



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



**Piero Mauricio Villavicencio Abarca**

# Caracterización de la dinámica del canal inalámbrico a 28 GHz en entornos interiores

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica**



# Caracterización de la dinámica en sistemas inalámbricos a 28 [GHz] en entornos interiores

Piero Mauricio Villavicencio Abarca

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Mauricio Alejandro Rodríguez Guzmán  
Profesor Guía

Sr. Francisco Guillermo Pizarro Torres  
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann  
Secretario Académico

Valparaíso, 30 de mayo de 2018

*Para mis abuelos Blanca, Carlos y Elvira.*

# Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a cada una de las personas que marcaron mi época universitaria a través de los años. Primero a toda mi familia, que me inculco que lo más importante siempre son los estudios. A mis padres Guillermo Villavicencio y Juana Abarca, que siempre me apoyaron en mis decisiones y me otorgaron todo lo que estuvo a sus manos. También a mis hermanos que siempre estuvieron conmigo durante toda mi carrera universitaria y, en especial a mi hermana más pequeña Laura que siempre fue un pilar fundamental para no bajar los brazos en las noches de estudio. A mis abuelos que, aunque no entiendo en demasía lo que estudiaba, siempre se mostraron preocupados. Y uno de los mayores agradecimientos a mi novia Catarina quien desde mi primer año en universidad hasta el día de hoy me ha ayudado, acompañado y motivado a ser mejor día a día, confiar en mí mismo y entregar lo mejor de mí.

Si bien, han sido muchos amigos y compañeros que me han marcado en la época universitaria, ya sea dentro o fuera de ella. Quisiera destacar a 3 que marcaron profundamente mi paso por la universidad: Ariel, Franco y Morys. Cada uno de ellos ha marcado mi paso de distintos aspectos, con quienes compartimos diversas situaciones. También agradecer al grupo de laboratorio de telecomunicaciones, quienes en un tiempo muy corto me entregaron su simpatía, conocimiento y risas, en la última etapa de mi carrera.

También agradecer a los profesores que me guiaron durante este proceso, Mauricio Rodríguez, Francisco Pizarro y Gabriel Hermosilla, me ayudaron constantemente, incentivaron con palabras de motivación y aconsejaron durante este proceso.

Finalmente, quisiera agradecer a Don Leonardo Madariaga (Q.E.P.D), padre de mi novia, quien me impregno de su sabiduría y conocimientos. Le agradezco profundamente cuando me acogió en su hogar en un momento muy difícil de mi vida y, que me enseñó que las cosas más importantes no son materiales, sino que saborear una rica pizza el día viernes en la noche.

# Resumen

El documento que se presenta a continuación tiene por objetivo principal dar a conocer el trabajo realizado con respecto a la caracterización de la dinámica del canal inalámbrico inmerso en un entorno interior a través de una plataforma diseñada para operar a la frecuencia de 28 [GHz] que se encuentra en el rango de las bandas propuestas para las nuevas tecnologías inalámbricas 5G. Las mediciones realizadas son en presencia de peatones caminando de forma aleatoria, lo cual se altera significativamente en presencia de ondas milimétricas y, en un entorno interior confinado.

La obtención de los datos para la caracterización del canal se realiza con el sistema a 28 [GHz] operado en banda estrecha y antenas direccionales, donde con dos terminales que se colocan en forma fija en lugares estratégicos del entorno interior, se extraen los datos para determinar las variaciones temporales y las estadísticas cuando las personas caminan por el enlace. Para ello, se obtuvo diferentes configuraciones y volúmenes de personas a modo de emular casos representativos. Por otra parte, se cuenta con una antena receptora montada en una plataforma giratoria con velocidades hasta 300 [rpm] para captar potencia angular cada un grado de giro, lo que otorga diversidad angular al enlace.

Existen diversos parámetros de modelos estadísticos de canales inalámbricos, pero para este tipo de canales que fluctúan en el tiempo y que se caracterizan por poseer multitrayectorias en la señal recibida, se da especial énfasis al factor K temporal y a la cuantificación de la duración de los desvanecimientos temporales. Con la información de los parámetros y con la característica del canal que posee diversidad angular, se proponen dos métodos de conmutación de haz; estos métodos se basan en la información adquirida anteriormente para así aumentar el rendimiento de sistema.

Palabras claves: Desvanecimientos temporales, ondas milimétricas, diversidad angular, caracterización del canal inalámbrico, multitrayectorias.

# Abstract

The main objective of the document presented below is to present the work done to characterize the dynamics of the wireless channel through a platform designed to operate at a frequency of 28 [GHz] that is in the range of the proposed bands for the new 5G wireless technologies. The measurements are made in the presence of pedestrians, which is significantly altered in the presence of millimeter waves and in a confined interior environment.

The obtaining of the data for the characterization of the channel is done with the system at 28 [GHz] operated in narrow band and directional antennas, where with two terminals that are fixedly placed in strategic places of the interior environment, the data are extracted to determine temporal variations and statistics when people walk through the link. For this, different configurations and volumes of people were obtained in order to emulate representative cases. On the other hand, a receiver antenna was mounted on a rotating platform that speeds up to 300 [rpm] to capture angular power every one degree of rotation, which gives angular diversity to the link.

There are several parameters of statistical models of wireless channels, but for this type of channels that fluctuate over time and that are characterized by having multiple projections in the received signal, special emphasis is given to the K factor and the quantification of the duration of temporary fades. With the information of the parameters and with the characteristic of the channel that has an angular diversity, two methods of beam switching are proposed. These methods are based on previously acquired information in order to increase system performance.

Key words: Temporary fades, millimeter waves, angular diversity, characterization of the wireless channel, multipath.

# Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	2
Objetivos específicos .....	2
1 Antecedentes generales.....	3
1.1 Sistemas inalámbricos en interiores .....	3
1.1.1 Canal inalámbrico con ondas milimétricas .....	4
1.1.2 Canales dinámicos en sistemas inalámbricos .....	6
1.2 Caracterización de sistemas inalámbricos .....	6
1.2.1 Modelos deterministas o teóricos .....	6
1.2.2 Modelos empíricos .....	6
1.3 Estado del arte .....	7
1.4 Conclusiones del capítulo .....	9
2 Marco teórico .....	11
2.1 Modelo temporal de desvanecimiento de banda angosta .....	11
2.1.1 Distribución de probabilidad .....	12
2.1.2 Distribución Rayleigh.....	12
2.1.3 Distribución Rice .....	12
2.1.4 Factor K temporal.....	13
2.1.5 Tasa de cruces por umbral.....	14
2.1.6 Duración media de los desvanecimientos .....	15
2.1.7 Duración de los desvanecimientos .....	15
2.2 Técnicas de diversidad .....	15
2.2.1 Diversidad angular .....	16
2.2.2 Métodos de conmutación de haz.....	16
2.3 Conclusiones del capítulo .....	16
3 Sistema de medición a 28 [GHz] .....	18
3.1 Antena transmisora y receptora .....	18
3.2 Estructura del equipo a 28 [GHz].....	19
3.2.1 Etapa de transmisión .....	20

---

3.2.2 Etapa de recepción .....	21
3.2.3 Adquisición de datos .....	21
3.2.4 Configuraciones y resolución .....	22
3.3 Conclusiones del capítulo .....	22
<b>4 Entorno y procedimiento de medición .....</b>	<b>24</b>
4.1 Lugar del entorno físico interior dinámico .....	24
4.2 Generalidades y elementos del entorno .....	25
4.3 Características de los movimientos.....	27
4.4 Tiempos de medición .....	27
4.5 Procedimientos de medición .....	28
4.5.1 Duración de los desvanecimientos .....	28
4.5.2 Factor K temporal .....	29
4.5.3 Conmutación de haz .....	29
4.6 Conclusiones del capítulo .....	30
<b>5 Resultados.....</b>	<b>32</b>
5.1 Duración de los desvanecimientos .....	32
5.2 Factor K temporal .....	37
5.3 Conmutación de haz.....	39
5.4 Conclusiones del capítulo .....	45
<b>Discusión y Conclusiones .....</b>	<b>48</b>
Trabajos futuros .....	50
<b>Bibliografía .....</b>	<b>51</b>
<b>A Programa de adquisición.....</b>	<b>55</b>
A.1 Configuración previa.....	55
A.2 Adquisición de datos .....	56
A.3 Mediciones en tiempo real .....	57
<b>B Entorno de medición real.....</b>	<b>58</b>
B.1 Tipos de movimientos.....	58
B.2 Posiciones de transmisión y recepción .....	59



# Introducción

En los principios del uso de telecomunicaciones solo se podían transmitir datos de voz con un servicio muy limitado, pero actualmente con la evolución tecnológica, tanto de los teléfonos móviles como de los servicios de telefonía, se está llegando a niveles impensados de transmisión de datos [1]. Es por ello, que el futuro servicio 5G viene para dar sustento (en cuanto a capacidad) a una serie de tecnologías en desarrollo como lo es la realidad aumentada de alta calidad, ciudades inteligentes, autos manejados automáticamente, internet de las cosas, realidad virtual en vivo de alta calidad, entre otras cosas [2].

Las comunicaciones inalámbricas, específicamente los servicios móviles, han avanzado exponencialmente a través de los años, pasando desde la primera generación de las telecomunicaciones con tecnología solamente analógica hasta llegar actualmente a lo que se conoce como *4G Advance* o *4G plus* [3], la cual el último año se ha implementado en las principales ciudades de Chile.

Actualmente las frecuencias propuestas para 5G, utilizarán bandas de frecuencias superiores a los 6 [GHz], otorgando así, velocidades hasta 10 veces más rápidas [2]. Es por ello que, sumado a las velocidades de transmisión, otra ventaja es la cantidad de espectro que no está en uso en estas bandas. Ahora bien, las frecuencias propuestas para 5G nunca se han ocupado para servicios móviles inalámbricos de corto alcance, ya que actualmente son ampliamente ocupadas para comunicaciones satelitales y red de retorno (*blackhaul*), pero el espectro para frecuencias más bajas, en especial para comunicaciones móviles de gran alcance, se encuentra saturado y no dará abasto a las siguientes tecnologías que requerirán mayor tasa de transmisión [4].

El creciente número de servicios disponibles de comunicaciones inalámbricas que se otorgan a dispositivos portátiles, en su mayoría teléfonos inteligentes, se entregan a los usuarios en una posición fija con respecto a una estación base, ya que a menudo se lleva a cabo en espacios públicos que pueden ser abiertos o cerrados, como centros comerciales, aeropuertos, universidades, entre otros [5]. Es por ello, que el uso de la banda a 28 [GHz] está enfocado en este trabajo principalmente a lugares o entornos en espacios públicos que presenten una densidad importante de personas, las cuales serán la principal causante de la dinámica temporal del canal. En estas frecuencias milimétricas la presencia de personas otorga no solamente un bloqueo importante en términos de desvanecimiento, sino que son grandes reflectores y dispersores de la señal [4], enriqueciendo así la cantidad de multitrayectorias generadas en el canal. Por otra parte,

se analizarán diferentes posiciones espaciales, con el fin de obtener la mayor cantidad de situaciones y combinaciones posibles.

Cuando se planea la implementación de un servicio inalámbrico para usuarios de dispositivos móviles u otros que requieren este tipo de conexión, se requieren modelos de canales precisos para lograr hacer eficiente el uso del ancho de banda [5]. Ahora bien, como en este caso estamos inmersos en un entorno dinámico otorgado por el paso de personas en el enlace, los parámetros estadísticos y el análisis de ellos, basados en los datos obtenidos de forma empírica, permite predecir el comportamiento del canal estadísticamente, dado que, la incorporación de transeúntes en este enlace es totalmente aleatorio. Para ello, se deben realizar de forma precisa cada una de las mediciones y adquisición de los datos en conocimiento del entorno físico dinámico, donde existirán dos capítulos exclusivos para estos tópicos, dando a conocer de forma más detallada cada uno de los aspectos técnicos de plataforma operada a 28 [GHz] y, por otra parte, el entorno físico donde se llevó a cabo cada una de las mediciones y donde se colocaron tanto la estación base como los usuarios.

De esta forma, el trabajo apunta directamente a generar nueva información que aporte a realizar un análisis de la dinámica temporal del canal a 28 [GHz] e implementar soluciones con el uso de la plataforma desarrollada. Las características de esta plataforma presentan una gran diferencia con investigaciones anteriores, específicamente en la plataforma receptora, la cual posee una antena altamente directiva y que se encuentra montada en una plataforma que gira en todo el plano azimutal a velocidades de 0 hasta 300 [rpm]. Los resultados obtenidos serán desarrollados para cuatro configuraciones posibles: bajo tráfico de personas LOS, bajo tráfico de personas NLOS, alto tráfico de personas LOS y alto tráfico de personas NLOS. Con estas configuraciones se compararán los parámetros de los desvanecimientos temporales y el factor K para cada una de las configuraciones y así, realizar la implementación de dos métodos con técnicas de diversidad angular, donde se compara el uso de estos métodos y cuan favorable es ocuparlos.

## **Objetivos generales**

- Caracterizar la dinámica en sistemas inalámbricos a 28 [GHz].

## **Objetivos específicos**

- Estudiar y analizar el estado del arte en sistemas inalámbricos.
- Calibrar el sistema de medición.
- Adquirir datos empíricos con equipos diseñados para este fin.
- Analizar los resultados empíricos y teóricos.

# 1 Antecedentes generales

El objetivo principal de este capítulo es lograr contextualizar al lector con respecto al trabajo presentado. Las comunicaciones inalámbricas en entornos interiores para servicios móviles se han realizado en frecuencias bajo los 6 [GHz], pero con la inminente llegada del 5G y el uso de ondas milimétricas para su implementación, las frecuencias propuestas oscilan entre los 10 a 100 [GHz], donde se mostrará las diferencias de lo que actualmente se ocupa en servicio móvil y la utilización de ondas milimétricas con sus ventajas y desventajas. Por otra parte, se darán a conocer las diversas formas de caracterizar a través de modelos empíricos y teóricos la dinámica del canal.

## 1.1 Sistemas inalámbricos en interiores

Las redes inalámbricas que actualmente se utilizan pueden dividirse en diversos grupos dependiendo el alcance que posean, donde se deben considerar un sinnúmero de factores donde se realizará la comunicación, de forma de caracterizar el entorno físico, ya que este puede ser muy diverso. Se pueden clasificar 4 grupos de redes inalámbricas dependiendo de las características mencionadas:

- Redes inalámbricas de área personal (*WPAN*).
- Redes inalámbricas de área local (*WLAN*).
- Redes inalámbricas de área metropolitana (*WMAN*).
- Redes inalámbricas de área amplia (*WWAN*).

Principalmente para los propósitos de este trabajo, se enfoca en las redes inalámbricas de área local, principalmente por el tipo entorno caracterizado y la forma de posicionamiento de las antenas en el espacio físico donde se otorga el servicio, con el fin de emular un servicio de esta índole. Ahora bien, como se muestra en la Figura 1-1, se puede notar las distancias que proporciona cada una de estas redes en términos de distancia, donde estas características de distancias de propagación denotan que el uso de algunas puede ser solamente interior, así como otras exclusivamente para uso exterior. Por una parte, las redes *WPAN* y *WLAN* son de uso interior, esta última es la que posee mayor interés en este trabajo, puesto que, la utilización de esta tecnología está pensada para lugares interiores con una densidad de personas importantes como centros comerciales, universidades, aeropuertos, entre otros. Las frecuencias ocupadas

típicamente difieren de un país a otro, para las redes WLAN las frecuencias más comunes son la de 2,4 [GHz] y la de 5 [GHz], disponibles en la mayor parte del mundo [6].

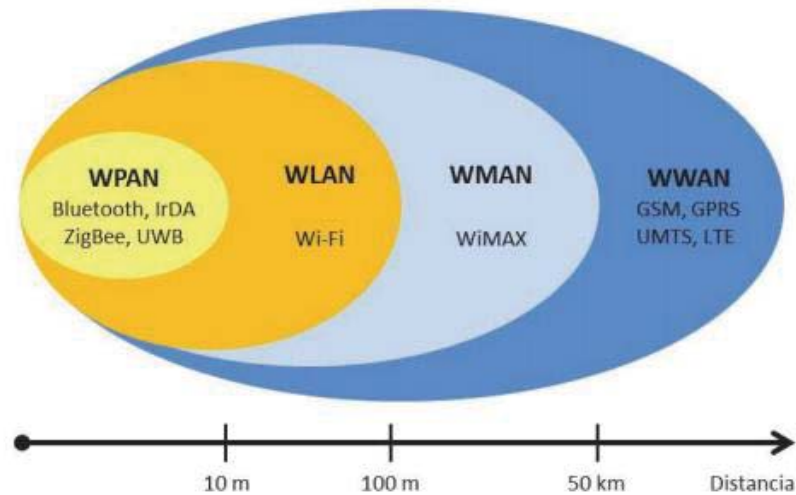


Figura 1-1: Clasificación de las redes inalámbricas [6].

Las propiedades de las señales (amplitud, frecuencia y fase) varían cuando se encuentran confinados a un entorno el cual, puede estar constituido por diferentes elementos o materiales de construcción, así como, los niveles de los pisos, grosor de las ventanas, elementos reflexivos, altura del entorno, entre otros. Es por ello, que existen listados de configuraciones para este tipo de servicio que dependen del tamaño del lugar, densidad de obstáculos, materiales de la locación, etc. Pero un aspecto muy importante en un enlace entre una estación base y un usuario es la condición de línea de vista, donde existen 3 casos:

- Línea de vista (LOS).
- Sin línea de vista (NLOS).
- Línea de vista con obstrucciones (OLOS).

Según cada una de las condiciones, dependerá la cantidad de multitrayectorias entre el Tx y el Rx, ya que, si la línea de vista se obstruye de forma total o parcial, la señal propagada estará afectada por diversos fenómenos de propagación como la reflexión, dispersión, difracción que atenuarán el nivel de potencia de la señal en términos de amplitud, y que se verán modificados también fase.

### 1.1.1 Canal inalámbrico con ondas milimétricas

Todos los canales de comunicación inalámbricos presentan fenómenos de reflexión, refracción, difracción y absorción, donde todos ellos contribuyen al efecto de las multitrayectorias positivamente o negativamente. Las multitrayectorias son generadas por el entorno lo cual provoca que la señal propagada tome diferentes trayectos entre el emisor y su receptor [7], donde se recibe una señal distorsionada constituida por una suma de contribuciones de las diferentes trayectorias que llegan desfasadas en el tiempo, ángulo y atenuadas en potencia [8]. Un canal inalámbrico existe una distancia entre Tx/Rx, donde en el camino se encuentran diversos

elementos que influyen en la propagación de la señal como personas, casas, vegetación edificios, entre otros. Estos elementos son llamados difusores, los cuales generan multitrayectorias y atenuaciones en la señal propagada. Si bien, en entornos interiores se poseen características muy diferentes a los entornos de tipo exterior, ya que estas no se ven afectadas por algunos factores atmosféricos que influyen en el desvanecimiento de la señal como la lluvia, granizo y otros fenómenos [4] [9], existen diferentes difusores que otorgan la característica dinámica al canal inalámbrico que, en este caso será el paso de personas por el enlace. Y uno de los principales motivos para analizar la dinámica del canal, otorgado por el paso de personas en el enlace es que los servicios inalámbricos interiores con ondas milimétricas serán ocupados típicamente en zonas de alta densidad de personas como aeropuertos, centros comerciales, universidades, entre otros [5]. El paso de personas en el enlace influye no solo en el desvanecimiento de la señal, sino que también en los efectos de propagación, puesto que, son grandes reflectores y dispersores de la señal propagada y, afecta a la trayectoria dominante de la señal propagada [4].

Los servicios inalámbricos de comunicación actualmente están operados a frecuencias bajo los 6 [GHz] dentro de lo que se denomina las radio frecuencias, la nueva generación de comunicaciones, lo que se conoce como 5G propone un uso de bandas, donde las instituciones y el mundo empresarial han propuesto bandas que van en un rango de 10 a 100 [GHz] [10], como se muestra en la Figura 1-2. Es por ello, que existe una gran cantidad de espectro disponible y, el uso de ondas milimétricas presenta una nueva oportunidad para futuras comunicaciones móviles para usar anchos de banda de canal de 1 [GHz] o más. Las bandas como la de 28 [GHz], 38 [GHz], 60-80 [GHz] parecen especialmente prometedoras para los sistemas celulares de próxima generación [10]. Las bandas de 28 [GHz] y 38-39 [GHz] están actualmente disponibles con asignaciones de espectro de más de 1 [GHz] de ancho de banda, y la E-Band por encima de 70 [GHz] tiene más de 14 [GHz] disponibles [4]. Originalmente la banda de 28 a 31 [GHz] se ocupa para el servicio de distribución local o LMDS (Local Multipoint Distribution Service) para otorgar servicios multimedia y difusión a los usuarios finales en un rango de 2 a 7 [km], por otra parte, las licencias de 28 [GHz] y 38 [GHz] podrían utilizarse para celulares móviles y *backhaul* [11].

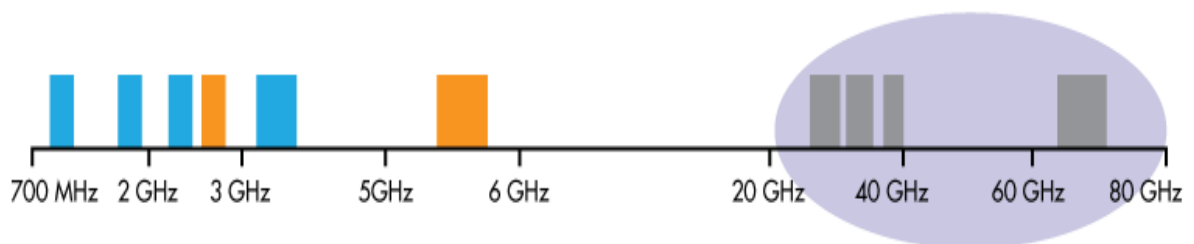


Figura 1-2: Bandas propuestas para alta frecuencia 5G (Fuente: "CTIA").

### **1.1.2 Canales dinámicos en sistemas inalámbricos**

Cuando se caracterizan canales inalámbricos es importante establecer el tipo de entorno que se estará inmerso cuando se establezca el enlace, ya que estos pueden ser estáticos o dinámicos. En un enlace de comunicaciones inalámbrica, la señal recibida puede fluctuar con respecto a la distancia y el tiempo y, si esta fluctuación es variable en el tiempo causada naturaleza aleatoria del entorno de propagación, tal canal se denomina canal variable en el tiempo [1], donde generalmente estos tipos de enlaces de telecomunicaciones están constituidos por una estación base y un usuario. Tanto la estación base como el usuario están inmersos en un entorno físico, que, en el caso de ser dinámico, este se encuentra variando en el tiempo. Dicho dinamismo puede ser producido por situaciones medio ambientales como vientos, lluvia, precipitaciones o bien, por objetos móviles como autos, movimiento de la vegetación por el viento, personas caminando, animales, entre otros. Los cuales otorgan la característica dinámica al canal.

## **1.2 Caracterización de sistemas inalámbricos**

Una de las mayores ventajas de ocupar modelos para caracterizar los sistemas inalámbricos es que se reducen los gastos por mediciones experimentales, ya que estas mediciones resultan realmente costosas con respecto a los recursos utilizados y el tiempo en que se desarrollan y, aumentan mientras mayor es el área de cobertura y si se desea mejor precisión. Es por ello, que la caracterización a través de los modelos de propagación típicamente se realiza a través de modelos empíricos que describen el comportamiento ajustando los datos obtenidos a modelos matemáticos teóricos o deterministas basados en el análisis de los fundamentos de la propagación electromagnética.

### **1.2.1 Modelos deterministas o teóricos**

Este tipo de modelo se basa en los principios fundamentales de la física en cuanto a las comunicaciones inalámbricas de la propagación de las señales y las diferentes variables que las describen. Para la determinación práctica requiere de bases de datos muy grandes en cuanto a su entorno físico del enlace, lo cual hace poco eficiente de obtener de forma práctica, dado que no existen forma de manejar bases de datos que detalle cada uno de los aspectos de un entorno [8]. Los algoritmos usados para este tipo de modelos son demasiado complejos, restringiéndolos a pequeñas áreas [12]. Algunas de las ventajas de estos modelos son que pueden ser aplicados a diferentes entornos sin afectar su precisión y proporciona gran precisión de predicción.

### **1.2.2 Modelos empíricos**

Estos modelos se basan en datos obtenidos a través de pruebas acertadas y de errores, es decir, con la experiencia. El uso de los modelos empíricos tiene como finalidad ajustar los datos obtenidos a modelos determinísticos o teóricos, utilizando la información obtenida experimentalmente con una serie de campañas de medición y medida con el sistema desarrollado para este propósito [13].

Una de las ventajas es que cada una de las características del entorno se toman en cuenta de manera implícita de forma general, sin tomar en cuenta cada una de forma aislada. La precisión de este método no depende de la precisión de cada uno de los datos obtenidos con las mediciones, sino también de la similitud de los entornos donde se llevó a cabo cada una de las medidas.

### 1.3 Estado del arte

La mayor cantidad de investigaciones con respecto a la caracterización de canales inalámbricos en entornos interiores se encuentran enfocadas en frecuencias bajo los 6 [GHz], puesto que el uso de ondas milimétricas típicamente solo se ha ocupado para enlaces exteriores donde no existe mayor cantidad de obstrucciones.

Generalmente los modelos para enlaces interiores tienen por objetivo encontrar el *path loss* del canal del canal inalámbrico. Entre los modelos más conocidos podemos encontrar el Modelo de propagación en el espacio libre o ecuación de Friis [14], Log-Normal Shadowing Path Loss Model [12], Modelo de dos rayos [15], Modelo Motley-Cost 231 [16], Multi-Wall Model (MWM) [17], Modelo UIT-R [18], Modelos FDTD [19], 3GPP [20]. Todos estos modelos son ocupados para modelar canales inalámbricos exteriores e interiores, pero generalmente son ocupados para cuando hablamos de términos de pérdidas a gran escala y pequeña escala. Ahora bien, cada uno de estos modelos nos otorga información de la pérdida en la trayectoria de la señal propagada, no nos permite conocer el comportamiento dinámico en términos temporales y, es por ello, que lo más indicado es la utilización de modelos de modelos de desvanecimiento de banda angosta.

Cuando hablamos de pequeña escala son fluctuaciones en la señal que se producen sobre distancias muy cortas con respecto a la longitud de onda o bien, sobre tiempos muy cortos, donde este último posee mayor importancia por el paso de gente en el canal. Generalmente, las distribuciones más ocupadas para conocer estas fluctuaciones de pequeña escala son Rayleigh y Rice [21]. En la distribución Rice, el parámetro factor K es uno de los parámetros más utilizados en sistemas inalámbricos que varían en el tiempo. En la literatura existe muy poca información respecto al factor K temporal para frecuencias cercanas a 28 [GHz] cuando hablamos en términos interiores, ya que existen diversas investigaciones específicamente para sistemas LMDS donde analiza el factor K, pero solo en escenarios exteriores [22] [23]. Por otra parte, cuando estamos inmersos en entornos interiores nuevamente la información es respecto a otras frecuencias, típicamente a servicios de área local en radio frecuencias en las cercanías de 2,4 [GHz] o 5 [GHz] donde ha sido ampliamente analizado [5] [24] [25]. O bien, a frecuencias más altas típicamente en las cercanías de los 60 [GHz], ya que ocupar esta frecuencia en espacios exteriores presenta grandes atenuaciones, pero mayor ancho de banda, algunas investigaciones relacionadas con el factor K en espacios interiores han sido realizadas a esta frecuencia [26] [27].

Los parámetros de modelos de banda estrecha permiten conocer y predecir los canales dinámicos, típicamente en la literatura encontramos los parámetros de covarianza, autocovarianza, correlación, tiempo de coherencia, densidad espectral de potencia, tasa de cruces por umbral y duración promedio de los desvanecimientos. Generalmente estos parámetros se asocian a desvanecimientos de pequeña escala, ya que nos permite conocer el

comportamiento a variaciones rápidas, en canales dinámicos. Cuando nos enfocamos en investigaciones realizadas en enlaces interiores de área local y con movimiento de personas, donde se caracterizan los desvanecimientos producidos por el paso de personas, los trabajos realizados son en bandas bajo los 28 [GHz]. En [28] se reportan una caracterización estadística producida por transeúntes en un enlace punto a punto de banda estrecha a 2,4 [GHz], pero con un tráfico bastante moderado de solo 4 personas, donde en [29], se realizan análisis muy similares, pero en área de oficinas con aumentando la cantidad de personas de 3 hasta 6 en movimientos por el enlace, calculando distribuciones de desvanecimiento, tasa de cruces por umbral y duración de los desvanecimientos, para cada uno de los casos. En [30], encontramos que al igual que las investigaciones anteriores realizan la caracterización estadística típica de canales dinámicos con transeúntes en el enlace, pero con la diferencia que da un énfasis especial al efecto de caminantes en las cercanías de la antena de forma particular entre la receptora y transmisora, donde claramente el efecto de los desvanecimientos es mucho más abrupto. Pero la situación con respecto al paso de personas en el enlace que se expone en este informe, no con respecto al número de personas sino a la situación que se intenta emular es el expuesto en [5], donde no existe un control sobre el movimiento de las personas y caracteriza estadísticamente ante una situación común en un lugar determinado. Ahora bien, solo en [31], se hace uso de ondas milimétricas en el enlace interior con personas, aunque nuevamente emula un entorno muy controlado de personas tanto en los movimientos como en el número de transeúntes, pero a una frecuencia de 30,1 [GHz] para un enlace punto a punto fijo.

El efecto de las multitrectorias en enlaces de ondas milimétricas se ve acentuado por la longitud de onda, donde obstrucciones en la trayectoria producen grandes desvanecimientos. Cuando nos enfocamos en la banda de nuestro interés encontramos generalmente enlaces exteriores donde los desvanecimientos y atenuaciones son producidos por factores diferentes a la dinámica producida por la incorporación del enlace. Algunos de los factores de mayor interés son las multitrectorias generadas por lluvia [11], donde se muestran una serie de investigaciones con ondas milimétricas de lo cual podemos deducir que mientras mayores son las frecuencias, mayores es el efecto de lluvias u otros fenómenos ambientales. Otro factor bastante mencionado que afecta bastante en un enlace con ondas milimétricas es la vegetación, árboles y arbustos en el entorno, donde nuevamente los análisis de la caracterización de las variaciones temporales son para sistemas LMDS o frecuencias cercanas [1] [32]. Ahora bien, nuestro mayor interés es cuantificar la dinámica del canal inalámbrico que se verá afectado por el paso de personas en el enlace, pero en un entorno interior, donde el efecto de la lluvia, granizo, viento u otro no vendrá al caso, aunque la vegetación puede estar presente en alguna área similar a la que se presenta en este informe, no forma parte del análisis temporal que se realiza. El efecto de los transeúntes ha sido extensamente investigado desde la llegada de las redes inalámbricas, puesto que siempre están presente especialmente en redes de área local (*WLAN*) donde su incorporación causa un mayor impacto, este efecto de los movimientos con respecto a las variaciones estadísticas del canal nuevamente se presentan en frecuencias que se ocupan típicamente en redes de área local (2,4 [GHz] y 5 [GHz]) cuando se encuentran inmersos en lugares interiores [9] [33], pero estas investigaciones son en entornos con movimientos de personas controlados. En [5], encontramos movimientos de personas sin controlar, ya que es una situación de flujo normal de gente por el entorno, que es lo que se trata de realizar en este trabajo, que es imitar una situación de tránsito



natural, aunque descartando ciertas situaciones locales. En [34] y [35], se analizan los efectos del paso de personas para un canal inalámbrico en ondas milimétricas de bandas de 73,5 [GHz] y 60 [GHz] respectivamente. Ahora bien, en [34] las mediciones se realizaron en un espacio urbano exterior donde el paso de personas era totalmente aleatorio y, con el uso de antenas directivas de un ancho de haz estrecho y orientables. Por otra parte, en [35] también se analiza el impacto de las personas, pero en un entorno interior con una sola persona en movimiento en el enlace, pero cruzándose a diferentes distancias entre Tx/Rx. Ambas investigaciones reportan duraciones de desvanecimientos en torno a los milisegundos, basados en los datos empíricos obtenidos.

En trabajos anteriores se utilizan típicamente para las mediciones, un enlace punto a punto generalmente fijo [9] [31] [33], los cuales se encuentran en presencia de personas, donde el uso de antenas permanece estáticas en alguna posición apuntando a la línea directa entre transmisor y receptor. Las antenas ocupadas son generalmente omnidireccionales [5] [31] o en algunos casos directivas [34] [35]. El mayor aporte del trabajo realizado tiene relación también con las características de las antenas ocupadas para esta frecuencia, puesto que, la directividad en especial del receptor es muy alta y, posee la característica de estar montada sobre una plataforma rotatoria que otorga la particularidad de realizar mediciones en todo el plano azimutal, con lo cual, podemos implementar técnicas de diversidad angular [36]. Los usos de la diversidad para reducir los efectos de las multitrayectorias se pueden apreciar en [37] [38], donde realizan un análisis de técnicas aplicadas de diversidad para mitigar los efectos de los desvanecimientos temporales. Esta diversidad angular en un entorno dinámico que varía aleatoriamente en el tiempo, nos permite conocer con mayor detalle el comportamiento de la señal para cada uno de los ángulos, con el fin de implementar técnicas de conmutación de haz. La diferencia en este trabajo radica en los parámetros que se cuantificaron, los cuales nos permitieron conocer la dinámica del canal en un entorno interior con personas que se cruzaban por el enlace aleatoriamente y, basados en los datos obtenidos empíricamente los parámetros principales analizados fueron la duración de los desvanecimientos y en el factor K temporal.

### 1.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentan los diferentes tipos de redes inalámbricas ocupadas al día de hoy y que otorgan servicio telecomunicaciones, dando un especial enfoque a las redes inalámbricas de uso local, las cuales son mayormente ocupadas en zonas interiores de nuestro interés y, también se presenta las características que posee un sistema inalámbrico dinámico. Por otra parte, se da a conocer las ondas milimétricas con las ventajas que dará su uso para las tecnologías de 5G y también las desventajas que posee frente al uso del radio frecuencias que se ocupan actualmente.

Otro aspecto importante es saber cómo se realiza la caracterización típicamente en sistemas inalámbricos en general, donde en la mayor parte de las investigaciones se hace uso del método empírico comparando los datos obtenidos a través de modelos teóricos, lo que otorga una gran ventaja no solo en términos de tiempo, sino también de recursos a la hora de conocer el comportamiento de un canal inalámbrico.

Finalmente, el uso de las distribuciones de desvanecimiento y los parámetros de banda estrecha han sido ampliamente ocupados para caracterizar típicamente las estadísticas temporales en este tipo de enlaces, ya que ante las variaciones temporales y los desvanecimientos a pequeña escala. Estos parámetros nos permiten conocer el comportamiento temporal del canal y, a partir de estos saber cómo influirá en la calidad del servicio con respecto a factores de comunicación de la información como el *bit rate*, ancho de banda, entre otros.

## 2 Marco teórico

Este capítulo tiene por finalidad dar a conocer los aspectos y fundamentos teóricos que serán ocupados con la finalidad de caracterizar el canal inalámbrico a 28 [GHz]. Se presentarán los parámetros del modelo de banda estrecha ocupados para este propósito y los modelos de distribución, dando a conocer los más conocidos que son la distribución tipo Rayleigh y Rice, dando una especial importancia a el parámetro factor K dada su importancia para conocer el comportamiento del canal. Por último, se definirá lo que respecta a la diversidad angular lo que dará paso a los métodos que se implementaran para la conmutación de haces para la optimización del canal inalámbrico.

### 2.1 Modelo temporal de desvanecimiento de banda angosta

Estos modelos de desvanecimiento se caracterizan por tener interferencias en la señal propagada de manera destructivas o constructivas en el receptor (Rx), ya que varias réplicas de la señal se suman o restan de manera vectorial [14]. Este modelo analiza los fenómenos de la propagación de las multitrayectorias que afectan a la señal mediante dos componentes principales: componente dominante y componentes difusas.

Existen diversos parámetros de estudio para los modelos de desvanecimiento de banda angosta, algunos de ellos son:

1. Correlación y Covarianza.
2. Densidad Espectral de Potencia.
3. Tasa de cruces por umbral y duración promedio de desvanecimientos.

En el caso de entornos dinámicos los parámetros típicos para caracterizar la dinámica del canal es la tasa de cruces por umbral y la duración media de desvanecimiento [7]. El primer término tiene relación con el número de veces por segundo, en promedio, que la amplitud de la señal cruza por un umbral establecido, el cual se evalúa para diferentes niveles típicamente para una representación [1]. Por otra parte, la duración media de desvanecimiento se relaciona con el valor promedio del tiempo en que la señal recibida se mantiene por debajo de un nivel establecido (umbral) [1], hasta que se recupera, mientras más cortos son estos tiempos, más profundos son los desvanecimientos.

### 2.1.1 Distribución de probabilidad

Cuando estamos inmersos en un medio o entorno físico en el que existen variaciones aleatorias que modifican las características físicas de la señal o envolvente, la potencia recibida presenta tanto fluctuaciones por las distancias entre Tx/Rx o variaciones espaciales, como en las variaciones temporales [1]. Las distribuciones de probabilidad más conocidas son la distribución Rice, Rayleigh y Nakagami [10], donde en nuestro caso abordaremos solamente las dos primeras.

### 2.1.2 Distribución Rayleigh

Una de las distribuciones más conocidas es la distribución Rayleigh que se presenta generalmente cuando existen diversas componentes de la señal [1]. Se puede representar a través de la siguiente ecuación:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, & 0 \leq r \leq \infty \\ 0, & r \leq 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

Donde:

- $r$  es el voltaje recibido de la envolvente en los terminales.
- $2\sigma^2$  potencia de los rayos difusos.

Se ha comprobado que esta distribución modela muy bien la condición en que no existe una componente dominante en la señal.

En una trayectoria LOS, las componentes multitrayecto arriban en diferentes ángulos y se superponen a la señal dominante [21]. Esto da lugar a una distribución de Rice.

### 2.1.3 Distribución Rice

Para describir estadísticamente las variaciones de intensidad de una señal constituida por un componente principal y varias componentes aleatorias se ocupa este tipo de distribución, donde generalmente los enlaces son de punto a punto [1]. Esta distribución está expresada a través de la siguiente ecuación:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right), & A \geq 0, r \geq 0 \\ 0, & r \leq 0 \end{cases} \quad (2-2)$$

Donde:

- $r$  es el voltaje recibido de la envolvente en los terminales.
- $2\sigma^2$  potencia de los rayos difusos.
- El parámetro  $A$  representa la amplitud peak de la señal dominante en volt.
- $I_0$  es la función modificada de Bessel de primer tipo y orden cero.

#### 2.1.4 Factor K temporal

Se define como la razón de las potencias de las componentes directas de la señal y las componentes del multitrayecto y se expresa como:

$$K(dB) = 10 \log\left(\frac{A^2}{\sigma^2}\right) \quad (2-3)$$

El parámetro  $K$  es conocido como el factor  $K$  Riceano, ya que es uno de los dos parámetros que se obtienen a través de esta distribución tipo rice [8]. Si  $A$  tiende a 0 implica que  $K$  tenderá a  $-\infty$  [dB], va generando una distribución Rayleigh. Como se muestra en la Figura 2-1, se muestra la representación de la relación entre la componente dominante con sus componentes difusas.

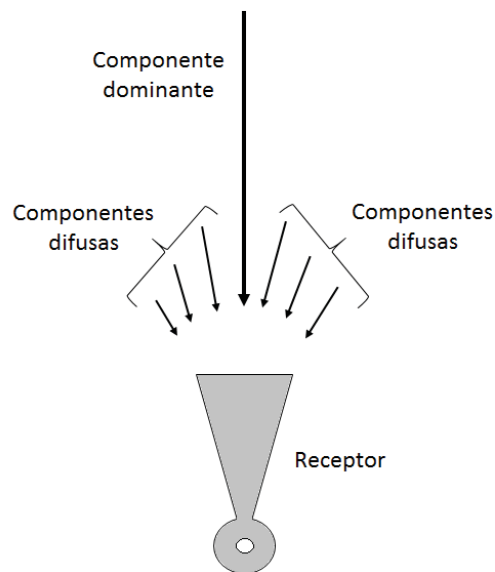


Figura 2-1: Representación de los componentes de la señal recibida

El factor K permite estimar estadísticas del canal que influyen en diversas variables de un servicio inalámbrico como el *error bit*, la eficiencia espectral, SNR, entre otros [22]. Por otra parte, este parámetro está directamente relacionado con la tasa de cruces por umbral y la duración media de los desvanecimientos [5] [21].

Para realizar el cálculo del factor K existen diversos métodos más complejos que otros, ya que se trata de un sistema no lineal. Uno de los métodos más utilizados y simples, para realizar la estimación del factor K, es el *Two moment-based estimators* [39].

### 2.1.5 Tasa de cruces por umbral

Conocido en inglés como *level crossing rate (LCR)*, es una medida en la cual una señal cruza por un umbral establecido, este dato en particular si bien en otras investigaciones ha sido mayormente utilizado, en nuestro caso no tendrá una relevancia tan profunda, aunque podría otorgarnos algunas informaciones adicionales.

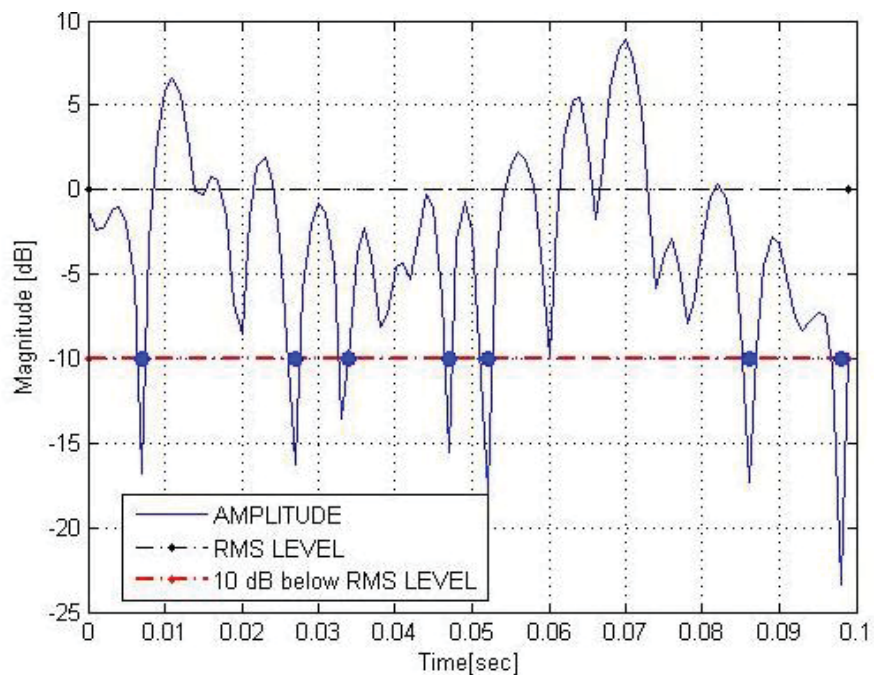


Figura 2-2: Tasa de cruces por umbral y duración media de desvanecimiento

(Fuente: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)).

Para poder cuantificarlo debemos notar la cantidad de veces que la señal cruza por el umbral establecido de manera positiva [1]. Tomando en consideración la Figura 2-2, podemos notar que cada uno de estos cruces deben contabilizarse y tomar en cuenta el tiempo de muestreo de la señal para así poder obtener la tasa de cruces de la señal en el tiempo.

### 2.1.6 Duración media de los desvanecimientos

Conocido en inglés como *average fade duration (AFD)*, es el tiempo en el cual una señal se encuentra por debajo de un umbral previamente establecido [14]. Este parámetro tiene mayor importancia, pero en esta tesis se ocupará como parámetro complementario para poder cuantificar la profundidad del desvanecimiento y la duración de estos. Ahora bien, para la utilización de este parámetro al igual que la tasa de cruces por un cierto nivel por unidad de tiempo, es necesario establecer previamente un umbral que como se muestra en la Figura 2-2, que a partir del valor RMS de la señal, se establece un umbral de 10 [dB] por debajo de éste valor.

### 2.1.7 Duración de los desvanecimientos

Aunque ya se dieron a conocer anteriormente los parámetros más utilizados para el análisis temporal de los canales inalámbricos, también a través de la duración de cada uno de estos desvanecimientos podremos obtener información más relevante del comportamiento del canal utilizando los parámetros de duración media de desvanecimiento y la tasa de cruces por umbral de forma complementaria y ampliándonos a la cuantificación de la duración de los desvanecimientos de forma particular.

Para cuantificar la duración de los desvanecimientos, debe establecer un umbral a partir del valor eficaz, medio u otro de la señal. En la Figura 2-2 se ocupa un umbral de 10 [dB] por debajo del valor eficaz de la señal en el tiempo. Posteriormente, se cuantifica por separado cada uno de los tiempos donde la señal se encuentra por debajo de dicho umbral establecido y, con ello podremos conocer cuánto tiempo dura cada uno de los desvanecimientos con respecto a un cierto umbral y realizar los análisis respectivos. Ahora bien, con la utilización de diversos umbrales podemos conocer que tan profundos pueden llegar a ser los desvanecimientos temporales de la señal.

## 2.2 Técnicas de diversidad

Las técnicas de diversidad se usan para mejorar el rendimiento del sistema en los canales de desvanecimiento, puesto que mitiga los efectos de los desvanecimientos a pequeña escala que se presentan en entornos de multitraectorias [40]. Estos métodos de diversidad requieren que existan varias rutas de transmisión disponible en el enlace, pero con estadísticas de desvanecimiento independientes, dado que si alguna de estas trayectorias sufre una atenuación severa se pueda conmutar a otra trayectoria de intensidad similar y, así obtener una adecuada combinación y no sufrir pérdidas de información transportada en común. Existen diversos tipos de técnicas de diversidad algunas de estas son: diversidad espacial, diversidad temporal, diversidad angular, diversidad de polarización y diversidad de frecuencia.

Todas estas técnicas pueden ser aplicables en sistemas de comunicación inalámbrica, pero en este informe se aplicó solo la diversidad angular con el fin de direccionar el haz de la señal transmitida. La utilización de técnicas de diversidad en ondas milimétricas se utiliza para compensar las pérdidas de la señal propagada que se produce en el camino entre Tx/Rx, puesto

que a frecuencias más altas los desvanecimientos son más profundos y al utilizar de estas técnicas, que en este trabajo es una técnica de diversidad angular nos permitirá ir conmutando a las mejores alternativas angulares señal propagada, para así mantener la calidad del sistema inalámbrico.

### **2.2.1 Diversidad angular**

Cuando estamos inmersos en enlaces de sistemas inalámbricos, las señales llegan a la antena de diferentes direcciones, estas señales se pueden utilizar para diversidad angular dado sus diferentes ángulos en las que arriban a la antena receptora [42]. Por lo tanto, dos o más antenas direccionales se pueden apuntar en diferentes direcciones en el sitio de recepción mitigando los efectos de las multitrayectorias. La diversidad angular se puede ver como un caso especial de diversidad espacial, ya que en algunos casos se aplican a través de múltiples antenas.

La diversidad angular consiste en ocupar varias antenas de recepción o transmisión directivas, o bien ocupar una sola antena directiva, pero que gire en todo su plano azimutal donde dichas antenas o antena debe poseer un ancho de haz pequeño, esto con el fin de mitigar los efectos de las multitrayectorias [41], dado que al utilizar una antena de este tipo de antenas se es mucho más selectivo en cuanto a la recepción de los multitrayectos de la señal propagada, dado que el ancho de apertura del haz de la antena es mucho menor.

### **2.2.2 Métodos de conmutación de haz**

El método de conmutación de haz permite elegir el ángulo donde se presenta la mejor o las mejores potencias de la señal entre las presentes sobre la base de un análisis de intensidad de las mismas [42], efectuándose una conmutación para obtener finalmente la más intensa o las más intensas.

El uso de métodos de conmutación de haz a través de la diversidad angular, permite ir conmutando angularmente en las mejores direcciones de recepción de la señal, con el fin de que si la mejor dirección sufre un desvanecimiento profundo se tenga una segunda alternativa angular independiente estadísticamente, que nos permita elegir si nos mantenemos en dicho ángulo o bien, conmutamos a un segundo mejor ángulo que no haya sido obstruido. En la adquisición de datos de la señal recibida podemos aplicar optimizaciones tales que, no sea necesario muestrear en cada uno de los ángulos de recepción y nos permita enfocar en los cuales se obtienen las mayores intensidades de la señal recibida.

## **2.3 Conclusiones del capítulo**

El presente capítulo da a conocer las bases teóricas que se utilizarán. El primer tópico está relacionado con el modelado de canal a través de parámetros de modelos temporales de desvanecimiento de banda estrecha, donde se dan a conocer las distribuciones de probabilidad típicas para sistemas inalámbricos. Dentro de estas distribuciones de probabilidad se destacan la distribución Rayleigh y la distribución Rice, que han sido ampliamente ocupadas. Ahora bien, por las características de nuestro enlace y antenas, nos enfocaremos en la distribución Rice y



particularmente en su parámetro factor K, que nos otorgará los primeros vestigios del comportamiento de la señal en términos de la relación entre los componentes de esta.

Otro de los parámetros ampliamente utilizados para caracterizar empíricamente canales que varían en el tiempo, destacan los parámetros de tasa de cruces por umbral y la duración media de los desvanecimientos, donde el principal enfoque es la duración de los desvanecimientos de la señal recibida con el fin de conocer su duración y profundidad.

Finalmente, las técnicas de diversidad permiten en ondas milimétricas compensar las pérdidas de propagación. La diversidad angular permite, a través de una antena directiva giratoria, realizar un barrido de potencia en los 360° e implementar métodos de conmutación de haz, basado en la búsqueda de las mejores direcciones angulares y así, encontrar alternativas angulares de recepción que permitan mantener la calidad del sistema en caso de que la mejor dirección angular de señal recibida sufra una obstrucción severa.

## 3 Sistema de medición a 28 [GHz]

Este capítulo tiene la finalidad de dar a conocer el sistema a 28 [GHz] ocupado para las mediciones, la información utilizada en cuanto a aspectos técnicos de la construcción proviene del informe un informe técnico [43] y, mientras que la información de cada una de las antenas utilizadas se da a conocer de los manuales de fábrica [44]. Por otra parte, se darán a conocer cada una de las configuraciones posibles que posee la plataforma a 28 [GHz], como las capacidades de adquisición de datos.

### 3.1 Antena transmisora y receptora

Ambas antenas corresponden a bocinas piramidales con una guía de onda tipo rectangular como fabricadas por la empresa AINFO. En la Figura 3-1.a, se muestra la antena bocina piramidal ocupada para la antena receptora, mientras que en la Figura 3-1.b podemos apreciar la antena directiva tipo bocina piramidal ocupada para la transmisión. Notar que existen variaciones entre ambas especialmente en la boca de la bocina y en el largo de la pirámide, dichas dimensiones están directamente relacionadas con la ganancia y el ángulo de apertura que ambas poseen. Cabe mencionar que la ganancia de la antena receptora es de 25 [dB], mientras que la ganancia de la antena transmisora es de 10 [dB], estos valores son importantes de conocer, ya que se pueden realizar cálculos del enlace a través de fórmulas de espacio libre y a lo que respecta al rango dinámico de cada una de las mediciones.

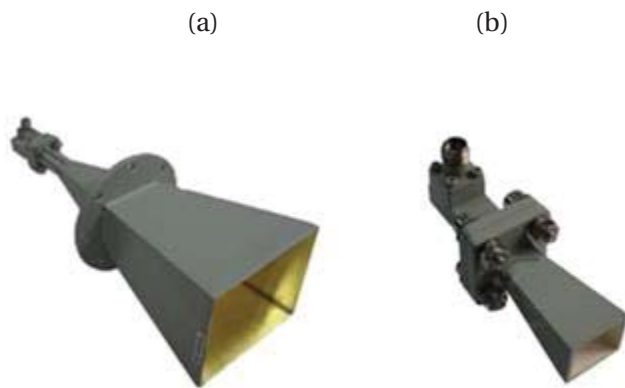


Figura 3-1: Antenas piramidales a 28 [GHz]: (a) Antena receptora (b) Antena transmisora [44].

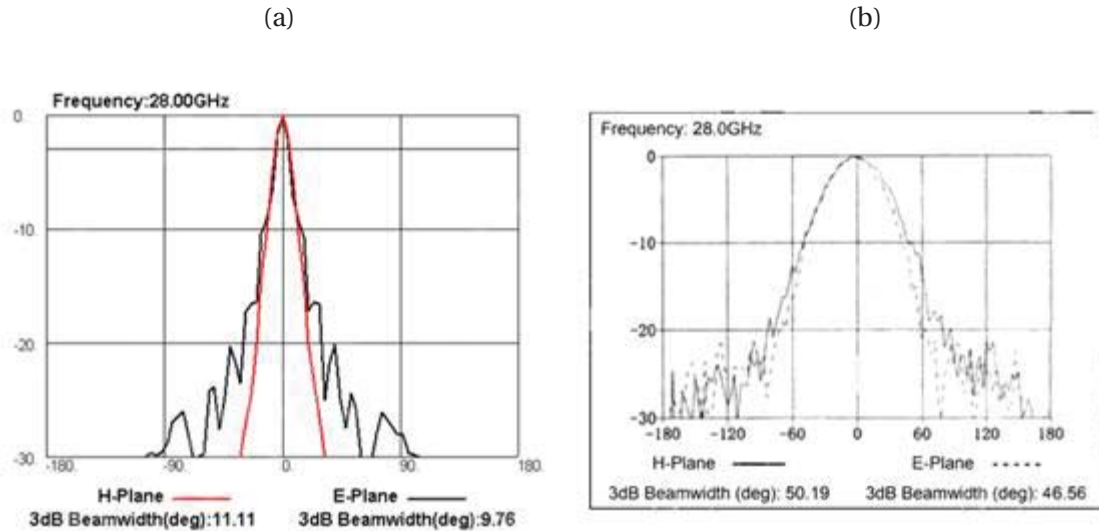


Figura 3-2: Patrón de radiación de: (a) Antena receptora (b) Antena transmisora [44].

Los diagramas de cada una de estas antenas se muestran en la Figura 3-2, en la cual la Figura 3-2.a corresponde al patrón de radiación de la antena receptora y Figura 3-2.b que corresponde al patrón de radiación de la antena transmisora ambos para la frecuencia de 28 [GHz]. Podemos notar en la Figura 3-2.a correspondiente a la antena receptora que posee un ancho de haz en el plano H de  $11,11^\circ$  y, en el plano E de  $9,76^\circ$  apertura, mientras que Figura 3-2.b la antena transmisora en el plano H posee  $50,19^\circ$  de apertura y en el plano E tenemos  $46,56^\circ$  de apertura.

### 3.2 Estructura del equipo a 28 [GHz]

La estructura del equipo a 28 [GHz] desde que se envía la señal hasta que es recibida, procesada y adquirida con sus datos, se resume en el diagrama de bloques mostrado en la Figura 3-3 da a conocer todos los pasos de manera simplificada desde la transmisión hasta llegar a su adquisición final a través de un ordenador que ocupe el usuario.

Este diagrama contiene cada una de las etapas principales del sistema de medición con cada una de sus características, las cuales serán explicadas más detalladamente subsecciones como es el equipo transmisor, equipo receptor con la antena ocupada y su etapa de amplificación y filtrado de frecuencia y, finalmente la etapa de adquisición y procesamiento de datos. Por otra parte, el sistema de 28 [GHz] tiene un sistema de alimentación, donde cabe destacar que consta de baterías que deben ser cargadas periódicamente. También consta con un control de velocidad para ir regulando la velocidad de la plataforma giratoria dependiendo de qué tan rápido se quiera realizar la adquisición de datos.

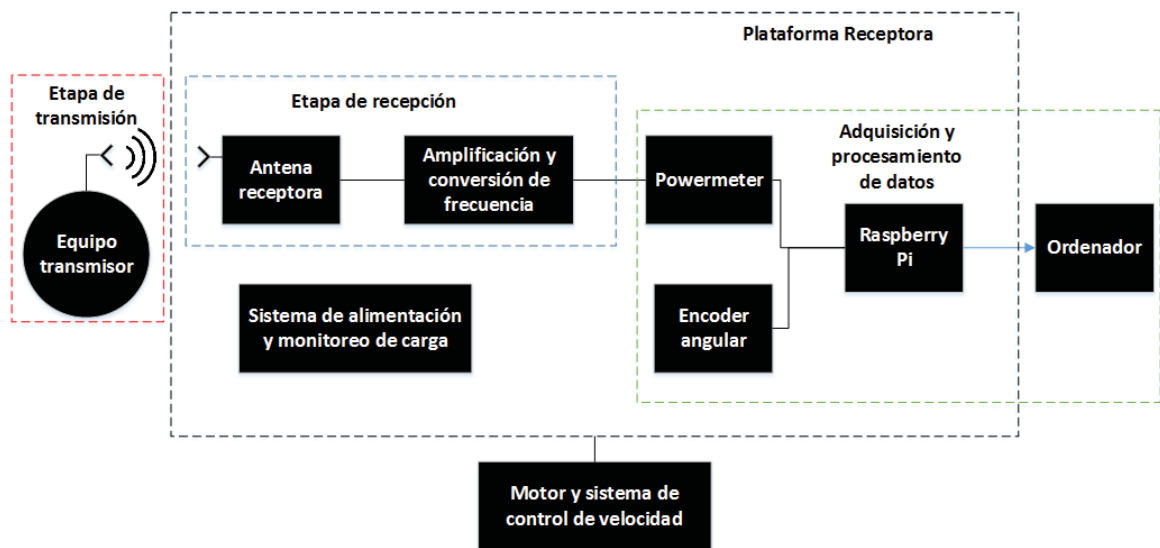


Figura 3-3: Diagrama de bloques del sistema a 28 [GHz].

### 3.2.1 Etapa de transmisión

El sistema de adquisición a 28 [GHz] está compuesto por diferentes elementos que permiten la adquisición de datos empíricos, donde la primera etapa es la transmisión de los datos a través de una antena transmisora, la cual se puede apreciar en la Figura 3-4.

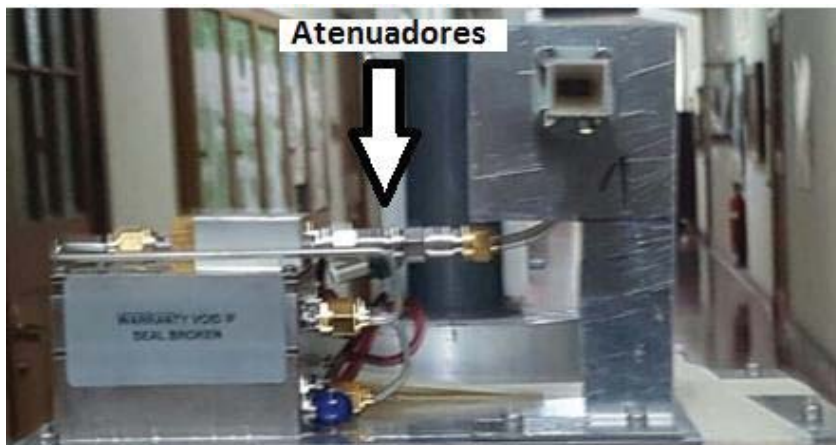


Figura 3-4: Antena transmisora a 28 [GHz]

También podemos notar atenuadores que se ocupan en el transmisor, ya que ambos equipos poseen niveles de sensibilidad a distancias cortas y para no afectar y/o saturar al receptor o transmisor, se ocupan estos atenuadores (10 [dB], 20 [dB] y 30 [dB]).

### 3.2.2 Etapa de recepción

Posteriormente a la transmisión de datos, estos son recibidos por la antena receptora que se encuentra montada en la plataforma giratoria a 28 [GHz] que se puede apreciar en la Figura 3-5.a. Por otra parte, la plataforma receptora posee diferentes etapas de filtraje, amplificación y atenuación, en la Figura 3-5.b podemos apreciar los diferentes elementos que componen el procesamiento de la señal.

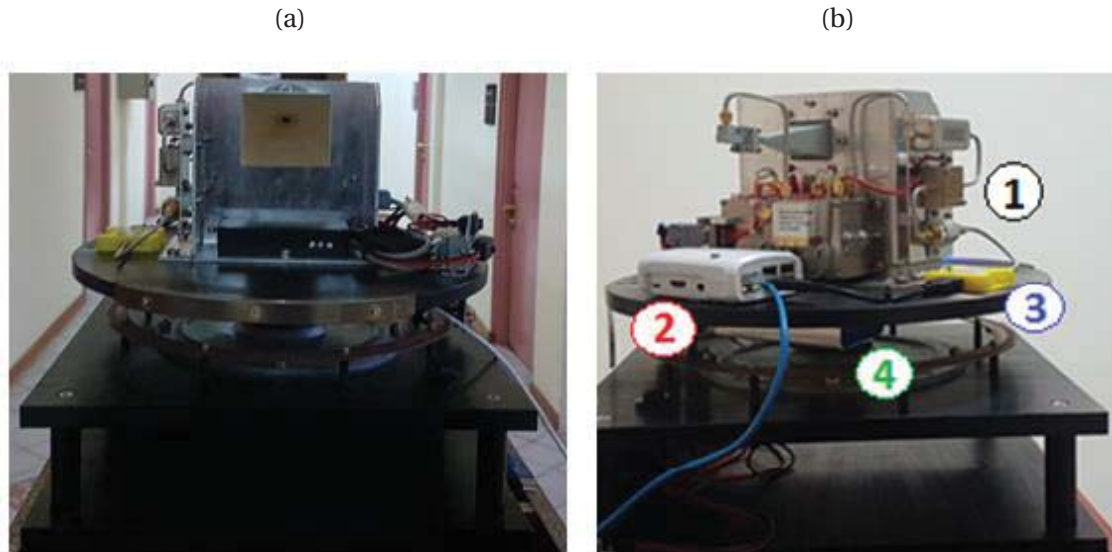


Figura 3-5: Plataforma receptora sistema a 28 [GHz]: (a) Plataforma receptora (b) Plataforma giratoria y sus componentes.

### 3.2.3 Adquisición de datos

Los componentes para la adquisición de datos y para el control de las mediciones, se encuentran exclusivamente en la plataforma receptora. En el caso de la adquisición de datos los componentes utilizados en la Figura 3-5.b que están enumerados, son los siguientes:

1. Etapa en FI (frecuencia intermedia) de tres elementos: Un filtro pasa-banda, un amplificador y un filtro pasa bajos, con el fin de procesar la señal para obtener mejores resultados.
2. Raspberry Pi 3: Este componente nos permite conectarnos tanto de forma *online* como *offline* para realizar las mediciones, ya que posee un módulo wifi lo que nos permite revisar los datos gráficamente en tiempo real.
3. Powermeter: El powermeter fue desarrollado por HCF Engineering. La función principal de éste es medir la potencia, ya que se basa en un amplificador logarítmico que recibe la señal de la etapa de frecuencia intermedia y nos otorga un valor analógico en volts.

4. Encoder: Su principal función es calcular la velocidad angular de la plataforma y su posición angular correspondiente, que es una rejilla metálica de forma circular.

Por otra parte, existe un software desarrollado por alumnos de la UTFSM que permite realizar las mediciones con un ordenador que posea la interfaz, en el anexo A, donde encuentra un manual detallado de cómo se utiliza el software, las configuraciones que posee y cada uno de las opciones que nos entrega. También se da a conocer en el manual, las consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de realizar las mediciones tanto de forma *offline* como de forma *online*. Ahora bien, adquiriendo los datos a través de la Raspberry Pi 3, nos conectamos vía *Ethernet* o *Wifi* y, se extraen los datos con un ordenador y se procesan los datos con el programa Matlab, donde manipulan las variables de los datos y así analizar la información recolectada, lo cual se verá en la sección 4.5.

### 3.2.4 Configuraciones y resolución

Las mediciones se realizan en banda estrecha para obtener un sistema mucho más sencillo y sin modulación. Para realizar la adquisición existen dos configuraciones con respecto a la plataforma giratoria, donde se puede realizar con la plataforma girando llegando hasta una velocidad máxima de 300 [rpm] o con la antena fija apuntando a una sola dirección.

En la Tabla 3-1, se resumen las características principales en términos de las variables obtenidas, muestreo o resolución del sistema de la plataforma cuando adquirimos los datos de las mediciones.

Tabla 3-1: Comparación entre configuraciones de la plataforma a 28 [GHz]

Configuraciones	Plataforma rotando	Plataforma fija
Variables obtenidas	Potencia, ángulo, tiempo, velocidad, vuelta.	Potencia, tiempo y ángulo.
Tiempo de muestreo de potencia para un ángulo	200 [ms]	1,4 [ms]

## 3.3 Conclusiones del capítulo

La finalidad de este capítulo es que el lector conozca cada uno de los detalles técnicos de la plataforma a 28 [GHz], ya que existen diferencias con lo que otros autores han ocupado en sus investigaciones, puesto que, la plataforma receptora posee la capacidad de realizar mediciones rotatorias y fijas. Por lo cual, existen ciertas limitaciones del sistema de medición a 28 [GHz] que se utiliza para la adquisición de los datos con sus respectivos resultados mostrados en este informe.

Otro aspecto importante en este tipo de trabajos es conocer las antenas ocupadas para su propósito, ya que cada uno de estos aspectos ayuda a la comparación posterior de las variables obtenidas y puede ser la razón de variaciones que pueden obtener algunas investigaciones con las realizadas en este trabajo, puesto que la antena ocupada para la recepción es altamente directiva.

También se da a conocer de forma detallada todo el proceso de adquisición de datos, desde la transmisión hasta la adquisición de datos por el usuario y, cada uno de los elementos que se requirieron para hacer eso posible. Se muestra las capacidades que posee la plataforma para cada una de las configuraciones (rotando y fija) de la plataforma, puesto que, cada uno de estos datos se resaltan a modo que el lector pueda manejar cada uno de estos aspectos y, así, pueda relacionar algunos datos de la plataforma con los resultados obtenidos.

## 4 Entorno y procedimiento de medición

Este capítulo tiene por objetivo dar a conocer algunas de las características del escenario o espacio físico donde se realizarán las mediciones con el sistema de 28 GHz. La característica principal es el entorno dinámico presente en el enlace Tx/Rx, por otra parte, se darán a conocer algunas características secundarias como las distancias del lugar y de qué forma se realizaron las mediciones, ya sea sin línea de vista (NLOS) y con línea de vista (LOS). Los elementos que estuvieron involucrados en la medición, tiempo que duró cada una de éstas y dónde se posicionaron tanto el receptor como el transmisor.

### 4.1 Lugar del entorno físico interior dinámico

El enlace de transmisión de la señal entre el transmisor y el receptor se encuentra inmerso dentro de un entorno interior que posee un carácter dinámico, ya que mientras se realizan las mediciones existe gente circulando por el enlace. El lugar físico donde se realizan las mediciones es el edificio C, específicamente el Hall C de la Universidad Técnica Federico Santa María, donde se caracteriza por ser un gran salón. En la Figura 4-1, se presenta el esquema del Hall C de la UTFSM con cada uno de los detalles más importantes que destacar.

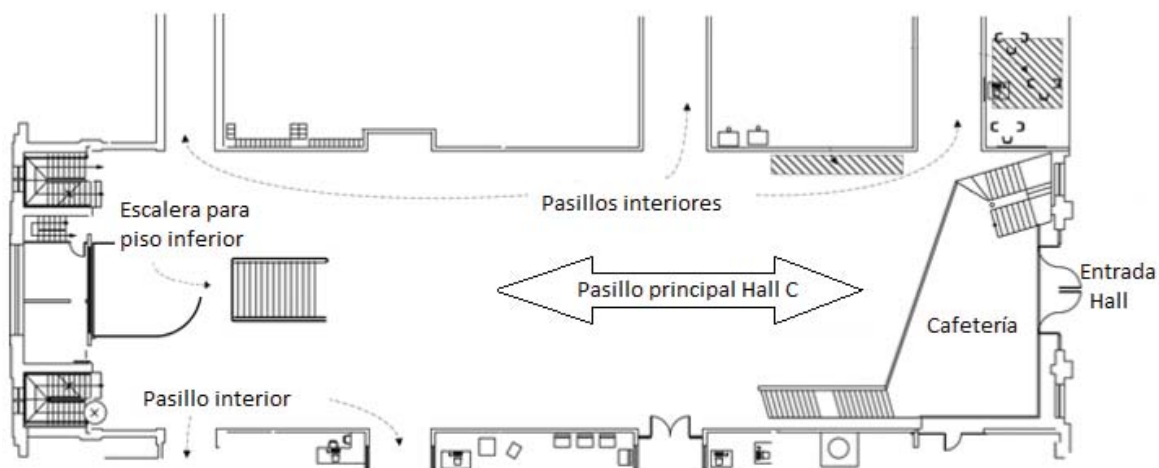


Figura 4-1: Esquema Hall C UTFSM [5].



En el anexo B, donde se puede apreciar con más detalle cada uno de los elementos que componen este gran salón, pero en la Figura 4-1 solo se han destacados los más importantes para este trabajo. Uno de los elementos que no se pueden apreciar y que proporciona una gran cantidad de reflexiones en el entorno son las vigas metálicas en las murallas del Hall que van desde el suelo hasta el techo, lo que en algunos casos nos otorga direcciones de potencias significativas. El salón es un punto de encuentro entre estudiantes y circulan por este para ir a los salones que se encuentran en los pasillos interiores que se muestran, por otra parte, posee una cafetería que está elevada y que posee dos escaleras para acceder a ésta y así dejar libre circulación de personas por debajo de ella.

#### 4.2 Generalidades y elementos del entorno

Existen diversas consideraciones y aspectos generales que se deben considerar antes de abordar los resultados obtenidos con respecto al entorno físico interior de medición donde fueron obtenidos los datos empíricos. El receptor puede tener dos configuraciones como se hizo notar en el capítulo anterior, girando hasta 300 [rpm] o fijo. Como se muestra en la Figura 4-2, el receptor o estación base se encuentra a 2,4 [m] sobre una estructura de madera y el transmisor o usuario se encuentra sobre un trípode a 1,3 [m] de altura. Por lo que, receptor y transmisor se colocaron de manera estratégica para emular un servicio de área local, de modo que el receptor sea la estación base y, el transmisor sea el usuario una persona ocupando su dispositivo móvil en una posición estática.

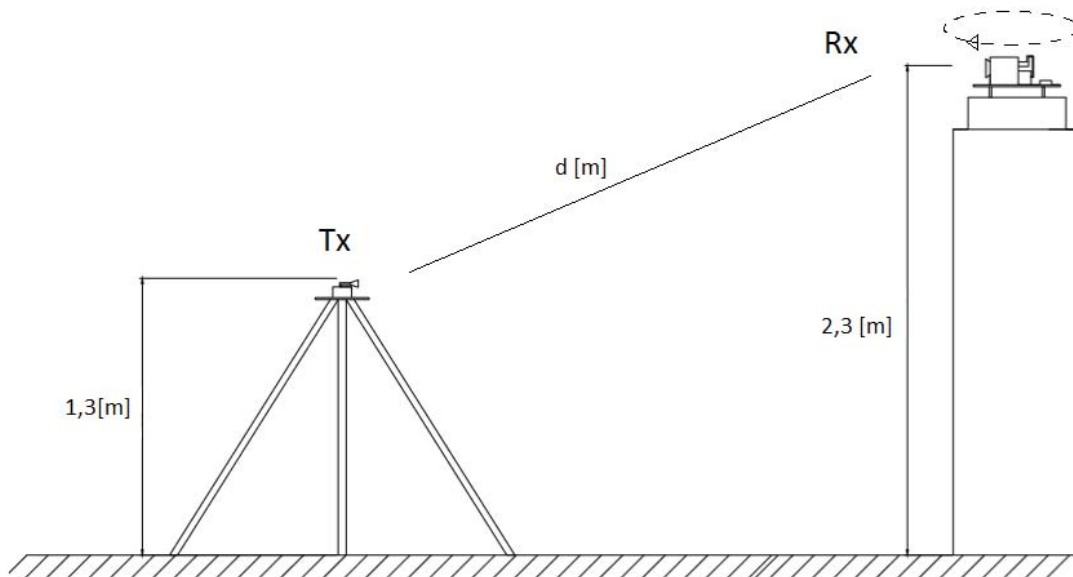


Figura 4-2: Altura del transmisor y receptor.

En la Figura 4-3, se puede notar las dimensiones del entorno de medición donde fueron adquiridos los datos y, existen 3 posiciones para Tx y solo una del Rx. Las posiciones de transmisión que se encuentran en el pasillo principal del Hall se encuentran en LOS con respecto al receptor y, el transmisor que se encuentra inmerso en el pasillo posee la característica de estar en NLOS con respecto al receptor, ya que se ve rodeado por muros del pasillo por los costados. Las distancias del enlace no superan los 50 [m] para todos los casos, siendo el caso de NLOS el más alejado de todos.

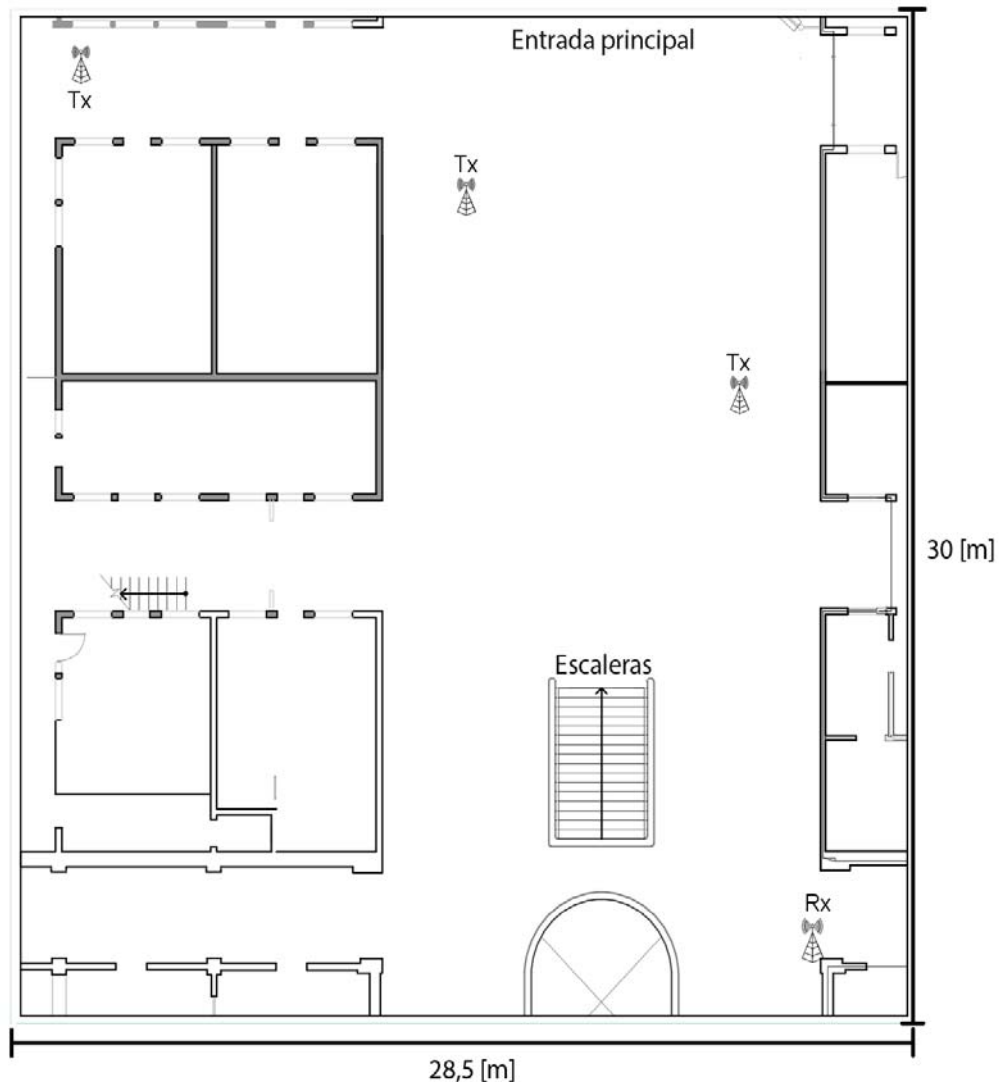


Figura 4-3: Hall C posiciones del receptor y transmisor.

Por otra parte, colocar las antenas transmisoras de forma fija y apuntarlas hacia alguna dirección, cabe destacar se realizaron de diferente forma dependiendo si nos encontrábamos en LOS o NLOS. Para los casos de NLOS el apuntamiento era desde el pasillo mirando el pasillo principal del Hall C, mientras que para los casos LOS para bajo y alto tráfico el apuntamiento de las antenas era al lado opuesto de la entrada principal que se aprecia en la Figura 4-1 y Figura 4-3.

### 4.3 Características de los movimientos

Uno de los aspectos más importantes son la cantidad de personas que se plantearon para el enlace, en los cuales se intentó que el número de personas se repitiera cada uno de los días. Es por ello, que los movimientos de personas se clasifican en dos tipos:

- Bajo tráfico: Correspondiente a 5 personas aproximadamente moviéndose por el enlace en la primera zona de fresnel.
- Alto tráfico: Correspondiente a 15 personas aproximadamente moviéndose por el enlace en la primera zona de fresnel.

Los movimientos de las personas o transeúntes típicamente como se muestra en la Figura 4-1, se dan en el pasillo principal del Hall, ya que es el lugar principal que conecta con los diferentes lugares (pasillos, cafetería, laboratorios, etc.) y también un punto de encuentro entre estudiantes, ya que como se muestra en el anexo B, existen bancas y asientos donde las personas se pueden mantener por un buen tiempo.

Ahora bien, teniendo en cuenta los tipos de movimientos y los casos expuestos anteriormente de línea de vista o no línea de vista, se pueden combinar y obtener 4 casos posibles para realizar las mediciones y que es muy importante tener en cuenta cuando se den a conocer los resultados de este trabajo, estas combinaciones son: bajo tráfico LOS, bajo tráfico NLOS, alto tráfico LOS y alto tráfico NLOS.

Cada tabla, gráfico u otro se tomarán en cuenta cada uno de estos casos y se analizarán de forma conjunta o por separado dependiendo de lo que se quiera dar a conocer.

### 4.4 Tiempos de medición

Cuando se realizan mediciones, el tiempo de cada una de las muestras es un aspecto muy importante cuando lo realizamos empíricamente, ya que los tiempos entre cada una de las mediciones y horas en que se realizaron es un aspecto que se debe tener presente especialmente en un sistema inalámbrico dinámico donde dicha característica viene dada por el paso de personas, ya que en ciertas horas habrá mayor tráfico que en otras.

La duración de cada una de las mediciones depende de cómo se comporte el entorno medido, es por ello, que en [31] se recalca la importancia de la estacionalidad de las mediciones es un pilar fundamental para este tipo de canales dinámicos, puesto que, pueden llevar a cálculos erróneos. Es por ello, que las mediciones son de 3 a 5 minutos típicamente para evitar situaciones locales como el aumento abrupto de transeúntes por el enlace, especialmente en las cercanías de las antenas.

## 4.5 Procedimientos de medición

Cada una de las mediciones se realizaron a través de procedimientos particulares tanto en la configuración del sistema de medición a 28[GHz], su posicionamiento a la hora de realizar la medición o su procesamiento posterior a la adquisición, dependiendo del parámetro. Es por ello, que se mostrara de forma particular el procedimiento de medición para cada uno de los parámetros y técnicas de diversidad.

### 4.5.1 Duración de los desvanecimientos

Las mediciones y el procesamiento de la duración de los desvanecimientos deben realizarse de maneras particulares las cuales se resumen en el diagrama de la Figura 4-4. Para adquirir los datos para la duración de los desvanecimientos, se busca con la plataforma el ángulo de potencia máxima promedio basado en la búsqueda angular en tiempo real, dicha búsqueda en tiempo real se detalla en el anexo A, para posteriormente posicionar la antena receptora de forma fija en ese ángulo. Posteriormente se realiza la adquisición con la antena fija en el mejor ángulo y se extraen los datos de la plataforma. Los datos obtenidos se procesan a través de Matlab, eliminando datos erróneos, seleccionando el tramo a manipular y convirtiendo el archivo obtenido a una extensión de datos binarios que usa Matlab. Con los datos ya procesados se eligen tres umbrales que en este caso y como se muestra Figura 4-4, son 6 [dB], 9 [dB] y 12 [dB], con los cuales se realiza el análisis estadístico correspondiente para cada uno de los casos posibles y configuraciones de interés.

Las mediciones para cuantificar la duración de los desvanecimientos se replicaron en diferentes días y en las posiciones de Tx y Rx mostradas en la Figura 4-3, intentando que las condiciones de volumen de gente fueran lo más similar posible.

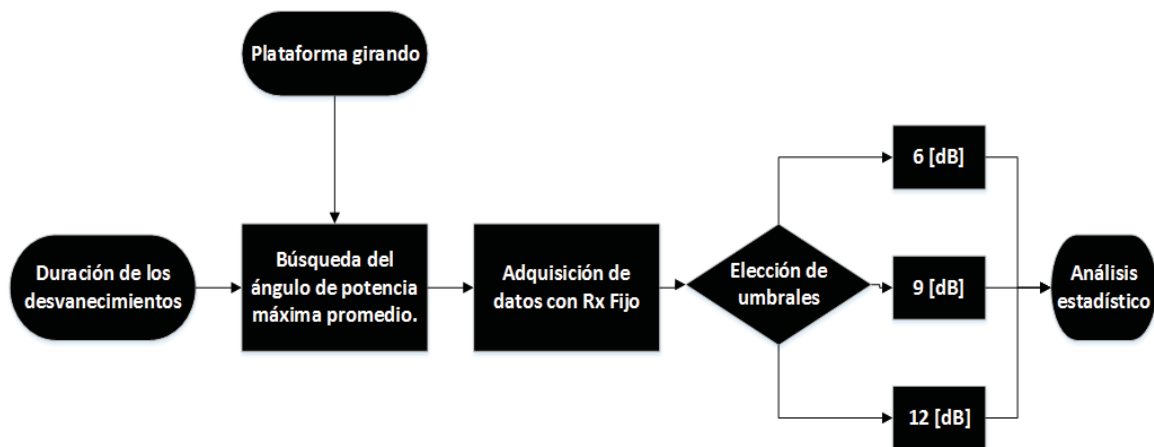


Figura 4-4: Diagrama de adquisición para la duración de los desvanecimientos

### 4.5.2 Factor K temporal

El diagrama de la Figura 4-5, muestra un resumen de los pasos que se siguieron para adquirir los datos para estimar el factor K temporal. Primero, se buscan con la plataforma los mejores ángulos de potencia máxima promedio, para posteriormente posicionar la antena receptora de forma fija en el mejor ángulo o en el segundo mejor ángulo de potencia máxima promedio. Luego se procesan los datos obtenidos a través de Matlab, donde se eliminan datos erróneos, se selecciona el tramo que se va a manipular y se convierte el archivo a una extensión de datos binarios de Matlab. Posteriormente se realiza la adquisición de forma fija en alguno de estos ángulos y, se extraen los datos de la plataforma. Se buscan las estadísticas para la primera y segunda dirección, primera dirección llamamos al ángulo donde encontramos la máxima potencia promedio y la segunda dirección al ángulo donde encontramos la segunda máxima potencia promedio. Se calculan los factores para todos los casos. Y se realizan solo mediciones fijas por el efecto de las variaciones temporales muy rápidas. Los datos ocupados para el factor K temporal son los mismos que se ocupan para la duración de los desvanecimientos las posiciones mostradas en la Figura 4-3 son las mismas.

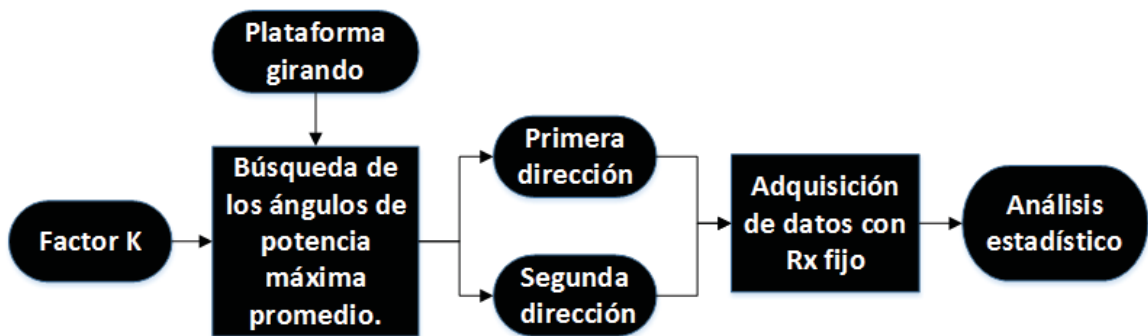


Figura 4-5: Diagrama adquisición de datos para factor K temporal.

### 4.5.3 Conmutación de haz

La Figura 4-6, muestra en forma de diagrama cada uno de los pasos realizados para obtener los resultados de la conmutación de haz. Notar que en este caso las mediciones se realizan con la plataforma receptora girando a 300 [rpm], por lo cual, no es necesario una búsqueda de algún ángulo. Al estar rotando la plataforma, el procesamiento de los datos se realiza con Matlab, pero se debe seleccionar solo los datos donde la plataforma se encuentre girando a 300 [rpm], ya que hay un tiempo previo donde la velocidad va aumentando hasta llegar a las 300 [rpm], por lo cual, se filtra la información, se eliminan los datos erróneos, se interpolan algunos datos faltantes dada la velocidad de la plataforma y se convierte el archivo a una extensión de Matlab. Posteriormente, realizada la medición se procede obtener los datos medidos. Una vez obtenidos estos datos se procesan y, se implementan dos métodos de conmutación:

- Mejor dirección de potencia máxima promedio: A través de una búsqueda angular por cada vuelta que realiza la plataforma, donde se selecciona el mejor ángulo de potencia promedio basado en 10 exploraciones anteriores, para posteriormente mantenernos en dicho ángulo por las 10 vueltas siguientes, donde se repetirá el ciclo hasta finalizar la medición.
- Tres mejores direcciones de potencia máxima promedio: Se realiza una búsqueda angular por cada vuelta que realiza la plataforma, donde se selecciona los mejores tres ángulos de potencia promedio basado en 10 exploraciones anteriores, para posteriormente mantenernos en dichos ángulos por las 10 vueltas siguientes, donde se repetirá el ciclo hasta finalizar la medición.

Para finalmente realizar un análisis estadístico de los resultados obtenidos, para cada uno de los casos de nuestro interés.

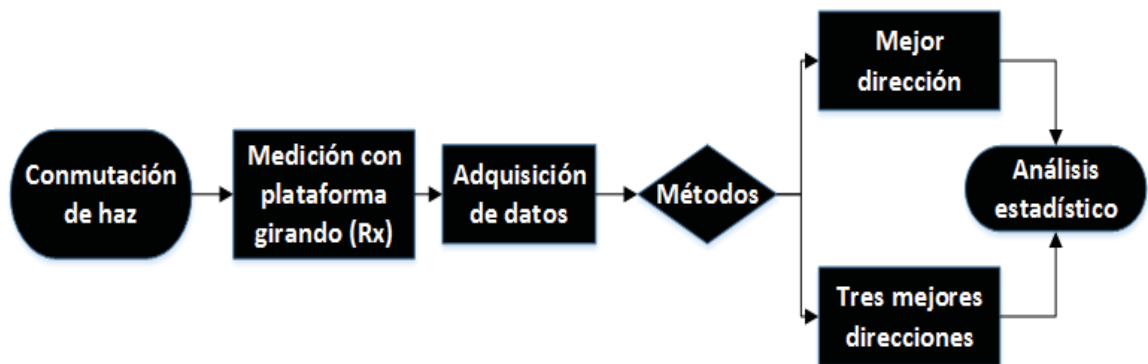


Figura 4-6: Diagrama de adquisición de datos para la conmutación de haz.

## 4.6 Conclusiones del capítulo

Conocer cada uno de los aspectos importantes del entorno de medición, posiciones de las antenas, movimientos de las personas, permiten dar a conocer de manera más detallada las situaciones que se presentan en este trabajo. Para ello se muestra una serie de figuras para dar a conocer el lugar, elementos, posiciones y altura del receptor y el transmisor, para informar cada una de las consideraciones que fueron tomadas en cuenta para realizar las mediciones.

Las configuraciones mostradas tienen gran relevancia, puesto que, en los resultados obtenidos se realizaron una serie de tablas y gráficos donde se comparan los 4 casos posibles que tenemos en nuestro entorno y que ocupamos en las mediciones, donde se pueden agrupar entre bajo tráfico, alto tráfico, con línea de vista o sin línea de vista para realizar análisis de cómo se comporta el canal. En entornos reales de servicio inalámbrico se pueden tener casos de NLOS y LOS y, el entorno nos permitía realizar mediciones para ambos casos. Los tiempos de medición son un aspecto importante a especialmente en entornos dinámico, ya que de un momento a otro la

situación dinámica puede cambiar abruptamente y es por ello que se debe tener en consideración la dinámica del entorno para saber cuánto es el tiempo indicado para las mediciones que se realizarán.

Antes de obtener los resultados, se necesita conocer como estos fueron adquiridos, procesados y manipulados para llegar a ello. Ahora bien, en el caso de la duración de los desvanecimientos y el factor K temporal, los datos se obtuvieron y procesaron de la misma forma, pero para la conmutación de haz era necesario que la plataforma se encontrase girando para adquirir los datos, por lo que, el procesamiento y manipulación de los datos es diferente.

## 5 Resultados

La finalidad de este capítulo es lograr caracterizar el comportamiento dinámico del canal inalámbrico a través de los datos que se obtendrán con las mediciones del sistema de 28 GHz. Los datos obtenidos por las mediciones dinámicas del sistema inalámbrico se analizarán a través del programa Matlab, tanto para el procesamiento de los datos, como para el análisis estadístico de cada uno de los parámetros utilizados.

Por otra parte, y donde se enfocarán nuestras mediciones a través de los parámetros de modelos de banda estrecha, será en el tiempo de desvanecimiento el cual nos permitirá cuantificar el tiempo de duración de los *fades* y su profundidad y, el factor K temporal de la distribución Rice.

Con estos datos adquiridos, podremos comparar las diversas señales *peak* de los ángulos donde se encuentran las potencias promedio más altas y así analizar si es realmente realizar una reorientación del haz, ya que poseeremos cada uno de los componentes de potencia correspondientes a los ángulos, esto nos permitirá averiguar través de diferentes relaciones si deberemos cambiarnos al segundo mejor ángulo en algún instante de tiempo o bien, si permanecemos en el que estábamos anteriormente.

### 5.1 Duración de los desvanecimientos

Algunos de los parámetros más importantes especialmente cuando estamos en entornos dinámicos, son el tiempo de desvanecimiento promedio y la tasa de cruces por umbral, los cuales nos otorgan información importante con respecto a la dinámica del canal inalámbrico, pero la cual no consideramos suficientemente específica para poder caracterizar óptimamente el canal inalámbrico dinámico. Es por ello, que la duración de los desvanecimientos, será analizada a través de la función de distribución acumulada o *cumulative distribution function* (CDF), con el fin de permitir una mejor interpretación de los resultados. La característica principal que queremos saber de los desvanecimientos temporales es:

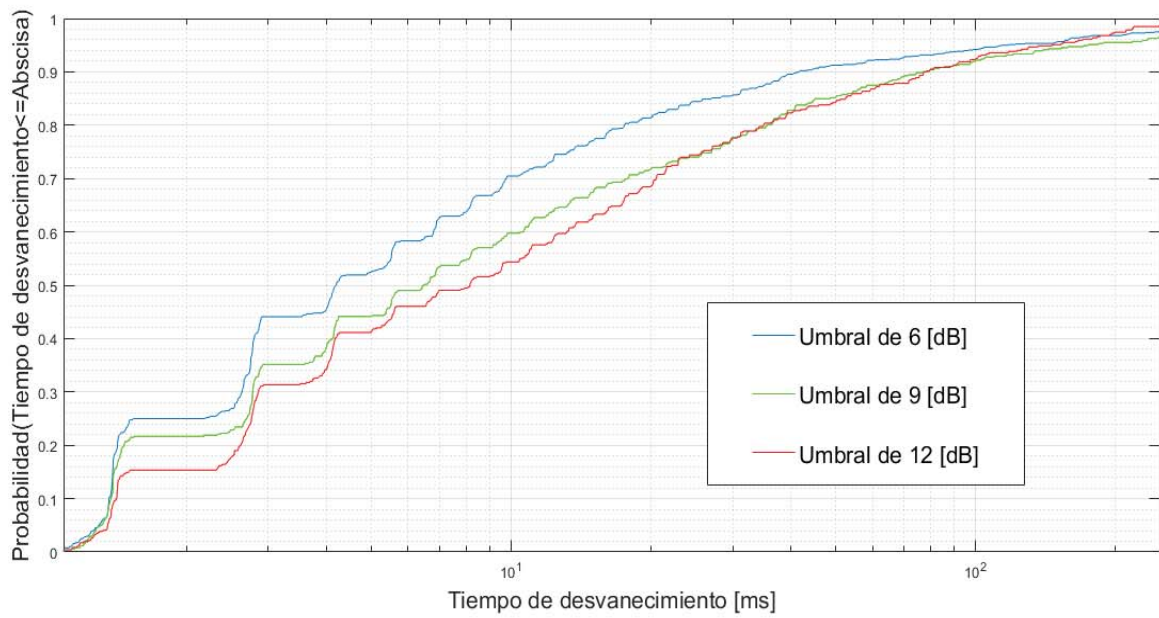
- Profundidad
- Duración

Para cada uno de los resultados se tomaron todas las mediciones de todos los días separándolos en casos: alto tráfico LOS, alto tráfico NLOS, bajo tráfico LOS y bajo tráfico NLOS. Donde una vez

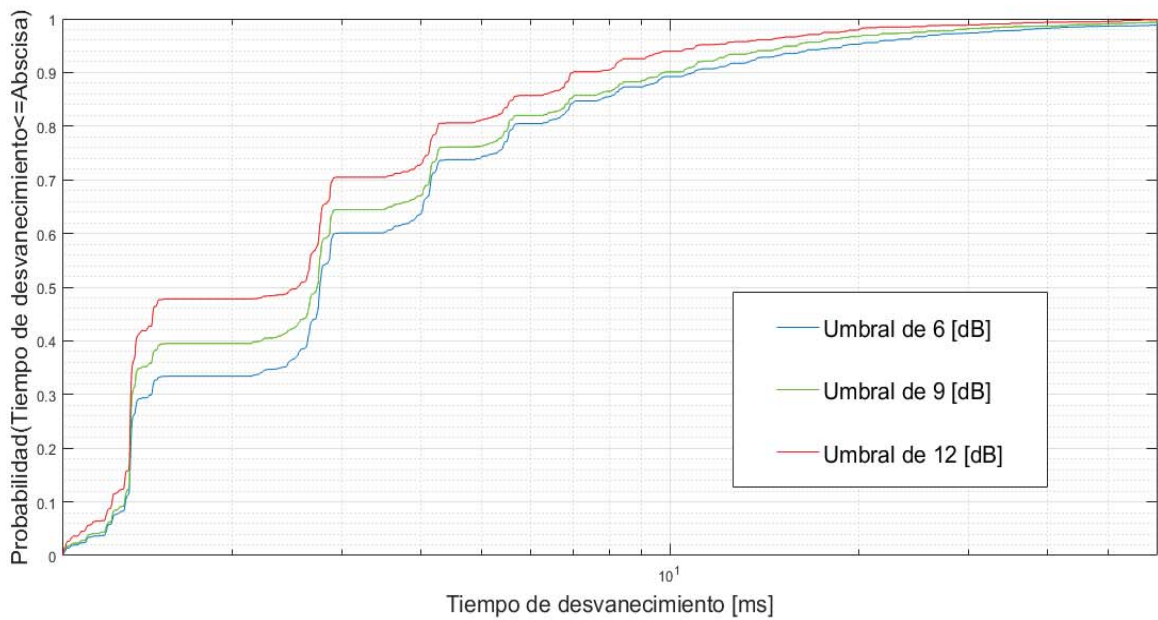


separadas por casos, se tomaron todas las mediciones de cada uno de los casos y a través de la función de distribución acumulada se realizaron cada una de las gráficas.

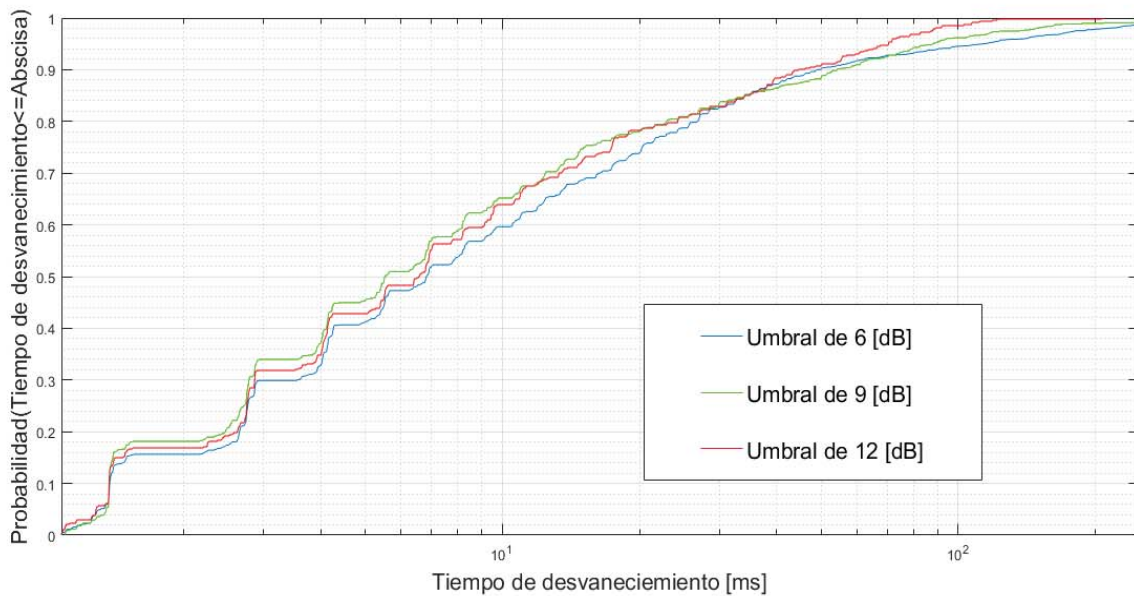
(a)



(b)



(c)



(d)

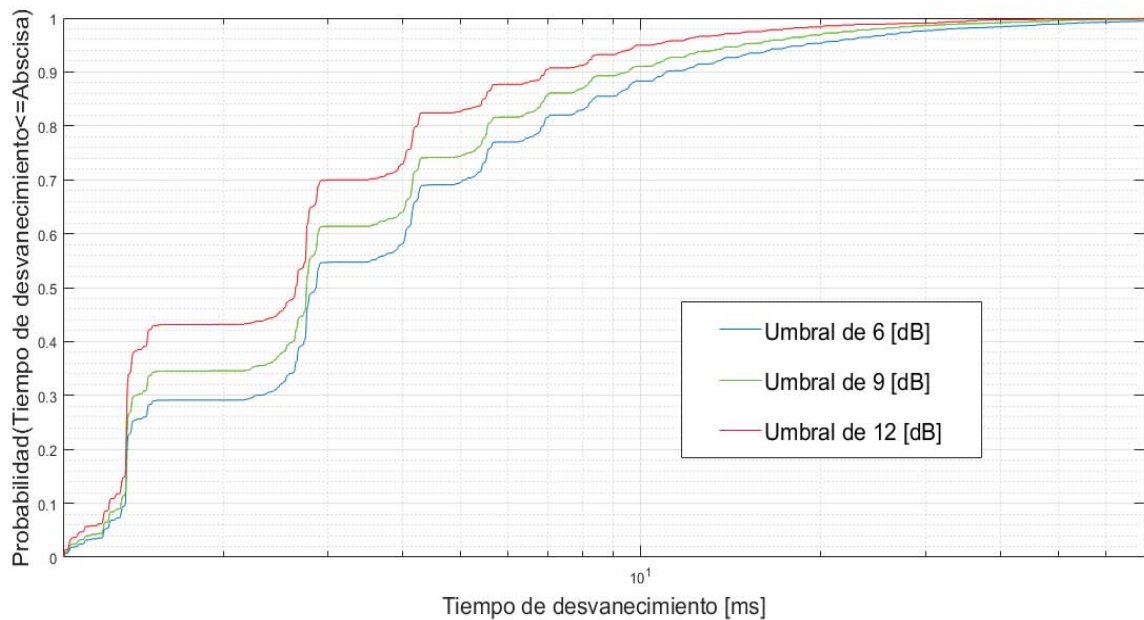


Figura 5-1: Duración de los desvanecimientos para los siguientes casos: (a) Bajo tráfico, LOS. (b) Bajo tráfico, NLOS. (c) Alto tráfico, LOS (d) Alto tráfico, NLOS.

Cada una de estas figuras se obtienen a partir de tres umbrales establecidos a partir de la potencia media de la señal adquirida, luego a través de la CDF podemos ver de forma acumulada cada uno de los desvanecimientos que se produjeron para caso. Se muestran en escala logarítmica para poder apreciar con mayor claridad los resultados obtenidos.

Notar que para todos los casos los desvanecimientos están en torno de los milisegundos de duración y, si tomamos la probabilidad de ocurrencia de un 90% para cada uno de ellos, podemos notar que la duración de los desvanecimientos no supera los 100 [ms]. En el caso de bajo tráfico en LOS en la Figura 5-1.a, se obtienen las duraciones de desvanecimientos mayores, especialmente aplicando los mayores umbrales de 9 [dB] y 12 [dB]. Por otra parte, la Figura 5-1.b muestra un caso de bajo tráfico, pero a diferencia del caso anterior es en NLOS. Si bien, los tiempos de desvanecimiento entre ambos son muy bajos, cuando es NLOS el enlace las duraciones son aun menores. La diferencia entre los umbrales es inversa al caso anterior, ahora el umbral de 12 [dB] es el que presenta menores tiempos desvanecimiento y, el que posee los mayores tiempos es el umbral de 6 [dB]. En la Figura 5-1.c, al igual que el caso de bajo tráfico se presentan desvanecimientos mayores, a pesar de estar en un caso de alto tráfico con LOS, aunque son menores y para un 90% de los casos para todos los umbrales las duraciones de los desvanecimientos son menores a 50 [ms]. Finalmente, en la Figura 5-1.d se aprecian desvanecimientos de muy corta duración muy similar a la Figura 5-1.b, por lo que, los casos de NLOS presentan las menores duraciones de desvanecimientos. Esta diferencia entre tener o no tener línea de vista para un mismo caso de bajo o alto tráfico de personas en el enlace, entrega los primeros vestigios del comportamiento del canal dinámico inalámbrico, ya que estar en línea de vista es mucho más perjudicial para los desvanecimientos temporales con el paso de personas, pues la irrupción de gente en el enlace es mucho más destructiva, especialmente con la componente dominante de la señal. Mientras que, en el caso de no tener línea de vista en el enlace, el canal ya se ve afectado por el efecto de las multitrayectorias, por lo que, el incorporar gente en el enlace puede permitir que la señal se interfiera constructivamente, ya que en estos casos la señal recibida está compuesta de varias contribuciones difusas.

Para poder apreciar e interpretar de forma más concreta cada uno de los casos, se muestran diferentes tablas que contienen los casos anteriormente mencionados, con los umbrales respectivos. La Tabla 5-1 presenta los resultados obtenidos para una probabilidad acumulada de ocurrencia del 10%, 50% y 90%, o sea, si nos posicionamos en el porcentaje para un 10%, nuestros valores de duración de desvanecimiento serán menores o igual a la abscisa correspondiente. Además, podemos notar que se muestran cada uno los tipos de tráfico que son alto y bajo y, a su vez se muestra si ellos están en LOS o NLOS. Se separan los resultados obtenidos en cada uno de los umbrales y con sus respectivas duraciones.

Tabla 5-1: Duración de los desvanecimientos para el 10%, 50% y 90% de los casos.

Tipo de Tráfico	LOS o NLOS	Umbral de 6 [dB]			Umbral de 9 [dB]			Umbral de 12 [dB]		
		Duración[ms]			Duración[ms]			Duración[ms]		
		10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%
Bajo	LOS	1,4	4,2	41,1	1,4	6,6	79	1,4	8,1	80
Bajo	NLOS	1,4	2,8	10,9	1,4	2,7	9,8	1,4	2,6	8
Alto	LOS	1,4	6,8	49	1,4	5,5	54	1,4	6,6	45
Alto	NLOS	1,4	2,9	11,2	1,4	2,8	9,5	1,4	2,6	7

Cuando se considera el 10%, para todas las combinaciones posibles tanto para el tráfico, LOS o NLOS, umbrales establecidos, el valor de las duraciones son los mismos: 1,4 [ms]. Dicho resultado está directamente relacionado con la resolución del sistema de medición, donde anteriormente se detalló que su máxima resolución posible es 1,4 [ms], por lo que, existen desvanecimientos cuya duración no hemos sido capaces de cuantificarlos, a pesar de mantener la plataforma de forma fija.

Por otra parte, cuando nos remontamos a un del 50% para todos los casos, empezamos a notar las primeras diferencias de encontrarnos entre LOS y NLOS, donde algunas duraciones de los desvanecimientos LOS con respecto a NLOS son casi el doble, cuando analizamos en los tráficos de alto tráfico. Lo que encontramos en una situación NLOS que contiene mayor presencia de multitrayectorias, nos otorga menores tiempos de desvanecimiento, esto se debe principalmente a que al obstruir un enlace de este tipo no es tan afectado como un caso LOS, ya que su componente dominante es mayor y sus difusas menores, por lo que, al ser NLOS nos proporcionará mejores opciones alternativas al ser obstruida la componente principal o la mejor dirección de máxima potencia.

Cuando observamos nuevamente los casos de bajo tráfico podemos notar una diferencia entre las duraciones, siendo la más notoria cuando estamos bajo un umbral de 12 [dB]. En los casos de alto tráfico esta diferencia es bastante similar siendo en cada uno de los umbrales casi el doble de duración para el caso de tener línea de vista. Si bien, una probabilidad del 50% no es tan representativo todavía, nos permite ir conociendo más detalladamente cada comportamiento y como se empiezan a notar las primeras diferencias entre los casos. Comparando los mismos tipos de casos LOS para alto y bajo tráfico, las duraciones son más similares que comparar los mismos movimientos de personas con un para línea de vista y sin línea de vista. También para el caso de

no línea de vista con alto y bajo tráfico la diferencia es casi nula ambas están en las cercanías de los 3 [ms].

Por último, con una probabilidad del 90% de los casos nos confirma lo anteriormente dilucidado, ya que aumenta esta diferencia entre LOS y NLOS en el enlace inalámbrico. También se nota una gran diferencia entre alto y bajo tráfico al encontrarnos con LOS, claramente se ve mucho más afectado el bajo tráfico con duraciones que llegan entorno de los 80 [ms] para el mayor umbral, lo que nos muestra que los desvanecimientos más duraderos los tendremos en este caso en particular con poca gente y con línea de vista. Respecto de investigaciones anteriores los tiempos encontrados son mucho menores dado a las características de nuestras antenas directivas lo que reduce los efectos de las multitrayectorias.

Las mayores diferencias con respecto a un mismo tipo de tráfico, es cuando nos encontramos analizando el bajo tráfico, puesto que, el hecho de tener LOS es mucho más perjudicial, inclusive se puede notar que para un umbral de 12 [dB], esta diferencia llega a ser 8 veces más grande. Para el mismo umbral. Pero para alto tráfico, la diferencia es menor, pero aun así es grande, llegando a ser 5 veces más duradero el desvanecimiento al estar en línea de vista, que el no estarlo. También podemos notar que para los casos NLOS, la diferencia nuevamente no es tan importante como cuando comparamos los tipos de tráfico. Mientras que para los casos LOS, la diferencia para el 90% es mucho mayor que para un 50%, llegando a ser en algunos umbrales como el de 9 [dB] y 12 [dB], hasta aproximadamente 30 [ms] más tiempo.

## **5.2 Factor K temporal**

El factor K de una distribución Rice es la relación entre la componente dominante y sus componentes difusas. Conociendo ya el comportamiento de los desvanecimientos temporales, los resultados del factor K temporal, ratificará ciertos aspectos del comportamiento del canal con respecto a cada una de las configuraciones y movimientos. Con ambos resultados obtendremos la caracterización del canal inalámbrico y como es su comportamiento en el sistema inalámbrico a 28 [GHz] en entornos interiores. Para obtener los datos del factor K temporal, se realizan una serie de pasos los cuales se detallarán en la sección 4.5.2. Al igual que el parámetro de duración de los desvanecimientos, las mediciones fueron realizadas de forma fija por temas de resolución de la plataforma a 28 [GHz]. Para estimar el factor K se realiza un ajuste Riceano con los datos obtenidos utilizando MoM [39]. La Figura 5-2, se muestra el ajuste empírico de la distribución de la potencia recibida normalizada, para un caso de bajo tráfico sin línea de vista. Se puede notar que presenta un buen ajuste empírico y también se muestra el valor del factor K para esta distribución calculado a través del método dos momentos [39]. Para realizar dicho gráfico debemos normalizar la potencia recibida con el fin de conocer las fluctuaciones de las señales que se producen.

Es por ello, que Figura 5-2, nos permite comprobar la información de la envolvente recibida y analizar la distribución de esta, con el fin de conocer si la distribución Rice se ajusta a nuestros datos empíricos. Las distribuciones en los otros casos no son mostradas, solo se da a conocer la de bajo tráfico sin línea de vista a modo de representación, ya que mostrar para todos los casos no otorga mayor información. Es por esto, que a modo de conocer de manera más precisa se ha

confeccionado una tabla con los diferentes valores de K temporal para cada uno de los casos para la mejor dirección y la segunda mejor dirección.

Por otra parte, la Tabla 5-2, muestra todas las combinaciones posibles de casos para la primera y segunda mejor dirección angular. Para la obtención de estos datos se calculan los 6 factores K obtenidos de las mediciones para un mismo caso y, las que presenten mejor ajuste se promedian para obtener un único valor, aunque generalmente dichos valores son bastante similares, dado que las condiciones de medición eran las mismas.

Los factores obtenidos tienen directa relación con los desvanecimientos temporales del canal por la inclusión de transeúntes en este. Donde podremos notar, que tanto influye la dinámica otorgada por la gente con respecto al tipo de posición que se encuentre la antena transmisora dentro del entorno (LOS o NLOS). Cuando comparamos los tipos de tráfico de personas en el enlace, podemos notar que el factor K temporal para un bajo número de personas es mucho más alto que para una densidad de personas más grande. Estos resultados con respecto al número de personas en el enlace eran de esperarse, puesto que, la gente contribuye a que la componente dominante se vea opacada cada vez que se cruzan por el enlace, realizando desvanecimientos en la señal recibida, aunque en algunos casos pueden contribuir constructivamente en la señal. Por lo que, tener mayor cantidad de gente en el enlace contribuye más negativamente que cuando estamos en un caso de LOS.



Figura 5-2: Ajuste empírico de la envolvente y factor K caso bajo tráfico LOS.

Tabla 5-2: Factores K temporales para la primera y segunda dirección

Tipo de tráfico	NLOS o LOS	Primera dirección	Segunda dirección
		Factor K [dB]	Factor K [dB]
Alto Tráfico	NLOS	7	5
Alto Tráfico	LOS	5	4
Bajo Tráfico	NLOS	10	7
Bajo Tráfico	LOS	12	9

A través de la Tabla 5-2, podemos notar diferentes comportamientos dependiendo del movimiento de los transeúntes o de la presencia o no de la línea de vista entre el receptor y el transmisor. Lo primero que notamos es que para todos los casos los factores K temporales denotan un tipo de distribución Rice que se ajusta bien a los datos empíricos obtenidos tanto para la primera dirección de potencia máxima, como para la segunda dirección, esto es principalmente por las antenas ocupadas y, especialmente por la antena receptora que es altamente directiva, lo que nos ayuda a mitigar efecto de multitrayectorias que harían decaer la distribución de Rice a Rayleigh.

También es de esperarse que la mejor dirección presente mayores factores K, ya que típicamente en enlaces LOS es la línea directa entre Rx/Tx y, por lo cual, la cantidad de componentes difusas que lo componen es menor. Ahora bien, cuando analizamos los tipos de casos LOS o NLOS, podemos notar las mayores diferencias. Si bien, para el caso de bajo tráfico en el enlace la diferencia de factores K no es tan pronunciada, el caso de tener línea de vista es igualmente mayor que el no tenerla. Por lo que, tener un alto tráfico de personas por el enlace afecta mucho más a la componente dominante en el caso LOS, dado que en enlaces de NLOS la señal propagada ya se encuentra tomando diferentes trayectorias y, el paso de personas no influirá tan profundamente como en LOS.

### 5.3 Conmutación de haz

La conmutación de haces es un aspecto que solamente a través de esta plataforma rotatoria o un arreglo de antenas se puede lograr a través de la diversidad angular que nos proporciona el sistema de 28 [GHz]. En los resultados obtenidos anteriormente de la duración de los desvanecimientos y el factor K temporal nos otorgaron ciertos vestigios del comportamiento del canal, pero el uso de técnicas de diversidad de canal nos permitirá optimizar a través de la conmutación de haz la búsqueda de los ángulos de potencia máxima promedio del enlace inalámbrico del sistema.

Algunos aspectos generales son que las mediciones se realizan con la plataforma rotando a 300 [rpm], para así poder aplicar técnicas de diversidad angular, puesto que, al girar en todo el plano azimutal podemos realizar un barrido de potencias recibidas para cada uno de los ángulos, pero teniendo en cuenta el grado de apertura de la antena directiva. Para ello, se aplican dos métodos de optimización, uno a partir de la búsqueda angular de la mejor dirección de potencia máxima promedio basado en las 10 exploraciones anteriores y otro a través de la búsqueda angular de las tres mejores direcciones de potencia máxima promedio basado en las 10 exploraciones anterior, explicados en la sección 4.5.3 y detallado paso a paso en el diagrama Figura 5-6.

La finalidad de los gráficos presentados es dar a conocer el comportamiento de la potencia instantánea y si, típicamente esta potencia se encuentra los mejores ángulos específico del sistema o va conmutando a otros. Para ello se comparan dos gráficos con la misma cantidad de gente, pero en casos diferentes: un caso LOS y otro NLOS.

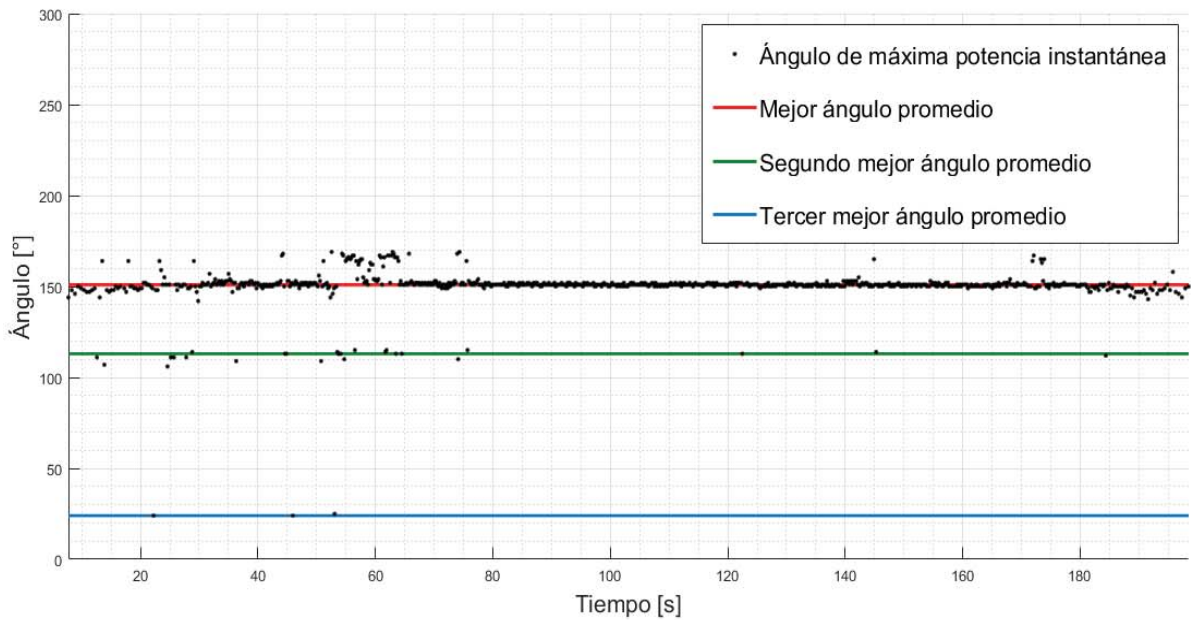


Figura 5-3: Dinámica angular caso bajo tráfico LOS.



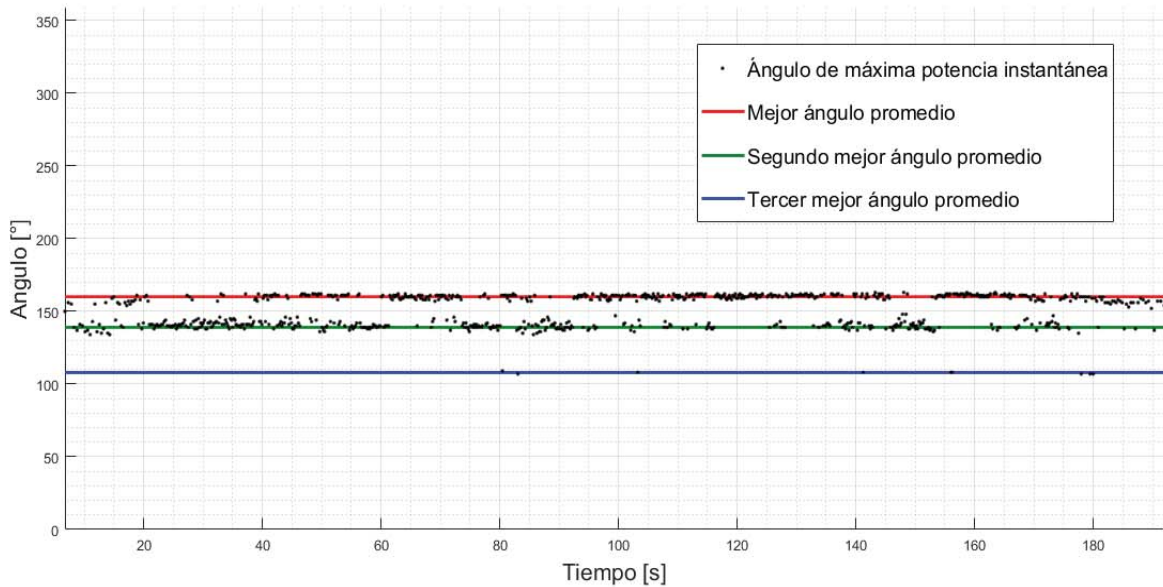


Figura 5-4: Dinámica angular caso bajo tráfico NLOS.

Para obtener los gráficos de la Figura 5-3 y Figura 5-4, se toman las mediciones realizadas con la plataforma girando, pero para generar estos gráficos se tomaron una medición para un solo caso y una posición de recepción, que en este caso como se puede que su duración en el eje del tiempo es de un poco más de 180 [s] o 3 [min]. Una vez obtenidos los datos, se buscan los tres mejores ángulos de potencia promedio en toda la medición y se compara con el máximo instantáneo de cada una de las vueltas. En la Figura 5-3, podemos un caso de bajo tráfico LOS y, como se distribuye la potencia angularmente. Por otra parte, en la Figura 5-4, se muestra un caso de bajo tráfico NLOS.

En la gráfica de la Figura 5-3, podemos notar una gran predominancia del mejor ángulo de potencia máxima instantánea sobre el mejor ángulo, ya que típicamente en este tipo de configuración LOS con poco tráfico, el mejor ángulo es varios decibeles más grandes que la segunda mejor dirección angular de potencia y, solo en algunos casos donde la señal se ve abruptamente obstruida, la potencia máxima instantánea caerá sobre la segunda mejor dirección, como se pueden notar un par de puntos sobre la línea verde y muy pocos en la línea azul. Esto comprueba que el método de una dirección podría optimizar el rendimiento de adquisición del sistema acotándonos a una sola dirección de potencia recibida. Se pueden notar ciertas diferencias entre la Figura 5-3 y la Figura 5-4, dado que son diferentes casos. Mientras que el caso de línea de vista presenta una gran predominancia en un solo mejor ángulo, cuando estamos en el caso de no línea de vista el segundo mejor ángulo pareciera ser tan prometedor como el mejor ángulo, así no tanto como el tercero, aunque igualmente presenta ciertos máximos instantáneos.

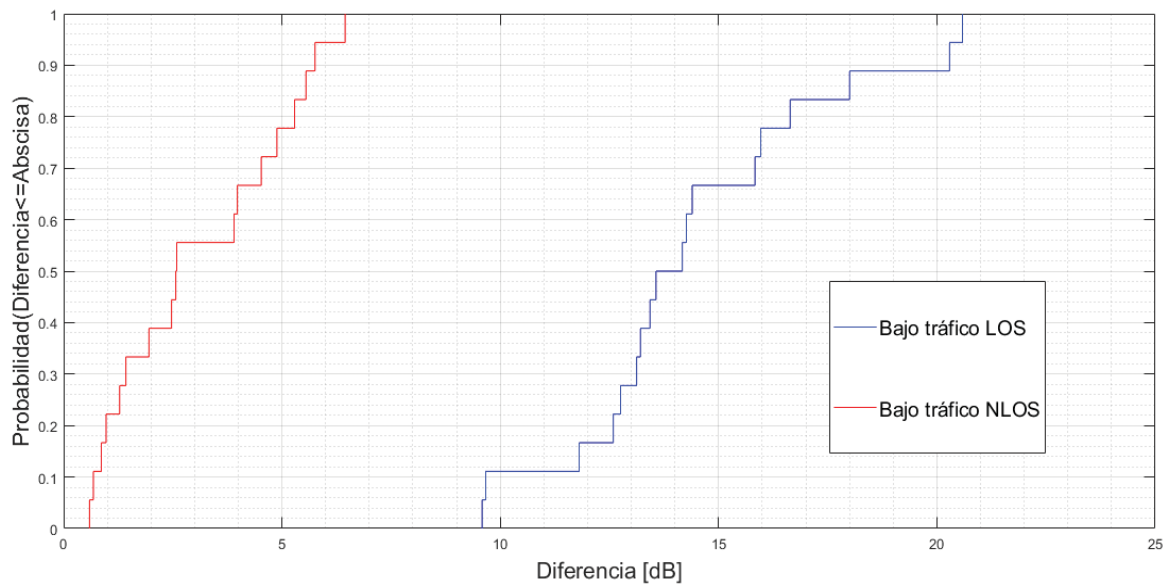


Figura 5-5: Diferencia de potencia entre el primer y el segundo mejor ángulo de máxima potencia promedio.

Podemos notar que las mayores diferencias se dan en casos LOS, donde para un 90% de los casos la diferencia es menor o igual a 21 [dB], confirmando la predominancia del mejor ángulo que se dilucidaba en la Figura 5-3, donde la potencia instantánea casi no se movió del mejor ángulo. Por otra parte, cuando nos enfocamos en el caso NLOS, las diferencias son mucho menores, ya que tomando un 90% de los casos las diferencias son menores a 6 [dB], donde claramente la segunda mejor dirección otorgara una alternativa para conmutar a ella, mientras se sufra un desvanecimiento en la primera dirección. La Figura 5-5, se muestra la diferencia entre el primer y el segundo ángulo donde se encontraron las máximas potencias promedio de las mediciones. Para ello, se toma la muestra completa de la medición y se obtienen los ángulos donde se encontraron las mayores potencias máximas en promedio en todo el tiempo y se compararon a través de una CDF, para su análisis estadístico.

Teniendo en cuenta los casos anteriores, que se implementaran técnicas de optimización basados en la diversidad angular del sistema, aplicando conmutación de haz con respecto a los ángulos de arribo de la señal, estos métodos son:

- Método 1: La mejor dirección de potencia media basada en 10 exploraciones anteriores en un intervalo de 2 [s].
- Método 2: Las mejores 3 direcciones de potencia media basada en 10 exploraciones anteriores en un intervalo de 2 [s].

En estos métodos se compara el máximo instantáneo para todos los ángulos de la plataforma obtenidos y como es su comportamiento en el tiempo con respecto al mejor o a los 3 mejores ángulos promedio. El diagrama de la Figura 5-6, se muestra cada uno de los pasos de la implementación de los métodos desde la adquisición de estos hasta su análisis estadístico. Se

explican cada uno de los detalles que se ocuparon para los métodos con respecto al número de vueltas y tiempo.

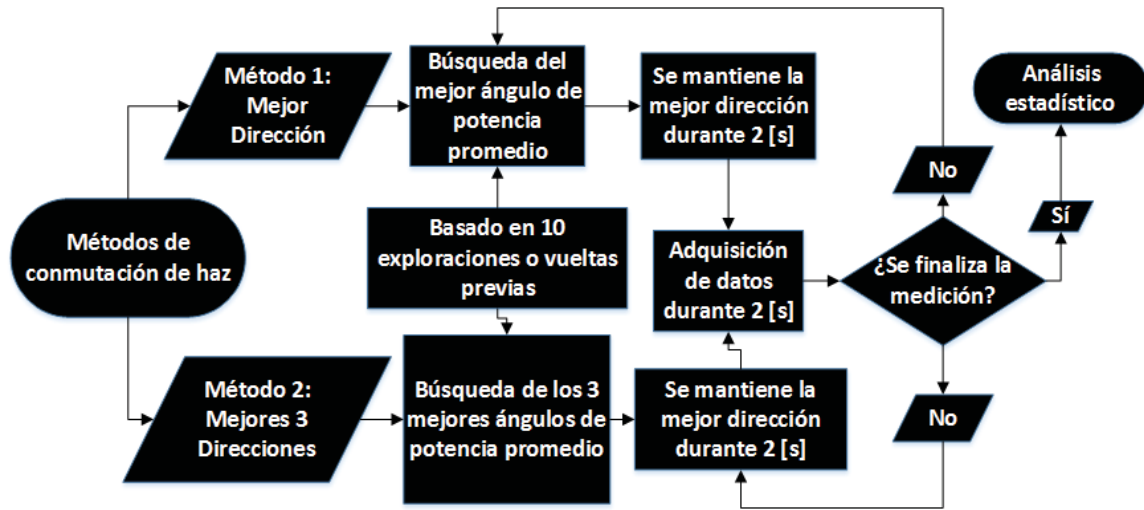


Figura 5-6: Diagrama de bloques de los métodos de conmutación de haz.

Ya con los aspectos de implementación y adquisición a través de ambos métodos, se muestran los gráficos obtenidos para cada uno de los casos. Se muestran gráficos separándolos en 2 casos: alto y bajo tráfico LOS y, alto y bajo tráfico NLOS.

La implementación de los métodos para los casos de línea de vista, se muestran en la Figura 5-7, con alto y bajo tráfico. Este gráfico muestra la diferencia de potencia en decibelios de la implementación de los métodos con respecto a la potencia instantánea de forma acumulada y con las probabilidades respectivas. Las líneas rojas corresponden para un caso de alto tráfico con línea de vista, mientras que las azules corresponden a un caso de bajo tráfico con línea de vista. Por otra parte, las líneas continuas corresponden al método 1, de una sola dirección. Las líneas segmentadas corresponden al segundo método de las 3 mejores direcciones.

El gráfico por temas visuales se muestra en escala logarítmica y limitado a un intervalo para poder observar con mayor detención el porcentaje de 90%, el cual es el más importante a destacar relacionado con el rendimiento de la implementación de los métodos. En el intervalo no se puede apreciar cuando la diferencia es 0 [dB], pero se pueden ver diferencias del 0,001 [dB] donde para el caso de bajo tráfico ronda el 60%, mientras que para alto tráfico son aproximadamente para el 40% de los casos, dichos porcentajes con sus correspondientes diferencias serán muy similares a la diferencia de 0 [dB] fluctuando apenas un poco.

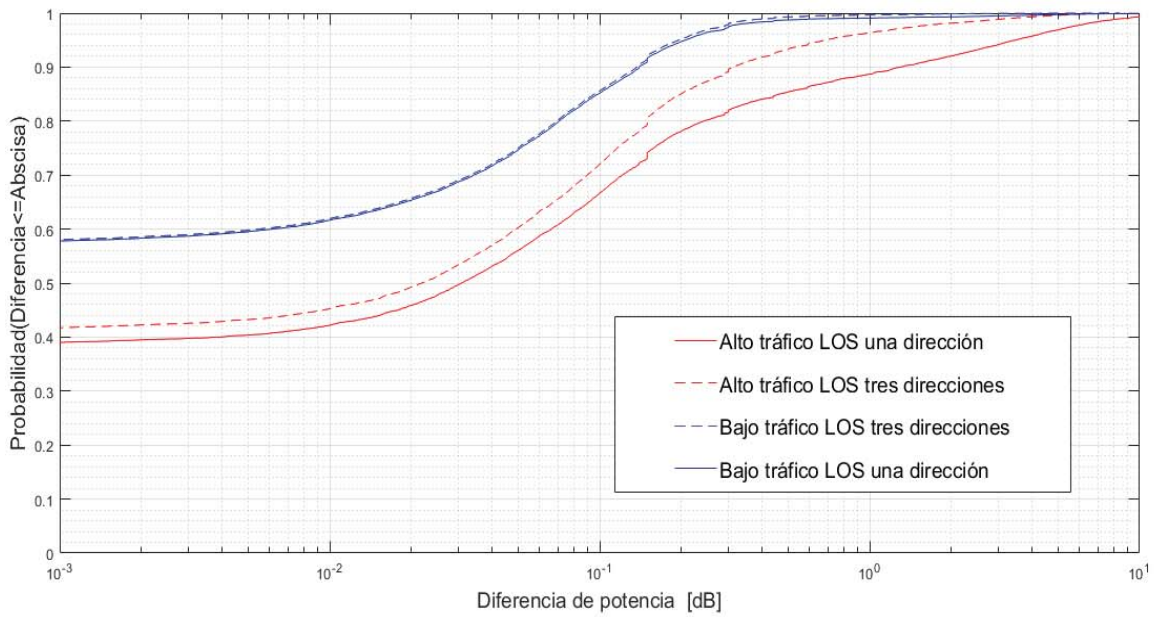


Figura 5-7 : Diferencia de potencia entre las mejores direcciones y el promedio caso alto y bajo tráfico LOS.

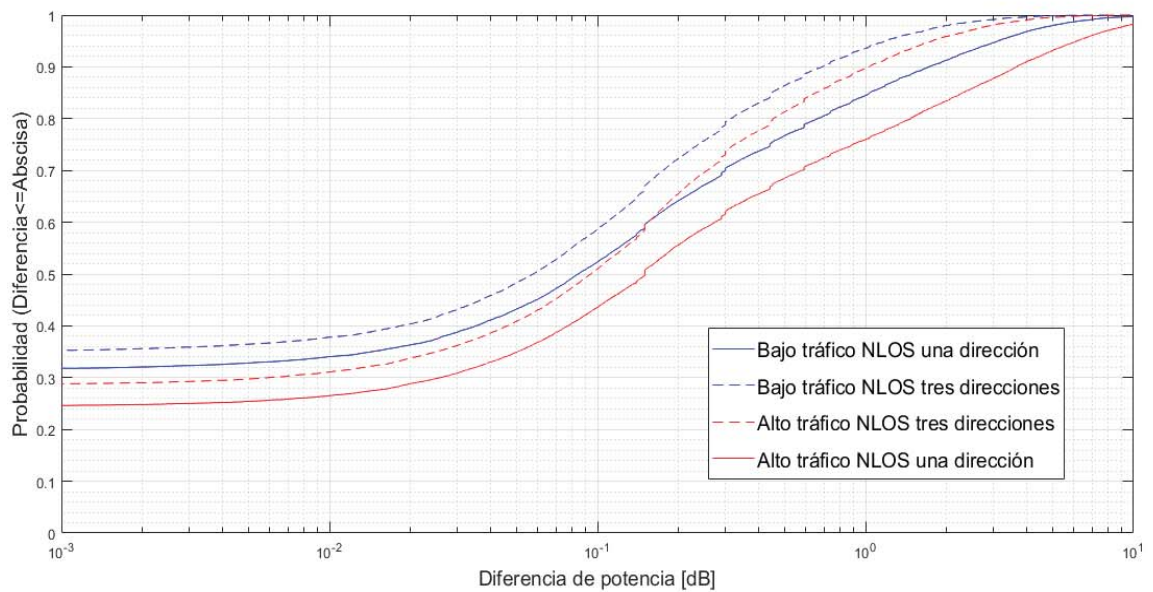


Figura 5-8 : Diferencia de potencia entre las mejores direcciones y el promedio caso alto y bajo tráfico NLOS.

Podemos notar que el rendimiento del uso de los métodos es muy diferente para cada tipo de tráfico de personas. Si bien, cuando nos encontramos en un escenario donde la cantidad de personas es baja y nuestro sistema posee línea de vista la implementación de alguno de los 2 métodos no hará diferencia, dado que ambos presentan un rendimiento casi idéntico, donde para el 90% de los casos esta diferencia no supera los 0,2 [dB] con respecto a la potencia instantánea del sistema.

Por otra parte, cuando en número de transeúntes aumenta en un caso de LOS en el enlace inalámbrico, podemos notar las primeras diferencias en el rendimiento de un método contra el otro. Ocupar el método 2 (tres direcciones) es mejor que ocupar el método 1, aunque la diferencia no es tan significativa. Cuando tomamos el 90% de los casos ocupar el método 1 se obtiene una diferencia de potencia menor a 2 [dB], mientras que para el método 2 la diferencia es menor a 0,3 [dB]. Ahora bien, en la Figura 5-7 se mostraron los casos LOS, mientras que en la Figura 5-8, se muestran los casos de NLOS a para alto y bajo tráfico, referente a la diferencia de potencia de las mejores direcciones con la potencia máxima instantánea. El rendimiento de los métodos para este tipo de configuración es muy diferente que para LOS, ya que cuando la densidad de personas en el enlace era baja y LOS no existía diferencia entre el uso de un método frente al otro. Pero para el caso de NLOS la diferencia es notoria, conviene ocupar el segundo método, ya que posee una diferencia menor. Cuando tomamos el 90% para los casos de bajo tráfico NLOS para el método 1 la diferencia es menor a 2 [dB], mientras que ocupando el método 2 es igual o menor a 0,7 [dB] de diferencia entre las tres mejores direcciones y el instantáneo.

Cuando la densidad de transeúntes es alta, la diferencia es aún mayor entre un método y otro, diferencia muy cercana 3 [dB] entre ocupar uno frente a otro, donde el método 2 nuevamente es mejor que el método 1. Para el 90% de los casos ocupar el método 1 se obtiene una diferencia de potencia menor a 4 [dB], mientras que para el método 2 la diferencia es menor o igual 1 [dB].

Algunos análisis que se desprenden de estos gráficos son que la pérdida de rendimiento no es mayor que 1 [dB] para los casos de línea de vista, mientras que en los casos donde no tenemos LOS incrementa notoriamente donde el método de las tres direcciones obtiene un mejor rendimiento donde para el 90% de los casos la diferencia es menor o igual a 1 [dB]. Para el caso de bajo tráfico los métodos no presentan casi ninguna diferencia es mejor claramente por temas de rendimiento ocupar una sola dirección y mantenernos durante las 10 vueltas siguientes allí. Mientras que en presencia de NLOS claramente es conveniente para un mejor rendimiento ocupar estas tres direcciones, esto es, puesto que una mayor cantidad de multitrayectorias caso típico para enlaces NLOS, existe mejores opciones en cuanto a direcciones angulares de potencia máxima.

## **5.4 Conclusiones del capítulo**

El presente capítulo tiene por destacar los diversos resultados obtenidos para los desvanecimientos temporales y factores K temporales, para posteriormente aplicar los métodos de conmutación de haz dada diversidad angular que posee la plataforma receptora. Los resultados de los parámetros de duración de los desvanecimientos y factor K temporales nos otorgaran los vestigios del comportamiento dinámico del canal.

A modo de conclusión, encontramos el paso de personas en altas o bajas cantidades según la definición otorgada anteriormente con el número específico de gente, no afecta tanto a los desvanecimientos temporales cuando estamos en un caso de no línea de vista (NLOS). Mientras que, en casos de línea de vista, el paso de personas será un factor importante en la obstrucción de la señal y, en especial si pasa en las cercanías de la antena transmisora. Por otra parte, ya en un 50% de los casos se ven las primeras diferencias entre tener o no tener línea de vista. Pero no es hasta ver los datos del 90% donde la diferencia es mucho más clara donde en los casos extremos de bajo tráfico con línea de vista puede llegar a ser los desvanecimientos hasta 8 veces más duraderos que en el caso de bajo tráfico sin línea de vista, donde podemos deducir que encontramos en un caso de línea de vista es mucho más perjudicial cuando estamos inmersos en un canal dinámico que circulan personas. También notar que los desvanecimientos temporales son mucho más largos que los presentados en [31], puesto que, en nuestro caso ocupamos antenas con alta directividad, mientras en su investigación hace uso de antenas omnidireccionales.

Con respecto al factor K, los mayores valores de este están presentes en el mejor ángulo de potencia máxima, mientras que para la segunda mejor dirección los valores de factor K temporales menores. Nuevamente estos valores altos de factor K se atribuyen a las características direccionales de las antenas utilizadas frente a lo que se ha ocupado típicamente en otras investigaciones. También podemos notar que los mayores más altos de factor K se dan típicamente cuando el número de personas caminando por el enlace es bajo, tanto para la primera dirección como para la segunda.

Los resultados de los parámetros dados nos entregan vestigios para los métodos de conmutación de haz implementados para optimizar la búsqueda de los ángulos del sistema. A través del uso de técnicas de diversidad angular podemos notar la predominancia del ángulo potencia instantánea que, para casos de bajo tráfico LOS, se mantienen sobre un ángulo y, para casos de bajo tráfico NLOS conmuta entre en la primera mejor y en la segunda mejor dirección de potencia máxima promedio y, en algunas pocas ocasiones en la tercera mejor dirección. Es por ello, que se muestra la diferencia de potencia entre el mejor y el segundo mejor para LOS y NLOS, donde para 90% de casos de LOS, esta diferencia de potencia es menor o igual a 21 [dB], mientras que para el mismo porcentaje de ocurrencia en NLOS la diferencia es menor o igual a 6 [dB] y, la segunda mejor dirección se presenta como una buena alternativa para realizar la conmutación de haz. Cuando vemos los resultados de conmutación de haz en términos de diferencia de potencia de los métodos utilizados versus la potencia instantánea se hace la diferencia entre LOS y NLOS. Al estar en LOS y bajo tráfico se obtiene el mejor rendimiento del método 1 (de la mejor dirección), mientras que el peor rendimiento es en alto tráfico NLOS. Tomando todos los casos, podemos concluir con certeza que el método 2 de las tres direcciones nos otorga un mejor rendimiento con respecto al instantáneo, donde para el peor caso (alto tráfico NLOS), la diferencia del método utilizado con el instantáneo es menor o igual a 1 [dB].

Finalmente, tomando en cuanto los tres temas presentados existe una estrecha relación, dado que, si analizamos los desvanecimientos temporales que se producen en un caso de bajo tráfico con LOS, podemos notar que los desvanecimientos son mucho más duraderos y, nos otorga

valores de  $K$  temporales mayores dado que este caso presenta una menor cantidad de componentes difusas en el enlace y al pasar gente, atenúa la señal abruptamente y, aunque la señal sea abruptamente atenuada, al realizar la búsqueda rotando la plataforma no se encontrará en la mayoría una mejor dirección para conmutar. Caso contrario para desvanecimientos menores, donde el factor  $K$  también es menor y se presenta un mejor escenario para realizar la conmutación de haz, puesto que existe una mayor cantidad de alternativas de mejores direcciones de potencia recibida, dado que existe una mayor cantidad de multitrayectorias.

## Discusión y Conclusiones

El sistema inalámbrico para 28 [GHz] implica una serie de desafíos, puesto que es una nueva tecnología de las telecomunicaciones. El trabajo presenta nuevos resultados respecto a la banda de 28 [GHz], ya que típicamente dicha frecuencia ha sido ocupada solamente para servicios LMDS en entornos exteriores [45]. Por otra parte, cuando nos remontamos a las estadísticas de desvanecimiento en entornos dinámicos interiores la información que encontramos es a frecuencias ocupadas típicamente en servicios de área local en frecuencias de 2,4 [GHz] o 5 [GHz] típicamente [28] [29] [30] y en ondas milimétricas [31] [34] [35], por lo que, los datos obtenidos marcan nuevos precedentes respecto a la banda propuesta de 28 [GHz].

Para cada uno de los resultados se obtuvieron una gran cantidad de mediciones estadísticas para cada una de las posiciones del entorno físico interior. Para ello, se simuló un servicio inalámbrico de área local donde la estación base estaba a una altura de 2,4 [m]. Por otra parte, el entorno físico que nos encontramos inmerso varía en el tiempo por el paso de gente, si bien en la mayoría de los casos que encontramos los movimientos son controlados, lo que se intentó en la mayoría de los casos es tener casos donde el movimiento de las personas sea de forma natural emulando una situación real de transeúntes que afecten el canal mientras un usuario intenta ocupar el servicio inalámbrico, semejante a lo que se presenta en [5].

Cuando analizamos los desvanecimientos temporales se observó que están en el orden de los milisegundos. Podemos notar que el 90% de las veces la duración de los desvanecimientos es menor a 12 [ms] en los casos NLOS para todos los umbrales y, son menores a 80 [ms] para los casos LOS tomando en cuenta todos los umbrales (6 [dB], 9 [dB] y 12 [dB]), donde los mayores tiempos de duración de desvanecimientos se da en el caso de baja densidad de personas en el enlace para un caso de línea de vista, donde podemos deducir que el paso gente afecta más a las configuraciones con línea de vista que sin ella, puesto que, en casos sin línea de vista la señal recibida, ya se encuentra afectada por multitrayectorias, por lo que, no afectara tanto a una situación que ya se encontraba afectado por diverso de efectos de reflexión, dispersión, absorción, entre otro. Otro aspecto importante de mencionar con respecto a los desvanecimientos temporales es que existen casos donde no hemos sido capaces de muestrear por temas de la resolución del sistema, típicamente para valores menores o iguales a 1,4 [ms]. Por lo cual, intentar medir con la plataforma girando tanto para los desvanecimientos temporales como para el factor K temporal resulta imposible, ya que la señal fluctúa muy rápidamente en el tiempo.



Los factores K obtenidos en todos los casos de tráfico y otras configuraciones son calculadas a través del método de dos momentos [39]. Los factores K obtenidos para todos los casos son altos, aunque en casos de NLOS se explican nuevamente a través del uso de las antenas directivas utilizadas. Por otra parte, cuando diferenciamos entre el tipo de movimiento, encontramos factores más altos en los casos de bajo tráfico de personas por el enlace, puesto que, generalmente los casos de NLOS se atribuyen a un tipo de distribución Rayleigh, pero por las características de nuestra plataforma en casos de NLOS y con alto tráfico, aun obtenemos factores K altos, en superiores a 5 [dB] para la primera y la segunda mejor dirección de potencia máxima promedio.

Cabe mencionar, que la mayor diferencia del trabajo realizado es la forma de adquisición, la cual, a través de una antena altamente directiva, montada sobre una plataforma giratoria que obtiene la envolvente en todo el plano azimutal, podemos aplicar técnicas de diversidad angular.

Los resultados de conmutación de haz, se muestra los métodos de los mejores ángulos de potencia máxima promedio versus la potencia instantánea, pero analizando de forma particular los casos de LOS y NLOS, por los resultados obtenidos de los parámetros anteriores. Al analizar la comparación entre los mejores ángulos de potencia máxima promedio y el instantáneo, notamos que existe una predominancia en el mejor ángulo para casos LOS, mientras que para casos NLOS existe la potencia instantánea conmuta entre el mejor y el segundo mejor.

Realizando una comparación a través de la diferencia de potencia entre la mejor dirección y la segunda mejor, podemos notar el hecho de porque existe esta conmutación en casos de NLOS. Generalmente en casos LOS notamos una diferencia importante decibeles entre una dirección y otra bordeando los 21 [dB] para el 90% de los casos, mientras que para casos NLOS, esta diferencia es menor a 6 [dB], nuevamente para el 90% de los casos. Cuando nos remontamos al análisis de los métodos propuestos, podemos notar que para un bajo tráfico de personas en un enlace de LOS ocupar un método u otro no presenta casi ninguna diferencia y, la diferencia de potencia es muy baja, menor al 0,2 [dB]. Ahora bien, cuando el tráfico de personas sube podemos ocupar el método 2, se obtiene un mejor rendimiento, pero no logra a ser tan significativo, donde en ambos métodos en alto tráfico LOS no supera la diferencia de 2 [dB]. Cuando analizamos los datos obtenidos de la conmutación de haz para casos de NLOS la diferencia de ocupar un método sobre otro es mucho más notorio, donde los mejores rendimientos se darán al ocupar el método de las 3 mejores direcciones. Para el caso de bajo tráfico la diferencia en decibeles entre ocupar un método frente a otro es aproximadamente de 1 [dB]. Mientras que, para un caso de alto tráfico NLOS, es donde encontramos las mayores diferencias de potencia y, también encontramos las mayores diferencias de ocupar un método frente a otro, donde al ocupar el método de las tres direcciones podemos ganar 3 [dB] con respecto el método de una sola dirección.

Finalmente, los métodos ocupados para la conmutación de haz, podemos decir que la conmutación es más efectiva en NLOS, por la cantidad de multitrayectorias y existencia de mayores componentes difusos para este caso. Para el caso de LOS no es más de 1 [dB], por lo que conmutar o calcular constantemente la mejor dirección no presenta una gran ventaja. Por lo cual, utilizar el método de las tres direcciones es mejor que ocupar solo una.

### Trabajos futuros

Un aspecto importante que se podría realizar a futuro, para corroborar el trabajo realizado, es realizar las mismas mediciones estadísticas de desvanecimientos temporales a 28 [GHz] en entornos interiores dinámicos diferentes, pero intentando replicar los movimientos naturales de los transeúntes. Por otra parte, también dichas mediciones y estadísticas se podrían realizar en entornos exteriores donde típicamente se puedan utilizar servicios inalámbricos de área local como parques, centros comerciales, aeropuertos, patios de universidades, entre otros.

# Bibliografía

- [1] J. M. H. Rábanos, Transmisión por radio, Centro de estudios Ramón Areces, 2006.
- [2] G. Brown, «Exploring the Potential of mmWave for 5G Mobile Access,» *Heavy Reading*, 2016.
- [3] J. Wannstrom, «LTE-Advance,» Junio 2013. [En línea]. Available: [www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced](http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced).
- [4] R. W. Heath, Communications, Millimeter Wave Wireless, Prentice Hall, 2014.
- [5] A. Luciano, H. Carrasco y R. Feick, «Effect of pedestrian traffic on fade statistics of fixed wireless link in public spaces,» *IET Communications*, 2011.
- [6] N. D. K. Sharma, «A study of wireless networks: WLANs, WPANs, WMANs, and WWANs with comparison,» *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 5, nº 6, pp. 7810-7813, 2014.
- [7] M. Cheffena, «Time dynamic channel model for broadband fixed wireless access systems,» University of Oslo, Oslo, Noruega, 2005.
- [8] E. R. Danizio, «Caracterización del canal móvil,» Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- [9] I. Ahmed, S. Orfali, T. Khattab y A. Mohamed, «Characterization of the indoor-outdoor radio propagation channel at 2.4 GHz,» de *GCC Conference and Exhibition (GCC)*, Dubai, United Arab Emirates, 2011.
- [10] D. Y. Wang, «5G Channel Model for bands up to 100 GHz,» de *4th International Workshop on 5G/5G+ Communications in Higher Frequency Bands*, Singapur, 2015.

- [11] T. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus y Y. Azar, «Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!», *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335 - 349, 2013.
- [12] A. Goldsmith, *Wireless Communication*, Cambridge University Press.
- [13] L. L. Hurtado, «MODELAMIENTO TEÓRICO Y MODELAMIENTO EMPÍRICO DE PROCESOS, UNA SÍNTESIS», *Scientia et Technica*, vol. 31, pp. 103-108, 2006.
- [14] T. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, Prentice Hall, 2001.
- [15] H. Xia, H. Bertoni, L. Maciel, A. Lindsay-Stewart y R. Rowe, «Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, n° 10, pp. 1439 - 1447, 1993.
- [16] R. V. Akhpashev y A. V. Andreev, «COST 231 Hata adaptation model for urban conditions in LTE networks», de *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2016 17th International Conference of Young Specialists on*, Erlagol, Russia, 2016.
- [17] L. Li, Y. Idbah, Y. Ding, H. Eghbali, S. H. Muhaidat y X. Ma, «Indoor Multi-wall Path Loss Model at 1.93 GHz», de *Military Communications Conference, MILCOM*, San Diego, USA, 2013.
- [18] T. Kim, B. J. Jeong, J. Chung, C.-S. Hwang, J. Ryu, K.-H. Kim y Y. K. Kim, «Beyond 3G: vision, requirements, and enabling technologies», *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, pp. 120-124, 2003.
- [19] O. Franek, G. F. Pedersen y J. B. Andersen, «Numerical modeling of a spherical array of monopoles using FDTD method», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, n° 7, pp. 1952 - 1963, 2006.
- [20] B. Mondal , T. A. Thomas, V. Eugene, W. V. Frederick y A. Ghosh, «3D channel model in 3GPP», *IEEE Communications Magazine* , vol. 53, n° 3, pp. 16 - 23, 2015.
- [21] A. F. Molish, *Wireless Communications*, Wiley, 2011.
- [22] P. Papazian y G. Hufford, «Time variability and depolarization of the local multipoint distribution service radio channel», de *Wireless Communications Conference*, Boulder, USA, 1997.
- [23] H. Xu, T. Rappaport, R. Boyle y J. Schaffner, «Measurements and models for 38-GHz point-to-multipoint radiowave propagation», *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, n° 3, pp. 310 - 321, 2000.

- [24] J.-J. Park, M.-D. Kim y H.-K. Chung, «Characteristics of Ricean K-factor in wideband indoor channels at 3.7 GHz,» de *Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Gold Coast, Australia, 2010.
- [25] S. Mukherjee, S. S. Das, A. Chatterjee y S. Chatterjee, «Analytical Calculation of Rician K-Factor for Indoor Wireless Channel Models,» *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19194 - 19212, 2017.
- [26] A. Siamarou y M. Al-Nuaimi, «Correlation bandwidth and K-factor measurements for indoor wireless radio channels at 62.4 GHz,» de *Antennas and Propagation*, Manchester, UK, 2001.
- [27] E. Zöchmann, M. Lerch, S. Caban, C. Mecklenbräuker y M. Rupp, «Directional evaluation of receive power, Rician K-factor and RMS delay spread obtained from power measurements of 60 GHz indoor channels,» de *Cairns, QLD, Australia*, 2016, Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC).
- [28] F. Villanese, W. Scanlon y N. Evans, «Statistical characteristics of pedestrian-induced fading for a narrowband 2.45 GHz indoor channel,» de *Vehicular Technology Conference*, Boston, MA, USA, 2000.
- [29] E. Walker, H. Zepernick y T. Wysocki, «Fading measurements at 2.4 GHz for the indoor radio propagation channel,» de *Broadband Communications*, Zurich, Switzerland, 1998.
- [30] H. Hashemi, M. McGuire, T. Vlasschaert y D. Tholl, «Measurements and modeling of temporal variations of the indoor radio propagation channel,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, n° 3, pp. 733 - 737, 1994.
- [31] P. Marinier, G. Y. Delisle y C. L. Despins, «Human presence effects on the wireless SHF/EHF channel,» de *Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, Montreal, QC, Canada, 1996.
- [32] . D. Falconer y N. Naz, «Temporal variations characterization for fixed wireless at 29.5 GHz,» de *Vehicular Technology Conference Proceedings*, Tokyo, Japan, 2000.
- [33] M. Carroll y T. Wysocki, «Fading characteristics for indoor wireless channels at 5 GHz unlicensed bands,» de *Mobile Future and Symposium on Trends in Communications*, Bratislava, Slovakia, 2003.
- [34] T. Rappaport, G. MaCartney y S. Ragan, «Rapid Fading Due to human blockage in Pedestrian Crowds at 5G Millimeter-Waves Frequencies,» de *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017.

- [35] A. Anglés-Vázquez, E. Carreño y L. Ahumada, «Modeling the Effect of Pedestrian Traffic in 60-GHz Wireless Links,» *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1927-1931, 2017.
- [36] M. Rodríguez, R. Feick, R. Valenzuela y D. Chizhik, «Achieving Near Maximum Ratio Combining Diversity Gains With Directive Antennas,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, nº 9, pp. 7782 - 7796, 2017.
- [37] C.-D. Iskander y P. T. Mathiopoulos, «Analytical Level Crossing Rates and Average Fade Durations for Diversity Techniques in Nakagami Fading Channels,» *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, nº 8, pp. 1301-1309, 2002.
- [38] X. Dong y N. C. Beaulieu, «Average Level Crossing Rate and Average Fade Duration of Selection Diversity,» *IEEE Communication letters*, vol. 10, nº 5, pp. 396-398, 2001.
- [39] . L. Greenstein, D. Michelson y V. Erceg, «Moment-method estimation of the Ricean K-factor,» *IEEE Communications Letters*, vol. 3, nº 6, pp. 175 - 176, 1999.
- [40] P. W. Raut y S. L. Badjate, «DIVERSITY TECHNIQUES FOR WIRELESS COMMUNICATION,» *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)* , vol. 4, nº 2, pp. 144-160, 2013.
- [41] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, New York: Wiley-Interscience.
- [42] N. Sachdeva y D. Sharma, «Diversity: A Fading Reduction Technique,» *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 2, nº 6, pp. 58-61, 2012.
- [43] L. Guerrero, «Plataforma de mediciones inalámbricas en 28 GHz,» Informe Técnico, Valparaíso.
- [44] A-INFO, «A-INFO,» [En línea]. Available: [www.ainfoinc.com](http://www.ainfoinc.com).
- [45] W. Stallings, *Wireless Communications and Networks*, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [46] J. Salazar, «TechPedia,» [En línea]. Available: [www.techpedia.eu](http://www.techpedia.eu) .
- [47] R. Heath, J. Murdock, R. C. Daniels y T. S. Rappaport, *Millimeter Wave Wireless Communications*, Prentice Hall, 2014.
- [48] S. Y. Seidel y H. Arnold, «Propagation measurements at 28 GHz to investigate the performance of local multipoint distribution service (LMDS),» de *Global Telecommunications Conference*, Singapore, 1995.

# A Programa de adquisición

Este apéndice tiene por objetivo dar a conocer como se adquirieron los datos para este trabajo con respecto al programa de adquisición si el lector estima conveniente, pero también contiene instrucciones para quien quiera utilizarlo a futuro.

## A.1 Configuración previa

Antes de realizar una medición es importante configurar como se realizarán, en la Figura A-0-1, se puede apreciar las diferentes configuraciones que se pueden ocupar. Por un lado, tenemos una sección donde podemos elegir qué tipo de antena podemos elegir, donde al desplegar la ventana tendremos dos:

- Omnidireccional
- Bocina piramidal (directiva)

Y, por otra parte, podremos configurar si queremos que se quede fija en una de estas o bien, que vayan conmutando entre ellas. Es cuando se elige esta última opción cuando se activa la ventana de las opciones de conmutación, donde la conmutación podemos realizarla por intervalos temporales o por vueltas realizadas.

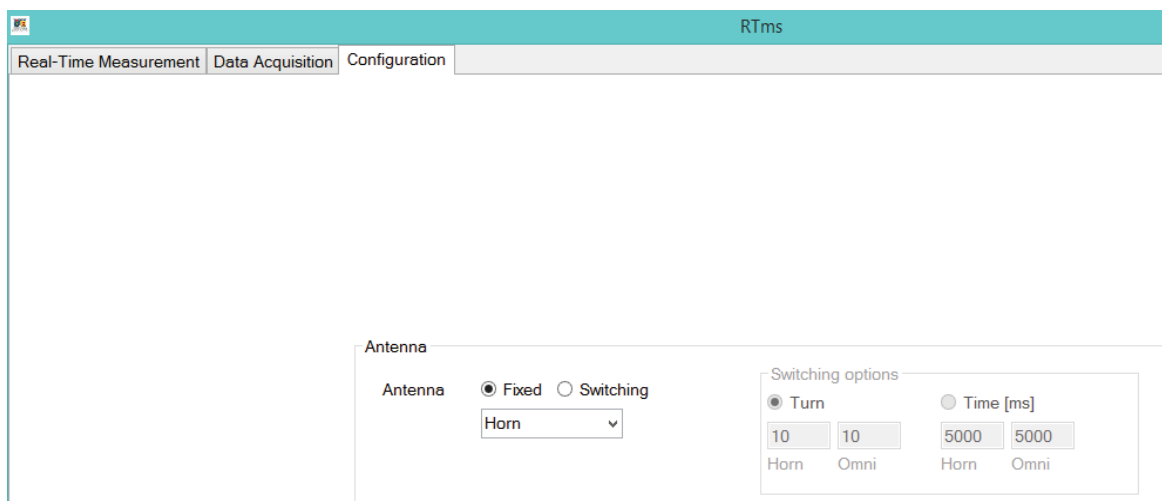


Figura A-0-1: Configuración del programa de medición.

## A.2 Adquisición de datos

Este tópico es muy importante, ya que decide la forma que adquiriremos los datos, los cuales pueden ser de dos formas:

- Wifi
- Ethernet

Como se ve en la Figura A-0-2, para elegir uno de los dos debe seleccionarse la casilla correspondiente, posteriormente se debe dar a *Connect*, una vez que el estado cambie a *Connected*, se puede realizar la medición. Ahora bien, para realizar la adquisición inalámbrica, se debe conectar a un router que está configurado especialmente para este propósito.

Antes de realizar la medición se puede elegir dos formas de controlarla, que corra libremente controlándolo manualmente o bien dándole un tiempo definido y una vez que se cumpla ese tiempo terminara de medir. Por otra parte, también se puede configurar el tiempo de espera antes den que empiece a adquirir una vez que se le de partida, por ejemplo, se pueden dar 30 [s] y una vez que se selecciona el botón de adquisición deberán pasar los 30 [s] antes de que el programa empiece a tomar datos. Por último, también se puede agregar algún nombre específico que se le quiera agregar al archivo que se generará con los datos adquiridos

Real-Time Measurement | Data Acquisition | Configuration

Wifi    Ethernet      Disconnected

Wifi Status  

RPi Date

  N / A  

Time measuring

Free run

Time [s]  

Time to get away

Time [s]  

Customized filename  

Time elapsed   0

Figura A-0-2: Adquisición de datos.



### A.3 Mediciones en tiempo real

Una característica particular del programa es que se pueden realizar adquisiciones en tiempo real; para ello la plataforma debe estar girando y debe estar conectada inalámbricamente. Ahora bien, en tiempo real no genera ningún archivo, solo una visualización en tiempo real de la señal recibida. En la Figura A-0-3 se muestra la pestaña para realizar las mediciones en tiempo real. Para activar este mecanismo de medición en tiempo real se debe seleccionar *Start TCP* y luego *Connect*, donde posteriormente aparecerá la señal en el tiempo e irá refrescándose por cada vuelta que de la plataforma. Se aprecia que se irán dando diversos datos en tiempo real, como es la potencia *peak* y su ángulo. También se mostrará la antena que otorga dicha señal y la velocidad de la plataforma.



Figura A-0-3: Medición en tiempo real.

## B Entorno de medición real

La finalidad de este apéndice es mostrar fotos reales del entorno de medición, las posiciones donde fueron colocada la plataforma de medición y el transmisor dentro del Hall C, por otra parte, se muestran las vistas del entorno con la gente pasando por el enlace y los diferentes elementos que se pueden encontrar en el entorno interior medido.

### B.1 Tipos de movimientos

En la Figura B-1, se muestra una situación típica de movimiento de personas por el enlace, donde se clasifican como bajo tráfico que son aproximadamente 5 personas en movimiento en la primera zona de fresnel, donde la vista es dirección este desde la vista del receptor en altura a 2,3 [m].

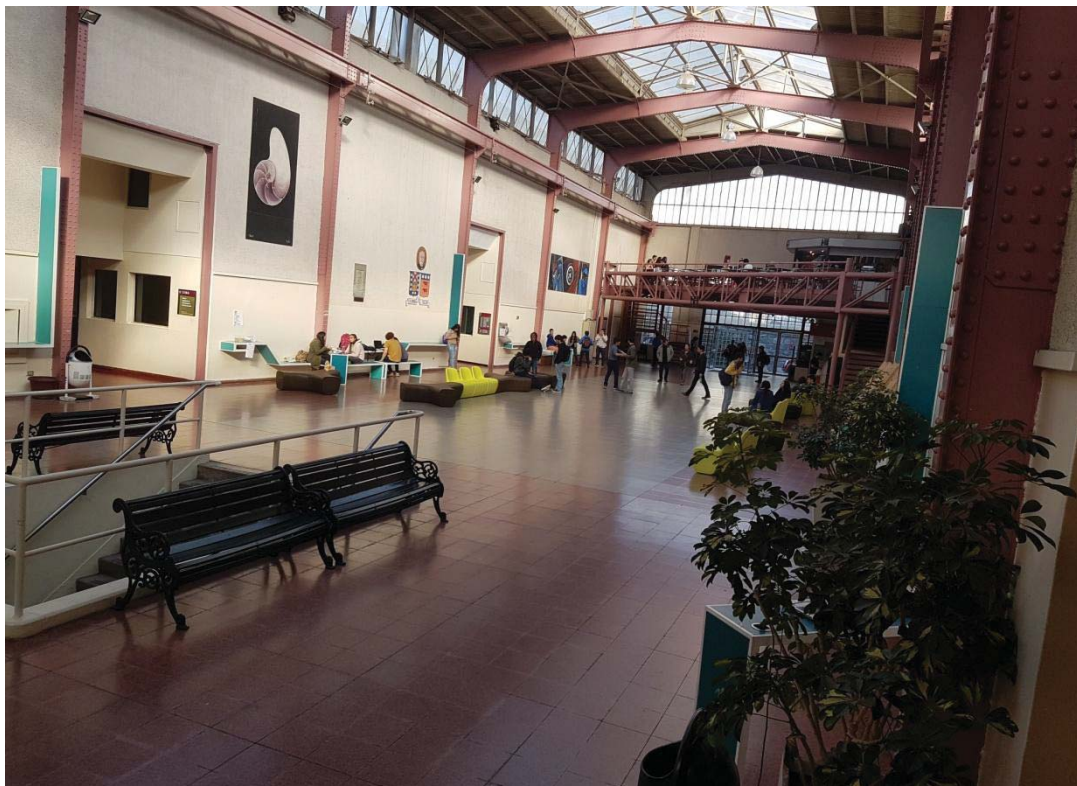


Figura B-1: Bajo tráfico vista desde la plataforma receptora.

La Figura B-2, muestra una situación de alto tráfico donde típicamente existen 15 personas en movimiento en la primera zona de fresnel, nuevamente la vista es dirección este desde la altura del receptor mirando hacia el centro del Hall C.



Figura B-2: Alto tráfico vista desde la plataforma receptora.

## **B.2 Posiciones de transmisión y recepción**

Como se mostró en el capítulo 4, del entorno físico de medición, el receptor y el transmisor se colocó a diferentes alturas a modo de emular un servicio de redes de área local, donde en la Figura B-3, se puede apreciar donde fue colocado la plataforma giratoria arriba de una plataforma de madera a 2,3 [m] emulando una estación base.

La Figura B-4, se muestra el transmisor a 28 [GHz] montado sobre un trípode, en la foto la antena está posicionada en una configuración sin línea de vista, dentro del uno de los pasillos con dirección a las salas del Hall C.



Figura B-3: Posición de la plataforma receptora.



Figura B-4: Posición del transmisor sin línea de vista.