

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Resumen del Proyecto fin de Carrera

Modelado Estadístico de Canales Enfocado a Sistemas

Profesionales de Microfonía Inalámbrica.



AUTOR: Gonzalo Ruiz Lantero

DIRECTOR: José María Molina García-Pardo

Junio 2010

Índice

Capítulo 1: Introducción	4
Capítulo 2: Modelado Estadístico de Canales	6
2.1 El canal de un sistema de comunicación inalámbrico	6
2.2 Degradación del canal y propagación multicamino	7
2.2.1 Signal time spreading	8
2.2.2 Canales variantes en el tiempo	9
2.2.3 Entornos de propagación indoor.....	9
2.3 El modelo de canal de Saleh-Valenzuela	10
2.3.1 Desarrollo del modelo.....	10
2.3.2 Descripción del modelo.....	11
2.4 El modelo de canal WINNER	12
2.4.1 Desarrollo del modelo.....	12
2.4.2 Descripción del modelo.....	13
2.4.3 Escenarios de aplicación.....	13
Capítulo 3: Implementación del Modelo de Canal WINNER	15
3.1 El código MATLAB del modelo de canal WINNER	15
3.1.1 Modelado de las antenas.....	15
3.1.2 Parámetros de entorno.....	17
3.1.3 Parámetros de simulación.....	17
3.1.4 Generación de la respuesta al impulso del canal.....	19
3.2 Adaptación del código a la aplicación PWMS	22
3.2.1 Adaptación al modelado de las antenas.....	22
3.2.2 Matriz de respuesta al impulso.....	23

Capítulo 4: Escenario de Aplicación	25
4.1 Escenario real de aplicación	25
4.2 Escenario virtual de aplicación	26
4.3 Análisis de los datos	28
4.4 Simulaciones del modelo WINNER	31
4.5 Velocidad del terminal móvil	33
Capítulo 5: Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo	35

Capítulo 1: Introducción

Desde su irrupción en los años 60, los sistemas de transmisión de audio inalámbricos han revolucionado el mundo de la industria del entretenimiento y han alentado el despliegue de montajes artísticos, libres de impedimentos, eliminando la gran mayoría de cables de conexión, tan molestos a veces, y tan propensos a errores y fallos. Este es el caso de los sistemas profesionales de micrófonos inalámbricos, PWMS (Professional Wireless Microphone Systems), los cuales se han impuesto a otros sistemas de comunicación en terrenos tales como eventos deportivos, escenarios para conciertos y obras de teatro, o incluso en el mundo de la cobertura informativa.

El principal inconveniente de estos sistemas es que son muy sensibles a las interferencias provocadas por fenómenos aleatorios atmosféricos o por otras aplicaciones inalámbricas. Por esta razón y con el objetivo de asegurar su correcto funcionamiento, es muy importante el estudio de estas aplicaciones PWMS sobre todo en aquellos campos donde la probabilidad de interferencias con otras aplicaciones es más alta. Estos estudios han sido enfocados en la viabilidad de usar bandas alternativas de frecuencia donde las PWMS operen libres de interferencias externas. En la actualidad las PWMS se encuentran situadas en la banda UHF que va desde los 470 MHz hasta los 862 MHz, compartiendo espectro con aplicaciones de radiodifusión. La continua digitalización de estas aplicaciones ha hecho que sea muy probable una reestructuración de las bandas espectrales donde operan las PWMS. En estos momentos se está evaluando el uso de las PWMS en frecuencias alternativas, enfocándose en particular en la banda L a 1500 MHz, o en otros puntos del espectro menos comunes como los 1800 MHz.

Dos tipos de aplicaciones PWMS, a las frecuencias anteriormente mencionadas, fueron examinadas en una investigación anterior. En ella, se estudio, en un escenario real, la respuesta al impulso del canal usando el modelo de Saleh-Valenzuela. Una de las aplicaciones examinadas fue la monitorización “in-ear”, IEM (In Ear Monitoring), en la cual una antena transmisora situada en un escenario enviaba señales a un receptor del tipo “body-pack”. Este dispositivo, permitía a la persona que lo llevaba escucharse a sí misma o a otras transmisiones a través de unos auriculares. Este PFC tiene como objetivo extender la investigación de esta aplicación IEM. Para ello utilizará el modelo de canal WINNER. Sin embargo, tanto el modelo WINNER como el de Saleh-Valenzuela

difieren en muchos aspectos, y será necesario hacer una comparación de los resultados obtenidos en los análisis realizados con ambos modelos, para de tener una visión más concreta del comportamiento de la aplicación PWMS bajo estudio.

Este proyecto está estructurado en tres partes. En la primera se explican los conceptos teóricos concernientes a la transmisión inalámbrica y a los efectos degradantes que ocurren en ella. A su vez, se enumeran las principales características de los modelos de canal involucrados en el análisis, el modelo WINNER y el modelo de Saleh-Valenzuela. En la segunda parte, que ocupa el capítulo 3, se explican todos los parámetros necesarios del modelo WINNER sujetos a cambios y que valor óptimo han de adoptar con el fin de simular la aplicación IEM mencionada anteriormente. La tercera parte se desarrolla en los capítulos 4 y 5. En el capítulo 4 se implementan y analizan las simulaciones WINNER, mientras que en el capítulo 5 se presentan las conclusiones principales.

Capítulo 2: Modelado Estadístico de Canales

En este capítulo se introducen los conceptos básicos que describen una transmisión inalámbrica. Entre ellos se encuentran los parámetros asociados a un canal de comunicación, la naturaleza de los efectos degradantes que suceden dentro del canal, y la influencia de los mismos en la señal transmitida en el trayecto desde el transmisor hasta el receptor. En siguientes apartados se describirán las características principales del modelo de canal de Saleh-Valenzuela y del modelo de canal WINNER.

2.1 El canal de un sistema de comunicación inalámbrico

En la figura 2.1 se puede ver el esquema básico de un sistema de comunicación inalámbrico.

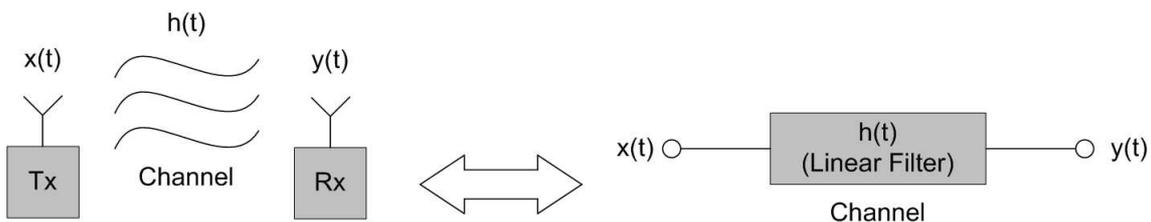


Figura 2.1: Esquema básico de un sistema de comunicación inalámbrica

En un canal de comunicaciones de audio inalámbricas, las ondas electromagnéticas viajan desde el transmisor hasta el receptor por el aire. $h(t)$ es el medio de propagación o canal y actúa como filtro lineal de la señal transmitida $x(t)$. La señal recibida $y(t)$ es el resultado de la convolución del canal $h(t)$ con $x(t)$. Al canal $h(t)$ también se le llama respuesta al impulso del canal o CIR (Channel Impulse Response). En función del número de transmisores y receptores participantes en el sistema, un canal de comunicaciones puede ser MIMO (multiple inputs multiple outputs), SISO (single input single output), MISO (multiple inputs single output) o SIMO (single input multiple outputs).

En los sistemas inalámbricos, el principal efecto degradante que causa el canal sobre la señal propagada es debido al entorno de propagación, es decir, a la estructura física que rodea al transmisor (o transmisores) y al receptor (o receptores). El

modelado de canales de transmisión tiene como objetivo estudiar los diferentes entornos en los cuales tienen lugar las transmisiones inalámbricas. Estos estudios concluyen en los llamados “Modelos de Canal”, los cuales predicen como una señal electromagnética va a ser afectada por un canal de transmisión inalámbrico específico. Hay dos tipos de modelos de canal, los modelos estadísticos y los modelos determinísticos.

- Los modelos estadísticos están basados en campañas de medidas realizadas en distintos entornos de propagación. Los datos obtenidos son analizados usando métodos estadísticos que dan lugar a las funciones de densidad de probabilidad PDF's (Probability Density Functions) de los parámetros de transmisión que definen cada entorno. Es decir, estos modelos son una descripción estadística de un comportamiento físico. El modelo de canal de Saleh-Valenzuela y el de WINNER, son modelos estadísticos.
- Los modelos determinísticos, por el contrario, tienen en cuenta la estructura física del entorno de propagación. Reproducen todos los parámetros geométricos y electromagnéticos asociados a un escenario concreto y los almacenan en bases de datos llamadas bases de datos de entorno, que serán usadas para simular en un ordenador la respuesta al impulso de un canal. Estos modelos de caracterizan por su gran precisión. Un ejemplo son los modelos de trazado de rayos los cuales están basados en la teoría de óptica geométrica.

2.2 Degradación del canal y propagación multicamino

En un canal inalámbrico de comunicaciones, el principal efecto de propagación que sufre una señal es la degradación o “fading”. Hay dos tipos de fading, el fading de gran escala y el fading de pequeña escala. El fading de gran escala se manifiesta en una reducción de la potencia media de la señal recibida. Este fenómeno ocurre en transmisiones realizadas en grandes áreas, en donde la señal se ve afectada por el contorno de las montañas, bosques o edificios situados entre el transmisor y el receptor. Por otro lado, el fading de pequeña escala supone dramáticos cambios en la amplitud y en la fase de la señal recibida. Éstos ocurren debido a pequeños cambios (mitad de la longitud de onda de la señal) en el medio de transmisión. La aplicación PWMS que va a ser analizada en este trabajo, se simula dentro de una sala de conferencias, por lo que el fading de gran escala es irrelevante, y sólo se tendrá en cuenta el de pequeña escala. El fading de pequeña escala, se manifiesta a su vez en dos efectos, el ensanchamiento temporal de la señal o “signal time spreading” y el comportamiento variante en el tiempo del canal.

2.2.1 Signal time spreading

El ensanchamiento de la señal en el tiempo es el resultado de la propagación multicamino o multipath fading. La señal, en su viaje a lo largo del canal de comunicación se ve afectada por tres principales efectos degradantes: reflexión, difracción y scattering. El primero tiene lugar cuando una onda incide en una superficie suave cuyas dimensiones son grandes en comparación con la longitud de onda de la señal incidente. La difracción ocurre cuando la señal transmitida se ve obstruida por un objeto denso y de dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda de dicha señal, causando ondas secundarias que se forman detrás del elemento obstructor. Finalmente, cuando una onda incide sobre un elemento de superficie rugosa o cuyas dimensiones son muy pequeñas en comparación con la longitud de onda, se produce una dispersión en todas direcciones de la energía de la señal incidente. Esto es lo que se conoce como scattering. Los elementos u objetos que producen reflexión, difracción o scattering se denominan scatters. Debido a estos tres efectos degradantes, la señal transmitida llega al receptor por medio de varios caminos o path's. Este fenómeno es denominado propagación multicamino o multipath fading. Cada camino o rayo, llega al receptor en distintos instantes de tiempo y con diferente amplitud, dependiendo de la distancia recorrida y de la naturaleza del efecto que lo ha producido. La suma de todos estos rayos representa la respuesta al impulso del canal o Power Delay Profile, PDP.

La figura 2.2 muestra la respuesta al impulso de un canal, cuya expresión matemática general se puede ver en la ecuación 2.1.

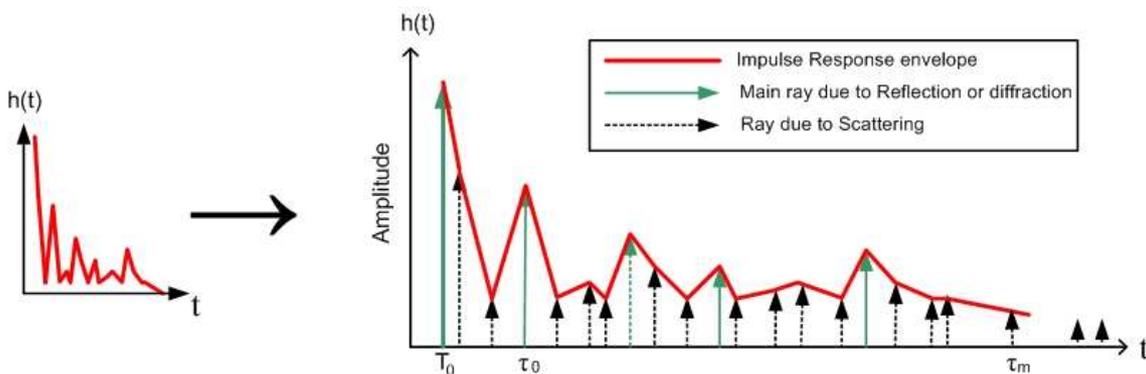


Figura 2.2: Power delay profile de una canal debido a la proggación multicamino

$$h(t) = \sum_{n=1}^m A_n \delta(t - \tau_n) e^{-j\phi_n}, \quad (2.1)$$

donde A_n y τ_n son la amplitud y el retardo de cada rayo respectivamente.

El Delay Spread de la señal recibida abarca desde T_0 hasta τ_m . El intervalo de tiempo entre τ_0 y τ_m se denomina RMS Delay Spread, τ_{RMS} . Este parámetro determina

a qué tipo de entorno pertenece el PDP medido. Grandes valores de τ_{RMS} implican grandes ecos con grandes retrasos, debido a scatters lejanos propios de grandes áreas rurales. De la misma forma, cuando el valor del de τ_{RMS} es relativamente pequeño, el CIR medido es resultado de un entorno de dimensiones reducidas como puede ser una habitación o una pequeña área urbana. Sin ser motivo de estudio, cabe resaltar que el signal time spreading deriva a su vez en otros dos efectos degradantes: la degradación selectiva en frecuencia y la degradación plana o “flat fading”.

2.2.2 Canales variantes en el tiempo

La variación temporal de un canal es producida por el movimiento de los elementos pertenecientes al entorno de propagación como, por ejemplo, antenas rotatorias, tráfico o personas caminando. La figura 2.3 muestra gráficamente este fenómeno.

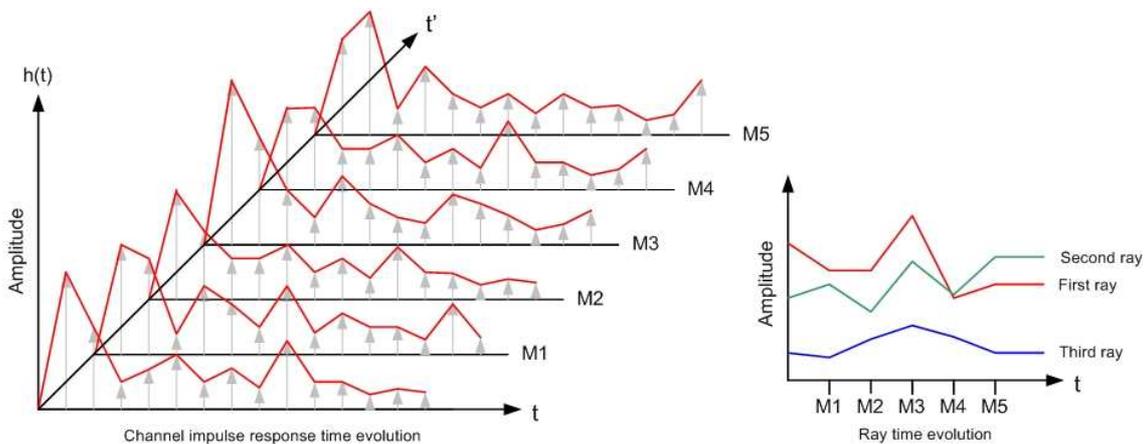


Figura 2.3: Evolución temporal de la respuesta al impulso de un canal

M_i es el instante i -ésimo de tiempo t' en donde ha tenido lugar una medición del CIR. En la parte derecha de la figura 2.3 se puede observar la evolución temporal de los primeros tres rayos que llegan al receptor. La evolución temporal del canal se manifiesta en dos efectos que degradan la señal, y que afecta, sobre todo, al pulso en banda base de ésta. Estos efectos son el “fast fading” y el “slow fading”.

En el siguiente apartado se caracterizan, en función de los efectos degradantes, los entornos de propagación típicos de las aplicaciones PWMS.

2.2.3 Entornos de propagación indoor

Salas de conciertos, de conferencias, estudios de grabación, etc, son algunos ejemplos de entornos de propagación típicos de las aplicaciones PWMS. Estos lugares de interior se diferencian de entornos de exterior como áreas urbanas y rurales, principalmente en el tipo de scatters y en el tamaño del área de aplicación. Las

principales diferencias de los canales indoor respecto a los canales outdoor son las siguientes:

- Evolución temporal del canal. En los canales indoor los scatters normalmente no están fijos, lo que produce variaciones temporales del canal. En entornos rurales o urbanos donde el efecto del tráfico no sea relevante, el canal de comunicación se puede considerar estacionario.
- Efecto Doppler. Este efecto consiste en el desplazamiento en frecuencia de las ondas de propagación debido al movimiento del transmisor o del receptor con respecto al canal, o incluso el movimiento del canal. En entornos outdoor las antenas transmisoras o receptoras pueden ir alojadas dentro de trenes, coches u otros elementos móviles que hacen que el efecto Doppler sea muy significativo. En ambientes de interior, este fenómeno puede considerarse irrelevante.
- Delay Spread. Como se ha mencionado anteriormente, los entornos de propagación indoor se caracterizan por áreas de aplicación no muy grandes que dan lugar a PDP's relativamente pequeños. Por el contrario, el delay spread de las áreas rurales o metropolitanas se extienden en intervalos de tiempo mayores.
- Correlación. En entornos de propagación indoor, los componentes o rayos de un mismo CIR, están muy cercanos (en retardo) entre ellos, causando correlaciones espaciales que gobiernan las amplitudes, los tiempos de llegada y fases de dichos rayos.

En los siguientes apartados, se describen los modelos de canal que intervienen en el análisis de la aplicación PWMS descrita en el capítulo de introducción.

2.3 El modelo de canal de Saleh-Valenzuela

El modelo de Saleh-Valenzuela es un modelo de canal estadístico que aproxima un canal de comunicación MIMO. Los autores Saleh y Valenzuela proponen una explicación estadística de la propagación de señales electromagnéticas dentro de entornos de interior. Esta fue una de las razones por las cuales este modelo fue elegido para simular la aplicación PWMS IEM.

2.3.1 Desarrollo del modelo

El escenario elegido en el que se tomaron las medidas de los PDP's, que a la postre definirían el modelo, fue un edificio de oficinas de tamaño medio. Las paredes externas estaban fabricadas con acero y cristal, y las habitaciones contenían el típico mobiliario de oficina y equipamiento de laboratorio. En el proceso de medida, las antenas transmisoras estaban situadas en los pasillos del edificio, mientras que las

antenas receptoras fueron fijadas dentro de las habitaciones. Todas las antenas radiaban omnidireccionalmente a una frecuencia central de 1.5 GHz. En este modelo no se contempló la movilidad ni de los transmisores ni de los receptores. El objetivo era deducir los pares A_n y τ_n de la ecuación 2.1 asumiendo que las fases de cada rayo φ_n eran estadísticamente independientes y uniformemente distribuidas en el intervalo $(0, 2\pi]$. Además, se partía de la base de que las amplitudes A_n eran mutuamente independientes.

2.3.2 Descripción del modelo

El modelo de canal de Saleh-Valenzuela se basa en la premisa de que los distintos rayos o caminos llegan al receptor en grupos llamados “clusters”. La ecuación 2.2 representa matemáticamente la respuesta al impulso del modelo de Saleh-Valenzuela.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_{kl} e^{j\varphi_{kl}} \delta(t - T_l - \tau_{kl}) \quad (2.2)$$

A_{kl} y φ_{kl} es la amplitud y la fase respectivamente del rayo k -ésimo dentro del cluster l -ésimo. T_l es el tiempo de llegada de cada cluster l -ésimo y τ_{kl} es el tiempo de llegada del rayo k -ésimo perteneciente al cluster l -ésimo. La amplitud de cada cluster y de los rayos que los forman decae en función del tiempo como puede verse en la figura 2.4.

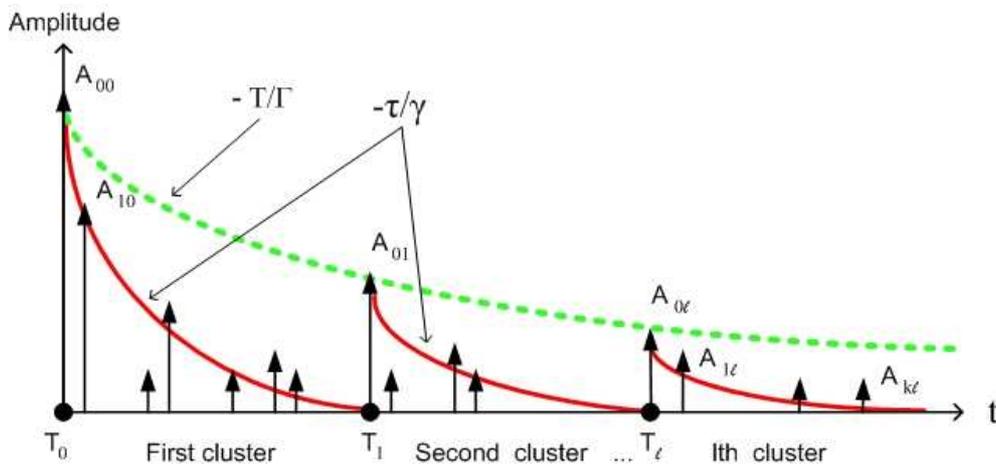


Figure 2.4: PDP típico del modelo de canal de Saleh-Valenzuela

- T/Γ y $-\tau/\gamma$ son las funciones de decremento de los clusters y rayos respectivamente, donde Γ y γ son las constantes de potencia-retardo que guardan una relación entre ellas de $\Gamma = 3\gamma$ aproximadamente. La tasa de llegada de cada cluster, es decir, la del primer rayo de cada cluster, Λ , es aproximadamente 60 veces menor que

la tasa de llegada de cada rayo, λ . El intervalo de tiempo $(T_l - T_{(l-1)})$ determina el delay spread de cada cluster.

Para concluir la descripción del este modelo, las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5 presentan las PDF's deducidas por Saleh y Valenzuela a la vista de los resultados obtenidos en las medidas. Por orden aparecen, la probabilidad de llegada de un cluster, la probabilidad de llegada de un rayo y la probabilidad de amplitud de éste.

$$p(T_l | T_{(l-1)}) = \Lambda \exp[-\Lambda(T_l - T_{(l-1)})], l > 0 \quad (2.3)$$

$$p(\tau_{kl} | \tau_{(k-1)l}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{kl} - \tau_{(k-1)l})], k > 0 \quad (2.4)$$

$$p(\beta_{kl}) = (2\beta_{kl} / \bar{\beta}_{kl}^2) \exp(-\beta_{kl}^2 / \bar{\beta}_{kl}^2) \quad (2.5)$$

2.4 El modelo de canal WINNER

El modelo de canal WINNER fue desarrollado para estimar canales de propagación inalámbricos en sistemas de tipo MIMO, SISO, MISO y SIMO. Este modelo cubre un rango de frecuencias desde 2 hasta 6 GHz para diferentes tipos de entornos de propagación. El modelo de canal WINNER fue implementado a partir de otros modelos estadísticos de canal, en concreto, los modelos SCM y SCME.

2.4.1 Desarrollo del modelo

Como la mayoría de los modelos de canal estadísticos, el modelo WINNER fue desarrollado siguiendo tres fases. En la primera, se escogieron los escenarios o entornos de aplicación en los cuales el modelo sería aplicable. En cada escenario se llevaron a cabo campañas de mediciones donde se obtuvieron los valores típicos de todos los parámetros de propagación. Toda la información fue almacenada en bases de datos. En la segunda fase se realizaron los análisis estadísticos de las bases de datos, dando como resultado las PDF's de cada parámetro, las cuales fueron usadas en la tercera fase para generar los PDP's de cada escenario.

Cada entorno de aplicación está caracterizado por sus parámetros de propagación. Estos parámetros se dividen en dos categorías, parámetros de gran escala y parámetros de pequeña escala. Los primeros están formados por el delay spread, los ángulos de salida de cada rayo AoD's (Angles of Departure), los ángulos de llegada AoA's (Angles of Arrival), el parámetro de shadow fading y el factor K Riciano. Entre los parámetros de pequeña escala se encuentran el radio de potencia de la polarización cruzada XPR, el número de clusters, el ángulo de salida y llegada de cada

uno, el número de rayos que forman cada cluster y la auto-correlación y correlación cruzada de los parámetros de gran escala.

2.4.2 Descripción del modelo

El modelo de canal WINNER se basa también en el concepto de que los rayos llegan al receptor agrupados en clusters. Cada cluster está definido únicamente por su amplitud, retardo, ángulo de llegada AoA y ángulo de salida AoD, ya que, a diferencia del modelo de Saleh-Valenzuela, no presentan dispersión (delay spread) y están formados por un número fijo de rayos, 20. Además todos los rayos dentro de un mismo cluster presentan siempre el mismo nivel de potencia. En el modelo WINNER las antenas pueden estar formadas por varios elementos, cada uno con un diagrama de radiación diferente. La figura 2.5 muestra como se generan los distintos clusters (con zero delay spread, ZDSC, Zero Delay Spread Cluster) debido a los fenómenos de reflexión, difracción y scattering.

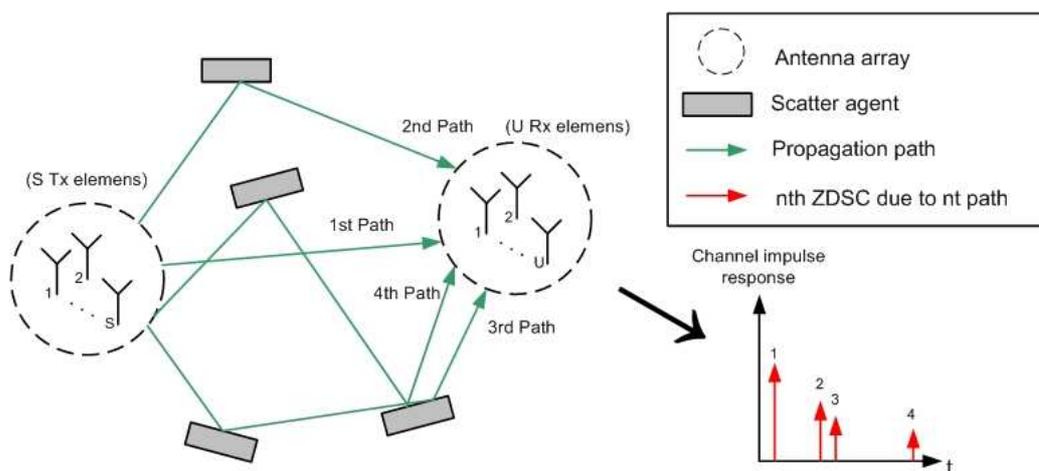


Figura 2.5: Generación de los WINNER ZDSC

Dentro de un sistema MIMO, SISO, MISO o SIMO, el modelo WINNER define dos tipos distintos de terminales, el terminal móvil MS (Mobile Station) y el terminal base BS (Base Station). Además cada BS puede estar formado por distintos sectores o celdas que proporcionan su propia área de cobertura. La conexión entre un MS y una celda de un BS se denomina enlace o link. WINNER permite simular entornos mono-link y multi-link. Debido al movimiento de los distintos terminales, la respuesta al impulso del modelo WINNER es variante en el tiempo.

2.4.3 Escenarios de aplicación

En el modelo WINNER se pueden simular 18 tipos diferentes de entornos, divididos en tres categorías: área local, área metropolitana y área extensa. De todos

ellos, los relevantes para este PFC son el A1 y el B3. Ambos escenarios son de área local. El primero de ellos simula una planta de oficinas donde los terminales pueden estar situados en los pasillos o en las habitaciones. El escenario B3 recrea ambientes propios de grandes salas de conferencias o de conciertos, fábricas, aeropuertos, estaciones de tren o pabellones deportivos. Para cada escenario, existen dos posibles condiciones de propagación, LOS (line of sight) y NLOS (Non Line of Sight). En la propagación de tipo LOS, la antena receptora tiene visión directa de la antena transmisora, mientras que, cuando el camino entre ambas antenas está obstruido por algún objeto o estructura (pared, puerta, ventana, etc.) se dice que la condición de propagación es NLOS.

En cuanto a los modos de aplicación posibles que puedan darse en un sistema de comunicaciones inalámbrico, WINNER permite recrear situaciones tales como handover, multi-user, multihop y relaying.

Capítulo 3: Implementación del Modelo de Canal WINNER

Las simulaciones del modelo de canal WINNER, llevadas a cabo en este PFC, van a ser implementadas por ordenador, usando el software MATLAB. Para ello, desde la propia web de los creadores y diseñadores del modelo, se obtiene el código y ficheros necesarios para la ejecución de dichas simulaciones. En este capítulo, y en parte del siguiente, se describen todas las opciones de simulación que ofrece el código, la manera de usarlas y los valores óptimos que han de adoptar para implementar y simular el escenario correspondiente a la PWMS IEM.

3.1 El código MATLAB del modelo de canal WINNER

El código MATLAB de WINNER costa de 42 archivos “.m” y 3 ejemplos de aplicación. Cada archivo tiene su propia importancia y relevancia dentro del conjunto. Los hay que son simples funciones auxiliares de otros archivos más importantes, o incluso archivos, que por su función específica, no van a ser usados en este proyecto.

Los archivos clave son 4: *AntennaArray.m* se encarga de implementar las características de todas las antenas, *layoutparset.m* define el entorno de propagación y *wimparset.m* ajusta los parámetros de simulación. El último archivo, y más importante, *wim.m*, es el que lleva a cabo el cálculo de la matriz de respuesta al impulso de canal (CIR matrix), nutriéndose de todos los parámetros fijados por *AntennaArray.m*, *layoutparset.m* y *wimparset.m*.

3.1.1 Modelado de las antenas

Como se comento anteriormente, esta función la realiza el archivo *AntennaArray.m*. Cada MS o celda de una BS tiene asignada una antena que puede estar compuesta por varios elementos cuyos diagramas de radiación son independientes entre sí. A este tipo de antenas se las conoce como arrays. El modelo WINNER trabaja con dos sistemas de coordenadas, uno global (GCS Global Coordinate System) donde se sitúa cada estación o terminal, y otro propio de cada antena (ACS Antenna Coordinate System) que sirve para situar los distintos elementos que componen un array. Dichos elementos pueden estar dispuestos de forma circular (UCA

Implementación del Modelo de Canal WINNER

Uniform Circular Array) o en línea recta (ULA Uniform Linear Array). Por tanto, para definir una antena es necesario saber su posición y rotación en GCS, el número de elementos que la componen y la posición y disposición de cada uno de ellos dentro del array. Por último, se define el diagrama de radiación de la antena.

WINNER soporta diagramas de radiación tridimensionales y bidimensionales, de polarización horizontal, vertical o ambas. Para definir diagramas tridimensionales, basta con asignar los niveles de potencia deseados para distintos valores de azimuth y elevación. En los diagramas bidimensionales los niveles de energía se distribuyen en una sola dirección, azimuth o elevación. Para implementar un diagrama de radiación se generan matrices de $n \times 2$ para cada punto de azimuth y elevación, siendo n el número total de elementos de la antena. La primera columna de la matriz representa la polarización vertical, mientras que la segunda acoge los valores correspondientes a la polarización horizontal. La ecuación 3.1 define el diagrama de radiación FP (field pattern) en el punto i -ésimo y j -ésimo de azimuth y elevación respectivamente, de una antena de n elementos y polarizada horizontal y verticalmente.

$$FP_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

La salida de la función *AntennaArray.m* es una estructura MATLAB que contiene las características de la antena deseada. Con el objetivo de reducir la complejidad sin perder representatividad, el formato usado por esta estructura para representar el diagrama de radiación es el formato EADF (Effective Aperture Distribution Function). Básicamente este formato es la transformada 2D de Fourier de la ecuación 3.1. La antena creada será procesada, más adelante, por los archivos que la necesiten. La figura 3.1 refleja el proceso de construcción de una antena usando el código MATLAB de WINNER.

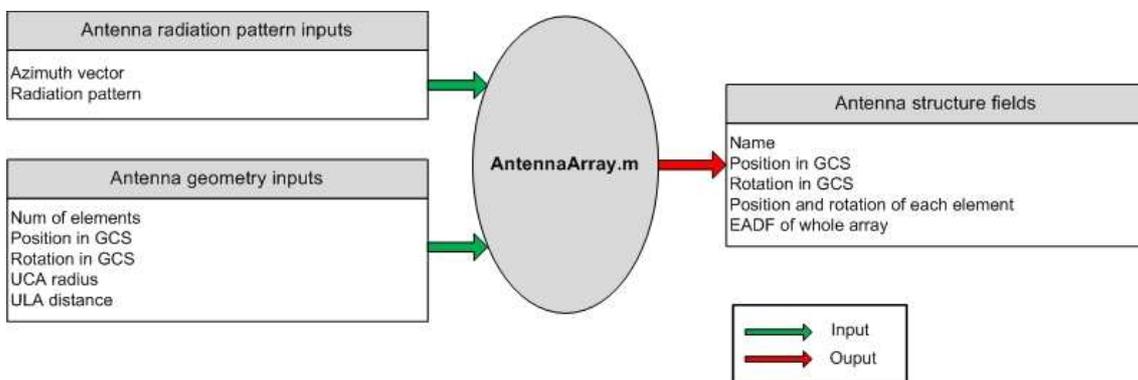


Figura 3.1: Diagrama del proceso de construcción de una antena

3.1.2 Parámetros de entorno

layoutparset.m es el archivo que genera los parámetros de entorno. Utiliza como entradas las antenas generadas por *AntennaArray.m*, el número de terminales móviles, el número de terminales base con sus respectivos sectores, el tipo de antena (del conjunto de las generadas) asociada a cada terminal, el radio máximo del área de simulación y el número total de enlaces entre terminales.

La salida de este archivo es una estructura MATLAB que contiene las características principales del entorno de propagación. Entre ellas se encuentran el nombre, la posición, rotación y velocidad de cada terminal, el número de sectores de cada BS, la asignación de los enlaces de comunicación entre terminales, el tipo de escenario de simulación (de los 18 posibles), la condición de propagación de cada enlace y otros parámetros asociados al cálculo de las pérdidas de retorno o pathlosses. La figura 3.2 muestra la estructura principal de la función *layoutparset.m*.

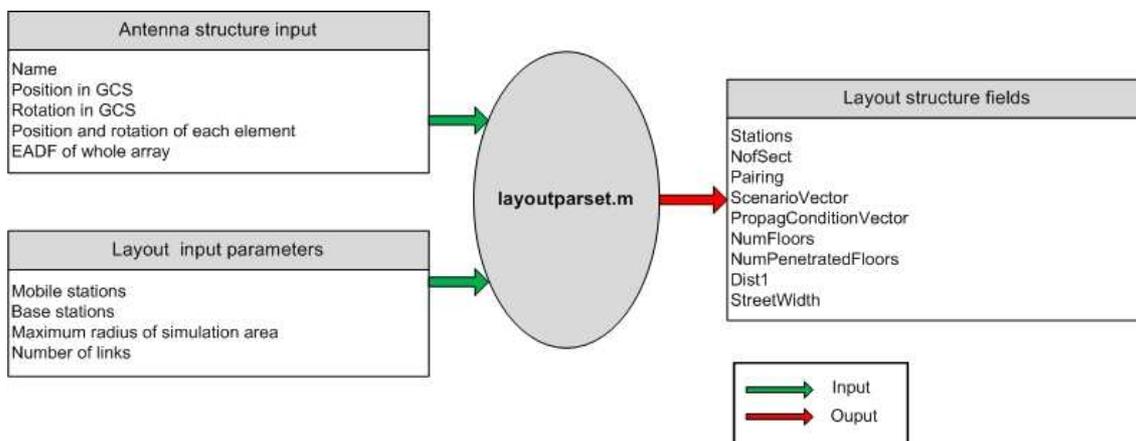


Figura3.2: Diagrama de los parámetros de entorno

3.1.3 Parámetros de simulación

Todos los parámetros de simulación están englobados en la estructura MATLAB generada por *wimparset.m*. Estos parámetros, a su vez, se dividen en dos grupos, parámetros de definición del modelo y parámetros de control de simulación.

Parámetros de definición del modelo

Cambios en los valores de estos parámetros provocan cambios en el comportamiento del modelo. Como se comentó en el apartado 2.4.2, en el modelo WINNER los clusters no presentan dispersión, sin embargo, existe una opción de simular la dispersión de los dos clusters de mayor potencia, los cuales están fijados de antemano según el tipo de escenario WINNER. El parámetro de simulación encargado de habilitar, o no, esta opción se denomina *IntraClusterDsUsed*.

Implementación del Modelo de Canal WINNER

Como modelo estadístico que es, el canal WINNER genera las características angulares y de potencia de cada cluster aleatoriamente, basándose en PDF's. Este comportamiento es propio del modelo genérico de WINNER. Sin embargo para aplicaciones de testeo interesa reducir la aleatoriedad de las simulaciones. Por ello, existe una opción llamada modelo WINNER CDL (Cluster Delay Line), el cual fija en función de las tablas CDL, y para cada tipo de escenario, el número total de clusters y el valor de sus características angulares y de potencia. Las tablas CDL se basan en los valores típicos obtenidos en las campañas de medida. Los parámetros de simulación encargados de habilitar el modelo CDL son *FixedPdpUsed* y *FixedAnglesUsed*.

La frecuencia central también forma parte de los parámetros de simulación que definen el modelo. El resto de parámetros de este grupo se usan para el cálculo de los pathlosses.

Parámetros de control de simulación

Este grupo es el encargado de definir el tiempo de simulación del canal WINNER por medio de parámetros como el número total de muestras tomadas, *NumTimeSamples*, y el tiempo transcurrido entre cada muestra. También permiten controlar la toma de muestras simultánea para varios enlaces en caso de más de un enlace en el sistema. Además, habilitan o inhabilitan la opción de permitir al usuario elegir manualmente la condición de propagación de cada enlace. Por último y como en los dos casos anteriores, hay parámetros de control asociados al cálculo de los pathlosses. La figura 3.3 muestra un esquema del funcionamiento del archivo *wimparset.m*.

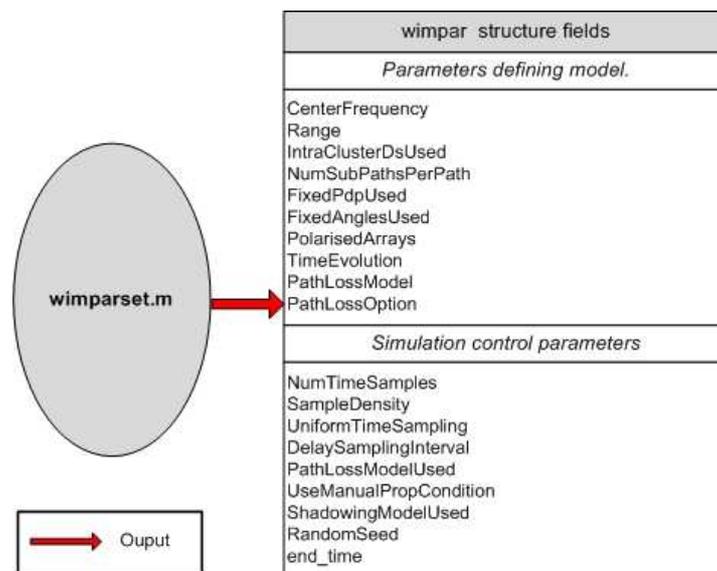


Figura 3.3: Diagrama de los parámetros de simulación

3.1.4 Generación de la respuesta al impulso del canal

AntennaArray.m, *layoutparset.m* y *wimparset.m* son los archivos que forman la fase de pre-procesado de la implementación del canal WINNER. Las salidas de estas funciones van a servir como argumentos de entrada del archivo principal, *wim.m*, encargado de calcular la respuesta al impulso del canal o CIR.

La ejecución *wim.m*, se divide en dos partes. En la primera de ellas se generan los parámetros de propagación de pequeña y gran escala, mientras que la segunda se ocupa únicamente del cómputo de la matriz CIR. El archivo clave que se encarga de generar los parámetros de propagación es *generate_bulk_par.m*. Esta función toma como argumentos de entrada la salida de *wimparset.m* que contiene los parámetros de simulación, la información física a nivel de enlace y los valores de los parámetros propios de cada escenario, definidos según el modelo genérico de WINNER. A partir de estas entradas, *generate_bulk_parameters.m* genera aleatoriamente los parámetros de propagación de pequeña y gran escala del entorno deseado. Las estructuras de salida de *layoutparset.m* y de *wimparset.m*, la respuesta de las antenas y los parámetros generados por *generate_bulk_parameters.m* son los argumentos de entrada de la función *wim_core.m*, cuya salida es la respuesta al impulso del canal. El formato de esta salida consta de $K \times M \times N$ matrices de tamaño $n \times m$, siendo K el número total de enlaces, M el número de clusters del escenario escogido y N el número de muestras tomadas. n y m son, respectivamente, el número de elementos de las antenas de los terminales MS y BS pertenecientes al enlace a considerar. La expresión matemática del CIR generado por el código MATLAB del canal WINNER se puede ver en la ecuación 3.2.

$$CIR_{kij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

k es el índice del k -ésimo enlace, i representa el cluster i -ésimo, mientras que j hace referencia a la muestra j -ésima.

wim.m puede soportar, además, otro argumento de entrada opcional llamado *initvalues*. Esta variable es una estructura MATLAB que contiene una serie de valores para los parámetros de propagación de pequeña y gran escala. La inclusión de *initvalues* como argumento de entrada hace que se inhabilite la función *generate_bulk_parameters.m*, y por tanto, que los parámetros de propagación ya no se generen aleatoriamente sino que se cargen directamente de la variable *initvalues*.

Implementación del Modelo de Canal WINNER

Esta particularidad puede ser útil cuando se calcula recursivamente la respuesta al impulso del canal o para análisis que requieran la mínima aleatoriedad posible.

La figura 3.4 muestra el árbol de jerarquía de todos los archivos, pertenecientes al código MATLAB de WINNER, asociados a la fase de pre-procesado y a *wim.m*. Por otro lado, en la figura 3.5 se puede ver el esquema del funcionamiento de *wim.m*.

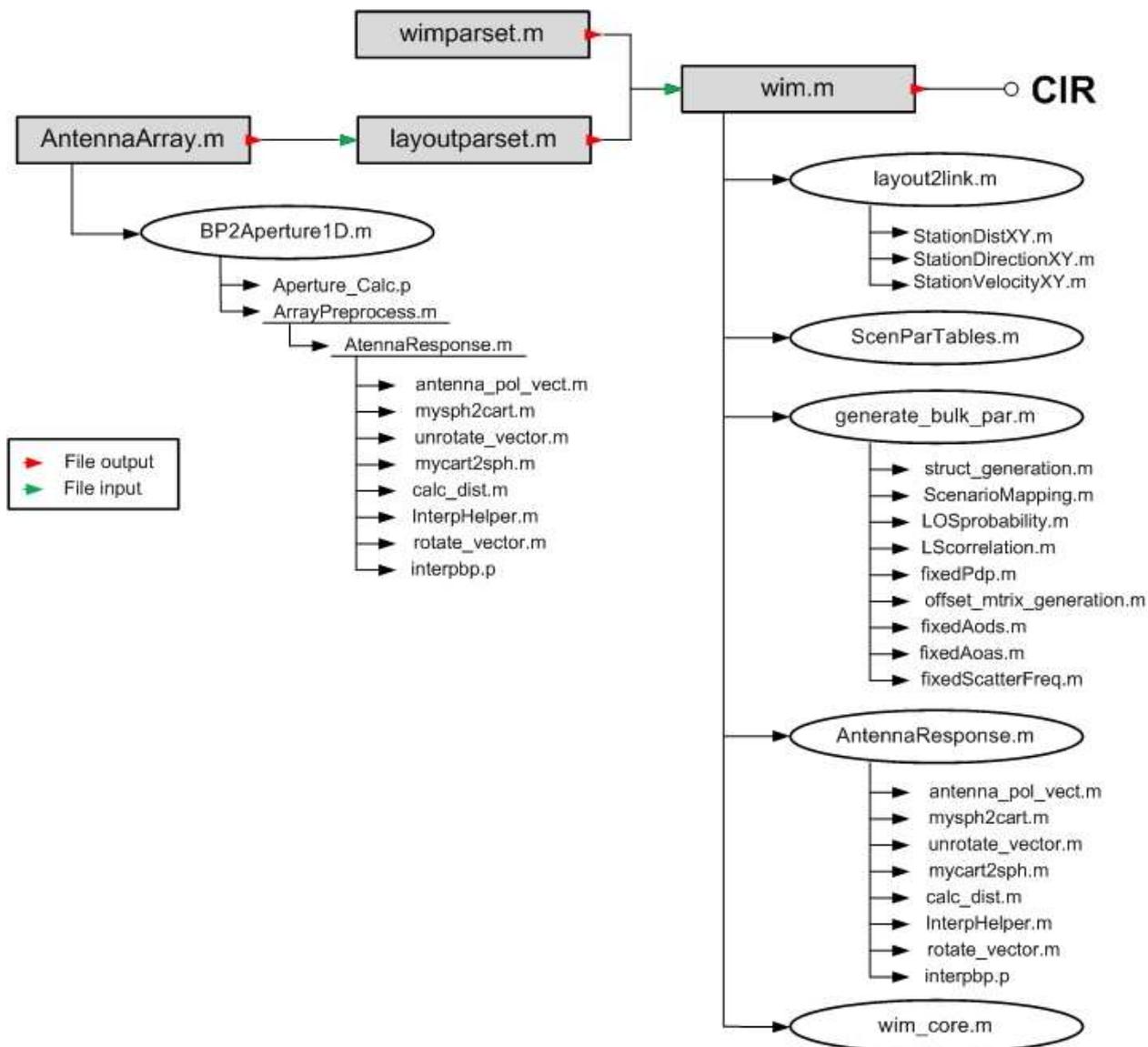


Figura 3.4: Árbol jerárquico de los archivos del código MATLAB del modelo WINNER

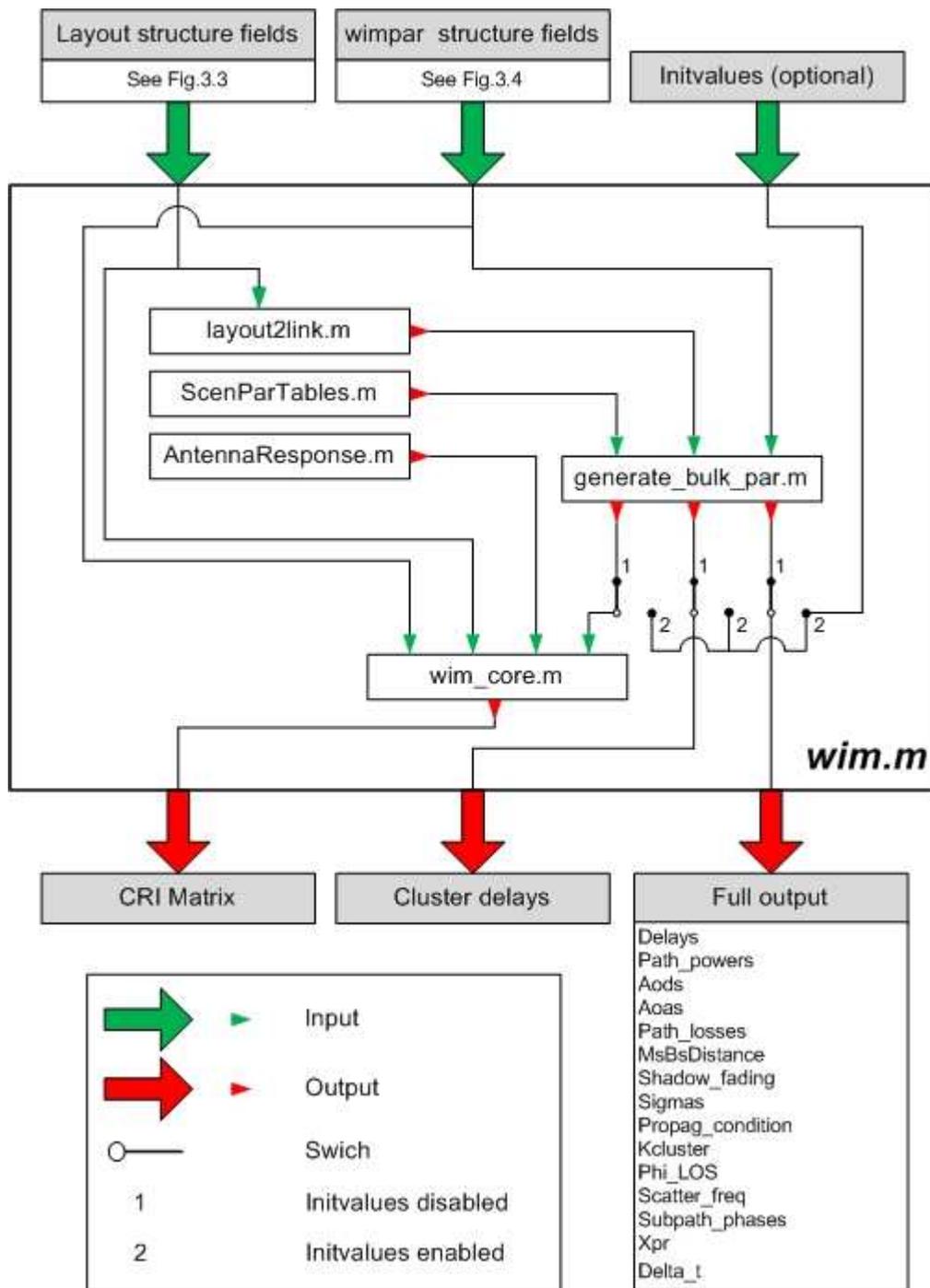


Figura 3.4: Esquema de funcionamiento del archivo *wim.m*

3.2 Adaptación del código a la aplicación PWMS

Como se mencionó en el capítulo de introducción, el objetivo de este PFC es analizar una aplicación PWMS usando el modelo de canal WINNER, extendiendo así, una investigación previa en la que esta misma aplicación era analizada usando el modelo de canal de Saleh-Valenzuela. Para que ambos análisis puedan ser más o menos comparables entre sí, tanto el entorno de aplicación como las condiciones de simulación han de ser lo más parecidas posible, y para ello, esta sección lleva a cabo el ajuste, de los parámetros de entorno y de simulación, necesario para conseguir tal semejanza.

Del conjunto de funciones y opciones de configuración descritas en el apartado anterior, no todas son útiles o relevantes para simular la aplicación PMWS IEM. Por ejemplo, a lo largo de este documento no va a ser necesario calcular el pathloss de ningún enlace, debido a que todos los análisis que se realizan van a estar centrados en las características temporales y de amplitud de las distintas PDP's obtenidas. Esto implica que todos los archivos y parámetros relacionados con el cálculo del pathloss van a ser ignorados.

3.2.1 Adaptación al modelado de las antenas

En los experimentos IEM realizados, sólo participaban dos antenas, una transmisora y otra receptora. Por esta razón, el número de terminales que forman parte de las simulaciones del modelo WINNER, es 2. Las antenas de cada terminal están formadas por un solo elemento. La antena transmisora realiza las funciones de BS mientras que la receptora actúa como MS. Ambas antenas presentan, únicamente, polarización horizontal. En cuanto a los diagramas de radiación, la antena transmisora adopta dos tipos diferentes en función de la frecuencia central en uso, 900MHz o 1.8GHz. La antena receptora radia siempre omnidireccionalmente. Las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 hacen referencia a estos tres diagramas de radiación, los cuales están definidos en azimuth y con una resolución de 1° (0.017 radianes). La figura 3.5 muestra los tres tipos de antenas usadas en las simulaciones WINNER.

$$FP(900)_{1j} = (0 \quad a_j) \text{ para } -180 < j < 179 \quad (3.3)$$

$$FP(1800)_{1j} = (0 \quad b_j) \text{ para } -180 < j < 179 \quad (3.4)$$

$$FP_{1j} = (0 \quad 1) \text{ para } -180 < j < 179 \quad (3.5)$$

Implementación del Modelo de Canal WINNER

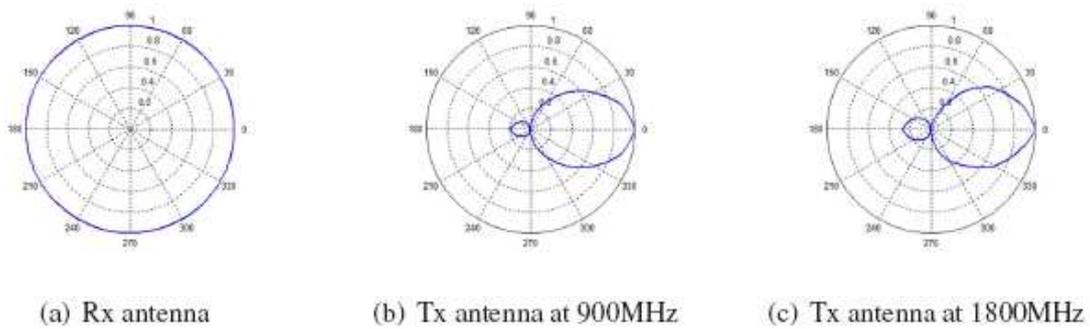


Figura 3.5: Diagramas de radiación de los terminales.

3.2.2 Matriz de respuesta al impulso

El sistema de comunicación es de tipo SISO, ya que solo intervienen dos terminales, es decir, sólo existe un enlace. Además, la antena de cada terminal está formada únicamente por un elemento. Estas características simplifican en gran medida la matriz de respuesta al impulso del sistema. En este caso, la matriz CIR se reduce a N niveles de potencia por cada cluster. Por ejemplo, la simulación de un escenario que presente 10 clusters, y donde se hayan tomado 98 muestras, genera una matriz de respuesta al impulso de tamaño 98x10. La figura 3.6 es una representación gráfica de esta matriz.

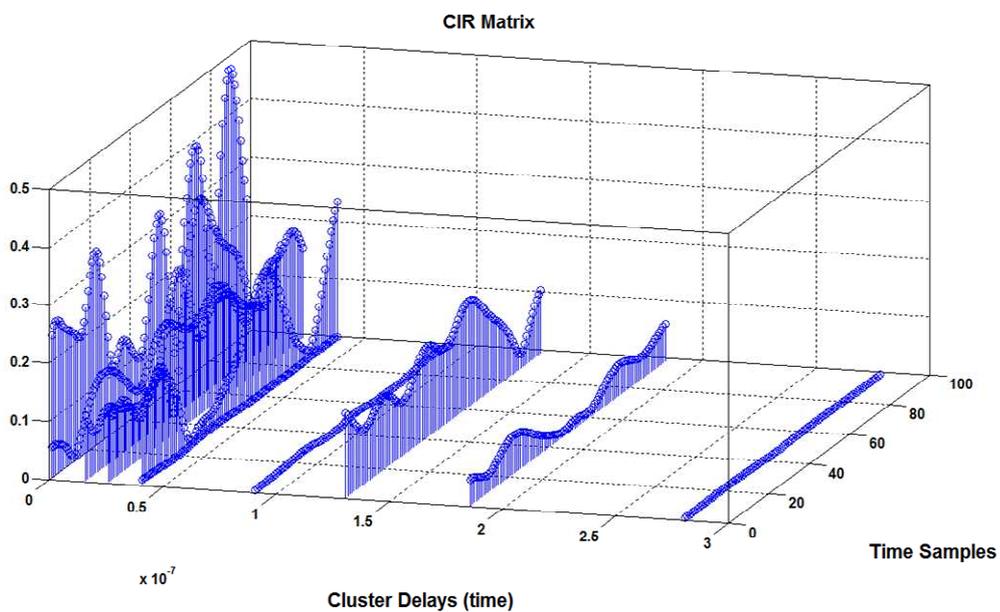


Figura 3.6: Matriz de respuesta al impulso

Implementación del Modelo de Canal WINNER

En la figura 3.6 se puede observar como cada cluster está definido por su tiempo de retardo (segundos), su amplitud normalizada y su evolución temporal.

La adaptación del código WINNER para los parámetros de entorno y de simulación se detalla en el siguiente capítulo, ya que es donde se realiza la descripción detallada del entorno y de las condiciones en las que fue simulada por primera vez la aplicación PWMS IEM.

Capítulo 4: Escenario de Aplicación

En este capítulo, se va a describir el escenario de aplicación desde dos puntos de vista diferentes: desde el punto de vista real, y desde el punto de vista virtual. Más adelante, se analizan los datos procedentes de las implementaciones basadas en el modelo de canal de Saleh-Valenzuela. Para terminar, se realizan las simulaciones del modelo WINNER y se contrastan con los análisis anteriores, obteniendo una visión general del comportamiento del entorno de propagación y una comparativa entre ambos modelos de canal.

4.1 Escenario real de aplicación

El salón principal del palacio de congresos de Hannover (Alemania), HCC (Hannover Congress Center), fue el escenario elegido para llevar a cabo los experimentos de la aplicación PWMS IEM. Los PDP's obtenidos fueron analizados posteriormente basándose en el modelo de canal de Saleh-Valenzuela. La figura 4.1 muestra la estructura básica de la sala. Una pared divisoria retráctil o biombo divide la estancia en dos partes. En una de ellas hay un escenario, lugar donde se localizan las dos antenas que forman el enlace de comunicación. Las antenas están situadas siguiendo el esquema de la figura 4.2.

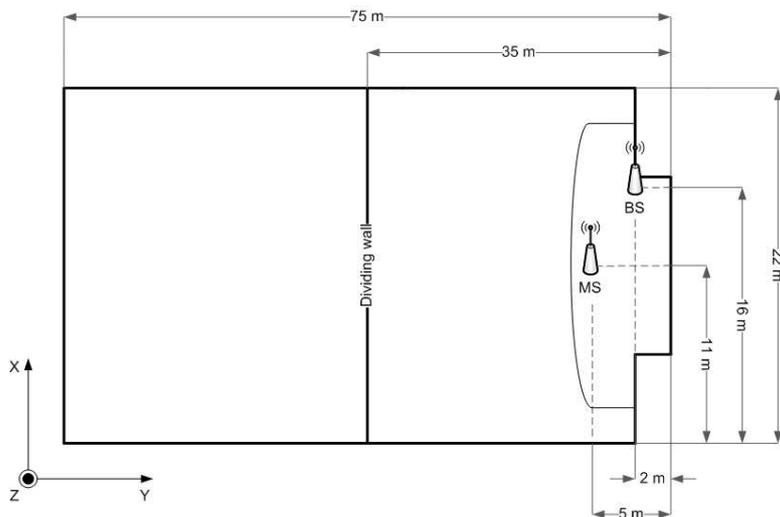


Figura 4.1: Esquema básico del salón principal del HCC

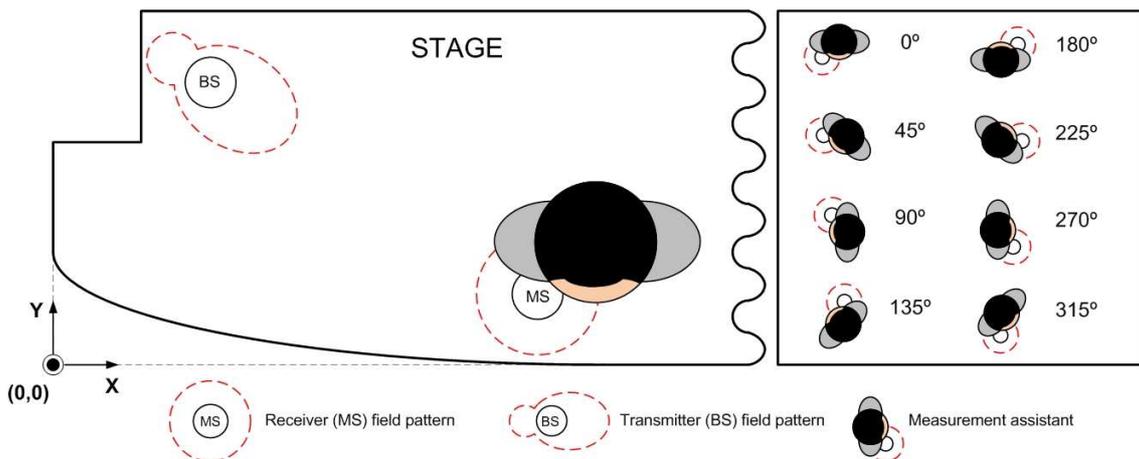


Figura 4.2: Disposición de los terminales en el escenario del salón principal del HCC

El body pack que actúa como estación móvil MS, está alojado en el cinturón de la persona, que ejerce de ayudante en los experimentos. Con el objetivo de observar efecto del cuerpo de dicho ayudante sobre la señal transmitida, las medidas fueron realizadas para distintos ángulos de giro, siendo el centro de giro el centro del escenario, tal y como puede verse en el cuadro de la derecha de la figura 4.2. La estación base BS estaba fija en la esquina superior izquierda del escenario, y su antena, situada a 2 metros de altura, radiaba direccionalmente a 6 frecuencias centrales distintas comprendidas entre 800 y 1800 MHz. En total, se evaluaron 48 respuestas al impulso del canal, una para cada frecuencia central y para cada posición del MS.

4.2 Escenario virtual de aplicación

El escenario virtual de aplicación es el entorno de propagación definido por los parámetros del modelo WINNER para implementar la aplicación PWMS IEM. Lógicamente este escenario debe parecerse lo máximo posible al escenario real.

En este apartado se especifica el valor que deben adoptar los parámetros de entorno del código MATLAB de WINNER para intentar recrear el escenario de aplicación esquematizado en las figuras 4.1 y 4.2. Sin embargo, no existe mucho margen de actuación a la hora de configurar el entorno de aplicación, ya que el modelo WINNER presenta numerosas limitaciones de configuración que tendrán que ser tenidas en cuenta a la hora de analizar los resultados.

El escenario de simulación del modelo WINNER que más se asemeja al salón principal del HCC es el escenario B3. El área de simulación está delimitada por ambos terminales, tal y como puede verse en la figura 4.3. Se observa como este esquema difiere enormemente con el mostrado en la figura 4.1, poniendo de manifiesto, una vez más, las limitaciones del código MATLAB del modelo WINNER.

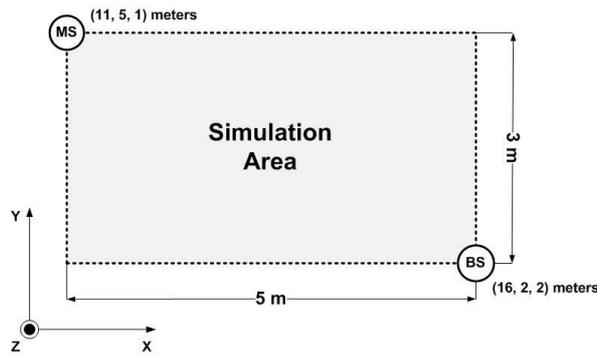


Figura 4.3: Área de simulación del modelo WINNER

Para recrear el esquema de la figura 4.2, las simulaciones son realizadas para diferentes posiciones del MS descritas por la figura 4.4.

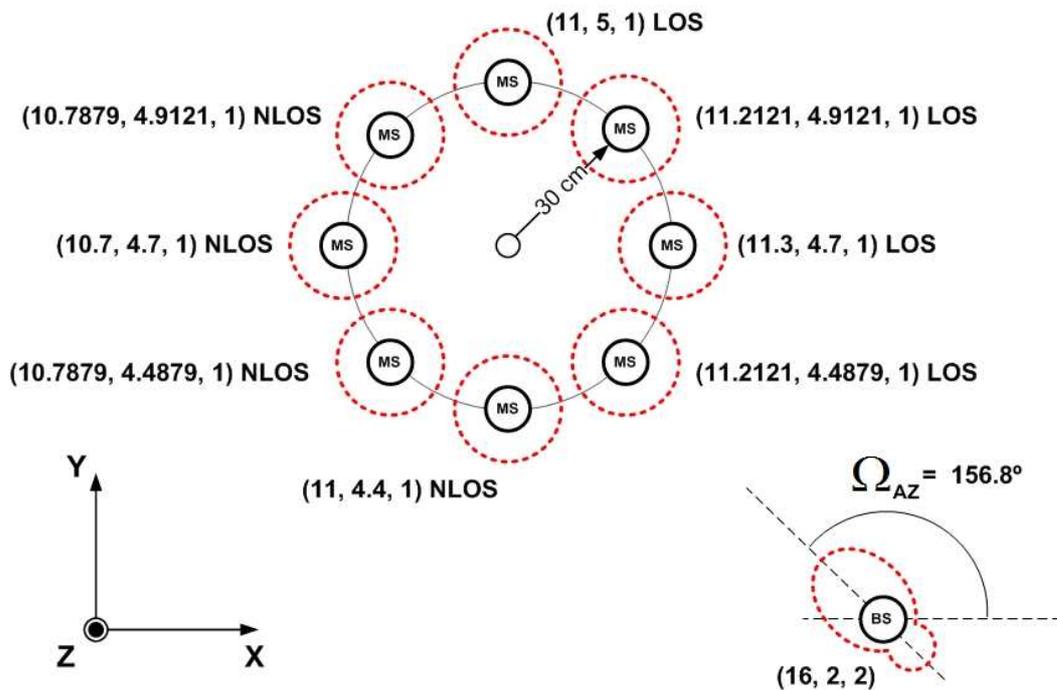


Figure 4.4: disposición de los terminales en las simulaciones del modelo WINNER

El radio de de 30 cm representa la mitad de la anchura de la cintura de una persona, mientras que las condiciones de propagación dependerán de la posición original del ayudante que portaba el body pack. Es decir, si para los ángulos de 180° , 225° , 270° y 315° el asistente de mediciones se situaba entre ambas antenas, en el modelo WINNER esto se traduce en una condición de propagación NLOS. Para el resto de posiciones la condición de propagación será de tipo LOS. Las coordenadas de los terminales están definidas en GCS. La coordenada zeta representa la altura de cada antena y Ω_{AZ} es el ángulo de rotación de la antena del BS. Las antenas utilizadas son las

descritas en el apartado 3.2.1. La frecuencia central es un parámetro de simulación, y por tanto se puede ajustar. Sin embargo, a la hora de calcular la respuesta al impulso de canal, sólo influye en la estimación de tiempo de muestreo. Por tanto, las simulaciones a 900MHz y 1800MHz sólo se diferenciarán entre sí en el diagrama de radiación de la antena transmisora.

4.3 Análisis de los datos

En este apartado se analizarán las PDP's obtenidas en el escenario real de simulación e implementadas con el modelo de Saleh -Valenzuela.

Los PDP's para cada frecuencia central y posición de MS están caracterizados por la presencia de tres grupos principales de rayos (clusters). El inicio del primer cluster se corresponde con el primer rayo en llegar al receptor. Los sucesivos rayos se originan por efectos reflexivos y de scattering en las paredes y columnas cercanas al escenario. El segundo cluster es fruto de las reflexiones de los distintos caminos en la pared divisoria. De todos los rayos que inciden en esta pared, no todos se reflejan, algunos se difractan alcanzando la pared trasera, donde se vuelven a reflejar y vuelven de nuevo a la pared divisoria, para poder volver a ser reflejados o difractados. Los difractados llegan al receptor y dan lugar al tercer cluster. Más allá del tercer cluster, los rayos alcanzan el MS con una amplitud lo suficientemente pequeña como para no tenerlos en consideración. La figura 4.5 muestra un ejemplo de la respuesta al impulso del salón principal del HCC a la frecuencia central de 800 MHz, estando el MS en la posición de 90° . Por otra parte, la figura 4.6 resume gráficamente la formación de cada cluster.

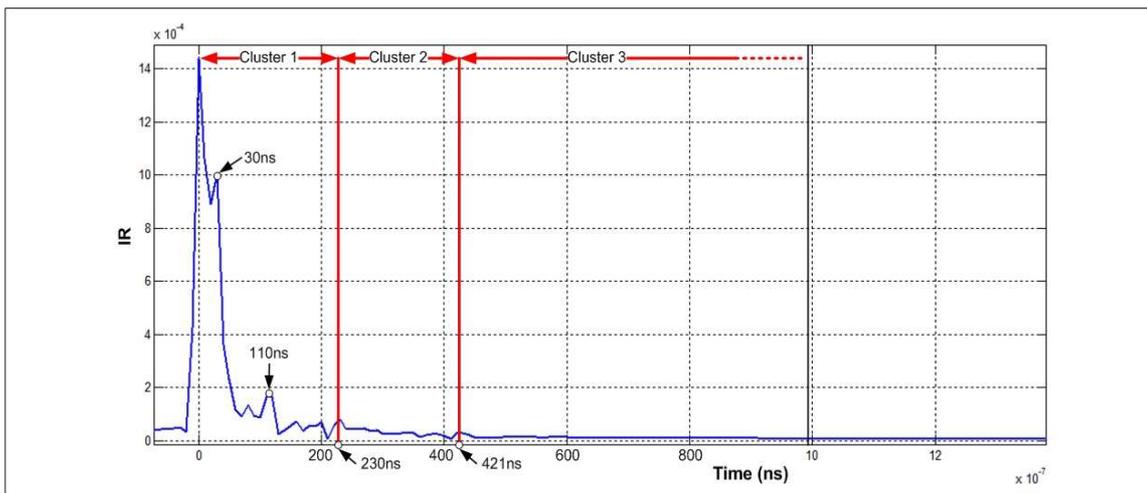


Figura 4.5: Respuesta al impulso del salón principal del HCC a 800 MHz

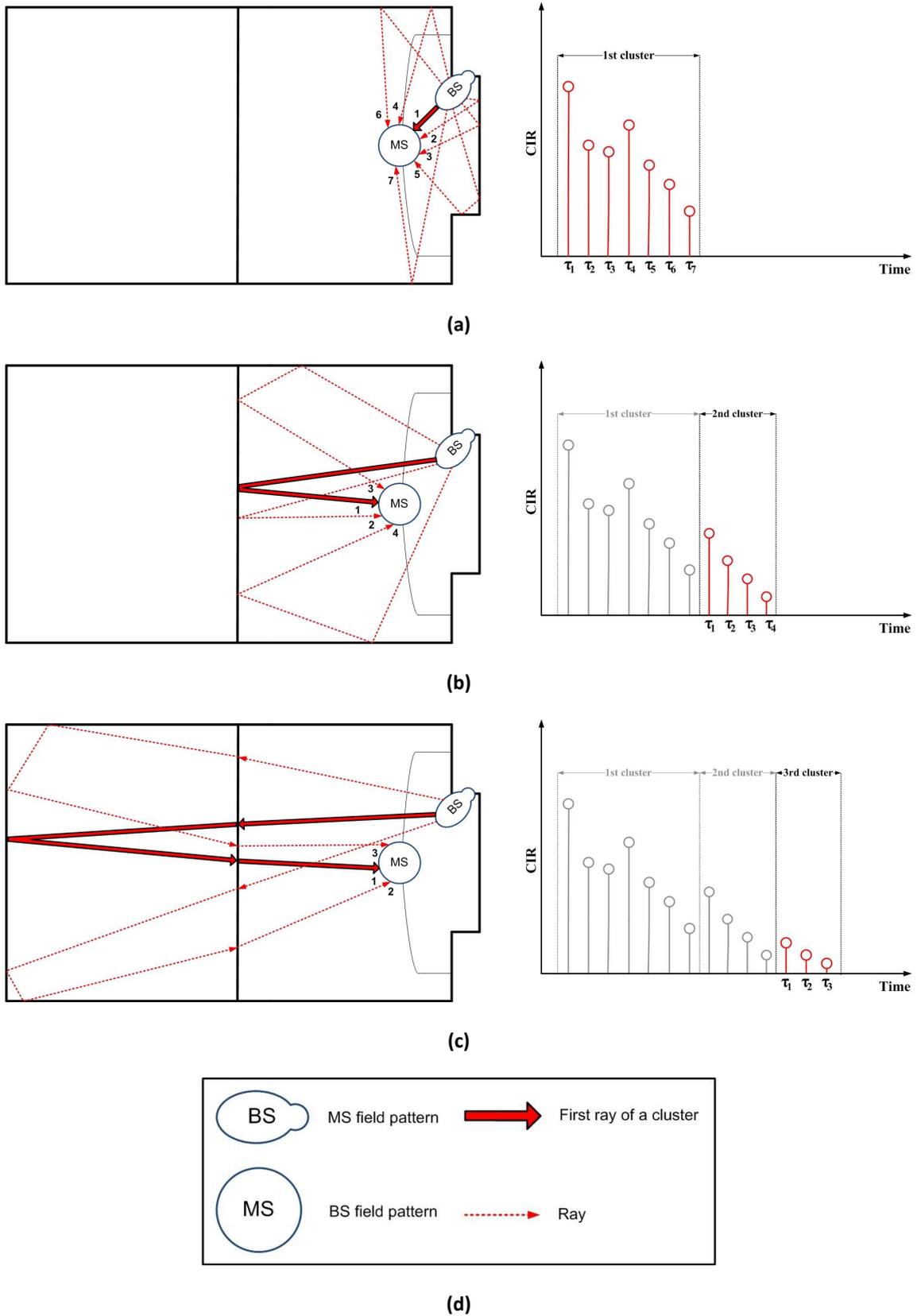


Figura 4.6: (a) Generación del primer cluster; (b) Generación del segundo cluster; (c) Generación del tercer cluster; (d) Leyenda

Las tablas 4.1 y 4.2 resumen las características temporales y de amplitud de las respuestas al impulso del salón principal del HCC para las frecuencias de 800, 1000 y 1600 MHz

Frequency(MHz)	1st cluster		2nd cluster		3rd cluster	
	\bar{A} (dB)	a_1	\bar{A} (dB)	a_2	\bar{A} (dB)	a_3
800	-31.81	1	-45.03	0.7	-45.7	0.69
1000	-31.67	1	-41.83	0.75	-43.97	0.72
1600	-36.43	1	-47.98	0.76	-51.47	0.70

Tabla 4.1: Características de amplitud de cada cluster

Frequency(MHz)	2nd cluster			3rd cluster		
	Interval(ns)	Mean(ns)	σ (ns)	Interval(ns)	Mean(ns)	σ (ns)
800	200-250	≈ 234	18.46	360-430	390	25.07
1000	190-230	≈ 204	13.02	371-441	≈ 389	21.83
1600	180-230	≈ 214	15.97	310-420	365	36.64

Tabla 4.2: Características de retardo de cada cluster

Los coeficientes a_1 , a_2 y a_3 de la tabla 4.1 se corresponden con las amplitudes normalizadas de cada cluster. En la tabla 4.2, los intervalos de tiempo reflejan los instantes de llegada al receptor del primer rayo del segundo y del tercer cluster (se asume que el primer rayo del primer cluster llega siempre en el instante $\tau = 0$). Ambas tablas quedan resumidas gráficamente en la figura 4.7, en donde se puede observar que conforme aumenta la frecuencia central, disminuye la amplitud de respuesta al impulso.

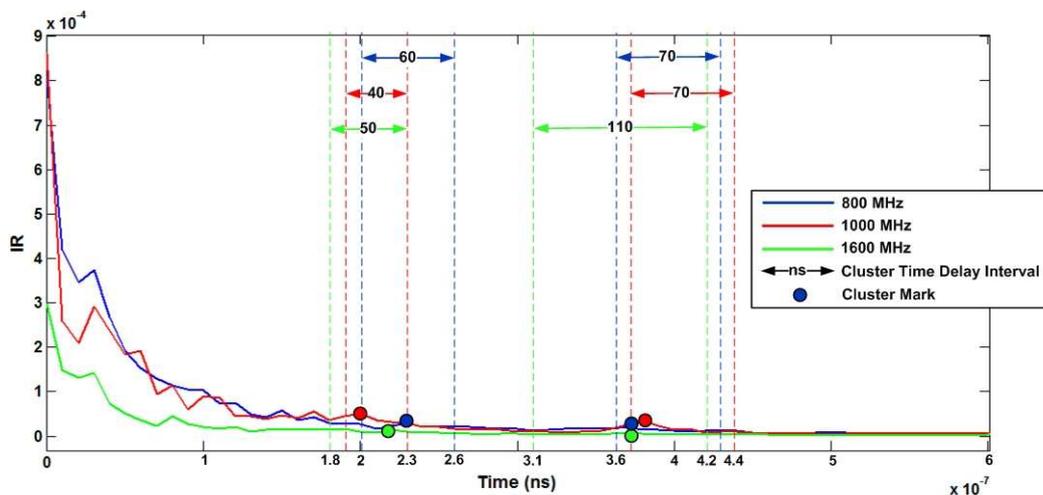


Figura 4.7: Características de los PDP's medidos en el salón principal del HCC

4.4 Simulaciones del modelo WINNER

El modelo WINNER es un modelo de canal estadístico, y por tanto cada implementación del mismo proporcionará una respuesta al impulso aleatoria basada en unas determinadas funciones de densidad de probabilidad. Por esta razón han de realizarse numerosas simulaciones para poder obtener resultados concluyentes acerca del comportamiento de este modelo. En concreto, para implementar la aplicación PWMS IEM, se han llevado a cabo 500 simulaciones del modelo genérico de WINNER para cada posición del terminal móvil (ver figura 4.4) y para cada tipo de antena del terminal base (ver figura 3.5). Como resultado se han obtenido 8000 matrices CIR's del escenario WINNER de tipo B3. Cada matriz es prácticamente estacionaria en el tiempo, o lo que es lo mismo, cada cluster permanece temporalmente constante. Por esta razón y con el objetivo de simplificar los resultados, los PDP's obtenidos de las simulaciones estarán representados por las medias temporales de cada cluster. La figura 4.8 es un ejemplo de un PDP simulado con el modelo WINNER.

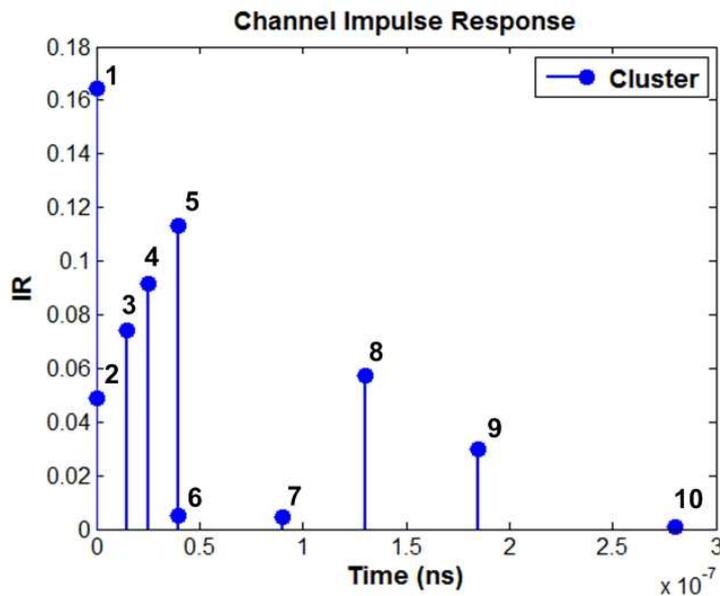


Figura 4.8: Power delay profile de un escenario WINNER de tipo B3

El escenario B3 está caracterizado siempre por la presencia de 10 clusters, que unido a todas las simulaciones realizadas, proporciona un total de 80000 clusters. Cada uno de ellos presenta su propia amplitud y retardo. La figura 4.9 muestra el mapa temporal de los todos clusters obtenidos, es decir, los niveles normalizados medios de amplitud que aparecen en determinados instantes de tiempo. Por otro lado, el histograma presentado en la figura 4.10, indica el nivel de ocurrencia de los clusters en función del tiempo.

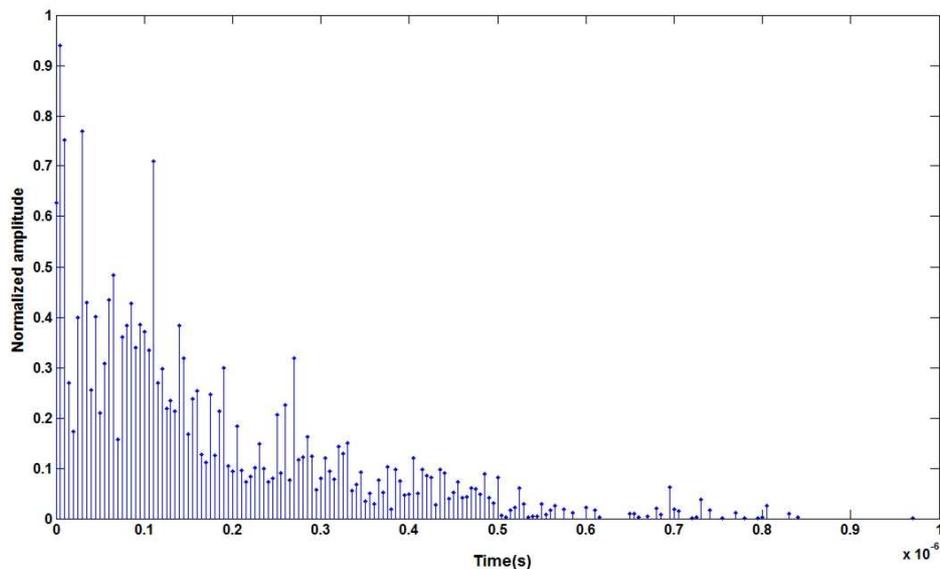


Figura 4.9: Mapa del nivel de energía de cada cluster en función del retardo

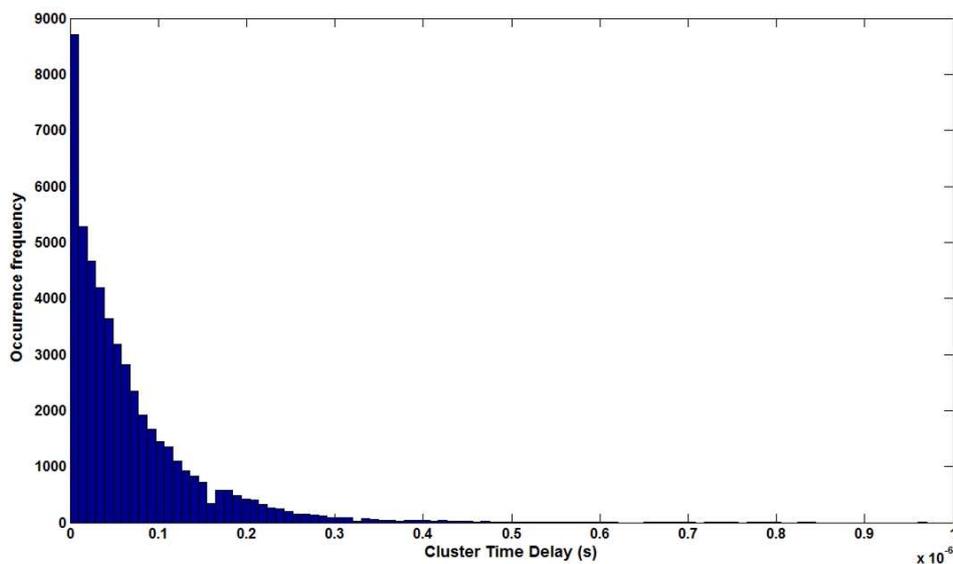


Figura 4.10: Relación entre el nivel de ocurrencia de todos los clusters en función del retardo.

A partir de lo mostrado en ambas gráficas se pueden concluir que aunque existan clusters mas allá de los 400 ns, éstos no se consideran una característica relevante de la aplicación PWMS IEM, ya que sólo representan el 0.56% del total de los clusters obtenidos. Por otra parte, el intervalo de tiempo entre 0 y 250 ns abarca el 97% de los cluster simulados. Los clusters con mayores amplitudes se encuentran ubicados entre 0 y 150 ns. Por último, y como cabía esperar, no se observan diferencias significantes en la utilización de un tipo de antena transmisora u otra, debido a la semejanza de los dos tipos de diagramas de radiación del BS.

4.5 Velocidad del terminal móvil

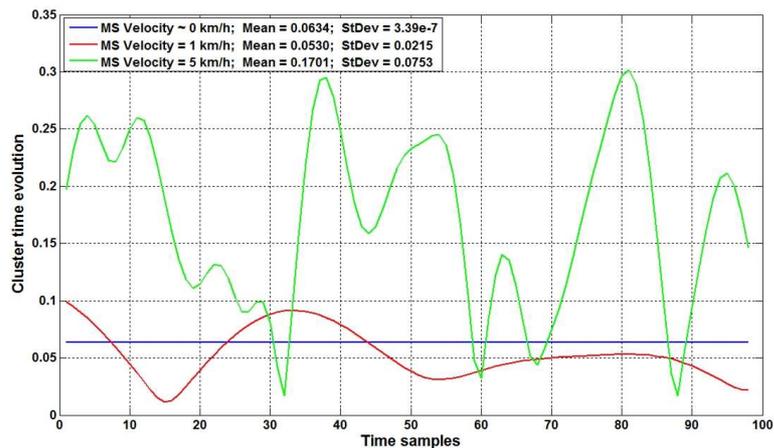
Una de las ventajas que presenta el modelo de canal WINNER respecto al modelo de Saleh-Valenzuela, es que permite simular escenarios de aplicación con terminales en movimiento. Este apartado tiene como objetivo analizar el efecto del movimiento del MS en la aplicación PWMS IEM.

Para estos análisis interesa reducir la aleatoriedad de las simulaciones lo máximo posible, por lo que se utilizará el modelo CDL de WINNER. Sin embargo, existe aún un pequeño porcentaje de aleatoriedad que provoca fluctuaciones en la amplitud de cada cluster, y que enmascaran el posible efecto de la velocidad del MS. Además el uso del modelo CDL fija el tiempo de retardo de los clusters, dejando como única característica sujeta a análisis, la variación temporal del canal. La figura 4.11 muestra la variación temporal de los tres clusters de mayor potencia para velocidades del MS entre 0 y 5 km/h. Se puede observar que, al aumentar la velocidad del terminal móvil aumenta la variabilidad temporal del canal, y al aumentar la variabilidad del canal, mayor ha de ser la tasa de transmisión de símbolo para evitar que la señal transmitida llegue distorsionada al receptor.

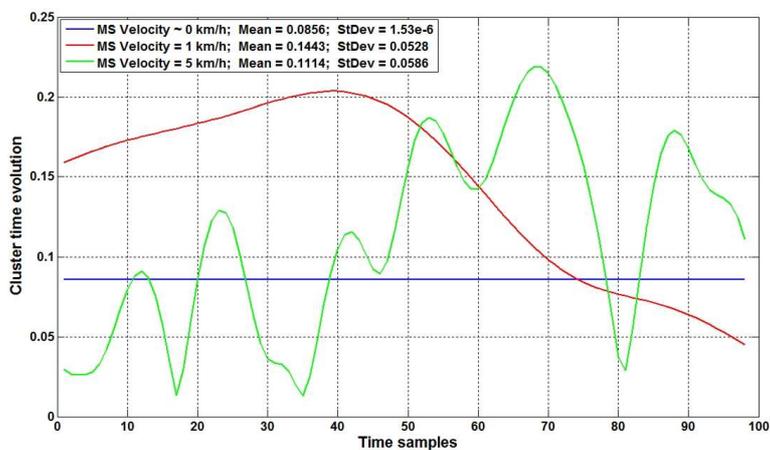
Para evitar distorsión en un enlace inalámbrico de comunicación a 900 MHz, la relación entre la tasa de transmisión símbolo y la velocidad del MS ha de ser:

$$S_{rate} = \frac{0.141}{V_{MS}} \quad (4.1)$$

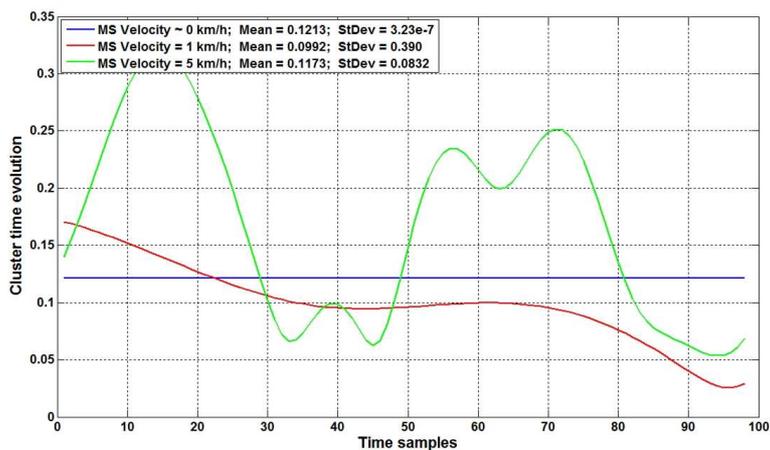
En conclusión, cuanto mayor sea la velocidad del terminal móvil, mayor deberá ser la tasa de transmisión de símbolo para evitar la distorsión.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.11: Relación entre la evolución temporal de los clusters y la velocidad del MS

Capítulo 5: Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo

A la hora de comparar las respuestas al impulso del modelo de Saleh-Valenzuela con las obtenidas con el modelo WINNER, hay que tener en cuenta las limitaciones que presenta el modelo WINNER para describir un escenario específico de simulación. Los dos modelos manejan conceptos diferentes, por ejemplo, mientras el modelo de Saleh-Valenzuela presenta 2 o 3 clusters caracterizados por su delay spread, en el modelo WINNER hay al menos 10 clusters que no presentan dispersión, sino un número fijo de rayos de igual amplitud. Al tratar ambos modelos a la vez, ya no se puede hablar ni de rayos ni de clusters debido a esta doble interpretación. Como mucho, se pueden analizar los niveles de amplitud en función del tiempo de retardo, pero aún así, ambos modelos son incomparables ya que las unidades de medida de la amplitud de cada uno no son compatibles. Realmente, más que una comparación, lo que se puede obtener de este PFC es una visión general del comportamiento de los dos modelos ante un entorno de propagación parecido pero no igual.

A la vista de los resultados, se puede concluir que el delay spread de la aplicación PWMS IEM del modelo de Saleh-Valenzuela es aproximadamente el doble que el presentado por el modelo WINNER, y que ambos modelos alcanzan sus mayores niveles de energía en los primeros componentes del PDP (en el modelo WINNER están un poco más repartidos a lo largo del eje temporal).

Para obtener resultados más concluyentes se podría usar, en vez del modelo de canal estadístico WINNER, un modelo determinístico como el de trazado de rayos basado en óptica geométrica. Este modelo permite al usuario definir cualquier entorno de propagación, sea cual sea, haciendo más comparables las simulaciones, y obteniendo una mejor visión general del comportamiento de la aplicación PWMS IEM.