. Esto implica que hay que definir el ángulo de cada giro que realice el terminal durante su trayectoria. Esta información no se encuentra en los datos de los que disponemos. Sin embargo, esto no supone un gran inconveniente ya que la mayoría de giros son de 90 grados. Por tanto, para facilitar el trabajo, el resto de giros se han intentado aproximar también a ángulos rectos. En la Figura 28, se puede comprobar el recorrido real y el recorrido aproximado que se ha implementado en QuaDRiGa. Como se puede observar, las diferencias son mínimas y no supone cambios importantes en la respuesta final del canal.

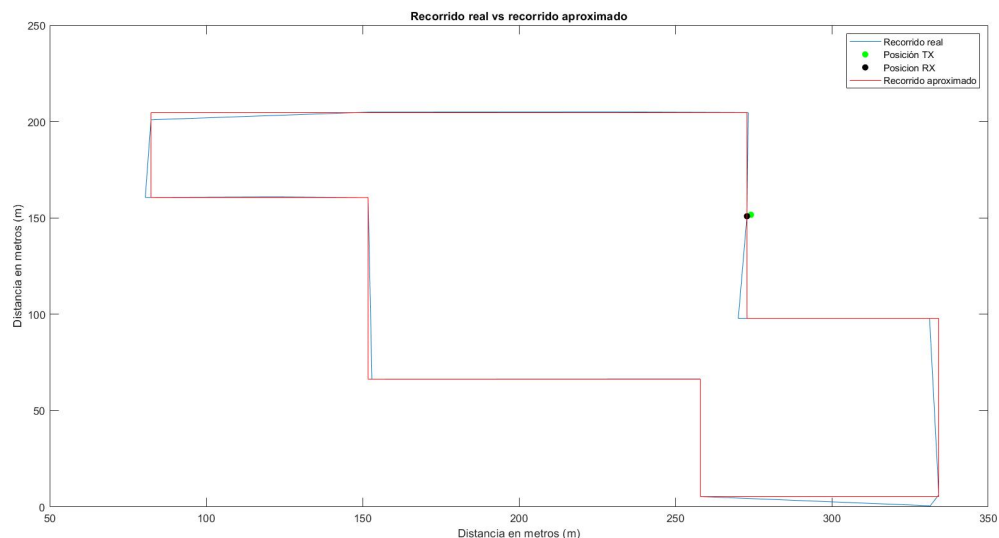


Figura 28: Recorrido real y aproximado del receptor en QuaDRiGa.

Por tanto, para definir la trayectoria en el modelo, basta con determinar las posiciones donde el terminal cambia de dirección, indicando el ángulo de giro en ese punto<sup>8</sup>.

```

%Definimos los puntos donde el terminal cambia de direccion y los ...
  angulos correspondientes.
positions = [53.7, 190.51, 44, 69.41, 94.28, 106.2, 60.925, 76.2, ...
  92.445, 61.3, 53.06];
  
```

<sup>8</sup>Por no alargar innecesariamente las explicaciones, se omiten las líneas de código que no contengan ningún valor explicativo.





```
turning_angle = [pi/2, pi, -pi/2, 0, -pi/2, 0, -pi/2, 0, pi/2, pi, pi/2];  
  
%Pasamos los argumentos al constructor de la clase qd_track para ...  
%generar la trayectoria.  
t = qd_track('linear', positions(1), turning_angle(1));  
%Definimos el punto de partida del receptor.  
t.initial_position = [272.9; 150.9; 1.917];
```

La clase «qd\_track» no solo define la trayectoria del terminal como una serie de puntos en el espacio sino que permite dividir la trayectoria en segmentos. Recordemos, un segmento es una porción del espacio donde los parámetros de gran escala (LSP) permanecen constantes, es decir, un tramo donde las propiedades del canal a grandes rasgos no cambian. Asimismo, a cada segmento se le debe asignar un escenario concreto (*indoor* LOS, *outdoor*, etc.). Estos escenarios son archivos de configuración .conf que contienen parámetros del canal como el *delay spread*, el factor K o los ángulos de llegada y salida de los rayos.

En el caso que nos ocupa, se contemplan dos escenarios posibles que el terminal en movimiento puede experimentar. Dado que el recorrido se produce por dentro de la misma planta en su totalidad, el escenario será de tipo *indoor* industrial. La diferencia está en la condición de línea de vista. Hay tramos en los que el terminal, debido a los objetos y paredes del entorno, no tendrá línea de vista directa con el transmisor. En otras ocasiones, en cambio, se dará la condición de línea de vista. Por lo tanto, esto implica que deben configurarse dos escenarios diferentes, uno de ellos correspondiente a la situación LOS y otro a la situación NLOS. Por ello, el próximo paso es determinar el número de segmentos, donde comienza y termina cada uno de ellos y qué escenario se asigna a cada segmento. Todo esto se realiza a través de la misma clase «qd\_track».

En QuaDRiGa, un cambio de segmento viene dado por dos motivos principalmente. El primero y más común es por el cambio del entorno producido por el movimiento del terminal. Por ejemplo, si la condición de línea de vista cambia de NLOS a LOS, el segmento correspondiente a NLOS termina y comienza el segmento LOS, con su escenario y nuevas condiciones asociadas. El segundo motivo está relacionado con la consistencia espacial que se implementa en el modelo. En su documentación, QuaDRiGa recomienda no simular segmentos LOS de más de 20 metros y segmentos NLOS de más de 45 metros. Estos valores coinciden con las distancias medias de decorrelación. Estas distancias definen cuánto debe moverse un terminal para experimentar un cambio en las condiciones del canal. Las distancias de decorrelación se determinan para cada parámetro LSP y suelen ser del orden del tamaño del objeto que causa el fenómeno. En el caso que nos ocupa, al tratarse de un espacio muy grande, es necesario dividir los segmentos largos en segmentos más pequeños. Por lo tanto, en nuestra trayectoria se deben atender a cambios de segmento por ambos motivos, un cambio de escenario o un segmento demasiado largo. En este último caso, un cambio de segmento no tiene por qué implicar un cambio de escenario.

Para resolver esta problemática se ha decidido proceder de la siguiente manera. En primer lugar, se encuentran los puntos del trayecto donde las condiciones cambian de LOS a NLOS y viceversa. Estos puntos determinan donde se debe alternar de segmento debido a un cambio de escenario. Una vez definidos estos segmentos, se comprueba si alguno de estos es excesivamente largo. Si es así, se divide este segmento en segmentos más pequeños pero

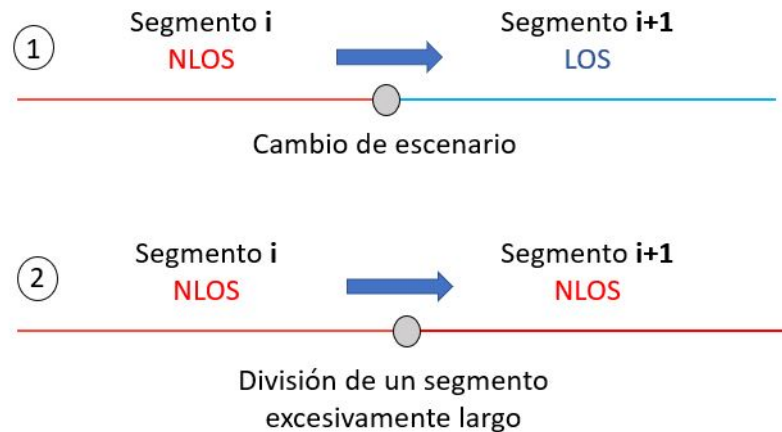
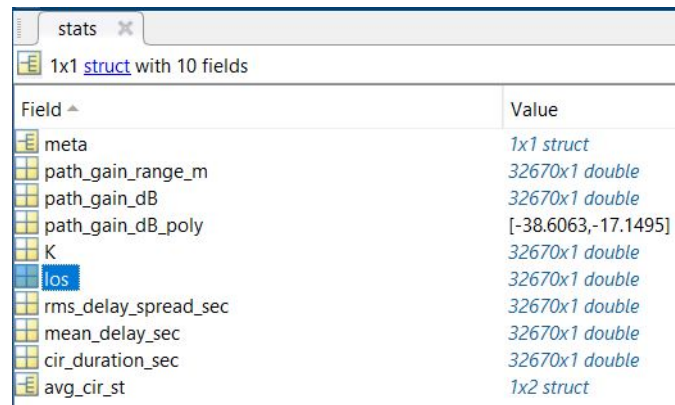


Figura 29: Posibles transiciones entre segmentos.

manteniendo el mismo escenario. Por ejemplo, un segmento LOS de 100 metros se dividiría en 5 segmentos LOS de 20 metros cada uno. De esta forma, se cumplen los cambios de escenario que vienen definidos por la información extraída del NIST y a su vez, se cumple con las condiciones que impone QuaDRiGa en términos de la longitud máxima de un segmento.

Por lo tanto, lo primero es determinar en qué puntos de la trayectoria se experimenta condición de línea de vista LOS o sin línea de vista NLOS. Para ello, el NIST realiza un procesamiento sobre las medidas que llama «LOS Classification». Este cálculo se basa en el valor del primer pico de la respuesta impulsional. En esencia, si el valor del primer pico es el máximo de todos los picos de la respuesta, se considera que el terminal se encuentra en situación LOS. Si no es así, se clasifica como NLOS. Esta clasificación cobra sentido cuando se piensa en el significado de línea de vista. Esta condición implica que hay un camino directo entre transmisor y receptor y por tanto, el rayo que se corresponde con este trayecto directo, llegará el primero y con una mayor amplitud. Los rayos consecutivos, fruto de los rebotes con el entorno, llegarán más tarde y con menor amplitud. Para extraer dicha clasificación, se debe tomar el software de post-procesado desarrollado por el NIST disponible en Github. Mediante la función «estimate\_channel\_cwd», se procesan las medidas contenidas en el archivo «AAPlantD2\_5GHz\_TX1\_vpol\_run1\_pp.mat» y se genera otro archivo llamado «AAPlantD2\_5GHz\_TX1\_vpol\_run1\_pp\_channel\_stats.mat», que contiene varios parámetros extraídos del canal. En la Figura 30 se observa el contenido de este archivo. La variable «los» es la que contiene la información acerca de la clasificación LOS/NLOS.

Al representar gráficamente estos valores, la variación que se observa en las condiciones de LOS y NLOS son demasiado rápidas. En la Figura 31 se muestra dicha representación. Cuando la condición es LOS, se representa un 1 y cuando la condición es NLOS, se representa un -1. Como se puede deducir, esta figura no ayuda a determinar en qué puntos cambian las condiciones de línea de vista. Además, aunque se quisiera simular de esta forma, sería inviable la simulación de una cantidad tan elevada de segmentos (recordemos que cada cambio de condición implica un nuevo segmento).



Field	Value
meta	1x1 struct
path_gain_range_m	32670x1 double
path_gain_dB	32670x1 double
path_gain_dB_poly	[-38.6063,-17.1495]
K	32670x1 double
los	32670x1 double
rms_delay_spread_sec	32670x1 double
mean_delay_sec	32670x1 double
cir_duration_sec	32670x1 double
avg_cir_st	1x2 struct

Figura 30: Contenido del archivo AAPlantD2\_5GHz\_TX1\_vpol\_run1\_pp\_channel\_stats.mat

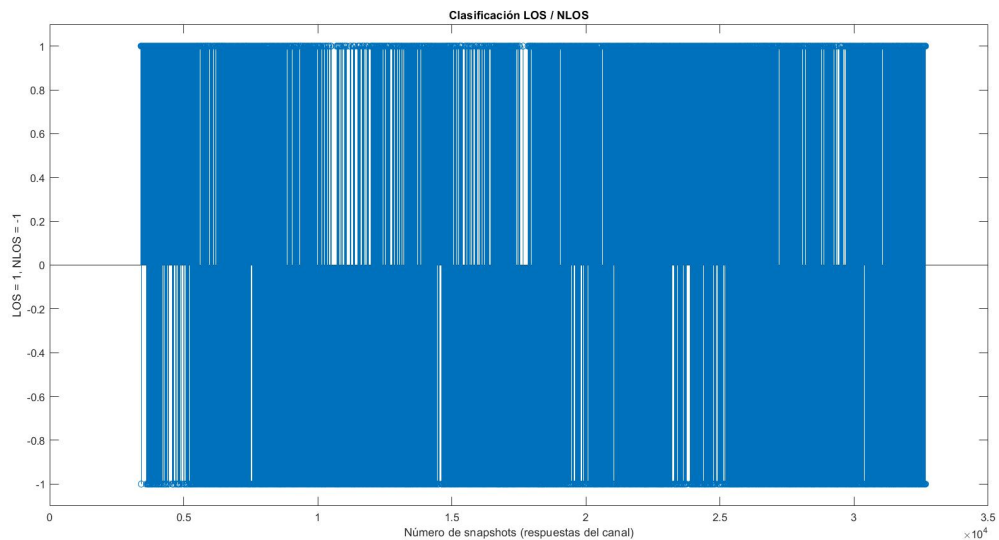


Figura 31: Clasificación LOS/NLOS de cada respuesta realizada por el NIST.

Por tanto, se ha decidido aplicar un procesado adicional a los datos relativos a la clasificación de LOS/NLOS, con la idea de visualizar un patrón que se pueda traducir en una serie de segmentos en QuaDRiGa. Para suavizar las transiciones LOS/NLOS, se ha decidido aplicar un enventanado de  $n$  muestras, calculando la mediana de las muestras que caen en cada ventana. Variando el tamaño de esta ventana se empiezan a visualizar grupos de mayor densidad, que se corresponden, por inspección visual, con las diferentes zonas LOS/NLOS. Además, para una mejor visualización, se ha establecido LOS con un valor de 1 y NLOS con valor de 0. En la Figura 32 se muestran cuatro tamaños de ventana diferentes.

Poniendo el eje en metros y mediante inspección visual, se han conseguido establecer 11 segmentos diferentes. Los segmentos a lo largo del recorrido son alternos, es decir, el segmento 1 es LOS, el segmento 2 es NLOS, el segmento 3 es LOS, etc. El *layout* resultante de esta primera iteración se representa en la Figura 33.

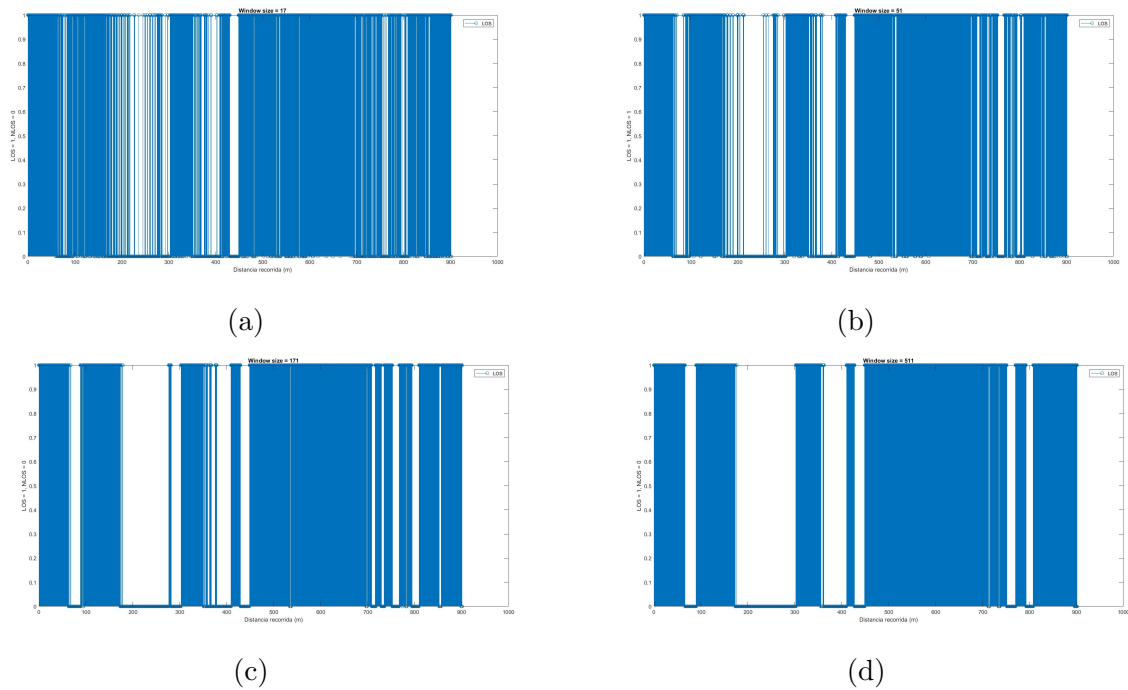


Figura 32: Contenido de un archivo de medidas: (a) Tamaño de ventana: 17 muestras, (b) Tamaño de ventana: 51 muestras, (c) Tamaño de ventana: 171 muestras, (d) Tamaño de ventana: 511 muestras.

El siguiente paso es comprobar si los segmentos son excesivamente largos para las condiciones que establece QuaDRiGa para la consistencia espacial. Después de medir la longitud de los 11 segmentos, se ha corroborado que algunos son demasiado largos. Es decir, hay segmentos LOS que sobrepasan los 20 metros y segmentos NLOS superiores a 45 metros. Por tanto, cada segmento que incumpliera estas condiciones se ha dividido en segmentos iguales más pequeños. El resultado es una trayectoria de 40 segmentos, cumpliendo con los requisitos de consistencia espacial y aproximando las zonas LOS/NLOS de la planta donde se han ejecutado las medidas. Como se ha visto, este proceso no es del todo exacto, ya que se ha llevado a cabo con los recursos e información de la que se dispone en el NIST. Aunque la aproximación se ha considerado lo suficientemente aceptable, esto puede acarrear algunas desviaciones en el resultado de las simulaciones. En la Figura 34 se representa el *layout* mejorado, que consta de los 40 segmentos mencionados.

Finalmente, para definir completamente la trayectoria, se emplea el método «*interpolate\_positions*». Esta función interpola, si fuera necesario, las muestras a lo largo de la trayectoria para que se cumpla el criterio de muestras por metro establecido en los parámetros generales de la simulación. Dicho de otra forma, este método «cuadra» las muestras teniendo en cuenta el recorrido y el número de muestras por metro establecido.

```
interpolate_positions(l.rx.track, s.samples_per_meter);
```

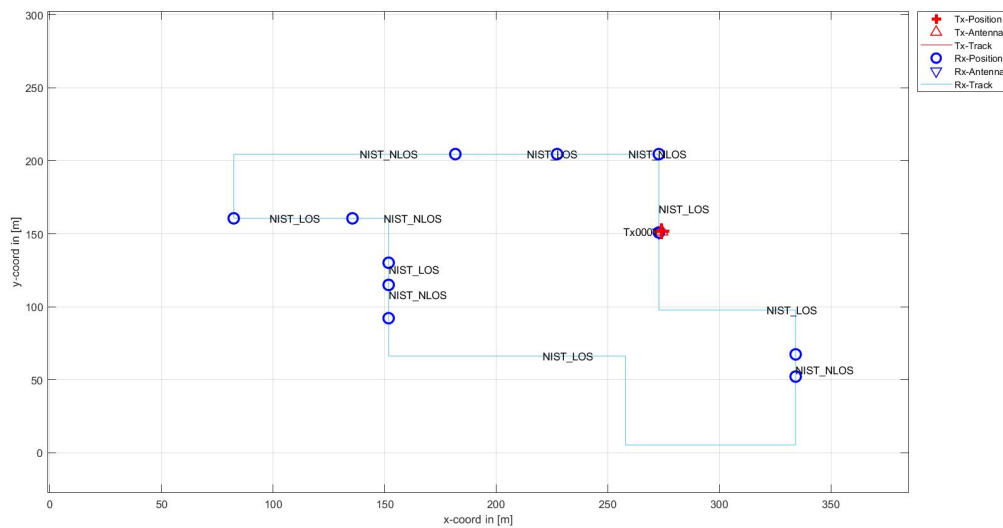


Figura 33: Layout compuesto por 11 segmentos.

### 7.3.5. Configuración de los archivos de escenario

En anteriores apartados, se ha discutido acerca de las condiciones que experimenta un terminal en una posición determinada del trayecto. Estas condiciones vienen definidas por los llamados parámetros de gran escala o LSP, que toman valores diferentes según el escenario. Una definición acertada del modelo pasa por determinar el escenario adecuado en cada situación. Por este motivo, en el apartado 7.3.4 se ha hecho especial hincapié en la definición de los segmentos y los escenarios asociados en cada caso. Como se ha mencionado previamente, un escenario se define a través de un archivo de configuración .conf, donde se almacenan los parámetros relevantes del escenario. Estos escenarios están basados en campañas de medidas en diferentes entornos. Por este motivo, es factible crear un nuevo escenario a partir de los datos de medidas del NIST. Recalcar que no todos los escenarios tienen el mismo número de parámetros ya que la información que se puede extraer de diferentes campañas no es la misma tampoco. La clave, por tanto, es determinar qué parámetros se pueden extraer del NIST para incluirlos en un nuevo archivo de configuración que modele las propiedades de la planta de ensamblaje de vehículos. La Tabla 3 resume de manera concisa los principales parámetros que se incluyen en estos archivos de configuración.

Analizando los escenarios ya existentes en QuaDRiGa, se concluye que existen tres escenarios cuyas características se asemejan al entorno que se quiere reproducir. Estos escenarios son:

- QuaDRiGa Industrial LOS y QuaDRiGa Industrial NLOS: ambos escenarios han sido definidos a partir de medidas en entornos industriales *indoor* entre 2 GHz y 6 GHz. Cada archivo se corresponde con una de las condiciones LOS o NLOS. Esta distinción ocurre en la mayoría de casos, donde un escenario cuenta con dos archivos diferenciados, uno para LOS y otro para NLOS.

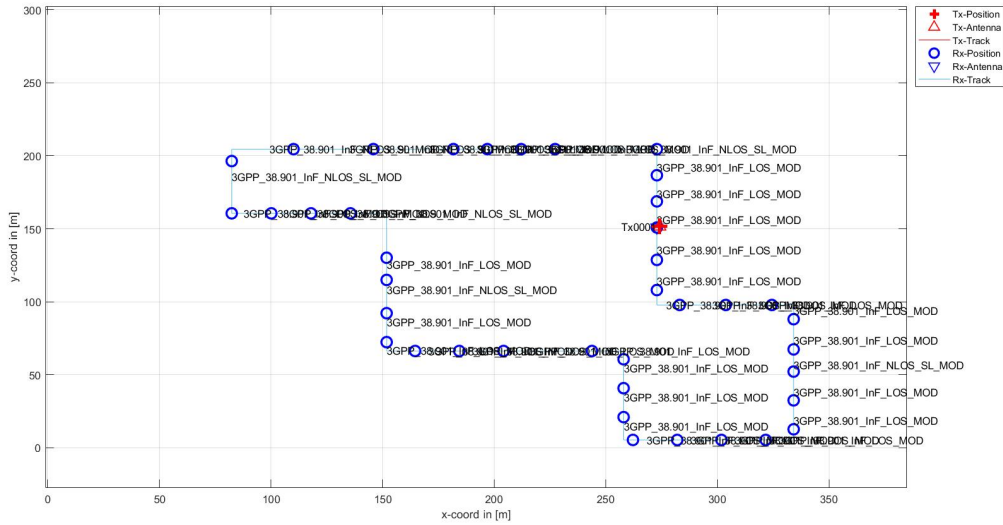


Figura 34: Layout compuesto por 40 segmentos.

Distribuciones estadísticas de los LSP			
DS ( $\mu, \sigma$ )	KF ( $\mu, \sigma$ )	SF ( $\mu, \sigma$ )	XPR ( $\mu, \sigma$ )
AS_D ( $\mu, \sigma$ )	AS_A ( $\mu, \sigma$ )	ES_D ( $\mu, \sigma$ )	ES_A ( $\mu, \sigma$ )
Parámetros del modelo			
Nº de clusters	Nº de paths / cluster	Factor de escala de delay	Shadowing / cluster ( $\sigma$ ) [dB]
AS_D / cluster [deg]	AS_A / cluster [deg]	ES_D / cluster [deg]	ES_A / cluster [deg]
Distancias de decorrelación ( $\lambda$ )			
DS_λ [m]	KF_λ [m]	SF_λ [m]	XPR_λ [m]
AS_D_λ [m]	AS_A_λ [m]	ES_D_λ [m]	ES_A_λ [m]
Correlación entre parámetros			
Matriz de correlación entre los diferentes parámetros LSP: DS vs KF, ASA vs SF, XPR vs ESD, etc.			
Modelo de path-loss			
Se define un modelo de path-loss: Hata, dual-slope, winner_los, etc.			

Tabla 3: Parámetros de un archivo de configuración de escenario.

- 3GPP 38.901 InF LOS y 3GPP 38.901 InF NLOS SL: Estos escenarios también están basados en medidas de entornos industriales. En el caso de NLOS, se especifica que el escenario es SL (Sparse clutter, Low BS), es decir, un entorno con objetos diseminados en el espacio (con una distancia significativa entre estos elementos) y con estaciones base cuya altura no supera la altura media de los *scatterers*.
- WINNER B3: este escenario no está incluido en QuaDRiGa sino que se ha importado del modelo de WINNER II. Aún no siendo un escenario de carácter propiamente industrial, se ha decidido incluirlo ya que en WINNER, se describe como un «espacio *indoor* abierto, similar a una fábrica o *factory hall*».

La idea, por tanto, es analizar estos escenarios y construir uno nuevo a partir de los parámetros extraídos del NIST. A continuación, se explica qué parámetros se han podido obtener para ser añadidos en los archivos de configuración del nuevo escenario. Como en

casos anteriores, se distinguen los entornos LOS y NLOS, por lo que se deberán crear dos archivos de configuración distintos, «NIST LOS» y «NIST NLOS». La Tabla 3 muestra los parámetros que se deben determinar, de una forma u otra, para aproximar la respuesta del modelo a la realidad lo máximo posible. Cuanto mayor sea el número de parámetros que se logren definir, más preciso será el comportamiento del modelo.

## Distribuciones estadísticas de los LSP

En primer lugar, se comienza por las distribuciones estadísticas de los LSP. Estas distribuciones está definidas por una mediana  $\mu$  y una desviación típica  $\sigma$ . Estos parámetros son el mínimo requisito para una correcta definición de las distribuciones. Adicionalmente, se pueden incluir otros parámetros que definen dependencias con la frecuencia, la distancia o la altura de las antenas. Sin embargo, como se ha dicho, la mediana y la desviación estándar dejan perfectamente definidas estas distribuciones. Para encontrar estos datos, se acude al documento del NIST donde se recoge un resumen de los resultados del post-procesado de las medidas. La Tabla 4 muestra dichos resultados.

Estimate	min( $\cdot$ )	median( $\cdot$ )	mean( $\cdot$ )	max( $\cdot$ )	std( $\cdot$ )	mad( $\cdot$ )	outlier info
K (dB), NLOS	-23.5	5.4	4.7	24.2	7.1	5.6	N: 29261
K (dB), LOS	1.1	11.3	11.6	24.2	3.1	2.5	N: 10261
$\tau$ (ns)	38.0	664.8	644.4	1702.2	221.4	178.0	N: 29076
S (ns)	14.4	182.0	177.4	420.4	57.6	46.0	N: 28717

Tabla 4: Resumen de resultados procedentes del NIST.

Como se puede ver, aparecen varios parámetros LSP de los que se pueden extraer información relevante, concretamente, la mediana  $\mu$  y la desviación típica  $\sigma$  del factor K para condiciones LOS y NLOS y el *delay spread* S. Por tanto, inicialmente, estos valores pueden ser mapeados directamente en los archivos de configuración del escenario. En cuanto al resto de parámetros LSP, no se pueden extraer de los datos proporcionados por el NIST. Sin embargo, tal y como se ha mencionado anteriormente, QuaDRiGa cuenta con dos escenarios basados en medidas industriales. Para los parámetros LSP restantes, se ha decidido tomar como referencia estos escenarios. Dado que los valores de cada escenario no son exactamente iguales, se ha tomado la media de estos valores. Por ejemplo, la mediana  $\mu$  de la distribución correspondiente a los ángulos de llegada en azimuth (AS\_A), será la media de las medianas de los escenarios QuaDRiGA Industrial y 3GPP 38.901 InF SL. El escenario WINNER B3 no se ha tenido en cuenta a la hora de definir estos parámetros ya que se trata de un caso especial (no es puramente un escenario industrial como los dos anteriores). La Tabla 5 recoge los valores de las distribuciones de los ángulos.

Por otra parte, el factor de polarización cruzada (XPR) no es relevante en estas simulaciones ya que tanto el transmisor como el receptor emplean antenas con la misma polarización vertical. Por lo tanto, este parámetro no se tiene en cuenta en el nuevo escenario.

## Parámetros del modelo

En cuanto a los llamados «parámetros del modelo», expresados en la Tabla 3, no existe manera de mapear de forma directa estos parámetros desde los datos del NIST. Sin



		QuaDRiGa Industrial		3GPP 38.901 InF SL		NIST escenario	
		LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
AS_D	$\mu$	1.66	1.68	1.56	1.57	1.61	1.63
	$\sigma$	0.12	0.1	0.25	0.2	0.19	0.15
AS_A	$\mu$	1.69	1.62	1.78	1.72	1.73	1.67
	$\sigma$	0.15	0.22	0.2	0.3	0.17	0.26
ES_D	$\mu$	1.55	1.6	1.35	1.2	1.45	1.4
	$\sigma$	0.01	0.17	0.35	0.55	0.18	0.72
ES_A	$\mu$	1.64	1.64	1.5	1.45	1.57	1.55
	$\sigma$	0.01	0.06	0.35	0.45	0.18	0.26

Tabla 5: Distribuciones estadísticas de los ángulos.

embargo, al observar, de nuevo, los escenarios QuaDRiGa Industrial y 3GPP 38.901 InF SL, se puede ver que los valores que se toman en cada caso son muy similares. Por lo tanto, no hay motivo para pensar que el nuevo escenario no guarde un parecido razonable con estos valores. Recordemos que los tres escenarios están configurados en base a medidas de campo en entornos industriales, por lo que la relación entre escenarios es evidente. En la Tabla 6 se muestran los parámetros en cuestión.

	QuaDRiGa Industrial		3GPP 38.901 InF SL		NIST escenario	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
Nº de clusters	25	26	25	26	25	26
Nº de paths / cluster	20	20	20	20	20	20
AS_D / cluster [deg]	5	5	5	5	5	5
AS_A / cluster [deg]	8	8	8	8	8	8
ES_D / cluster [deg]	7	7	7	7	7	7
ES_A / cluster [deg]	9	9	9	9	9	9
Factor de escala de delay	2.7	3	2.7	3	2.7	3
Shadowing / cluster [dB]	4	3	4	3	4	3

Tabla 6: Parámetros del modelo para el archivo de escenario.

## Distancias de decorrelación

El siguiente grupo de parámetros se trata de las distancias de decorrelación. Estos valores se corresponden con la distancia durante la cual los LSP se mantienen relativamente constantes. De nuevo, se toman como referencia los valores de los escenarios industriales por defecto, calculando la media entre ambos escenarios para obtener los nuevos valores. La Tabla 7 recoge las distancias de decorrelación.

## Correlación entre parámetros

La correlación entre los parámetros LSP viene dada por la matriz de correlación. Esta matriz asigna un valor entre -1 y 1 a cada pareja de parámetros LSP según la correlación que guarden entre ellos. En el caso que nos ocupa, se ha decidido prescindir de esta matriz ya que su definición no es obligatoria. De hecho, en el escenario 3GPP 38.901 InF SL no se define una matriz de correlación. Por ello, y ante la dificultad de obtener estos valores a



[m]	QuaDRiGa Industrial		3GPP 38.901 InF SL		NIST escenario	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
DS	50	52	10	10	30	31
KF	32	14	10	10	21	12
SF	15	30	10	10	12	20
AS_D	10	13	10	10	10	11
AS_A	10	13	10	10	10	11
ES_D	10	20	10	10	10	15
ES_A	10	20	10	10	10	15

Tabla 7: Distancias de decorrelación.

partir de los datos del NIST, se ha omitido este conjunto de parámetros.

### Modelo de path loss

En QuaDRiGa, hay posibilidad de seleccionar diversos modelos de *path loss*. Atendiendo a la documentación del NIST, se puede observar un gráfico del *path loss* obtenido a partir de las medidas de campo. Este gráfico es el que se muestra en la Figura 35.

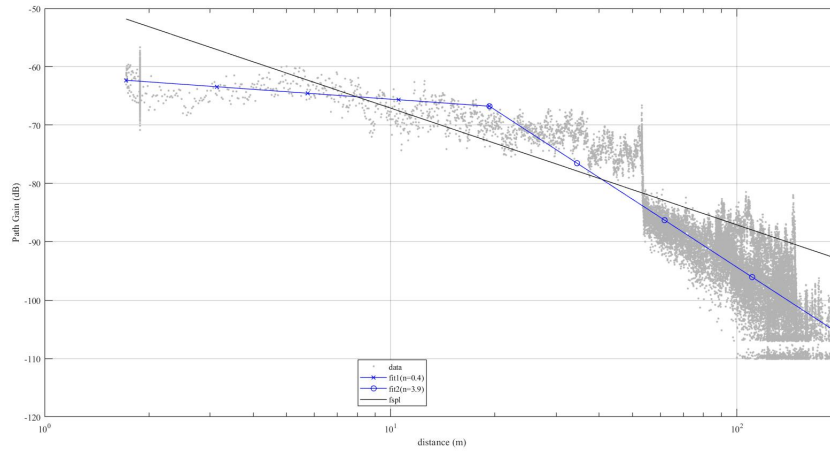


Figura 35: Medidas de path loss extraídas del NIST.

Como se puede ver, el conjunto de puntos se ha aproximado a dos rectas, cada una con sus respectivos coeficientes  $n$ . Por tanto, el *path loss* queda definido mediante una función a trozos. Basándose en la ecuación del modelo de «log-distance path loss», el *path loss* se puede expresar como:

$$PL = \begin{cases} 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + PL(d_0) & n = 0,3, d < 20 \text{ m} \\ 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + PL(d_0) & n = 3,9, d > 20 \text{ m} \end{cases} \quad (9)$$

donde  $n$  es el coeficiente de las rectas,  $d_0 = 1m$  es la distancia de referencia y  $PL(d_0)$  son las pérdidas a la distancia de referencia  $d_0$ , que a la frecuencia de trabajo de 5.4GHz

ascienden a 32 dB. Estas ecuaciones se han incluido en los archivos de configuración del nuevo escenario.

Llegados a este punto, se tiene una primera aproximación del modelo completo para comenzar con las simulaciones. En el siguiente apartado se explican las simulaciones efectuadas y los resultados obtenidos, así como las modificaciones pertinentes que se han realizado al modelo para obtener una aproximación óptima de la realidad.

## 7.4. Validación del modelo. Resultados

En este apartado se describen las simulaciones que se han llevado a cabo para comprobar cómo de preciso es el modelo diseñado. Como se ha explicado anteriormente, una parte importante del modelo es la definición de los archivos de configuración del escenario, que contienen los parámetros LSP del modelo. Por otra parte, se han mencionado tres escenarios industriales que se incluyen en QuaDRiGa por defecto. Como punto de partida, se ha simulado el modelo escogiendo cada uno de estos escenarios: WINNER B3, QuaDRiGa Industrial y 3GPP 38.901 InF SL. De esta forma, se ha podido comprobar cómo de bien representan estos escenarios industriales el entorno real a emular. Tras esto, se ha simulado el modelo con el escenario «ajustado» del NIST. Para todos los casos, se han mantenido constantes el resto de parámetros del modelo (trayectoria del terminal, tipo de antenas, densidad de muestras, etc.).

La pregunta ahora reside en qué parámetros se deben analizar para evaluar la respuesta del modelo. Estos parámetros deben poder extraerse de los datos del NIST, ya que lo que se pretende es comparar los resultados de la simulación con los datos reales. Analizando los datos disponibles en el NIST, se recurre de nuevo a la Tabla 4. En esta tabla se muestran una serie de estadísticos de parámetros clave en la definición de cualquier canal: factor K en línea de vista, factor K sin línea de vista, *delay spread* y *mean delay* o *delay* medio. Adicionalmente, el NIST también proporciona datos de *path loss*. En definitiva, estos cinco parámetros son los que se han decidido calcular para determinar la validez del modelo. En principio, podrían parecer pocos parámetros pero hay que recordar que muchos parámetros ya han sido modelados de forma «determinista», como el recorrido del terminal, los segmentos, las condiciones de línea de vista o el número de muestras tomadas a lo largo de la trayectoria. Todos estos parámetros no se consideran estrictamente resultados de las simulaciones pero dan buena cuenta de las capacidades del modelo a la hora de representar el entorno.

A continuación, en la Figura 36 se muestran cuatro gráficas. Cada gráfica representa los valores medios de cuatro de los parámetros mencionados: factor K LOS, factor K NLOS, *delay spread* y *mean delay*. Los valores medios son, como su nombre indica, la media de estos parámetros a lo largo de la trayectoria, es decir, el valor medio del *delay spread* es la media de todos los valores de *delay spread* calculados en cada punto del trayecto. Para cada escenario, se han realizado diez simulaciones por lo que, de cada escenario, se han obtenido diez valores medios de cada parámetro. Son estos valores los que se representan en cada una de las cuatro gráficas.

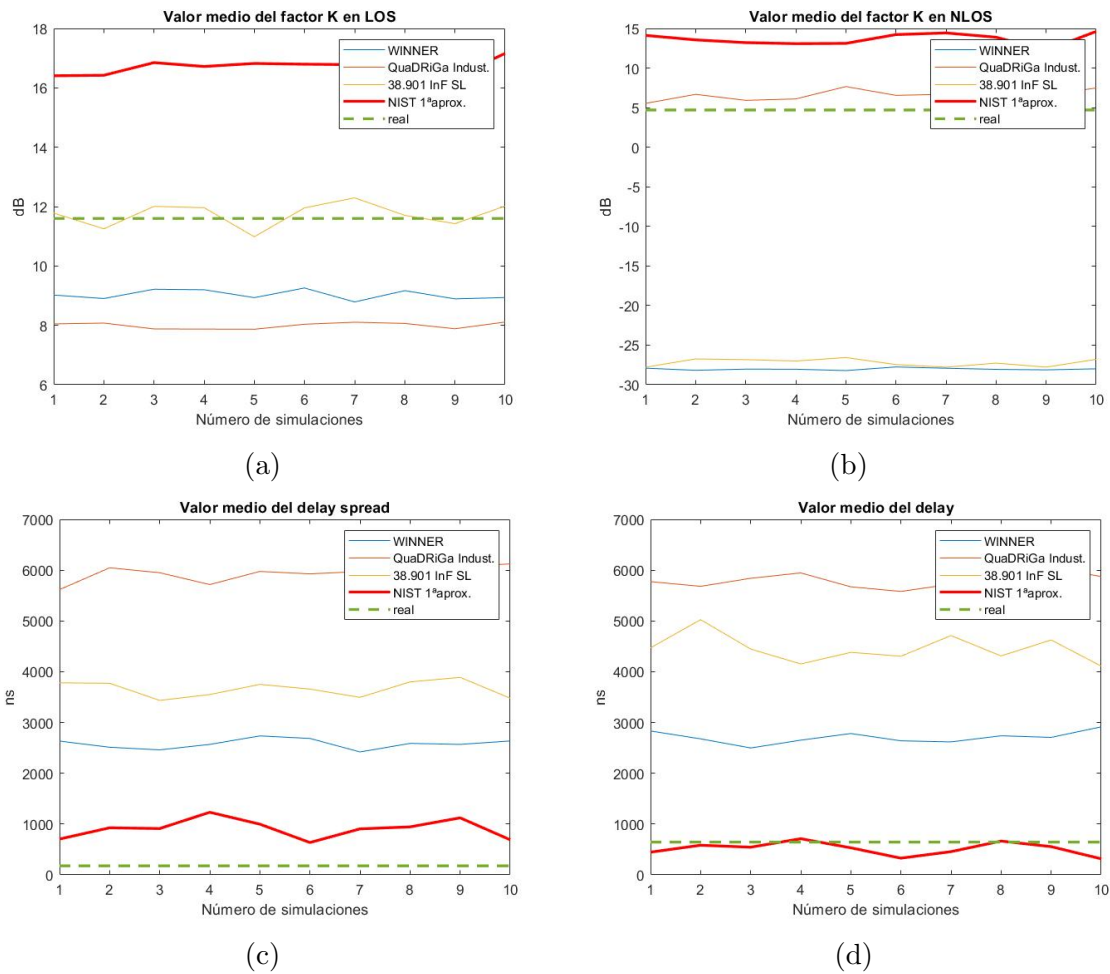


Figura 36: Resultados de la 1ª aproximación: (a) Factor K en LOS, (b) Factor K en NLOS, (c) Delay spread, (d) Mean delay

De esta primera aproximación se pueden sacar varias conclusiones. La primera es que, a priori, ninguno de los escenarios se erige como claro ganador en la comparativa. Por ejemplo, mientras que para el caso del *delay spread* y del *delay* medio, el escenario del NIST es el que más se acerca a la realidad, la estimación del factor K es superior empleando el escenario 38.901 InF SL para LOS y QuaDRiGa Industrial para NLOS. Por otra parte, todos los escenarios sobrestiman ampliamente los valores de *delay spread* y *delay* medio. Sin embargo, inspeccionando la Tabla 4, que recoge los resultados reales de las medidas, se puede ver que los valores de *delay* tienen una elevada desviación por lo que el valor medio, en este caso, no es un valor tan representativo del canal. A pesar de ello, los valores estimados de los escenarios por defecto siguen siendo elevados. Esto también se puede deber a que las dimensiones del escenario simulado son grandes, saliendo del rango de distancias recomendado para alguno de los escenarios. Por ejemplo, para el escenario de QuaDRiGa Industrial se define un rango de aplicación de 5 - 150 metros (la planta de ensamblaje de vehículos del NIST es de 400 x 400 metros), mientras que el escenario 38.901 3GPP InF SL permite mayores distancias. Esto es una posible explicación de por qué, en ambos casos, la estimación del *delay spread* y *delay* medio es mejor con el escenario 38.901 3GPP InF SL.

Tras estos resultados, se pretende ajustar una segunda vez el escenario del NIST para aproximar de manera más precisa los valores del factor K. Como se ha observado anteriormente en la Figura 36, el escenario 38.901 InF SL es el que mejor estima el factor K en LOS y QuaDRiGa Industrial es la mejor aproximación para NLOS. Por tanto, para mejorar el escenario del NIST, se introducen los valores del factor K de los mejores escenarios en cada caso. La Figura 37 ilustra esta modificación.

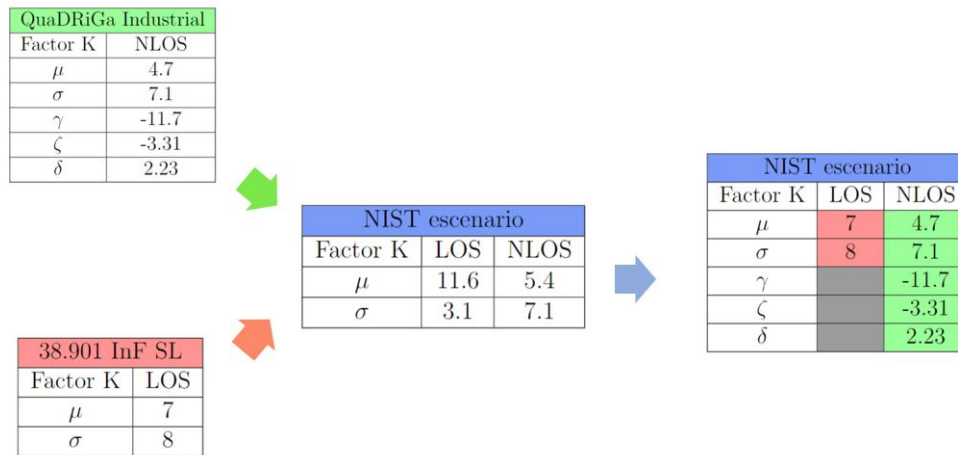


Figura 37: Modificación del escenario de NIST para mejorar la estimación del factor K.

Tal y como se aprecia en la figura anterior, el escenario de QuaDRiGa NLOS incluye tres parámetros extras ( $\gamma$ ,  $\zeta$ ,  $\delta$ ) que no se encuentran en el resto de escenarios. Estos parámetros modelan una dependencia con la frecuencia y la altura del transmisor. En la Figura 38, se muestra la segunda aproximación del escenario del NIST. Se puede ver que la modificación realizada sobre los parámetros relativos al factor K han surgido efecto y, como se buscaba, la estimación del factor K ha mejorado. Sin embargo, se puede ver que el *delay spread* y el *delay* medio han aumentado y por tanto, la estimación de estos parámetros ha empeorado. La explicación está en la relación inversa que poseen el factor K y el *delay spread*. Cuanto mayor es el factor K, mayor potencia se le asigna al rayo principal. En otras palabras, un factor K bajo implica que la amplitud de los rayos secundarios es mayor en relación al rayo principal. Es justamente esta relación la que se tiene en cuenta en el cálculo del *delay spread*. Por este motivo, un factor K bajo dilata en el tiempo la llegada de rayos significativos para el cómputo del *delay spread*, que termina por aumentar. Esta relación inversa, que se produce fruto de la naturaleza de estos parámetros, puede ser definida de forma explícita mediante la ya mencionada matriz de correlación de los parámetros LSP. La Figura 38 refleja la segunda aproximación del modelo.

Por otra parte, la Tabla 8 muestra una comparativa del máximo, mínimo y desviación típica de los parámetros mencionados. Entre estos valores, cabe destacar una menor desviación de las medidas en el entorno simulado, sobre todo en el *delay spread* y *delay* medio, dando una idea de la gran variabilidad de un entorno de tipo industrial. En un mismo escenario, se llegan a medir valores tan dispares como un *delay spread* de 38 ns hasta 1700 ns aproximadamente. Esto refuerza lo que se ha venido repitiendo en apartados anteriores, esto es, la complejidad de modelar entornos tan variables de una forma precisa y a la vez, tener un modelo «genérico» que pueda representar un conjunto de escenario similares.

	min( $\cdot$ )		mean( $\cdot$ )		max( $\cdot$ )		std( $\cdot$ )	
	Datos empíricos	Simulación	Datos empíricos	Simulación	Datos empíricos	Simulación	Datos empíricos	Simulación
K (dB), NLOS	-23.5	-12.9	4.7	14.1	24.2	21.3	7.1	4.6
K (dB), LOS	1.1	0.8	11.6	9	24.2	27.7	3.1	4.9
$\tau$ (ns)	38.0	0	644.4	2485	1702.2	4900.1	221.4	33.8
S (ns)	14.4	0	177.4	2829.3	420.4	982.3	57.6	6.9

Tabla 8: Comparativa de estadísticos entre datos empíricos y resultados de las simulaciones.

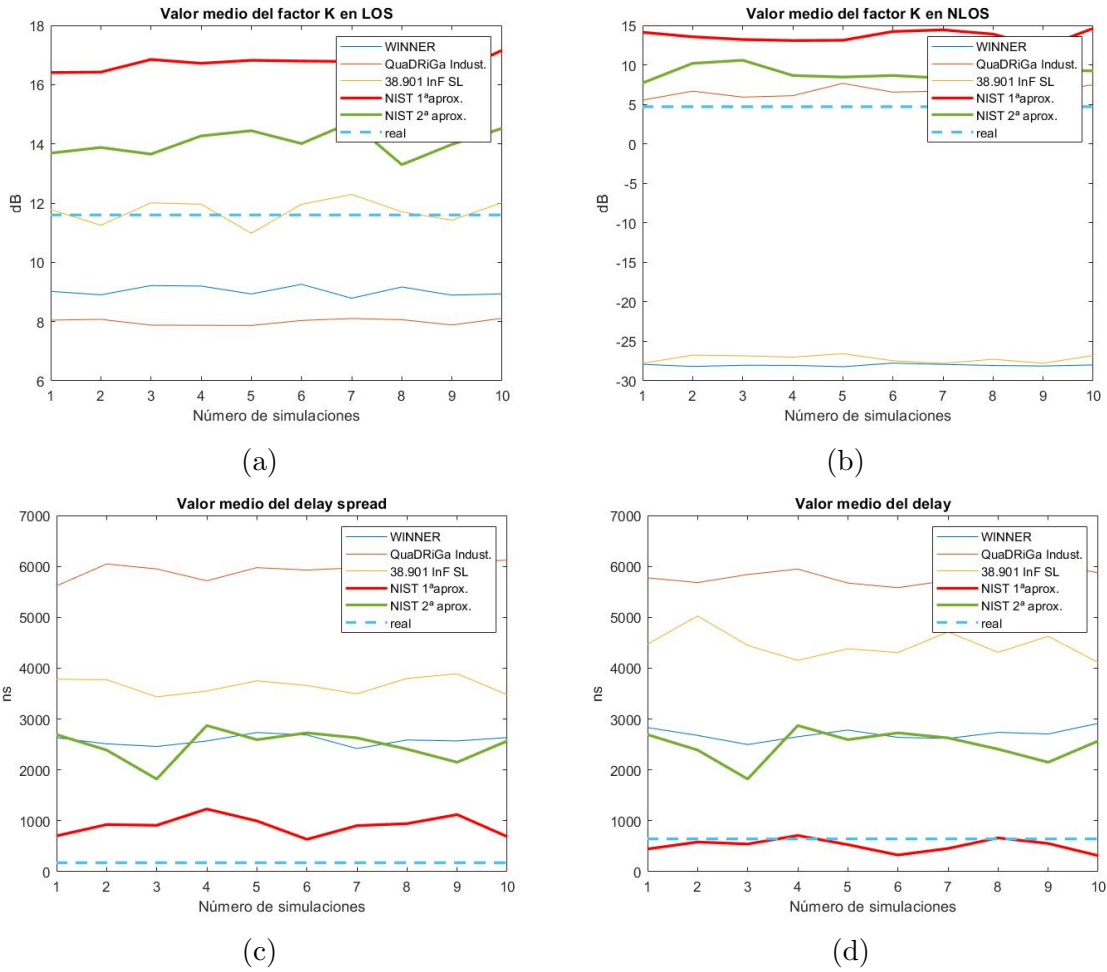
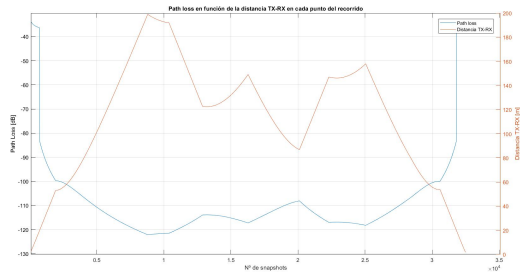


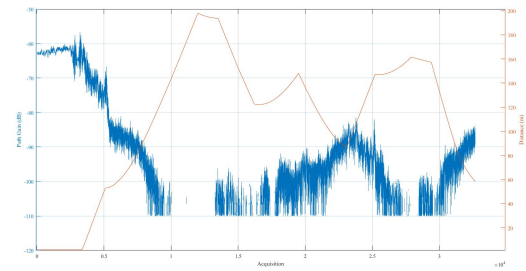
Figura 38: Resultados de la 2ª aproximación: (a) Factor K en LOS, (b) Factor K en NLOS, (c) Delay spread, (d) Mean delay

Por último, la Figura 39 (a) representa el *path loss* en función de la distancia entre el transmisor y receptor. En el eje x, se muestra el número de *snapshots*. Es decir, para cada *snapshot* o punto del recorrido, se ha calculado el *path loss* empleando la ecuación 9, que depende de la distancia entre los terminales. De la misma forma, la Figura 39 (b) muestra el *path loss* extraído de los datos empíricos del NIST.

Como se puede intuir, el proceso de aproximación del modelo a la realidad puede volverse una tarea ardua, no solo por el número de parámetros a ajustar sino por las intrincadas relaciones entre todos ellos (basta con apuntar que la matriz de correlación de los LSP puede llegar a incluir hasta 28 parámetros). Además, recordar que este tipo de modelos no busca representar de manera hiperrealista un escenario concreto sino poder representar, bajo un



(a)



(b)

Figura 39: Path loss en función de la distancia TX-RX: (a) Simulación , (b) Medidas empíricas

mismo escenario, un conjunto similar de entornos. Por ejemplo, el escenario QuaDRiGa Industrial procede de una planta industrial concreta, pero el objetivo no es poder reproducir de nuevo este escenario a la perfección. Para este tipo de representaciones, existen modelos más adecuados como el *ray-tracing*, del que se discute con mayor profundidad en el apartado 1. Por estos motivos, con la segunda aproximación se considera finalizado el proceso de ajuste del modelo.

## 8. Planificación del proyecto

Este trabajo se ha desarrollado a lo largo de siete meses aproximadamente. En este apartado se recogen las diferentes etapas del proyecto, representadas por paquetes de trabajo. A su vez, cada paquete se segmenta en una serie de tareas. El objetivo es mostrar de forma resumida las diferentes fases que se han ido cumpliendo para la consecución del proyecto, así como el tiempo invertido en cada una de ellas.

### 8.1. Definición de paquetes de trabajo y tareas

#### PT 1. Coordinación, gestión y supervisión del proyecto

**Tarea 1.1:** Supervisión y seguimiento del proyecto. Esta tarea corresponde al seguimiento del trabajo a lo largo de su desarrollo. Esto incluye reuniones con los directores del proyecto para concretar directrices, resolver dudas y realizar un seguimiento del trabajo realizado en cada etapa.

#### PT 2. Contextualización

**Tarea 2.1:** Familiarización con el tema a desarrollar. Conocimiento del contexto en el que sea plantea el trabajo y la problemática que se pretende resolver.

**Tarea 2.2:** Búsqueda de información para la realización del proyecto. Búsqueda y recopilación de diferentes fuentes a lo largo del desarrollo de todo el proyecto.

#### PT 3. Análisis del modelo de WINNER II

**Tarea 3.1:** Análisis teórico del modelo de WINNER II. Se analizan los principios en los que se basa el modelo.

**Tarea 3.2:** Simulación del modelo en MATLAB. Se simula la implementación de WINNER II disponible en MATLAB.

#### PT 4. Análisis del modelo de QuaDRiGa

**Tarea 4.1:** Análisis teórico del modelo de QuaDRiGa. Se estudia el modelo de QuaDRiGa en profundidad para comprender su funcionamiento.

**Tarea 4.2:** Análisis de la implementación del modelo en MATLAB. Se analiza la implementación propuesta por QuaDRiGa.

**Tarea 4.3:** Implementación de la versión final del modelo. Se implementa el modelo depurado del cual extraeremos los resultados.

**Hito 1:** Implementación del modelo de QuaDRiGa.



---

## **PT5. Estudio de las bases de datos de medidas de campo**

**Tarea 5.1:** Estudio de bases de datos disponibles con medidas de campo. Se buscan bases de datos que contengan medidas de campo de interés.

**Tarea 5.2** Análisis de la base de datos seleccionada. Se analiza la bases de datos para la extracción de información relevante.

**Tarea 5.3** Integración de las medidas de campo en el modelo de QuaDRiGa. Se estudia la forma de combinar las medidas de campo con nuestro modelo de canal.

**Hito 2:** Obtención de las medidas de campo para la validación del modelo.

## **PT6. Ajuste y validación del modelo**

**Tarea 6.1:** Ajuste del modelo con las medidas de campo seleccionadas. Se calibra el modelo en base a las medidas de campo extraídas de la base de datos.

**Tarea 6.2:** Validación del modelo con dichas medidas.

## **PT7. Evaluación de los resultados**

**Tarea 7.1:** Obtención de los resultados.

**Tarea 7.2:** Análisis de los resultados obtenidos. Se extraen las conclusiones pertinentes a partir de los resultados obtenidos.

## **PT8. Elaboración del documento**

**Tarea 8.1:** Redacción del documento a entregar.

**Hito 3:** Entrega del documento final.

## **8.2. Diagrama de Gantt**

En cuanto a la cronología del proyecto, en la Figura 40 se muestra el diagrama de Gantt. Este gráfico presenta los paquetes de trabajo y las tareas previamente definidas a lo largo del tiempo. De esta forma, se pueden visualizar la fecha de comienzo y finalización de cada evento.



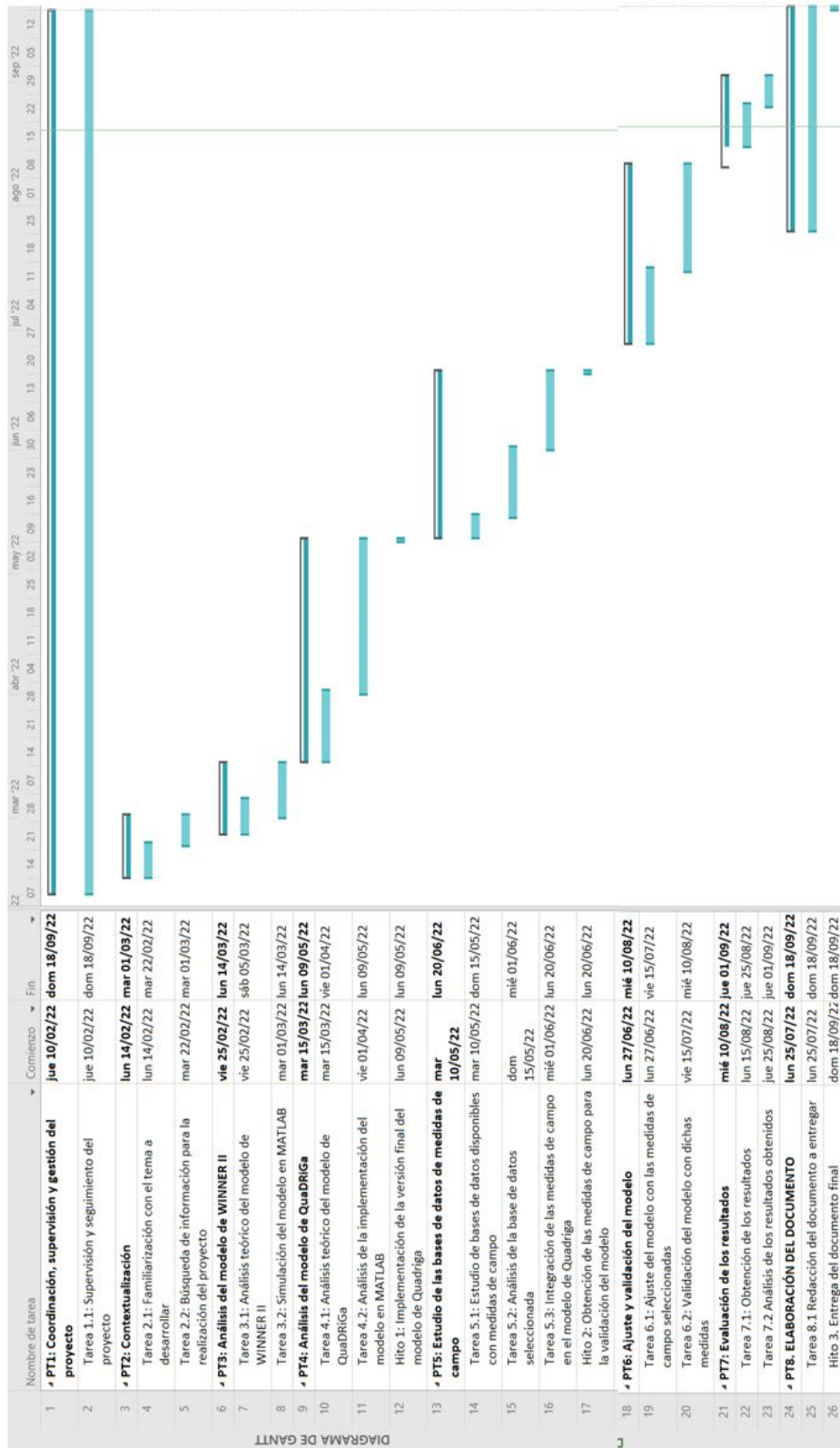


Figura 40: Diagrama de Gantt.

---

## 9. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado, implementado y ajustado un modelo de canal geométrico-estocástico basado en la implementación de QuaDRiGa, empleando bases de datos abiertas con medidas de campo en entornos industriales. En este proyecto se ha establecido una metodología para la implementación de este tipo de modelos, con la intención de incentivar su uso en el desarrollo y estandarización de nuevos modelos de canal inalámbricos para comunicaciones industriales. Mediante la realización del proyecto, se ha logrado esclarecer las ventajas y desventajas en la utilización del modelo de QuaDRiGa. Además, mediante la simulación de dicho modelo, se han recopilado una serie de resultados. Estos resultados han servido para estimar la efectividad del modelo al representar entornos industriales y también para abrir futuras actividades de investigación en torno a este modelo. Asimismo, mediante la comparativa con medidas empíricas, se han determinado los parámetros más relevantes del modelo a la hora de emular un entorno real. Esto no solo ayuda a la comprensión general del funcionamiento del modelo sino que sirve como referencia para futuras campañas de medida enmarcadas en el proyecto QuaDRiGa, o de forma más general, en la definición de otros modelos geométrico-estocásticos.

## 10. Bibliografía

- [1] F. HHI. «QuaDRiGa: The next generation radio channel model.» (), dirección: <https://quadriga-channel-model.de/>.
- [2] Y. Okumura, «Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service,» *Rev. Electr. Commun. Lab.*, vol. 16, págs. 825-873, 1968.
- [3] M. Hata, «Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, n.º 3, págs. 317-325, 1980. DOI: 10.1109/T-VT.1980.23859.
- [4] P. Kyösti, J. Meinilä, L. Hentila y col., «WINNER II channel models,» *IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2*, feb. de 2008.
- [5] M. Wollschlaeger, T. Sauter y J. Jasperneite, «The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0,» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, n.º 1, págs. 17-27, 2017. DOI: 10.1109/MIE.2017.2649104.
- [6] P. Angueira, I. Val, J. Montalbán y col., «A Survey of Physical Layer Techniques for Secure Wireless Communications in Industry,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, n.º 2, págs. 810-838, 2022. DOI: 10.1109/COMST.2022.3148857.
- [7] 3. T. 38.901, «Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz,» 2017.
- [8] P. Ferrand, M. Amara, S. Valentin y M. Guillaud, «Trends and challenges in wireless channel modeling for evolving radio access,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, n.º 7, págs. 93-99, 2016. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7509384.
- [9] A. Meijerink y A. Molisch, «On the Physical Interpretation of the Saleh–Valenzuela Model and the Definition of Its Power Delay Profiles,» *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 62, págs. 4780-4793, sep. de 2014. DOI: 10.1109/TAP.2014.2335812.
- [10] A. Traßl, T. Höbner, L. Scheuven, N. Franchi y G. P. Fettweis, «Deriving an Empirical Channel Model for Wireless Industrial Indoor Communications,» en *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2019, págs. 1-7. DOI: 10.1109/PIMRC.2019.8904382.
- [11] C. Cano, G. H. Sim, A. Asadi y X. Vilajosana, «A Channel Measurement Campaign for mmWave Communication in Industrial Settings,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, n.º 1, págs. 299-315, 2021. DOI: 10.1109/TWC.2020.3024709.
- [12] J. Karedal, S. Wyne, P. Almers, F. Tufvesson y A. F. Molisch, «A Measurement-Based Statistical Model for Industrial Ultra-Wideband Channels,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, n.º 8, págs. 3028-3037, 2007. DOI: 10.1109/TWC.2007.051050.
- [13] D. Block, N. H. Fliedner y U. Meier, *CRAWDAD dataset init/factory (v. 2016-06-13)*, Downloaded from <https://crawdad.org/init/factory/20160613>, jun. de 2016. DOI: 10.15783/C76S3K.
- [14] D. Block, N. H. Fliedner, D. Toews y U. Meier, *CRAWDAD dataset init/robotarm (v. 2015-07-06)*, Downloaded from <https://crawdad.org/init/robotarm/20150706>, jul. de 2015. DOI: 10.15783/C7C88V.

- [15] NIST. «Project Data: Wireless Systems for Industrial Environments.» (), dirección: <https://www.nist.gov/ctl/smart-connected-systems-division/networked-control-systems-group/project-data-wireless-systems>.
- [16] N. Rick Candell. «NIST Industrial Wireless Analysis Github Repository.» (), dirección: <https://github.com/usnistgov/IndustrialWirelessAnalysis>.
- [17] NIST. «NIST Technical Report 1951.» (), dirección: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1951.pdf>.