



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Roberto Eusebio Roberts Cruces

Modelado del canal inalámbrico a 28 GHz en entornos interiores

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 19 de abril de 2018



Modelado del canal inalámbrico a 28 GHz en entornos interiores

Roberto Eusebio Roberts Cruces

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

Sr. Mauricio Alejandro Rodríguez Guzmán

Profesor Guía

Sr. Francisco Guillermo Pizarro Torres

Segundo Revisor

Sr. Rodolfo Juan Feick Laudien

Tercer Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 19 de abril de 2018

*Para mi mentor, Eusebio Cruces Jara,
quien me ha acompañado en
todos los momentos de mi vida.*

5 de marzo de 1930 - 30 de julio 2008

*Para mi hijo, Agustín Eusebio Roberts Vega,
quien se convirtió en mi motor y mi razón de ser.*

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia que de alguna u otra manera siempre me apoyaron en cada uno de mis pasos. Les doy las gracias, porque, siempre creyeron en mí incluso en los peores momentos cuando parecía que el sueño se esfumaba.

A los profesores que me acompañaron, ayudaron y aconsejaron, especialmente a mi profesor guía Mauricio Rodríguez, al cual le agradezco enormemente la paciencia y comprensión que tuvo en muchas ocasiones.

A Barbara, quien me acompañó en la etapa más importante de mi vida, a quien le debo más que a nadie en el mundo por darme el regalo más lindo que pudieron haberme dado, mi hijo.

A mis compañeros de laboratorio, Piero, Guillermo, Mauricio, Pablo y Alicia con los que pasamos lindos y agradables momentos.

A mi gran amigo José, con quien comencé este gran sueño, un pilar en una ciudad desconocida para mí, él se encargó de darme ánimos y levantarme cuando ya no tenía ganas de avanzar, compartimos penas, historias, anécdotas y vivencias que nunca se olvidaran, por ejemplo, aquella maratón en Sausalito.

A mi gran amigo Patricio, quien estuvo siempre disponible para darme una palabra de aliento y acompañarme en los buenos y malos momentos, compartiendo risas y penas. Creciendo juntos desde hace más de 15 años, siendo un consejero como ninguno. Gracias por estar siempre ahí.

Por último, a toda la gente maravillosa que conocí durante estos años en Valparaíso, gente que pasó de ser conocido a un amigo para toda la vida, Juan Pablo, Unda, Negro, Julio y Ale Pinto, personas con un corazón inmenso.

Valparaíso, 27 de febrero de 2018

R.R.C.

Resumen

Las comunicaciones inalámbricas han tenido un crecimiento explosivo en la demanda de datos móviles. En la actualidad prácticamente todos los dispositivos móviles cuentan con conexión a internet y lo hacen en su mayoría por medio de la red 4G, que es la cuarta generación de red celulares, la cual se encuentra saturada y en la actualidad ha sido incapaz de dar soporte a todas las necesidades que tiene el usuario de hoy en día. Estas necesidades en su mayoría hacen alusión a la velocidad de navegación. Es ahí en donde la nueva red 5G juega un papel relevante, ya que, se implementará en Ondas Milimétricas (OM), lo cual proporcionará un gran aumento en la capacidad debido al gran ancho de banda disponible en este nuevo espectro.

Este trabajo tiene la finalidad de modelar el canal inalámbrico en entornos interiores a 28 GHz, basado en resultados empíricos y en la utilización de antenas directivas de gran ganancia. Siendo esto último de gran interés, debido a que, hasta el momento los estudios realizados son en su mayoría con antenas omnidireccionales y con frecuencias bajo los 6 GHz. Con los resultados empíricos, se realiza un modelo matemático que estime la pérdida de potencia, con la finalidad de predecir el área de cobertura en entornos interiores. Dicha información es útil al momento de tomar decisiones, con miras a, la implementación de un servicio inalámbrico.

Palabras claves: 5G, 28 GHz, modelado del canal, entornos interiores.

Abstract

The wireless communications have experienced an explosive growth in demand for mobile data. Currently all of their mobile devices have Internet connection and they do it mostly through the 4G network, which is the fourth generation of cellular network. The which is saturated and currently has been unable to support all the needs of the user of today. These needs mainly refer to the speed of navigation. This is where the new 5G network plays an important role, since it is implemented in Millimeter Waves (OM), which will provide a large increase in capacity due to the large bandwidth available in this new spectrum.

This work has a function of modeling the wireless channel in indoor environments at 28 GHz, based on empirical results and the use of high-gain directing antennas where the latter is of great interest since, to date the studies carried out are mostly omnidirectional antennas. With the empirical results, a mathematical model is made that allows the loss of power, with the purpose of predicting the coverage area in interior environments. This information is useful when making decisions, with a view to the implementation of a wireless service.

Key words: 5G, 28 GHz, channel modeling, indoor environments.

Índice general

Introducción	1
1 Antecedentes generales	3
1.1 Descripción general del problema	3
1.2 Estado del arte	4
1.2.1 Trabajos relacionados con los temas a tratar	4
1.3 Solución Propuesta en base al estado del arte.....	5
1.4 Objetivos del proyecto.....	5
1.4.1 Objetivos generales	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
2 Marco teórico.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Modelos de propagación en pequeña escala	8
2.2.1 Gran escala	8
2.2.2 Modelos de propagación de pequeña escala	11
2.2.3 Tres mecanismos básicos de propagación.	13
2.3 Parametros relevantes.	13
2.3.1 Path Gain	13
2.3.2 Azimuth Gain	14
3 Mediciones.....	16
3.1 Equipos utilizados	16
3.2 Escenarios y protocolos de Medición	17
3.2.1 Escenario 1 Pasillo-Pasillo	18
3.2.2 Escenario 2 Pasillo-Pasillo con quiebre.....	18
3.2.3 Escenario 3 Pasillo-Oficina.....	19
4 Resultados	21
4.1 Escenario 1	21
4.1.1 Modelo PG.....	21
4.1.2 Azimuth Gain	23
4.1.3 Dispersión Angular	23
4.2 Escenario 2	24

4.2.1 Modelos PG.....	24
4.2.2 Azimuth Gain.....	29
4.2.3 Dispersión Angular.....	30
4.3 Escenario 3.....	32
4.3.1 Modelos PG.....	32
4.3.2 Azimuth Gain.....	39
4.3.3 Dispersión Angular.....	40
Discusión y conclusiones.....	43
Bibliografía.....	44

Introducción

Para nadie es un misterio la gran expansión y evolución que han tenido las comunicaciones a través de dispositivos móviles. La mayoría de las personas ya consideran que el servicio de voz móvil es una necesidad, y los servicios móviles de voz, datos y video se están convirtiendo rápidamente en una parte integral de la vida de los consumidores y usuarios. El espectro actual de LTE (Long Term Evolution) utiliza frecuencias bajo los 6 [GHz], dicho espectro se está saturando debido a la gran cantidad de equipos conectados a la red, es por lo mismo, que se necesita poner en marcha prontamente la red 5G, que se implementará en la banda de ondas milimétricas (OM), la cual proporcionará una gran capacidad, con velocidades sobre los 20 [Gb/s] [1]-[2]-[3]-[4]. El uso de OM implica un aumento en la frecuencia portadora, esto hace que las condiciones de propagación se conviertan en un tema importante, ya que, las señales de OM, entre otras cosas, no penetran en la mayoría de los materiales sólidos como por ejemplo paredes de ladrillo, hormigón u otros materiales de construcción, convirtiéndose estos en elementos reflectores, los cuales sumados a distintos dispersores pueden interferir en la propagación del frente de ondas entre transmisor (Tx) y receptor (Rx), produciendo el efecto de multi-trayectoria, en donde, dicho frente de ondas puede realizar contribuciones de magnitud y fase variables, presentando como resultado, variaciones en la potencia recibida.

Es importante mencionar el aumento de la pérdida de trayectoria omnidireccional debido al uso de OM. Esta situación puede compensarse a través de la formación de un haz a fin de concentrar la señal y transmitirla de forma directiva. En esto último se basará este trabajo, en la caracterización del canal inalámbrico mediante el uso de antenas directivas implementadas en un sistema angular. Siendo esto último de gran interés, ya que, en comparación a las omnidireccionales, las antenas directivas tienen la capacidad de obtener mayores niveles de potencia en diferentes posiciones angulares, de esta forma, podemos ver entre otras cosas, la dirección del rayo dominante y analizar la presencia de multi-trayectos. Tener esta información, sirve entre otras cosas, para saber la cobertura de servicio inalámbrico en distintos lugares, ya sea, oficinas, pasillos de edificios, universidades, colegios, etc.

Para poder lograr los resultados mencionado anteriormente, se necesita contar con una gran cantidad de datos empíricos, los cuales, se obtendrán tras una campaña de mediciones en el interior de la Universidad Técnica Federico Santa María.

En el capítulo 1 se estudiará el estado del arte con respecto al modelado del canal inalámbrico en entornos interiores. Podemos decir, que en los últimos años ha crecido cada vez más el interés por utilizar antenas directivas y aprovechar sus grandes ganancias para poder obtener mejores niveles de

potencia recibida. Además, el interés crece al tener en cuenta que la red 5G se implementará con antenas directivas.

En el capítulo 2 nos encontramos con el marco teórico, en donde, entraremos en profundidad a abarcar la materia en cuestión. Se analiza la propagación de la señal y se estudian distintas técnicas para poder caracterizar de mejor manera el canal inalámbrico. Además, se definen algunos conceptos esenciales al momento de analizar y estudiar los radio-enlaces.

En el capítulo 3, se presentan los equipos utilizados para realizar las mediciones y los lugares de medición junto a los respectivos protocolos seguidos para llevar a cabo cada una de las mediciones en los distintos escenarios.

Para finalizar, en el capítulo 4 se muestran los resultados finales de este trabajo, que en resumen son tres distintos análisis realizados comenzando con el modelo Path Gain, el cual entregará las pérdidas de propagación en entornos interiores. Luego el modelo estadístico Azimut Gain, el cual entregará las ganancias que se obtendrán al utilizar antenas directivas en distintas condiciones de interior, así como pasillos, oficinas y pasillos con quiebre. Por último, se realizan gráficos de dispersión angular de la potencia recibida.

1 Antecedentes generales

Luego del exponencial aumento año tras año, de la demanda de datos celulares, es que las compañías y grandes empresas ligadas al mundo de las telecomunicaciones han comenzado la búsqueda de mejorar el sistema de comunicaciones móviles, sin embargo, necesitarán rediseñar significativamente dicho sistema, para poder alcanzar el progreso esperado.

1.1 Descripción general del problema

Debido a la notoria tendencia mundial hacia el uso de las tecnologías inalámbricas, en conjunto a la creciente evolución de la telefonía móvil implementada actualmente a través de teléfonos inteligentes y tabletas, es que se ha hecho imperiosa la necesidad de actualizar el sistema de telecomunicaciones, el cual es utilizado por usuarios que pasan la mayor parte del día conectados a la red, por medio de aplicaciones que ocupan cada vez más un mayor ancho de banda.

Hasta hace unos años, las conexiones a la red se realizaban por medio de un computador o un teléfono inteligente, sin embargo, hoy en día junto con la masiva tendencia hacia el internet de las cosas (IoT), ya no es un solo usuario conectado a la red como individuo, sino que, este usuario puede llegar a tener varios equipos conectados a la red de forma simultánea como, por ejemplo, electrodomésticos, juegos, cámaras de vigilancia, relojes inteligentes, etc. De hecho, se prevé que para el año 2020 existirán más de 35 millones de dispositivos conectados a la red y de estos, 25 millones serán objetos o cosas [5]-[6]-[7]-[8]. La situación en Chile no es lejana a esta nueva tendencia, cada vez existen más usuarios con una mayor cantidad de dispositivos conectados a la red. En la Figura 1-1, se ve de forma gráfica el aumento exponencial que han tenido las conexiones móviles desde el año 2010 hasta finales del año 2016. En el gráfico, cada una de las barras representa las conexiones por mes que han tenido en conjunto las redes 2G, 3G y 4G [9].

Cabe destacar que todas las tecnologías mencionadas anteriormente, se implementan con frecuencias bajo los 6 [GHz], además dado el crecimiento exponencial de estas tecnologías es que la porción de espectro electromagnético utilizado se acerca a una inminente saturación. Por lo tanto, la solución es explorar nuevas bandas de frecuencia para la implementación de futuras aplicaciones, con la finalidad de descongestionar la red.

Estas nuevas bandas serán las existentes en el espectro de OM, las cuales han sido investigadas desde hace muchos años, sin embargo, carecen de estudios en torno al modelado del canal inalámbrico

basados en datos empíricos y empleados en entornos interiores. Esto último, debido a que la utilización de este tipo de ondas se encuentra comúnmente asociada a condiciones de exterior-exterior.

Finalmente, el problema radica en que faltan modelos para predecir las pérdidas por propagación de las OM, junto a modelos estadísticos que determinen las ganancias que se pudiesen obtener al utilizar una antena directiva bajo distintas condiciones en entornos interiores como, por ejemplo, a lo largo de pasillos, en el interior de oficinas o en la extensión total de un pasillo con quiebres.

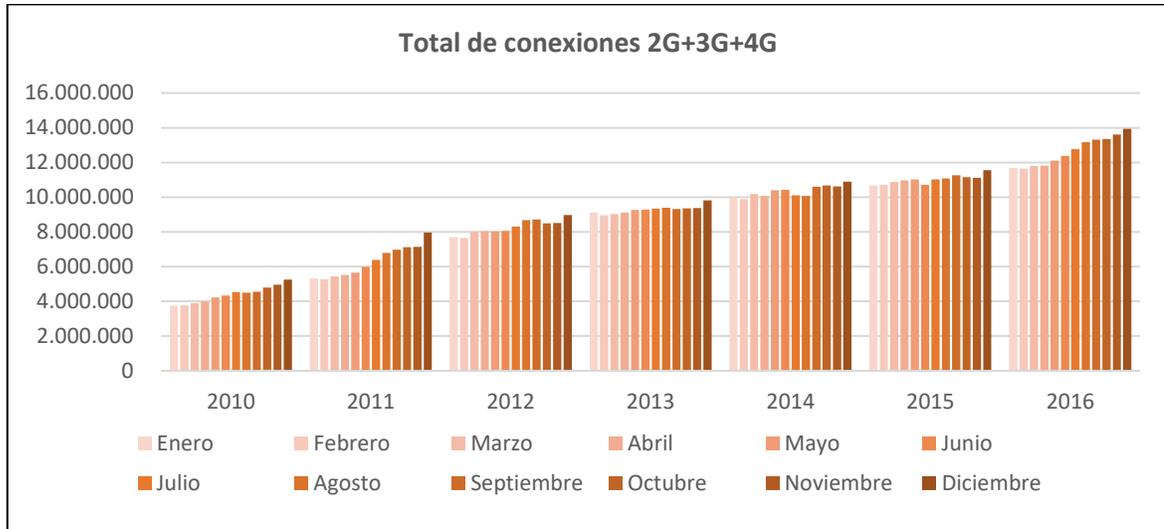


Figura 1-1: Evolución del uso de las conexiones móviles (Fuente: [9])

1.2 Estado del arte

La finalidad de esta sección es dar a conocer trabajos e investigaciones relacionados de forma directa con esta tesis, la cual tiene como finalidad caracterizar el canal inalámbrico a 28 [GHz], en entornos interiores y mediante el uso de antenas directivas. La mayoría de los estudios relacionados con la caracterización del canal inalámbrico se han realizado para condiciones de exterior-exterior, es decir, cuando el transmisor y el receptor se encuentran en el exterior [10]-[11]-[12]-[13]-[14]-[15]. Además de lo anteriormente mencionado, cabe destacar, que la mayor parte de estos estudios se han realizado mediante el uso de antenas omnidireccionales y con frecuencias bajo los 6 [GHz].

1.2.1 Trabajos relacionados con los temas a tratar.

En [16] se presenta un trabajo realizado con una frecuencia de 28 [GHz], en el cual utilizan un par de antenas directivas, una en el equipo transmisor y otra en el receptor, ambas con una apertura de 10° en el plano azimutal. Cuentan con un total de 101 mediciones, las cuales fueron realizadas en distintos escenarios dentro de un mismo edificio, en el hall, en una oficina y a lo largo de un pasillo, lo cual es favorable, ya que, los escenarios tienen distintos elementos en su interior, con lo cual entre otras cosas la señal podría propagarse en distintas direcciones al rebotar en dichos elementos y de esta forma pudiendo producir un nivel mayor de multitrayectoria. Finalmente se compara toda la información y se pueden obtener conclusiones sólidas, las cuales no se podrían lograr con un solo escenario.

En [17] se presenta un trabajo realizado en 28 [GHz], de igual manera que en [16], se utiliza un par de antenas horn con una apertura de 15° en el plano azimutal. Las mediciones las realizaron en una porción acotada del plano, en donde, lo esperable sería realizar un barrido completo del plano en 360°, lo cual permite obtener información en todas las posiciones angulares y de esta forma analizar de mejor manera la multitrayectoria presente en el lugar. Además, se examinó solo un escenario (un salón), en donde lo esperable es que se realizaran mediciones en distintos escenarios, a fin de obtener más información y poder comparar los distintos entornos y de esta forma sacar conclusiones más sólidas sobre el comportamiento de la señal en entornos interiores.

En [18] se presenta un trabajo realizado con 28 y 38 [GHz] muy similar a [19]. A diferencia de los trabajos anteriores, se utiliza un par de antenas omnidireccionales, tanto en el equipo receptor como en el transmisor, lo cual es contrario a la tendencia que están adoptando los investigadores de utilizar antenas directivas, esto debido a las grandes pérdidas por propagación que presentan las OM. Las mediciones, al igual que en [17] se realizan en un solo escenario, una oficina con abundantes cubículos en su interior. Finalmente estiman Path Loss y compara los resultados obtenidos de una frecuencia y la otra.

En [20] se presenta un trabajo realizado en 28 [GHz] en un entorno de interior, más específicamente dentro de un laboratorio. Se utilizaron dos antenas horn, una para el equipo Tx y otra para el equipo Rx, contando ambas antenas con una apertura en el plano azimutal de 20° y 15° respectivamente. Por otro lado, el equipo Rx se montó en un trípode y se rotó en 360° en el plano azimutal adquiriendo datos cada 15° en sentido horario, en donde sería más efectivo tomar muestras en cada grado, a fin de analizar la posible multitrayectoria presente en el lugar debido a los rebotes en los elementos propios del laboratorio. Además, en [20] solo se realizaron mediciones en condiciones de línea de vista.

1.3 Solución Propuesta en base al estado del arte

La solución propuesta será crear un modelo que permita obtener las pérdidas de propagación, basado en datos empíricos obtenidos en campañas de mediciones, las cuales serán llevadas a cabo en entornos que cumplan con la condición de interior como pasillos, oficinas, etc. El modelo será implementado a una frecuencia de 28 [GHz], mediante el uso de un par de antenas directivas de gran ganancia, siendo esto último de gran importancia debido a que se deben compensar las pérdidas por propagación de las OM. Además, se creará un modelo estadístico que sea capaz de determinar las ganancias que se obtendrán al utilizar antenas directivas entornos de interior. Cada antena estará montada en una plataforma, capaz de realizar un barrido angular a lo largo de todo el plano azimutal, de esta forma obteniendo información en cada posición angular.

1.4 Objetivos del proyecto

En esta sección se presentan los objetivos generales y específicos de este proyecto

1.4.1 Objetivos generales

El objetivo principal de este proyecto es caracterizar los sistemas inalámbricos operados a 28 [GHz] en entornos interiores, basado en datos empíricos y utilizando antenas directivas de gran ganancia.

1.4.2 Objetivos específicos

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

2 Marco teórico

2.1 Introducción

Las comunicaciones por radio tienen como principal objeto enviar información procedente de una fuente, para hacerla llegar hasta un destino remoto. El emisor es el ente que se encarga de adecuar la información para que pueda ingresarse al canal de radio, que es el medio radioeléctrico a través del cual la señal transmitida se propaga hasta llegar al receptor, el cual, se encarga de recuperar toda la información y hacerla llegar al destino. El esquema de lo que se acaba de mencionar, se ve en la Figura 2-1. El canal de radio viene acompañado por una serie de efectos indeseados que dificultan la recuperación de la información, como, por ejemplo: ruido, interferencias, distorsión y atenuación.

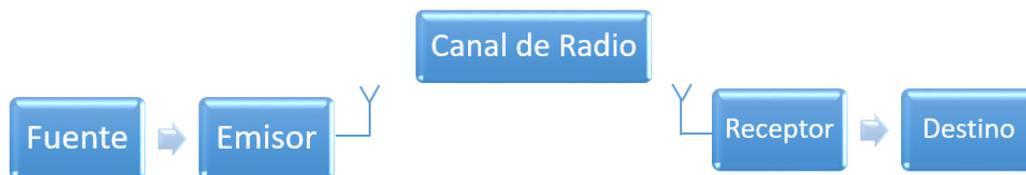


Figura 2-1: Modelo de comunicación por radio (Fuente: Elaboración propia)

El diseño de un sistema de comunicaciones por radio busca que la transferencia de información desde la fuente hacia el destino se realice de la manera más eficiente posible. Claramente esto aplicando las técnicas de ingeniería de radio más apropiadas a las condiciones de la comunicación. Como el medio de transmisión en los sistemas de comunicaciones por radio son las ondas radioeléctricas, es preciso estudiar el comportamiento de los niveles de señal y de los fenómenos que intervienen en la propagación de dichas ondas.

Las ondas radioeléctricas se comportan según el modelo establecido por las leyes de Maxwell [21]. La aplicación de las ecuaciones que describen la teoría electromagnética según estas leyes nos entrega de forma exacta las diferentes magnitudes de interés como: intensidad de campo electromagnético,

potencia recibida, niveles de tensión y niveles de corriente. Sin embargo, requiere conocer exactamente las condiciones de frontera. Esto, no es posible para la mayoría de los escenarios reales en los que se utilizan los sistemas celulares. Por esto, es que se deben buscar formas alternativas para el modelado del canal, que sean sencillas y confiables. Es ahí en donde radica la importancia de los estudios empíricos, los cuales han entregado modelos que describen el comportamiento de las magnitudes necesarias para describir el medio de transmisión y poder aplicar técnicas necesarias para una transmisión fiable de la información [22].

2.2 Modelos de propagación en pequeña escala y gran escala

Los modelos de propagación se han centrado tradicionalmente en predecir la intensidad media de la señal recibida a una distancia determinada del transmisor, así como las variaciones en la intensidad de la señal en la proximidad espacial de un determinado lugar. Estos modelos, se presentarán en las secciones 2.2.1 y 2.2.2.

En la Figura 2-2, se puede apreciar como la señal se desvanece más rápido a medida que el receptor se mueve, pero la señal promedio cambia más gradualmente.

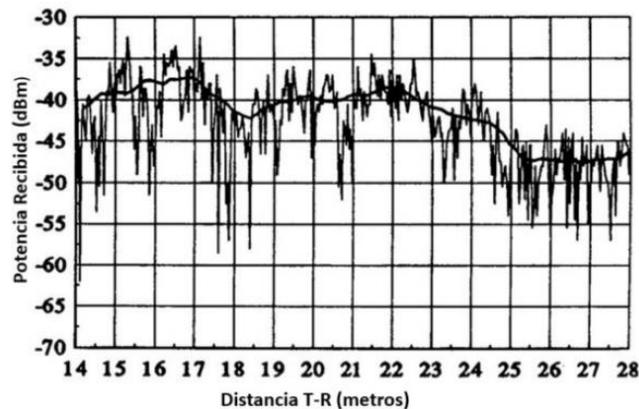


Figura 2-2: Desvanecimiento en pequeña escala y gran escala para sistemas de radio comunicación en interiores. (Fuente: [23])

2.2.1 Gran escala

Los modelos que predicen la intensidad promedio de la señal para estimar el área de cobertura de un transmisor, son llamados modelos de propagación a gran escala, ya que, caracterizan la intensidad de la señal sobre grandes separaciones de distancia entre el transmisor y el receptor, donde dicha distancia es grande en comparación a la longitud de onda (tener en cuenta que para este trabajo se utilizan ondas milimétricas, es decir longitudes de onda de unos cuantos milímetros) [24].

Estos modelos tienen una gran importancia para el desarrollo de este trabajo, el cual tiene entre sus finalidades estudiar y analizar la cobertura inalámbrica de la señal transmitida en entornos interiores.

A continuación, se verán algunos modelos de propagación de gran escala.

Modelo de espacio libre

El modelo de espacio libre, o ecuación de Friis, se utiliza para predecir la intensidad de la potencia recibida cuando la comunicación entre el receptor y el transmisor no está obstruida, o sea, están en línea de vista. En este modelo la potencia recibida está en función de la distancia de separación entre Tx y Rx. Debido a esto, es que la potencia recibida irá disminuyendo a medida que aumenta la distancia, dicha potencia se puede expresar como se ve en la ecuación 2-1.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (2-1)$$

Donde:

- P_t : Potencia transmitida.
- P_r : Potencia recibida.
- G_r : Ganancia de la antena receptora.
- G_t : Ganancia de la antena transmisora.
- λ : Longitud de onda expresada en metros.
- d : Distancia de separación entre Tx y Rx expresada en metros.

La pérdida por trayecto (PL: Path Loss) representa la atenuación de la señal medida como una cantidad positiva, expresada en dB. El PL en espacio libre, cuando se excluye las ganancias de las antenas, asumiendo que tienen ganancia unitaria, se representa por la siguiente expresión [25]:

$$PL(dB) = -20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (2-2)$$

El modelo en espacio libre de Friis, es válido solo en condiciones LOS y para valores de distancia d que estén en un campo lejano a la antena transmisora. Ese campo lejano, se conoce como región de Franunhofer, la cual obedece la siguiente expresión $d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$, donde $d_f \gg \lambda$. Y D es la mayor dimensión lineal de la antena de transmisión [23].

Por otro lado, se puede ver de forma clara desde la ecuación 2-1, que la ecuación no es válida para un valor de distancia $d = 0$. Es por esto, que los modelos a gran escala utilizan un valor de distancia d_0 conocido (usualmente 1 metro) para estimar la potencia recibida. Así, podemos expresar la potencia recibida de la siguiente manera:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right) \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (2-3)$$

Además, teniendo en cuenta que en los sistemas de radio la potencia recibida suele variar su magnitud en un área de cobertura típica de varios kilómetros. Debido al gran rango dinámico de los niveles de P_r , es que, estos mismos niveles suelen expresarse en unidades de dBm o dBW. Por ejemplo, si P_r se expresa en dBm, tendríamos:

$$P_r(d) \text{ dBm} = 10 \log_{10} \left[\frac{P_r(d_0)}{0.001W} \right] + 20 \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right) \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (2-4)$$

Donde $P_r(d_0)$ está expresado en watts.

Modelo Log-distance

Tanto los modelos de propagación teóricos como los que están basados en datos empíricos, concuerdan en que, la potencia recibida sufre un decaimiento logarítmico con la distancia, ya sea, en entornos de exterior o de interior. Además, el promedio de las pérdidas de trayecto en gran escala en separaciones arbitrarias entre Tx y Rx, están expresadas en función de la distancia y de un exponente de pérdida n , tal como muestra la siguiente expresión:

$$\overline{PL}_{dB}(d) = \overline{PL}_{dB}(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right) \quad (2-5)$$

Donde:

- n : Exponente de pérdida el cual indica la razón del incremento de PL con la distancia.
- d_0 : Distancia de referencia, usualmente un metro.
- d : Distancia de separación entre Tx y Rx.
- $\overline{PL}_{dB}(d_0)$: Pérdida de trayecto en espacio libre a una distancia d_0 y expresado en dB.

Notar, que las barras en las ecuaciones 2-5, hacen alusión al promediado espacial de todos los posibles PL en una determinada área espacial.

Por otro lado, se sabe que muchos resultados empíricos tienen concordancia con Friis el cual habla de un decaimiento logarítmico con la distancia y dicho logarítmico es cuadrático. Sin embargo, lo anterior no es el mejor ajuste en muchos de los ambientes reales de propagación

Modelo Log-normal Shadowing

El modelo anterior expresado en la ecuación 2-5, no considera el hecho que el entorno cercano pueda ser muy diferente en dos lugares distintos que tengan la misma separación entre Tx y Rx, lo que puede causar mediciones de señales muy distintas al promedio que entrega la ecuación mencionada (ecuación 2-7). A continuación, en la ecuación 2-6, se presenta el modelo Log normal con shadowing:

$$\overline{P}_{dB}(d) = \overline{P}_{dB}(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right) + X_\sigma \quad (2-6)$$

Donde X_σ , es una variable de distribución Gaussiana con media cero y desviación estándar σ (en dB). Para obtener n y σ , se usa regresión lineal minimizando el error cuadrático medio entre modelo y medición.

La distribución log-normal describe los efectos que produce el sombreado aleatorio que ocurre en una gran cantidad de mediciones, las cuales, tienen las mismas distancias de separación entre Tx y Rx, pero con diferentes caminos de propagación. A este fenómeno, se le conoce como *log-normal shadowing*.

2.2.2 Modelos de propagación de pequeña escala

A medida que un móvil se desplaza a distancias muy pequeñas, la intensidad de la señal recibida puede fluctuar rápidamente dando lugar al desvanecimiento a pequeña escala. La razón de esto es que la señal recibida es una suma de muchas contribuciones procedentes de diferentes direcciones. Dado a que las fases son aleatorias, es que la suma de las contribuciones varía ampliamente, además, estas fases son distribuidas uniformemente en un rango de 0 a 2π . Dicha distribución podrá ser Rice o Rayleigh, esto dependerá de la presencia de las componentes difusas y de la existencia de una posible componente dominante como se puede ver en la Figura 2-3 [26]-[27].

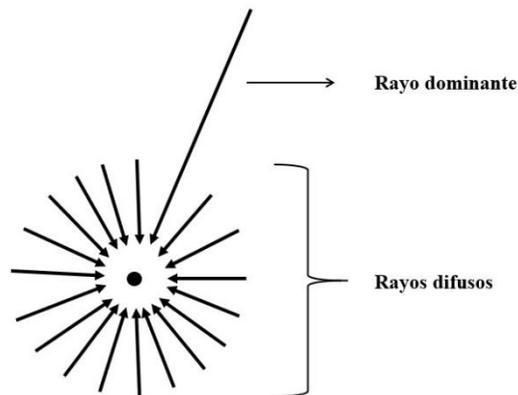


Figura 2-3: Representación espacial del modelo de desvanecimientos Rice. (Fuente: Elaboración propia)

Distribución Rayleigh: Cuando no está presente una componente dominante estacionaria de la señal, el desvanecimiento de la señal a pequeña escala se dice que posee una distribución Rayleigh. La función de densidad de probabilidades (PDF) de la distribución Rayleigh viene dada por la ecuación 2-7 [23]:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0 & (r \leq 0) \end{cases} \quad (2-7)$$

Donde:

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

Distribución Rice: A diferencia de la distribución Rayleigh, aquí si aparece una componente dominante, el desvanecimiento de la señal a pequeña escala se ha modelado por una distribución Rice. En donde la PDF de dicha distribución viene dada por la ecuación 2-8 [23]:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) & (A \geq 0, r \geq 0) \\ 0 & (r \leq 0) \end{cases} \quad (2-8)$$

Donde:

- r : Es el voltaje recibido de la envolvente en los terminales.
- $2\sigma^2$: Es la potencia de los rayos difusos.
- A : Es el parámetro que representa la amplitud peak de la señal dominante en volt.
- I_0 : Es la potencia de los rayos difusos.

En la expresión anterior podemos ver que el parámetro A representa la amplitud de la señal dominante determinística e $I_0(\cdot)$ es la función modificada de Bessel de primer tipo y orden cero.

Factor K: Definido como la relación entre la potencia del frente de onda dominante y la potencia promedio de la suma de todos los componentes dispersos.

Considerando que en este trabajo se utiliza un par de antenas directivas, en donde una de ellas estará girando en 360° (receptor) abarcando todo el plano azimutal, y que la otra antena estará en posición fija (transmisor), se puede hacer el siguiente análisis: Una vez establecido el enlace, si la antena receptora está apuntando en una dirección en donde no se encuentra la componente dominante, entonces la distribución del voltaje recibido será Rayleigh. Por otro lado, cuando el lóbulo de la antena directiva recibe el frente de ondas dominante, se puede decir que la distribución del voltaje recibido será Rice [27].

$$K(dB) = 10 \log\left(\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2-9)$$

Donde:

- A : Es el parámetro que representa la amplitud peak de la señal dominante en volt.
- $2\sigma^2$: Es la potencia de los rayos difusos.

Al analizar la ecuación 2-9, se pueden inferir dos casos extremos:

1. Si A tiende a aumentar en comparación a las componentes difusas, el factor K tiende a aumentar también y la distribución es claramente Rice.
2. Si A tiende a 0, esto implica que el factor K tenderá a menos infinito y pasará de distribuir Rice a distribuir Rayleigh.

2.2.3 Tres mecanismos básicos de propagación.

La potencia recibida es generalmente el parámetro más importante que predicen los modelos de propagación a gran escala, basado en la física de la reflexión, dispersión y difracción. El desvanecimiento a pequeña escala, y la propagación por multi-trayectoria, también pueden ser descrito por estos sistemas físicos, debido a que ante la presencia de estos fenómenos la distribución de la señal puede cambiar a causa del posible aumento de los rayos difusos y desaparición del rayo dominante.

La reflexión, difracción y la dispersión, son mecanismos que impactan en la propagación de los sistemas de comunicaciones móviles a continuación una breve reseña de cada uno obtenido desde [23]-[24].

Reflexión: Ocurre cuando la propagación de ondas electromagnéticas impacta con un objeto que tiene dimensiones muy grandes en comparación con la longitud de onda.

Difracción: Ocurre cuando la trayectoria directa entre el transmisor y el receptor se encuentra obstruida por la superficie de algún objeto. Las ondas secundarias resultante, desde la superficie obstruida, están presentes en todo el espacio incluso detrás del obstáculo dando lugar a una especie de flexión de la onda, alrededor del obstáculo incluso, cuando no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor.

Dispersión: Ocurre cuando el medio, a través del cual viaja la onda consiste en objetos con dimensiones que son pequeñas en comparación con la longitud de onda. La dispersión de las ondas es producida por: superficies rugosas, objetos pequeños y por otras irregularidades en el canal.

2.3 Parametros relevantes.

Además, de todos los parámetros mencionados anteriormente en este capítulo, se utilizarán específicamente dos más, Path Gain, Azimuth Gain. Los cuales, serán de gran utilidad en todo este trabajo, ya que, son los aspectos más importantes al momento de definir el modelo.

2.3.1 Path Gain.

En general, el Path Gain (PG), se puede definir como el PL negativo o inverso obedeciendo a la siguiente expresión:

$$PG = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (2-10)$$

Por lo tanto, asumiendo de igual manera las condiciones en espacio libre y excluyendo las ganancias de las antenas la expresión de PG queda así:

$$PG_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (2-11)$$

donde:

- λ : Longitud de onda expresada en metros.
- d : Distancia de separación entre Tx y Rx expresada en metros.

2.3.2 Azimuth Gain.

Se puede definir el Azimuth Gain (AG) como la relación entre la máxima potencia y el promedio angular obtenidos en una determinada ubicación y se expresa de la siguiente manera [28]:

$$\text{Azimuth gain} = \frac{\max_{\phi} P(\phi)}{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi P(\phi)} \quad (2-12)$$

donde:

- $P(\phi)$: Es la potencia recibida en una posición angular ϕ .

Tras analizar la ecuación 2-13, se puede apreciar que existe una clara similitud entre el AG y el Factor K, ambos relacionan la componente dominante (máxima potencia) y los rayos difusos. Sin embargo, la diferencia es que el AG al realizar el promedio de todas las potencias incluye el rayo dominante, es decir toma todas las muestras de 0 a 2π y las promedia. Por otro lado, el Factor K hace la diferencia entre los rayos difusos y el rayo dominante excluyendo este último del promedio.

Luego, el mejor caso para el AG y el Factor K se dará para condiciones de espacio libre, en donde las componentes difusas serán inexistentes y el valor máximo del AG será la ganancia nominal de la antena, mientras que el Factor K el valor máximo será infinito.

El caso contrario sería un lugar donde exista un alto grado de multitrayectoria, lo que implica que aumenten los rayos difusos y que disminuya el nivel de la componente dominante tendiendo a cero, por consecuencia el Factor K tenderá a menos infinito y el AG a cero.

En la Figura 2-4a, se presenta el mejor caso posible en la realidad, es decir lo obtenido en el interior de una cámara anecoica. En la Figura 2-4b, se presenta el caso contrario, o sea un entorno con un alto nivel de multitrayectoria.

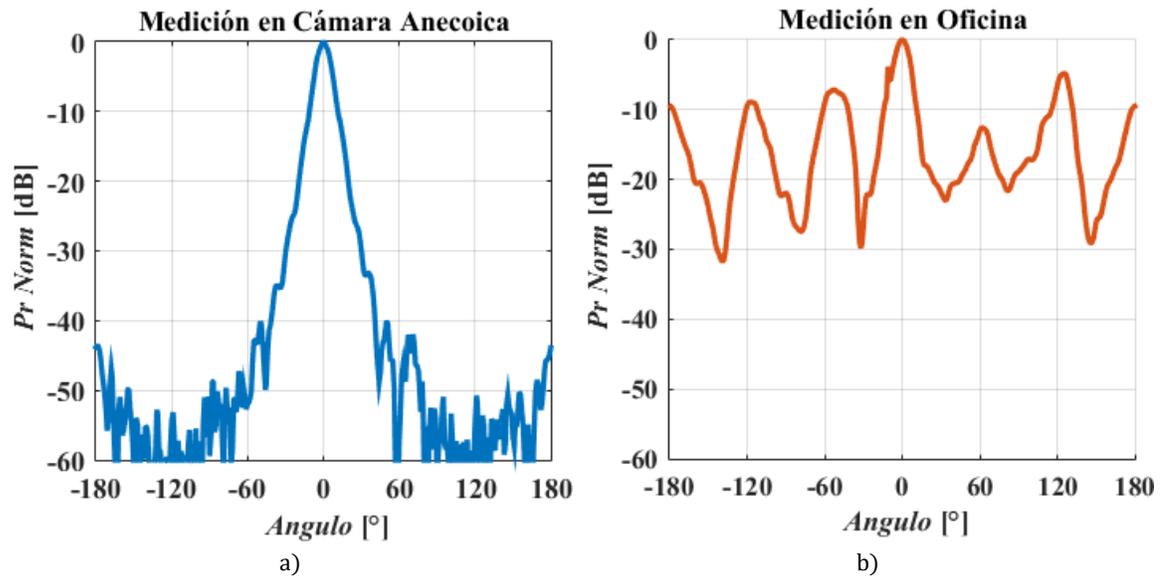


Figura 2-4: (a) Gráfico de dispersión angular obtenido en la cámara anecoica, el cual muestra el mejor caso de AG. (b) Gráfico de dispersión angular obtenido de una medición en el interior de una oficina, en donde disminuye el nivel de AG debido a que las componentes difusas son considerables con respecto a la componente dominante. (Fuente: Elaboración propia).

3 Mediciones

3.1 Equipos utilizados

En esta sección se presentan las dos plataformas utilizadas para realizar las mediciones, detallando brevemente cada una de las antenas que componen estas plataformas.

Primero se presentará el equipo receptor (ERX), el cual está montado en una plataforma giratoria. Este equipo cumple la función de obtener datos empíricos de potencia en cada posición angular del plano azimutal, a fin de obtener los datos necesarios para poder modelar el canal inalámbrico. En esta plataforma se utiliza una antena direccional A-INFO LB-28-25 [29] cuya apertura es de 10° y una ganancia de 25 [dB]. Este equipo se muestra en la Figura 3-1.

Luego se presenta el equipo transmisor (ETX), el cual está montado en una plataforma estática. Este equipo cumple la función de emitir la señal, a través de una antena direccional A-INFO LB-28-10 [30] cuya apertura es de 55° con una ganancia típica de 10 [dB] y una potencia máxima de transmisión de 22 [dBm]. Este equipo se muestra en la Figura 3-2.



a)



b)

Figura 3-1: Fotos reales del equipo receptor montado en la plataforma giratoria: (a) Equipo receptor vista 1, (b) Equipo receptor vista 2.

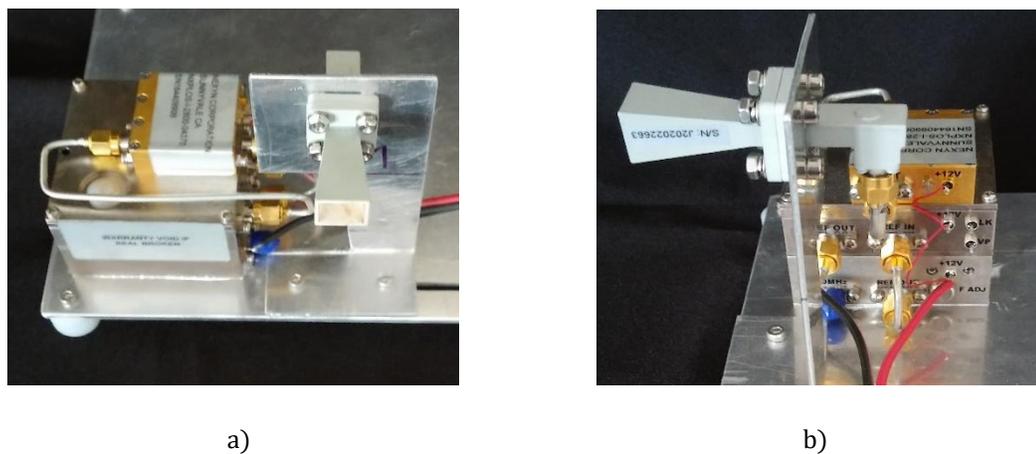


Figura 3-2: Fotos reales del equipo transmisor: (a) Plataforma con el equipo transmisor vista frontal, (b) Plataforma con el equipo transmisor vista lateral.

3.2 Escenarios y protocolos de Medición

Los escenarios de medición se encuentran todos localizados en el tercer nivel del edificio B de la Universidad Santa María. En la Figura 3-3, se muestra un plano de todo el nivel mencionado. En las secciones 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3, se presentan los 3 escenarios principales, en donde, se efectuaron las mediciones.

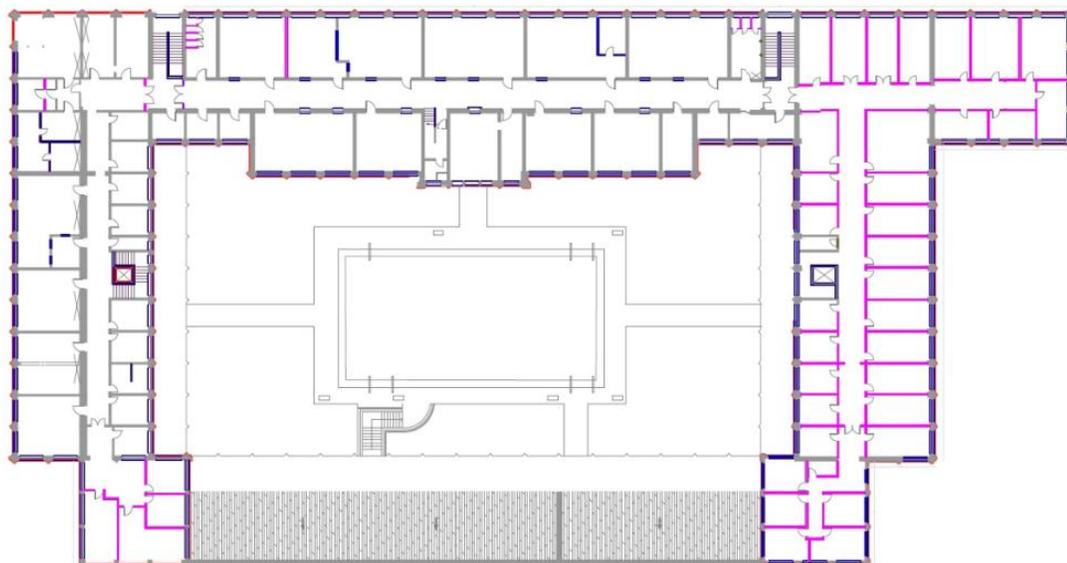


Figura 3-3: Tercer nivel del edificio B de la Universidad Santa María (Fuente: Departamento Arquitectura USM).

Cabe destacar, que la concentración de mediciones se realizó en dos pasillos y tres oficinas. Estos pasillos corresponden al vertical derecho y al pasillo horizontal principal, los cuales se pueden observar en la Figura 3-3 y se especificarán más adelante en las próximas secciones, mientras que las tres oficinas corresponden a la sala de reuniones y los laboratorios Marconi y Bell, los cuales se especificaron en la sección 3.2.3.

3.2.1 Escenario 1 Pasillo-Pasillo

Las mediciones realizadas en este escenario se hicieron todas en condición LOS (Line Of Sight o línea de vista), a lo largo de algunos de los pasillos que se muestran en la Figura 3-3, logrando una distancia máxima de medición de 54 [m]. Estos pasillos tenían un ancho de 2,8 [m], sus paredes estaban construidas de hormigón, tabiquería y puertas de madera, además en algunos sectores había casilleros metálicos a los costados de dichos pasillos.

En este escenario el protocolo de medición fue el siguiente:

Primero se posiciona el ERX en algún lugar determinado, por ejemplo, en caso de que se quiera obtener la potencia recibida a lo largo de un pasillo, lo primero es posicionar uno de los equipos (receptor o transmisor) en un extremo del pasillo, supongamos que dicho equipo será el receptor. Luego se procede a ir alejando el ETX del ERX, registrando niveles de potencia cada cierta distancia. En la Figura 3-4, se observa un ejemplo de medición en

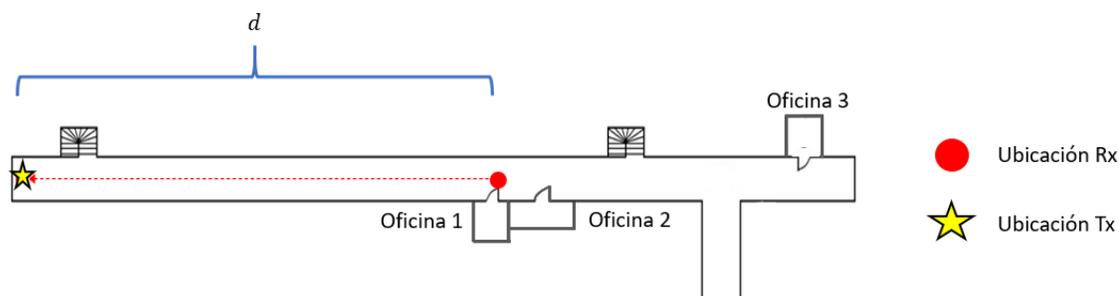


Figura 3-4: Protocolo de medición para el escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).

3.2.2 Escenario 2 Pasillo-Pasillo con quiebre

A diferencia del caso anterior, este tipo de escenario tiene solo una parte de su extensión bajo condición LOS y el resto una vez pasado el quiebre de pasillo, pasan a estar en condición NLOS (Non Line Of Sight o sin línea de vista).

Los protocolos de medición son iguales que en el escenario 1, a diferencia que cuando el operario llega a la intersección de los pasillos, se siguen realizando mediciones. Lo anterior se explica por medio de la Figura 3-5, la cual indica como d_{break} la distancia en la cual el enlace aún se encuentra en condición

LOS. Por otro lado, una vez que llega a la intersección del pasillo, el operario continúa avanzando registrando la distancia notada como d' .

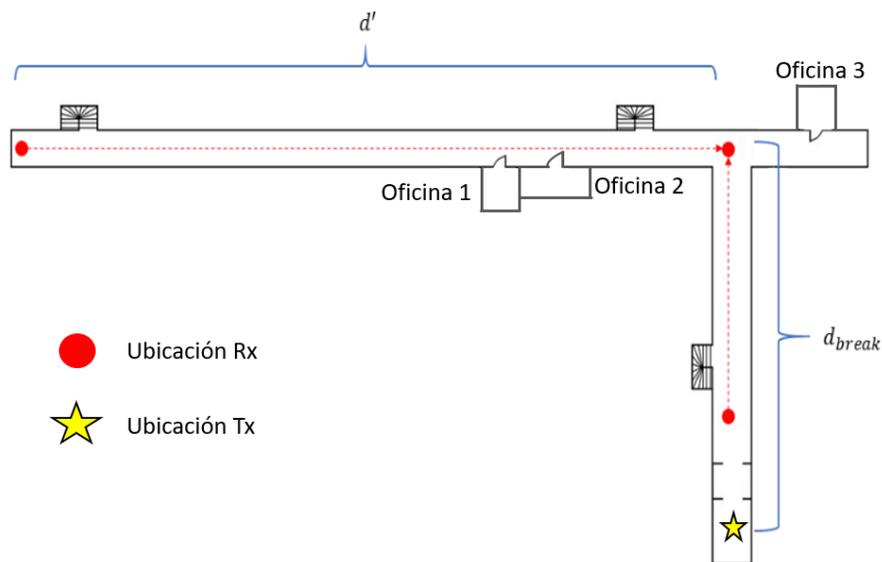


Figura 3-5: Protocolo de medición para el escenario 2 (Fuente: Elaboración propia).

3.2.3 Escenario 3 Pasillo-Oficina

Este caso se asemeja bastante al escenario 2, ya que las distintas oficinas se pueden considerar como pasillos más cortos, de esta manera, utilizando la distancia que existe entre el equipo ubicado en el interior de la oficina y el que se encuentra en el exterior de la oficina, como la distancia de quiebre, o sea, d_{break} como se muestra en las Figuras 3-6 y 3-7.

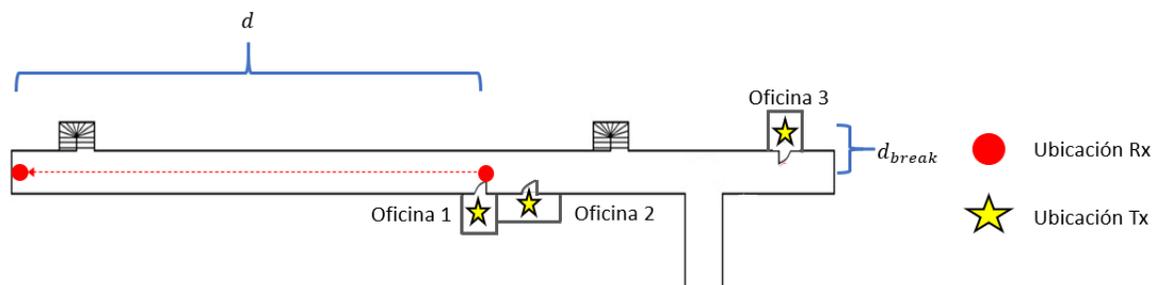


Figura 3-6: Transmisor en el interior de la oficina (Fuente: Elaboración propia).

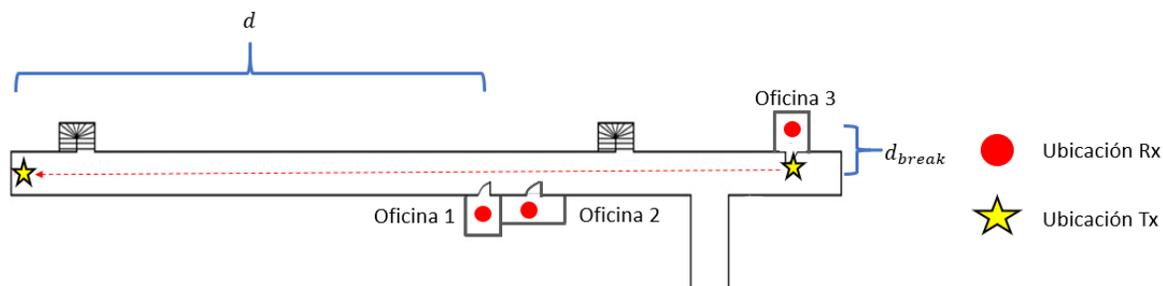


Figura 3-7: Receptor en el interior de la oficina (Fuente: Elaboración propia).

Cabe destacar, que aquí influye bastante cuál de las dos antenas estará en el interior de la oficina. Esto se verá más adelante en la parte de resultados, en donde, se analizará el efecto que causa en la potencia recibida el mantener girando la antena receptora en el interior de la oficina en comparación al caso de mantenerla girando a lo largo del pasillo.

Es importante tener en cuenta que las figuras que se presentan a continuación son solo de referencia y muestran mayor detalle y como se mencionó al comienzo de la sección las oficinas 1, 2 y 3 corresponden al laboratorio Marconi, sala de reuniones y laboratorio Bell respectivamente.

4 Resultados

En este capítulo se presentan los modelos propuestos para predecir PG en los tres escenarios presentados en la sección 3.2. Los resultados serán presentados a través de tablas y gráficos de PG vs distancia. Además, se realizará el análisis estadístico del AG de cada medición, por medio de una CDF y acompañado de gráficos de dispersión angular, los cuales servirán para poder entender de mejor manera cada una de las CDF's y el comportamiento del canal.

4.1 Escenario 1

4.1.1 Modelo PG

A continuación, se presentará el modelo de PG propuesto para el escenario 1 y el cual se expresa por medio de la ecuación 4-1.

$$PG_{dB}(d) = PG1_{dB}(d_0) + 10 n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (4-1)$$

donde:

- d_0 : 1 metro.
- $PG1_{dB}(d_0)$: Pérdidas en espacio libre a 1 metro.
- n : Exponente de pérdidas.
- d : distancia entre Rx y Tx.
- X_{σ} : Variable aleatoria de distribución gaussiana con media cero y desviación estándar σ en [dB].

Como se mencionó en el capítulo 2, Para obtener n y σ , se usa regresión lineal minimizando el error cuadrático medio. En este caso se utilizan tres casos distintos de regresión, con la finalidad de encontrar el mejor ajuste posible para nuestro modelo, los tres casos mencionados se presentan en la tabla 4-1.

Tabla 4-1. Casos de regresión lineal para el escenario 1 (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regression lineal	n	$PG1_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
caso 1 (parámetros libres)	-1,6	-63,6	1,8
caso 2 (intercepto fijo)	-1,7	-61,4	1,9
caso 3 (pendiente fija)	-2,0	-58,1	2,3

donde:

- Caso 1: Se optimizan todos los parámetros del modelo, $PG1_{dB}(d_0)$ y n .
- Caso 2: Se fija $PG1_{dB}(d_0 = 1) = -61,4 [dB]$, y se optimiza n
- Caso 3: Se fija $n = -2$, optimizando con esto solo el intercepto.

En la Figura 4-1, se muestra un gráfico PG vs distancia, en donde se aprecia que el PG disminuye a medida que la distancia aumenta, cabe destacar, que dicha disminución está descrita por el exponente de pérdida o pendiente mostrado en la Tabla 4-1.

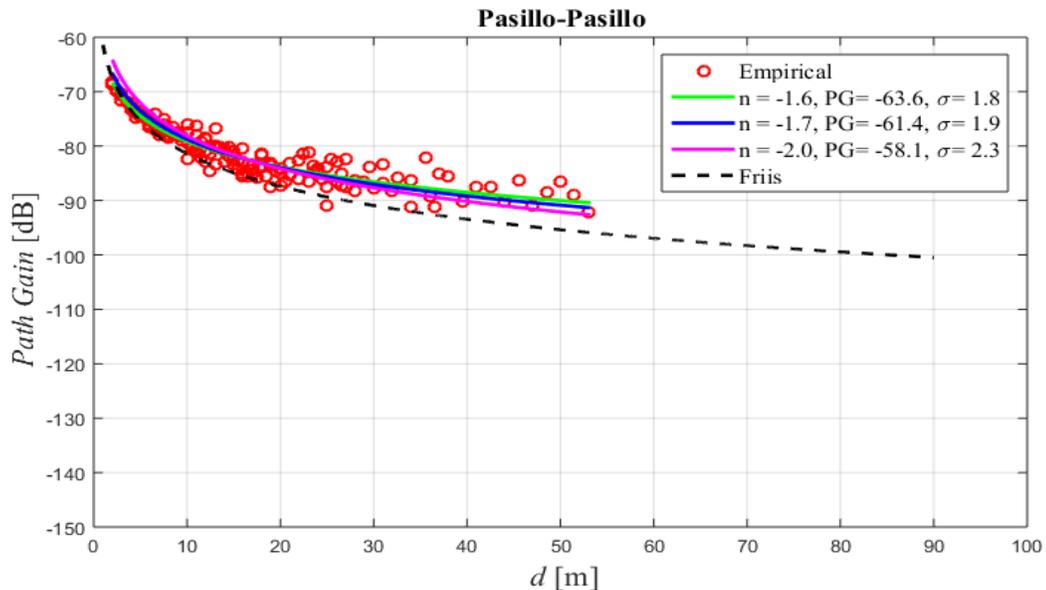


Figura 4-1: Gráfico Path Gain vs distancia del escenario 1 con los tres casos propuestos de regresión lineal (Fuente: Elaboración propia)

De los tres casos empleados se escoge como mejor el caso número 2, ya que, al comparar este con el caso 3, se tiene un nivel menor de error cuadrático medio. Por otro lado, si bien el caso 1 registra un nivel menor de error, no tiene un respaldo físico como el caso 2 y 3, los cuales se basan en la ecuación

de Friis, la cual asegura un cierto nivel de potencia a una determinada distancia cumpliendo la condición de espacio libre.

De igual manera, la dificultad de un modelo se puede estimar según la cantidad de parámetros que tiene a optimizar. En este modelo en particular, el caso 1 contiene dos parámetros que se optimizan por el método de mínimos cuadrados, mientras que el caso 2 y 3 solo contienen un parámetro.

4.1.2 Azimuth Gain

En la Figura 4-2, se presenta la estadística del AG graficada en una CDF. En el gráfico tenemos una línea recta segmentada, la cual representa al valor de AG obtenido en la cámara anecoica, la cual es la condición ideal, por lo tanto, se utiliza dicha línea como referencia, por otro lado, una curva CDF de los datos empíricos. Del gráfico se puede inferir que en el 90% de los datos empíricos se obtendrá un valor mayor a 11,8 [dB]. Y con una degradación del valor ideal usado como referencia (14,5 [dB] medido en la cámara anecoica) de 2,7 [dB].

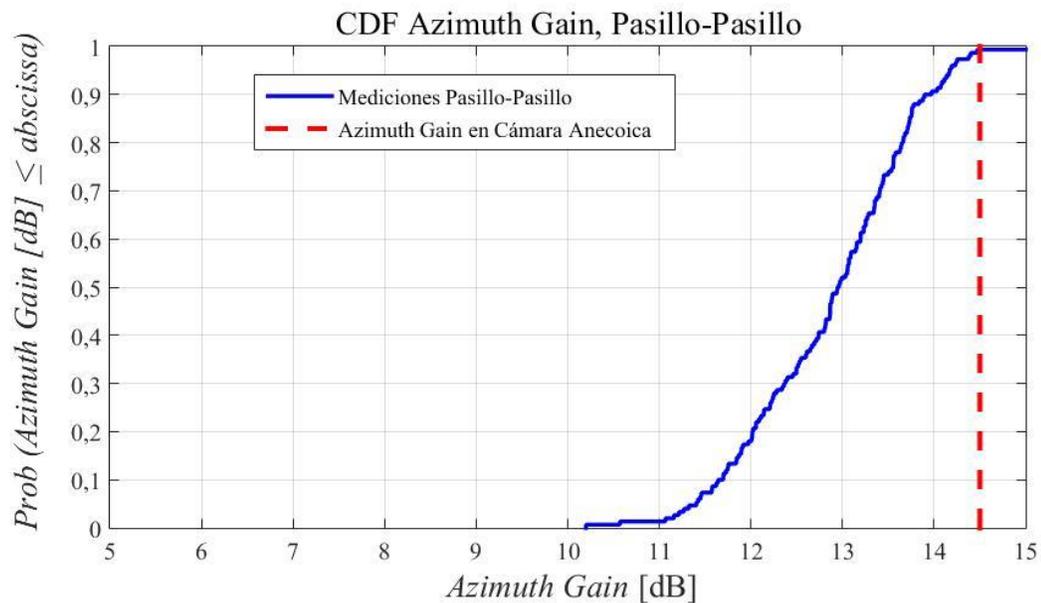


Figura 4-2: CDF del AG para el escenario 1 (Fuente: Elaboración propia)

4.1.3 Dispersión Angular

Con la finalidad de respaldar la información entregada por el AG, es que se presenta la Figura 4-3, la cual muestra un gráfico de dispersión angular de todas las mediciones realizadas en el escenario 1. El gráfico muestra la potencia recibida normalizada en cada una de las posiciones angulares a lo largo de todo el plano azimutal. Cabe destacar, que la potencia se normalizo respecto a la máxima potencia angular. También se destaca el promedio de todas las potencias recibidas normalizadas en cada posición angular, con la finalidad de realizar un análisis más representativo del comportamiento de las señales en cuestión. Además, se agrega la potencia obtenida en el interior de la cámara anecoica, representada con una línea segmentada.

En el gráfico de la Figura 4-3 podemos observar que existen dos grandes componentes dominantes opuestas en 180° . Una de estas componentes (la principal) es la señal que viene de forma directa entre el equipo transmisor y el receptor, o sea, cuando existe línea de vista en el enlace. Mientras que, la segunda componente se atribuye al rebote de la señal con la muralla presente en el final del pasillo.

Por otro lado, al analizar los valores de AG para el escenario 1, se podría pensar que dichos valores deberían ser muy similares a los utilizados como referencia (cámara anecoica), esto, ya que, todas las mediciones realizadas en este escenario son bajo condición LOS. Sin embargo, al ver la Figura 4-2 se puede apreciar que realmente esto no es así. Lo anterior, se puede explicar de forma clara al analizar la Figura 4-3, en donde se compara la dispersión angular del escenario 1 con la obtenida en la cámara anecoica.

La diferencia en el valor del AG visto en la Figura 4-2, radica en el promedio de todas las contribuciones de potencia obtenidas de 0 a 2π (Figura 4-2), tanto de la curva segmentada (Cámara Anecoica), como de la continua (Promedio). Esto, debido a que el AG está directamente relacionado con el promedio de las potencias (ecuación 2-13), mientras mayor es este, menor será el valor del AG y viceversa.

Finalmente, al ver la Figura 4-3, se puede observar que sin lugar a dudas al promediar la curva segmentada se obtendrá un promedio menor al de la curva continua y como consecuencia la segmentada tendrá un valor de AG mayor.

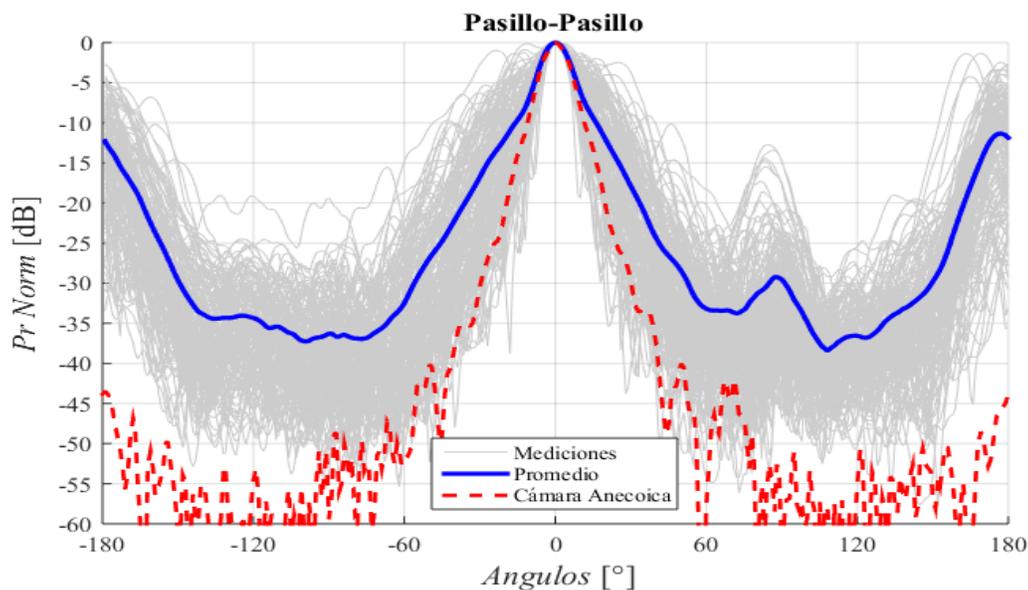


Figura 4-3: Dispersión angular de las mediciones realizadas en el escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).

4.2 Escenario 2

4.2.1 Modelos PG

En esta sección se presentarán tres modelos para calcular Path Gain, además, se realizan los mismos casos de regresión lineal con la finalidad de poder comparar dichos modelos.

Recordar la sección 3.2, en donde muestra que el escenario de medición tiene dos tramos, antes y después del d_{break} , para lo cual el modelo se separa en dos partes.

Modelo 1: El modelo 1 propuesto para el escenario 2 consta de dos tramos. El primero representa a todas las mediciones realizadas en condición LOS, es decir, antes del quiebre de pasillo (d_{break}). Mientras que el segundo tramo, representa a todas las mediciones realizadas en condición NLOS, es decir después del quiebre.

Cada tramo se analiza de forma separada, con sus respectivos exponentes de pérdida y valores de distancia.

$$PG_{dB}(d) = \begin{cases} PG1_{dB}(d_0) + 10 n_1 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, & d \leq d_{break} \\ PG2_{dB}(d_0) + 10 n_2 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, & d > d_{break} \end{cases} \quad (4-2)$$

donde:

- d_0 : 1 metro.
- $PG1_{dB}(d_0)$: Pérdidas en espacio libre a 1 metro.
- $PG2_{dB}(d_0)$: Pérdidas del segundo tramo a 1 metro.
- n_1 y n_2 : Exponentes de perdidas.
- d : distancia entre Rx y Tx.
- d_{break} : distancia antes del quiebre.
- X_σ : Variable aleatoria de distribución gaussiana con media cero y desviación estándar σ en dB.

En este caso se utilizan tres casos distintos de regresión, con la finalidad de encontrar el mejor ajuste posible para nuestro modelo. Dichos casos se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Casos de regresión lineal para el escenario 2 (Fuente: Elaboración propia).

Casos de regresión lineal	n_1	$PG1_{dB}(d_0)$	n_2	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (parámetros libres)	-1,6	-63,4	-4,6	-51,3	3,2
Caso 2 (intercepto fijo)	-1,8	-61,4	-1,8	-99,4	5,0
Caso 3 (pendiente fija)	-2,0	-58,6	-2,0	-95,2	4,8

donde los tres casos son:

- Caso 1: Se optimizan todos los parámetros del modelo, $PG1_{dB}(d_0)$, $PG2_{dB}(d_0)$, n_1 y n_2 .
- Caso 2: Se fija $PG1_{dB}(d_0 = 1) = -61,4$ [dB], y se optimiza n_1 . Luego $n_2 = n_1$, optimizando con esto $PG2_{dB}(d_0)$.
- Caso 3: Se fija $n = -2,0$. Luego $n_2 = n_1$, optimizando con esto ambos interceptos.

Modelo 2: Este modelo a diferencia del modelo 1, tiene un tratamiento distinto para el tramo 2, o sea, todas las mediciones que se realizan después del quiebre ($d > d_{break}$). El tratamiento consiste en realizar un ajuste en la distancia a todo el tramo 2, restándole el valor de d_{break} , esto con la finalidad de trasladar todas las mediciones de potencia vs distancia del tramo en cuestión al mismo eje de referencia que el tramo 1.

$$PG_{dB}(d) = \begin{cases} PG1_{dB}(d_0) + 10 n_1 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, & d \leq d_{break} \\ PG2_{dB}(d_0) + 10 n_2 \log_{10} \left(\frac{d - d_{break}}{d_0} \right) + X_\sigma, & d > d_{break} \end{cases} \quad (4-3)$$

donde:

- d_0 : 1 metro.
- $PG1_{dB}(d_0)$: Pérdidas en espacio libre a 1 metro.
- $PG2_{dB}(d_0)$: Pérdidas del segundo tramo a 1 metro.
- n_1 y n_2 : Exponentes de perdidas.
- d : distancia entre Rx y Tx.
- d_{break} : distancia antes del quiebre.
- X_σ : Variable aleatoria de distribución gaussiana con media cero y desviación estándar σ en dB.

Tabla 4-3. Casos de regresión lineal para el escenario 2 (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regresión lineal	n_1	$PG1_{dB}(d_0)$	n_2	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (parámetros libres)	-1,6	-63,4	-1,7	-107,7	3,0
Caso 2 (intercepto fijo)	-1,8	-61,4	-1,8	-106,9	3,0
Caso 3 (pendiente fija)	-2,0	-58,6	-2,0	-103,5	3,3

Al igual que en el modelo 1, se muestran en la Tabla 4-3, los resultados obtenidos tras realizar los respectivos casos de regresión lineal, en donde, la explicación de cada uno de los casos es la misma que en el modelo 1.

Modelo 3: Finalmente se presenta el modelo 3, en donde, se observa que la expresión de la primera parte del modelo, es decir, los valores que están antes del quiebre ($d \leq d_{break}$) sigue siendo la misma que en el modelo 1 y 2. Sin embargo, la segunda parte de este modelo ($d > d_{break}$) incorpora un nuevo parámetro (PGS_{dB}) el cual representa un valor constante de decaimiento que afecta al nivel de potencia luego del quiebre de pasillo.

$$PG_{dB}(d) = \begin{cases} PG1_{dB}(d_0) + 10 n_1 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, & d \leq d_{break} \\ PG1_{dB}(d_0) + PGS_{dB} + 10 n_2 \log_{10} \left(d_{break} \left(\frac{d - d_{break}}{d_0} \right) \right) + X_\sigma, & d > d_{break} \end{cases} \quad (4-4)$$

donde:

- d_0 : 1 metro.
- $PG1_{dB}(d_0)$: Pérdidas en espacio libre a 1 metro.
- PGS_{dB} : Decaimiento constante en el nivel de potencia presenta tras un quiebre.
- n_1 y n_2 : Exponentes de perdidas.
- d : distancia entre Rx y Tx.
- d_{break} : distancia antes del quiebre.
- X_σ : Variable aleatoria de distribución gaussiana con media cero y desviación estándar σ en dB.

El modelo 3 es mucho más sencillo en comparación con los otros dos modelos, ya que, se incluye en su expresión el parámetro PGS (Path Gain Slope) como constante, dicho parámetro es el decaimiento del nivel de potencia que existirá siempre entre la última medición del tramo 1 (antes del quiebre) y la primera del tramo 2 (después del quiebre). Cabe destacar que este parámetro se obtuvo mediante la aplicación de mínimos cuadrados a todas las mediciones de este escenario, de esta manera, se pudo fijar como una constante más en nuestro modelo. Como consecuencia de lo anterior, para obtener la información del tramo 2 ya no es necesario tener PG2, puesto que, solo basta con tener pendiente e intercepto del tramo 1 y al llegar al final de este aplicar el parámetro nuevo obteniendo de esta forma todos los datos del segundo tramo.

En otras palabras, podemos obtener el PG2 sin necesidad de aplicar regresión lineal, porque, este se puede obtener tal como se puede ver en la ecuación 4-6.

$$PG2_{dB} = PG1_{dB}(d_0) + 10 n_1 \log_{10}(d_{break}) + PGS_{dB} \quad (4-5)$$

Como se observa, todos esos parámetros son conocidos durante el análisis de las mediciones, por lo tanto, calcular el PG2 se resume a un simple trabajo algebraico.

De igual manera que en los modelos anteriores, a continuación, se presenta una tabla con los resultados tras realizar los respectivos casos de regresión lineal. La diferencia en este modelo es que el caso de

todos los parámetros libres no tiene sentido, debido a que, en este modelo no se busca optimizar el PG2 por medio de regresión lineal, por lo tanto, solo se presentan dos casos los cuales se presentan en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Casos de regresión lineal para el escenario 2 (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regresión lineal	n_1	$PG1_{dB}(d_0)$	n_2	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (intercepto fijo)	-1,7	-61,4	-1,7	-109,9	3,3
Caso 2 (pendiente fija)	-2,0	-58,6	-2,0	-111,3	4,9

donde los tres casos son:

- Caso 1: Se fija $PG1_{dB}(d_0 = 1) = -61,4 [dB]$, y se optimiza n_1 . Luego $n_2 = n_1$ calculando $PG2_{dB}(d_0)$ al incluir PGS_{dB} al último valor del tramo 1.
- Caso 2: Se fija $n_1 = -2$. $n_2 = n_1$ y se optimiza $PG1_{dB}(d_0)$. Luego se calcula $PG2_{dB}(d_0)$ al incluir PGS_{dB} al último valor del tramo 1.
- Para el escenario 2 el valor de $PGS_{dB} = -21.4 [dB]$.

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos por los casos de regresión 1 y 2, se observa que el primero entrega un valor menor de error medio cuadrático, en consecuencia, se escoge este como mejor caso. Luego, se procede a aplicar dicho caso en las mediciones realizadas en el escenario 2 y se expresan por medio de un gráfico de Path Gain vs distancia, mostrado en la Figura 4-4.

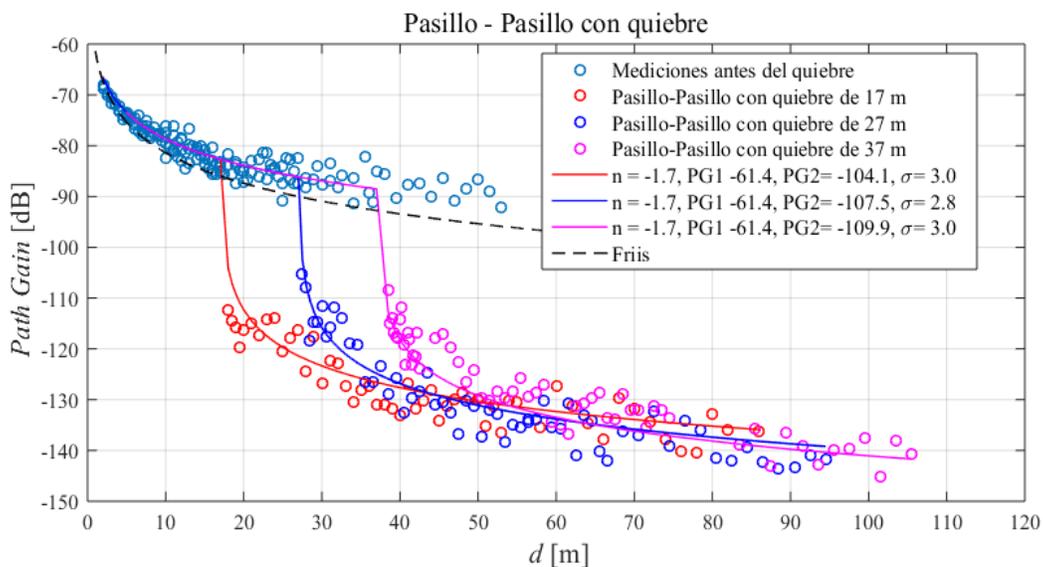


Figura 4-4: Gráfico PG vs distancia, resultado del escenario 2, modelo 3, caso de regresión 1. (Fuente: Elaboración propia).

4.2.2 Azimuth Gain

En la Figura 4-5, se presenta la CDF del AG de todas las mediciones realizadas en el escenario 2. En concreto, se realizaron mediciones en tres ocasiones distintas cada una con una distancia de quiebre, d_{break} , diferente. Notar que en cada gráfico presente en la Figura 4-5, se observan dos curvas, las cuales corresponden a los datos empíricos obtenidos antes y después del quiebre respectivamente. De igual manera, se presenta una línea recta segmentada, la cual representa el nivel de ganancia obtenido en la cámara anecoica.

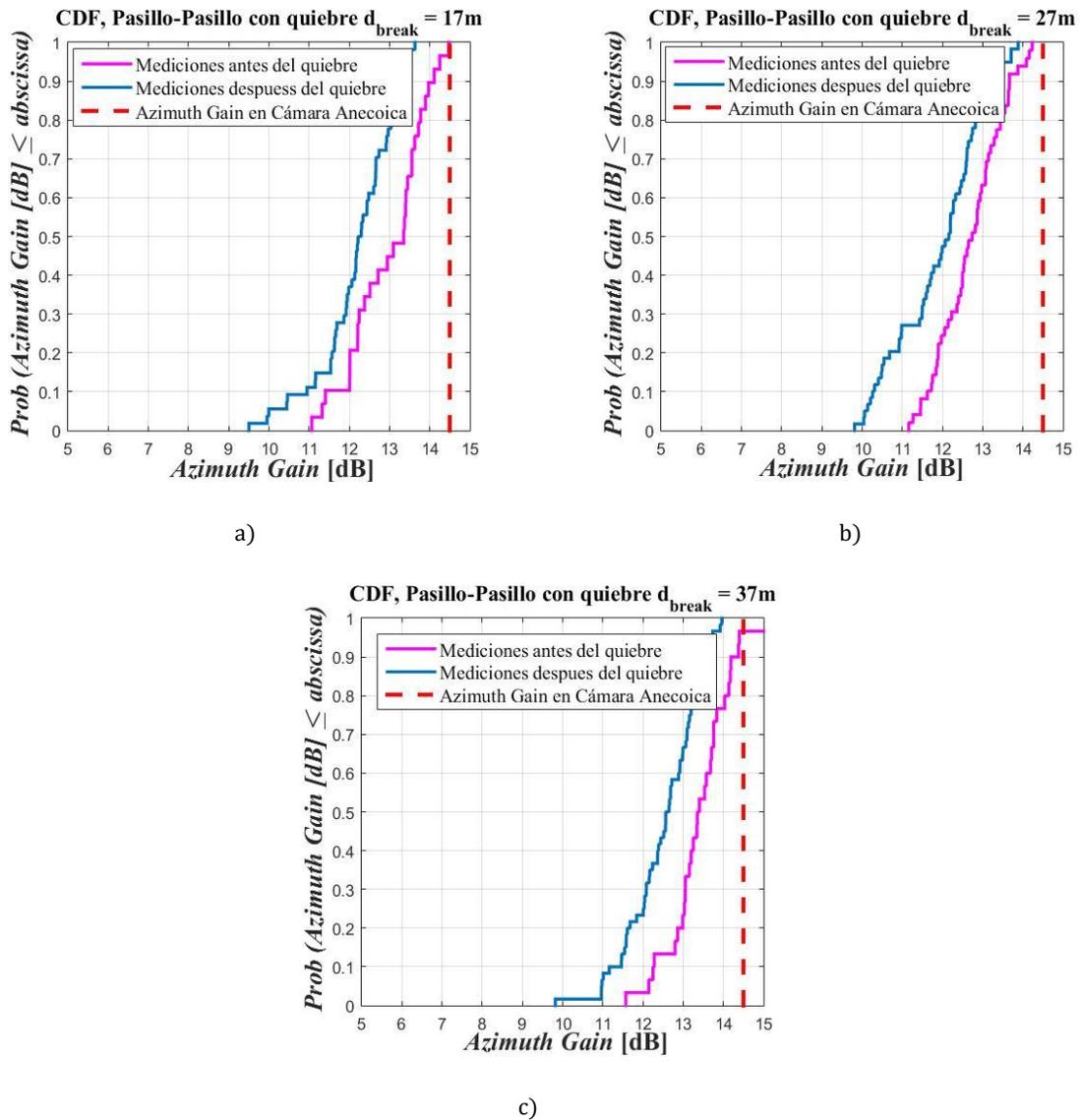


Figura 4-5: Gráficos de CDF de los tres quiebres estudiados a) 17 [m], b) 27 [m], c) 37 [m] (Fuente: Elaboración propia).

En la Tabla 4-5, se presenta la información de los valores de potencia que podemos asegurar en el 90% de los datos empíricos para cada uno de los tres quiebres analizados en este escenario. Cabe destacar, que dicha información se puede ver de forma gráfica en la Figura 4-5

Tabla 4-5: Valores de AG registrados para el 90% de los datos empíricos obtenidos con las tres distancias de quiebre, d_{break} , utilizadas. LOS antes del quiebre y NLOS después del quiebre (Fuente: Elaboración propia)

	17 [m]	27 [m]	37 [m]
LOS [dB]	12,0	11,7	13,3
NLOS [dB]	10,9	10,3	11,5

Al comparar las gráficas de la Figura 4-5, se observa que siempre se obtiene un mayor nivel de ganancia en las mediciones realizadas antes de pasar el quiebre de pasillo, es decir, cuando las antenas se encuentran con condición de línea de vista, esto último se observa de forma más clara aún en la tabla 4-5, en donde, la ganancia para el caso de condición LOS es mayor (para los tres casos de distancia 17, 27 y 37 [m]) que en condición NLOS. Se puede inferir a priori, que al pasar el quiebre crece el nivel de multitrayectoria, puesto a que el frente de ondas ya no llega de forma directa a la antena receptora, rebotando en diversos elementos y paredes antes de llegar a destino. Lo anterior será corroborado en la sección 4.2.3 al analizar la dispersión angular.

4.2.3 Dispersión Angular

Nuevamente con la finalidad de respaldar la información entregada por el AG, es que se presentan las Figura 4-6, 4-7 y 4-8, las cuales muestran los gráficos de potencia recibida normalizada en cada una de las posiciones angulares del plano azimutal en el escenario 2. Además, se destaca el promedio de las potencias recibidas para cada posición angular, el cual será utilizado para hacer el análisis comparativo en todos los casos, puesto que este promedio es más representativo que analizar alguna de las mediciones al azar.

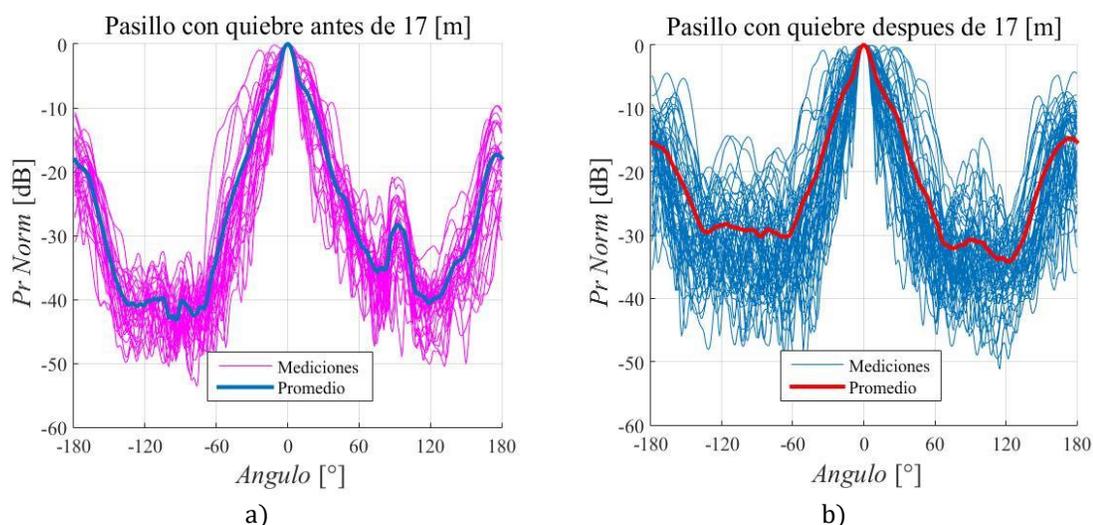


Figura 4-6: Dispersión angular de las mediciones realizadas en el escenario 2 con un quiebre de 17 [m], (a) antes del quiebre condición LOS, (b) después del quiebre condición NLOS. (Fuente: Elaboración propia).

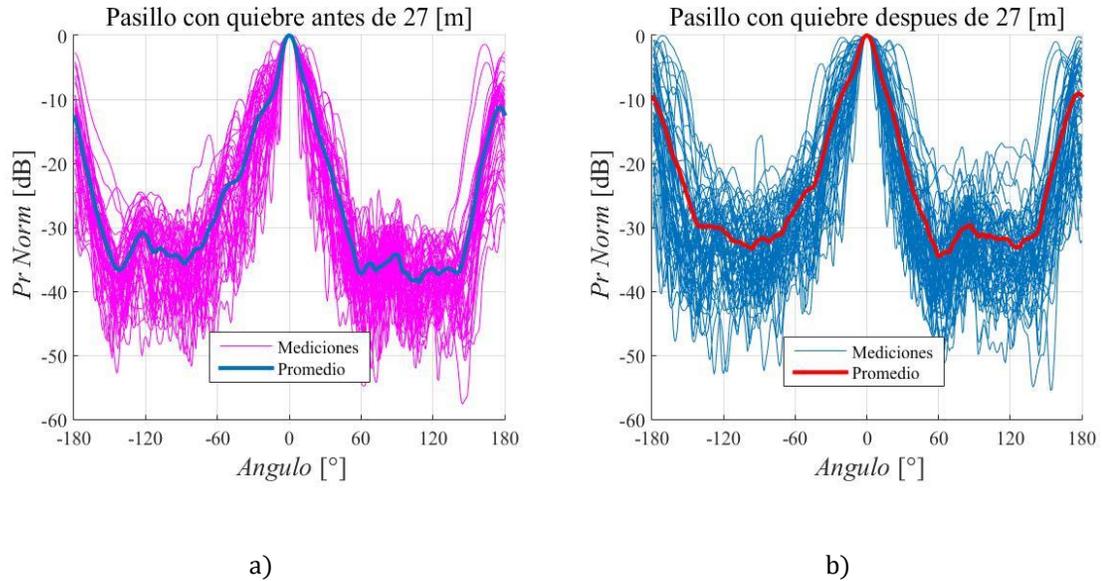


Figura 4-7: Dispersión angular de las mediciones realizadas en el escenario 2 con un quiebre de 27 [m], (a) antes del quiebre condición LOS, (b) después del quiebre condición NLOS. (Fuente: Elaboración propia).

El análisis de cada figura se hará considerando la curva destacada en cada gráfico, puesto que será el comportamiento más representativo para cada caso. Luego, al comparar la Figura 4-6a con la 4-6b se observa a simple vista que el promedio de la curva de la Figura 4-6a será menor que el de la curva de la Figura 4-6b. Desde ahí se establece una asociación directa con el AG, el cual relaciona la máxima potencia, con el promedio de todas las contribuciones de potencia a lo largo del plano azimutal (ecuación 2-13).

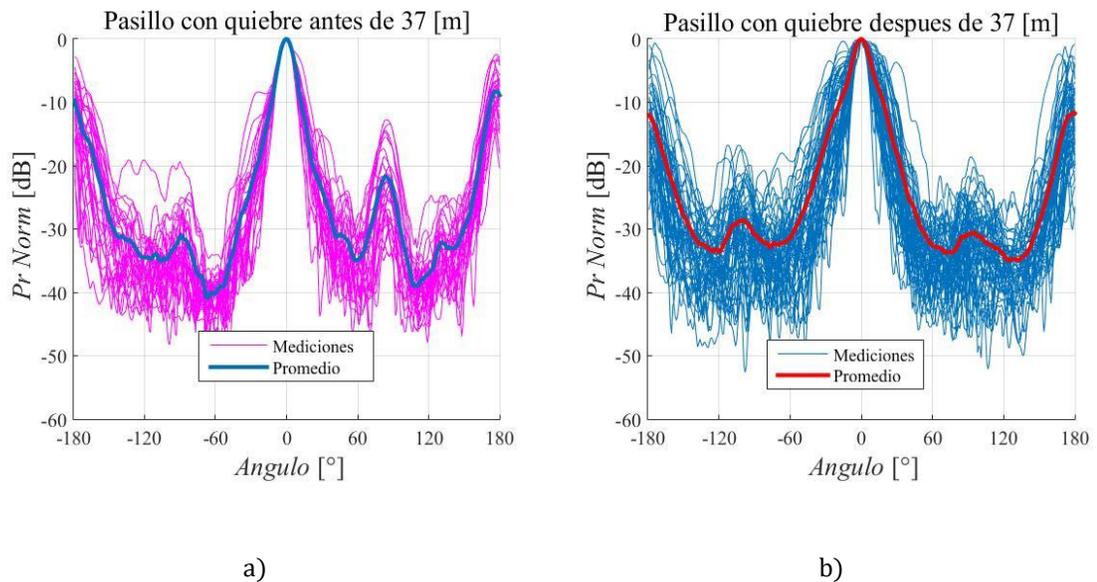


Figura 4-8: Dispersión angular de las mediciones realizadas en el escenario 2 con un quiebre de 37 [m], (a) antes del quiebre condición LOS, (b) después del quiebre condición NLOS. (Fuente: Elaboración propia).

En resumen, si aumenta el promedio de las contribuciones de potencia recibida de 0 a 2π , disminuye como consecuencia, el valor del AG. Al mismo tiempo, si el promedio disminuye el AG aumenta. Esto se

puede comprobar al ver la Figura 4-5a, en donde se observan dos curvas, siendo la representante de las mediciones obtenidas antes del quiebre, la que registra un mayor valor de AG en todo momento.

Cabe destacar que la afirmación anterior se cumple tanto para la Figura 4-6 (relacionada con la Figura 4-5a), 4-7 (relacionada con la Figura 4-5b), y 4-8 (relacionada con la Figura 4-5c).

4.3 Escenario 3

4.3.1 Modelos PG

En esta sección se presentarán tres modelos para calcular Path Gain, además, se realizan los mismos casos de regresión lineal con la finalidad de poder comparar dichos modelos. Tener en cuenta que en este escenario no se consideran los posibles datos con línea de vista que pudiesen existir, esto debido a que, el tramo en donde se presenta esta condición es muy pequeño tal como se aprecia en las Figuras 3-6 y 3-7 pudiendo tener incluso una extensión de unos dos metros lo cual incluso podría generarle daños al equipo. Sin embargo, se utiliza la nube de puntos obtenidas en el escenario 1 ($PG1_{dB}$ y n_1), con la finalidad de, poder obtener pendiente e intercepto para fijarlo en este modelo. Notar que en la pendiente e intercepto se utiliza un número 2 haciendo alusión al segundo tramo de mediciones presente en cada gráfico PG de este escenario.

Modelo 1: Este modelo es similar al presentado en el escenario 1, en donde solo existe un tramo de mediciones en condición NLOS, el cual corresponde a la extensión del pasillo comenzando desde el exterior de la oficina.

Este modelo es bastante sencillo y solamente contiene dos variables a optimizar.

$$PG_{dB}(d) = PG2_{dB}(d_0) + 10 n_2 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (4-6)$$

donde:

- d_0 : 1 metro.
- $PG2_{dB}(d_0)$: Pérdidas a 1 metro.
- n_2 : Exponente de perdidas.
- d : distancia entre Rx y Tx.
- X_σ : Variable aleatoria de distribución gaussiana con media cero y desviación estándar σ en dB.

En las Tablas 4-6 y 4-7, se presenta la aplicación de tres casos distintos de regresión para las dos configuraciones presentes en este escenario, es decir, cuando el equipo Receptor está girando en el interior de la oficina y cuando está girando a lo largo del pasillo respectivamente. Se puede ver de forma clara que los resultados son prácticamente los mismos, solo existen variaciones en el PG2 en tan solo un par de décimas.

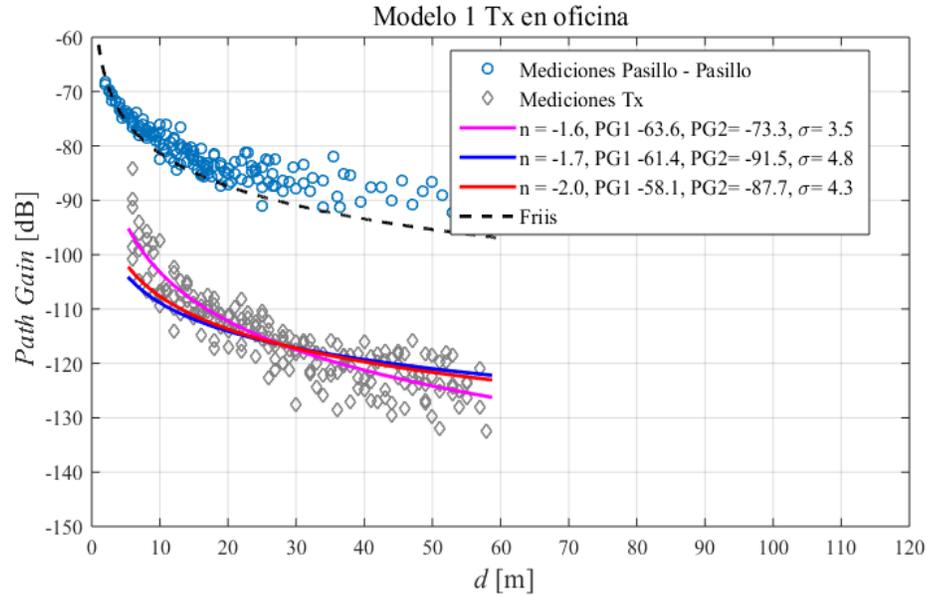


Figura 4-9: Gráfico PG vs distancia, resultado del escenario 3, modelo 1, con el Rx girando en el interior de la oficina y aplicando los tres casos de regresión siendo el magenta el caso 1, azul el caso 2 y finalmente el rojo el caso 3 (Fuente: Elaboración propia).

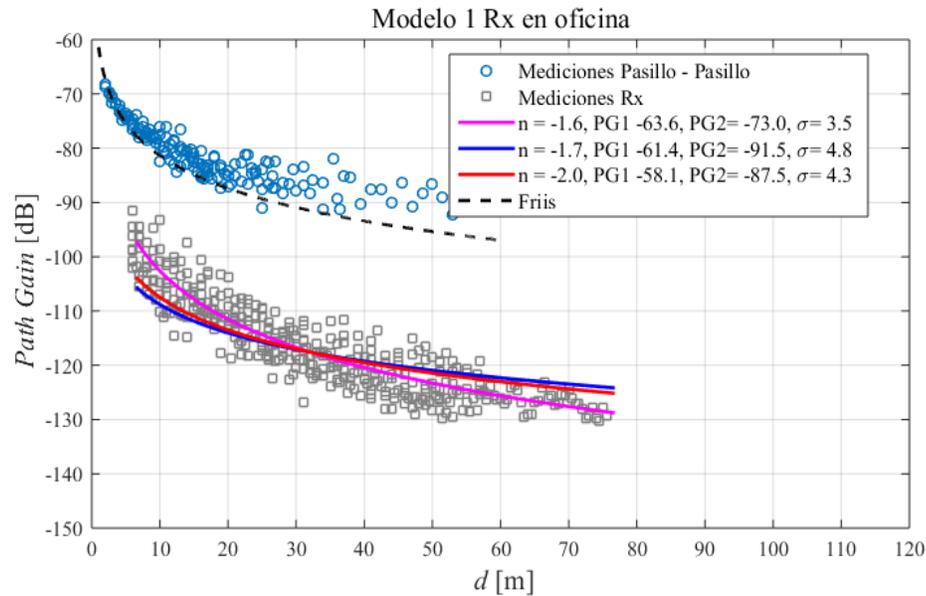


Figura 4-10: Gráfico PG vs distancia, resultado del escenario 3, modelo 1, con el Tx en el interior de la oficina y aplicando los tres casos de regresión siendo el magenta el caso 1, azul el caso 2 y finalmente el rojo el caso 3 (Fuente: Elaboración propia).

Al momento de analizar los resultados obtenidos, se puede observar de forma clara que existe una gran similitud entre cada uno de los tres casos de regresión aplicados tanto en la Figura 4-9 como en la 4-10. En concreto, al comparar los valores obtenidos en el error medio cuadrático se puede ver que en el peor de los casos se registra una diferencia de a lo más 1,3 [dB].

Tabla 4-6. Casos de regresión lineal para el escenario 3 modelo 1 Rx girando en el interior de la oficina (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regresión lineal	n	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (parámetros libres)	-1,6	-73,0	3,5
Caso 2 (intercepto fijo)	-1,7	-91,5	4,8
Caso 3 (pendiente fija)	-2,0	-87,5	4,3

Tabla 4-7. Casos de regresión lineal para el escenario 3 modelo 1 Tx girando en el interior de la oficina (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regresión lineal	n	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (parámetros libres)	-1,6	-73,3	3,5
Caso 2 (intercepto fijo)	-1,7	-91,5	4,8
Caso 3 (pendiente fija)	-2,0	-87,7	4,3

donde:

- Caso 1: Se optimizan todos los parámetros del modelo, $PG2_{dB}(d_0)$ y n .
- Caso 2: Se fija $PG1_{dB}(d_0 = 1) = -61,4 [dB]$, como Friis a un metro y se optimiza n_1 , siendo estos dos parámetros Intercepto y pendiente del tramo Pasillo - Pasillo. Luego $n_2 = n_1$, optimizando con esto $PG2_{dB}(d_0)$.
- Caso 3: Se fija $n_1 = -2,0$. Luego $n_2 = n_1$, optimizando con esto ambos interceptos.

Modelo 2: En comparación con el modelo 2 del escenario 2, este modelo no tendrá el problema producido al aumentar la distancia del quiebre. Lo anterior debido a que en este escenario dicha distancia depende de la ubicación de la antena en el interior de cada oficina y al considerar una oficina promedio siempre serán distancias de unos cuantos metros.

A continuación, se presenta la expresión para el modelo 2 de PG propuesto para el escenario 3.

$$PG_{dB}(d) = PG2_{dB}(d_0) + 10 n \log_{10} \left(\frac{d - d_{break}}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (4-7)$$

donde:

- d_0 : 1 metro.
- $PG2_{dB}(d_0)$: Pérdidas a 1 metro.

- n : Exponente de pérdidas.
- d : distancia entre Rx y Tx.
- d_{break} : distancia antes del quiebre.
- X_{σ} : Variable aleatoria de distribución gaussiana con media cero y desviación estándar σ en dB.

En las Tablas 4-8 y 4-9, de igual manera que en el modelo anterior, se presenta la aplicación de tres casos distintos de regresión para las dos configuraciones presentes en este escenario, es decir, Rx y Tx en el interior de la oficina respectivamente. Al comparar los resultados con los obtenidos en el modelo 1 se aprecian claras diferencias en el valor del error medio cuadrático de aproximadamente 0,8 [dB]. Siendo claramente más favorables los valores obtenidos con el modelo 2.

Tabla 4-8. Casos de regresión lineal para el escenario 3 modelo 2 Rx girando en el interior de la oficina (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regresión lineal	n	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (parámetros libres)	-1,6	-83,5	3,6
Caso 2 (intercepto fijo)	-1,7	-92,8	4,2
Caso 3 (pendiente fija)	-2,0	-88,9	3,5

Tabla 4-9: Casos de regresión lineal para el escenario 3 modelo 2 Tx girando en el interior de la oficina (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regresión lineal	n	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (parámetros libres)	-1,6	-83,2	3,5
Caso 2 (intercepto fijo)	-1,7	-92,8	4,1
Caso 3 (pendiente fija)	-2,0	-89,1	3,2

donde:

- Caso 1: Se optimizan todos los parámetros del modelo, $PG2_{dB}(d_0)$ y n .
- Caso 2: Se fija $PG2_{dB}(d_0)$ como Friis a un metro y se optimiza n .
- Caso 3: Se fija $n = -1.7$. Optimizando $PG2_{dB}(d_0)$.

En las Figuras 4-11 y 4-12, se pueden ver la aplicación del modelo 2 en un gráfico de PG vs distancia junto a las respectivas curvas de regresión lineal aplicadas.

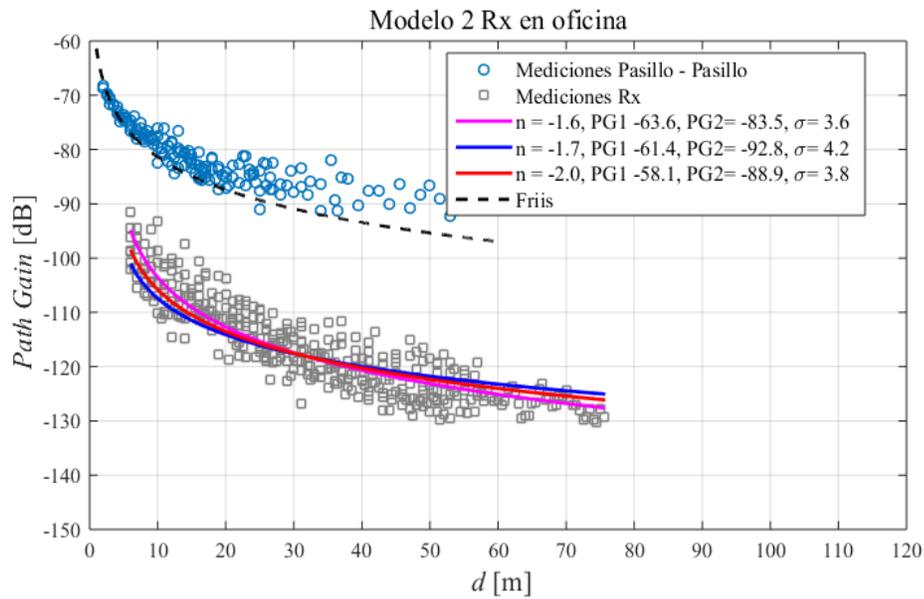


Figura 4-11: Gráfico PG vs distancia, resultado del escenario 3, modelo 2, con el Rx girando en el interior de la oficina y aplicando los tres casos de regresión siendo el magenta el caso 1, azul el caso 2 y finalmente el rojo el caso 3 (Fuente: Elaboración propia).

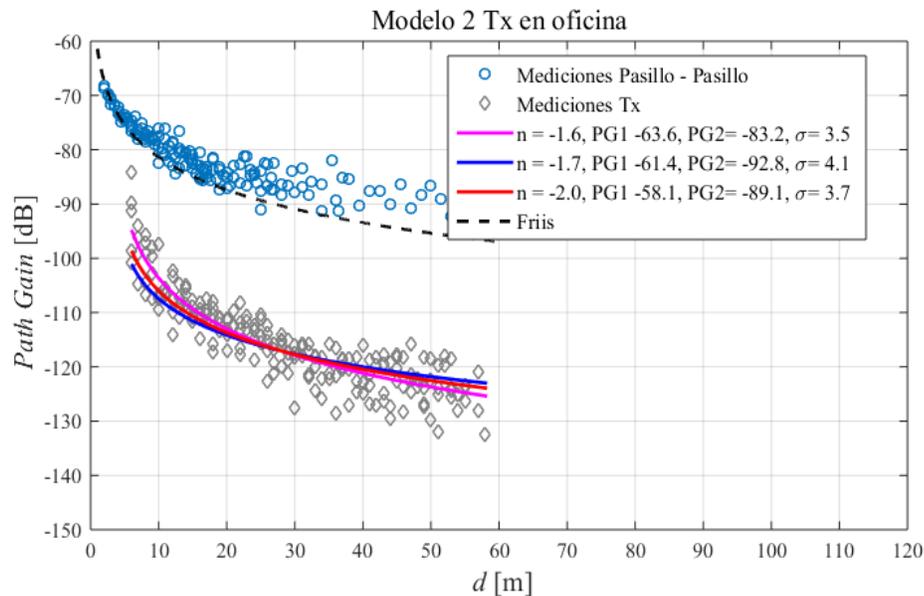


Figura 4-12: Gráfico PG vs distancia, resultado del escenario 3, modelo 2, con el Tx en el interior de la oficina y aplicando los tres casos de regresión siendo el magenta el caso 1, azul el caso 2 y finalmente el rojo el caso 3 (Fuente: Elaboración propia).

Nuevamente, al igual que en el modelo 1 los resultados obtenidos tanto en la Figura 4-11 y 4-12 son muy similares entre sí, con diferencias en el error medio cuadrático de a lo más 0,6 [dB].

Modelo 3: En este modelo se sigue la misma idea presentada en el modelo 3 para el escenario 2. La idea es seguir viendo la oficina como un pasillo pequeño existiendo de igual manera un decaimiento constante en el nivel de potencia (PGS) tras pasar el quiebre.

$$PG_{dB}(d) = PG1_{dB}(d_0) + PGS_{dB} + 10 n \log_{10} \left(d_{break} \left(\frac{d - d_{break}}{d_0} \right) \right) + X_{\sigma} \quad (4-8)$$

donde:

- d_0 : 1 metro.
- $PG1_{dB}(d_0)$: Pérdidas en espacio libre a 1 metro.
- PGS_{dB} : Decaimiento constante en el nivel de potencia presenta tras un quiebre.
- n : Exponentes de perdidas.
- d : distancia entre Rx y Tx.
- d_{break} : distancia antes del quiebre.
- X_{σ} : Variable aleatoria de distribución gaussiana con media cero y desviación estándar σ en dB.

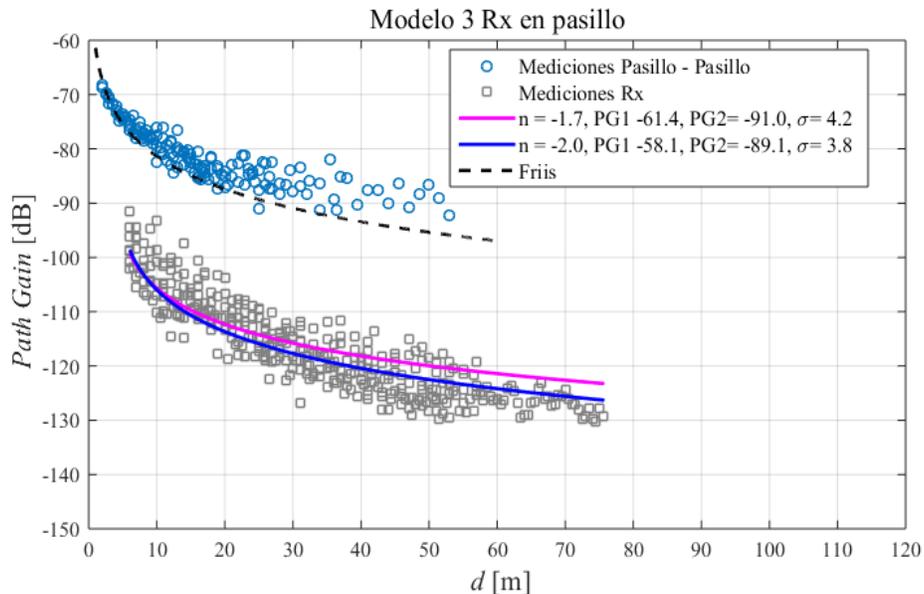


Figura 4-13: Gráfico PG vs distancia, resultado del escenario 3, modelo 3, con el Rx girando en el interior de la oficina y aplicando los dos casos de regresión siendo el magenta el caso 1 y azul el caso 2 (Fuente: Elaboración propia).

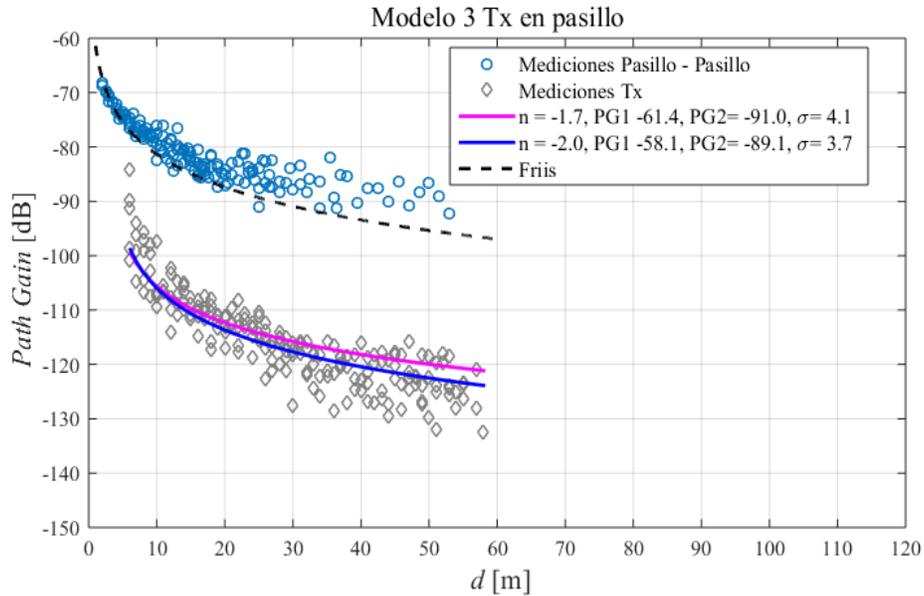


Figura 4-14: Gráfico PG vs distancia, resultado del escenario 3, modelo 1, con el Tx en el interior de la oficina y aplicando los dos casos de regresión siendo el magenta el caso 1 y azul el caso 2 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 4-10: Casos de regresión lineal para el escenario 3 modelo 3 Rx girando en el interior de la oficina (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regresión lineal	n	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (intercepto fijo)	-1,7	-91,0	4,2
Caso 2 (pendiente fija)	-2,0	-89,1	3,8

Tabla 4-11: Casos de regresión lineal para el escenario 3 modelo 2 Tx girando en el interior de la oficina (Fuente: Elaboración propia)

Casos de regresión lineal	n	$PG2_{dB}(d_0)$	σ_{dB}
Caso 1 (intercepto fijo)	-1,7	-91,0	4,1
Caso 2 (pendiente fija)	-2,0	-89,1	3,7

donde:

- Caso 1: Se fija $PG1_{dB}(d_0 = 1) = -61,4 [dB]$, como Friis a 1 metro y se optimiza n_1 . Luego $n_2 = n_1$ calculando $PG2_{dB}(d_0)$ al incluir PGS_{dB} al último valor del tramo 1.
- Caso 2: Se fija $n_1 = -2,0$. $n_2 = n_1$ y se optimiza $PG1_{dB}(d_0)$. Luego se calcula $PG2_{dB}(d_0)$ al incluir PGS_{dB} al último valor del tramo 1.

- Para el escenario 2 el valor de $PGS_{dB} = -21,4 [dB]$.

En las Figuras 4-13 y 4-14, se pueden ver la aplicación del modelo 3 en un gráfico de PG vs distancia junto a las dos respectivas curvas de regresión lineal aplicadas.

Como se puede observar, en este modelo tampoco se aplica el primer caso de regresión utilizado en los modelos 1 y 2, esto debido a que no se busca optimizar de forma libre el PG2. En cuanto a los resultados obtenidos tanto en la Figura 4-13 como en la 4-14, las diferencias entre los errores medios cuadráticos son de a lo más 0,4 [dB].

4.3.2 Azimuth Gain

En esta sección se analizará el resultado del AG para él todas las mediciones realizadas en el escenario 2. Lo primero es tener en cuenta que en este escenario se dan dos casos, es decir, el Rx girando en el interior de la oficina y también el Tx en el interior de la oficina. Por lo tanto, resulta más fácil de analizar ambas situaciones por separado y es justamente lo que se puede apreciar en la Figura 4-15, la cual contiene 2 curvas correspondientes a las mediciones realizadas con el Rx girando en el interior de la oficina y a lo largo del pasillo respectivamente. De igual manera, se presenta una línea recta segmentada, la cual representa al nivel de ganancia obtenido en la cámara anecoica. Además de lo anteriormente mencionado, se puede observar que para el caso de la Rx en la oficina se obtiene en un 90% de los datos empíricos un valor mayor a 8,5 [dB] y para el caso del Rx en el pasillo se obtiene un valor mayor a 10,2 [dB] de igual manera para el 90% de las mediciones. Ambos con una degradación del valor ideal usado como referencia de 6 y 4,3 [dB] respectivamente.

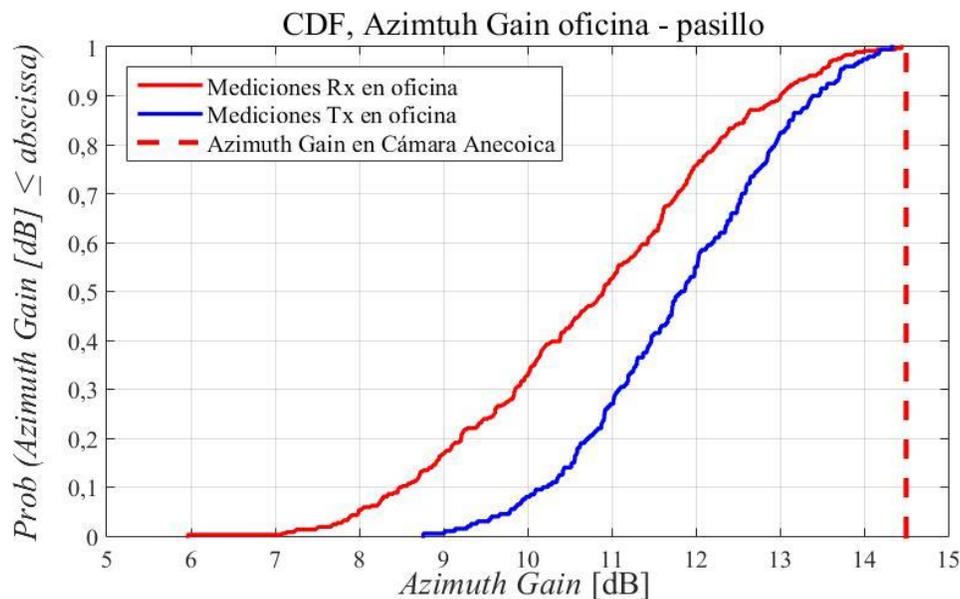


Figura 4-15: CDF del total de mediciones del escenario dos separadas en dos grupos. La curva de color azul agrupa a todas las mediciones realizadas con el Tx en el interior de la oficina, por otro lado, la curva de color rojo representa a todas las mediciones realizadas con el Rx girando en el interior de la oficina. Además, la línea roja segmentada equivale al AG de referencia obtenido en la cámara anecoica. (Fuente: Elaboración propia).

4.3.3 Dispersión Angular

Al igual que en los escenarios anteriores, se incluye un análisis de dispersión angular para apoyar la información entregada por los gráficos de AG. Cabe destacar que se adjuntan todos los escenarios de medición con sus respectivos gráficos.

Al analizar las Figuras 4-16, 4-17 y 4-18, se puede ver de forma clara la diferencia que existe entre los gráficos cuando el equipo receptor se encuentra girando dentro o fuera del laboratorio. En concreto, al observar el comportamiento de las señales, se puede apreciar que cuando se mantiene girando el receptor a lo largo del pasillo, la señal sigue comportándose de igual manera que en los escenarios anteriores, es decir, tiende a tener distribución Rice. Por el contrario, cuando el receptor está girando en el interior del laboratorio la señal tiende a tener distribución Rayleigh. Por medio de esto, se puede explicar y asociar los resultados expuestos en las tres figuras en cuestión con la Figura 4-15, en donde se muestra un mejor resultado de AG para los casos que tienden a tener distribución Rice.

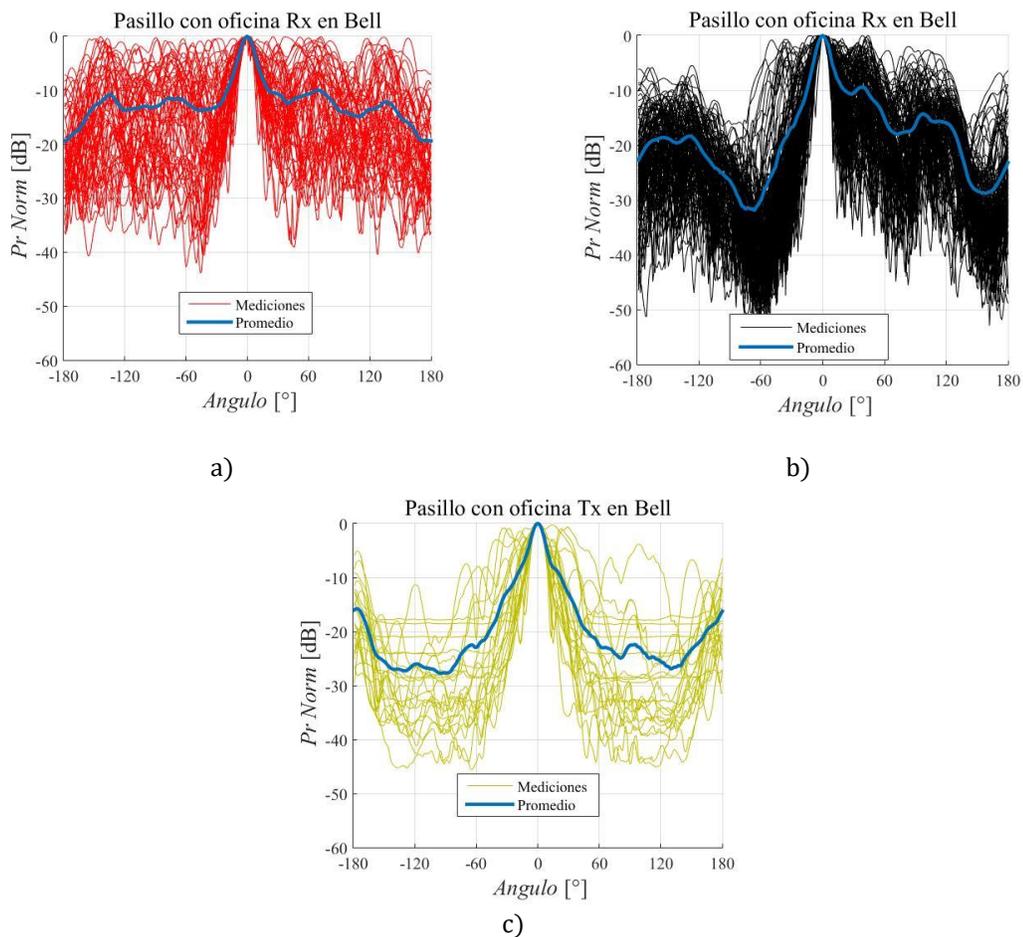


Figura 4-16: Gráficos de dispersión angular de las mediciones obtenidas en el laboratorio Bell: (a) Rx girando en el interior del laboratorio a una profundidad de 2,0 [m], (b) Rx girando en el laboratorio a una profundidad de 2,5 [m], (c) Tx direccionado hacia la puerta del laboratorio y posicionado a una profundidad de 1,0 [m],

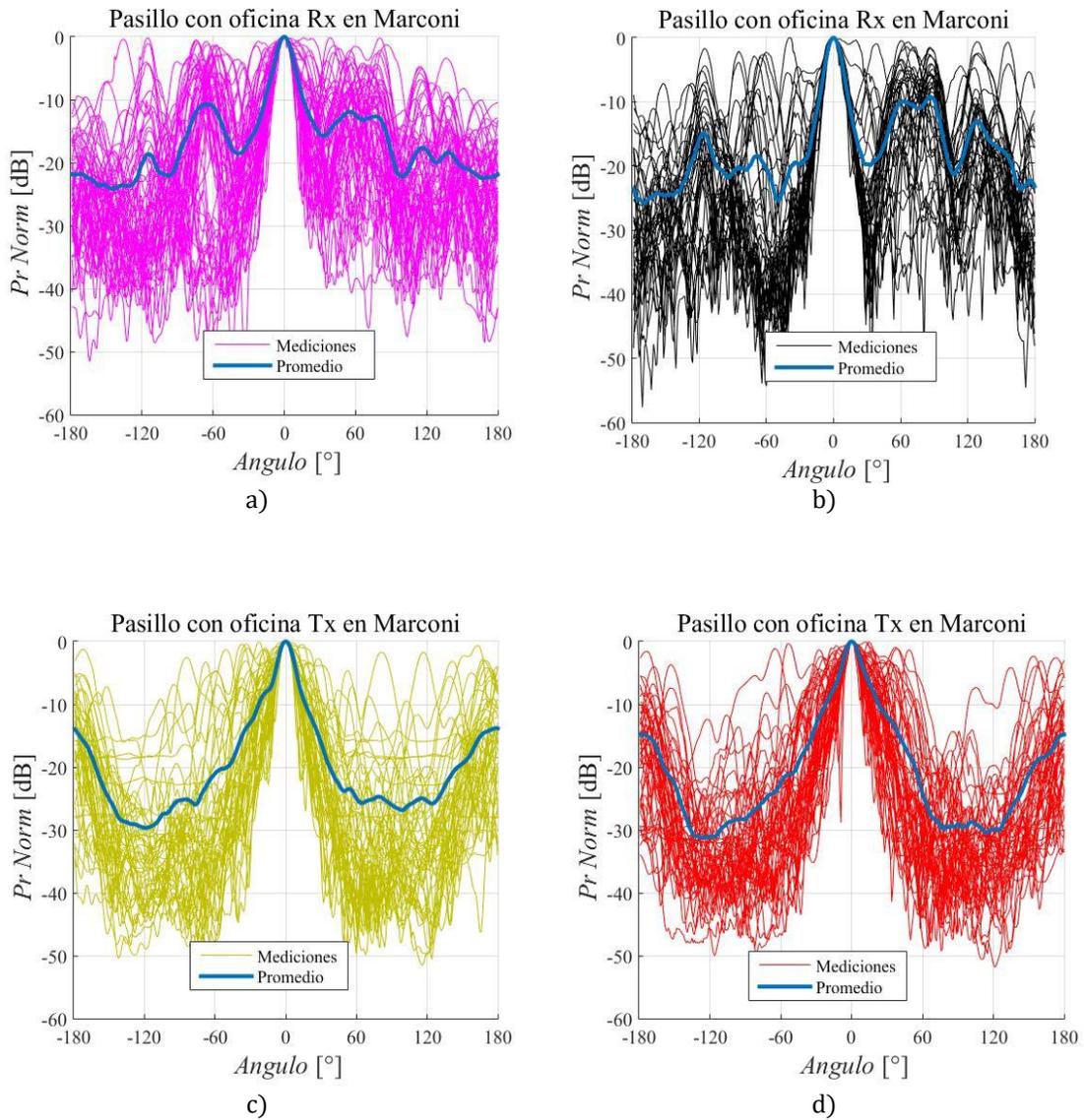


Figura 4-17: Gráficos de dispersión angular de las mediciones obtenidas en el laboratorio Marconi: (a) Rx girando en el interior del laboratorio a una profundidad de 2,0 [m], (b) Rx girando en el interior del laboratorio a una profundidad de 2,5 [m], (c) Tx direccionado hacia la puerta del laboratorio y posicionado a una profundidad de 1,0 [m], (d) Tx direccionado hacia la puerta del laboratorio y posicionado a una profundidad de 2,0 [m].

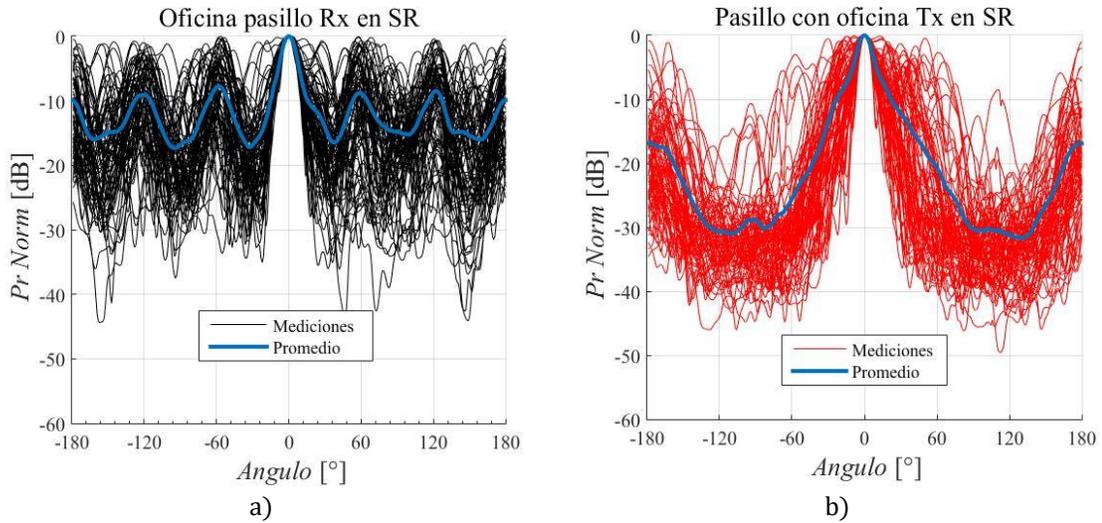


Figura 4-18: Gráficos de dispersión de las mediciones obtenidas en la sala de reuniones: (a) Rx girando en el interior de la sala a una profundidad de 2,0 [m], (b) Tx direccionado hacia la puerta de la sala y posicionado a una profundidad de 2,0 [m],

No obstante, en este escenario también se cumple lo expuesto en el escenario 1 y 2, es decir, que los valores de AG se pueden respaldar, tras un análisis a los gráficos de dispersión angular, en concreto según el promedio que tendrán las contribuciones de potencia de 0 a 2π .

En este escenario existen dos grupos principales, el receptor girando en el interior de la oficina y el receptor girando a lo largo del pasillo. Obteniendo un mayor promedio de las contribuciones de potencia siempre en el primer caso, es decir, cuando el receptor está en el interior de la oficina.

Finalmente, al comparar las figuras 4-16, 4-17 y 4-18, se comprueba la afirmación anterior, por ende, se espera un valor mayor de AG para las mediciones realizadas con el receptor girando a lo largo del pasillo, lo cual se comprueba al ver la Figura 4-15.

Discusión y conclusiones

A lo largo de este trabajo se realizaron campañas de mediciones en el interior de la Universidad Técnica Federico Santa María, realizando finalmente más de 1000 mediciones con la finalidad de modelar el canal inalámbrico a 28 [GHz]. Además, se utiliza un par de antenas directivas de gran ganancia a fin de compensar las pérdidas de propagación que sufren las OM. Las mediciones se llevaron a cabo en tres escenarios distintos, los cuales cumplían con la condición de interior. Estos fueron: Escenario 1 pasillo-pasillo (LOS), escenario 2 pasillo con quiebre (LOS y NLOS), y escenario 3 pasillo con oficina (NLOS).

Los modelos empleados son el Path Gain y Azimuth Gain, siendo el primero el modelo que se utilizará para estimar las pérdidas de propagación, mientras que el segundo es un modelo estadístico que permite estimar la ganancia que se obtendrá al utilizar una antena directiva en un entorno de interior.

En cuanto al Path Gain, en el escenario 1 se realizaron mediciones en condición LOS, esto conlleva a implementar un modelo simple y fácil de utilizar. Mientras que, para el escenario 2 se presentan tres modelos distintos, de los cuales finalmente se eligió como mejor el modelo número 3, esto debido a que dicho modelo era aún más simple y sencillo que sus antecesores, puesto que contiene el parámetro PGS (*Path Gain Slope*), el cual, representa el decaimiento de la potencia luego de pasar el quiebre de pasillo y se determinó mediante el método de mínimos cuadrados. El valor del PGS, se cuantificó como -21,4 [dB]. En cuanto al escenario 3, se siguió el mismo procedimiento mencionado anteriormente, se proponen tres modelos de los cuales se escoge como mejor el modelo 3, el cual también contiene el parámetro PGS.

En cuanto a los resultados del Azimuth Gain, para el escenario 1 en condición LOS, se registra un valor mayor a 11,8 [dB] para el 90% de los datos empíricos con una degradación del valor ideal usado como referencia (14,5 [dB] medido en la cámara anecoica) de 2,7 [dB]. Mientras que para el escenario 2 en condición LOS, los valores fluctúan entre 11,7 y 13,3 [dB] con una degradación del valor ideal de 2,3 [dB] y en NLOS varían entre 10,3 y 11,5 [dB], de igual manera, para el 90% de los datos empíricos. Así mismo, para el escenario 3, solo que aquí no existen mediciones con línea de vista, sino que, se hace la comparativa entre tener girando el receptor en el interior de la oficina y a lo largo del pasillo, registrando para cada caso un valor mayor a 8,5 y 10,2 [dB] respectivamente para el 90% de los datos empíricos, ambos con una degradación del valor ideal usado como referencia de 6 y 4,3 [dB] respectivamente.

Bibliografía

- [1] M. Giordani, M. Mezzavilla and M. Zorzi, «"Initial Access in 5G mmWave Cellular Networks",» *Proc IEEE Communications*, vol. 54, n° 11, pp. 40-47, 2016.
- [2] S. Rangan, T. S. RaPPaport and E. Erkip, «"Millimeter-Wave Cellular wireless networks: Potentials and challenges",» *Proc IEEE*, vol. 102, n° 3, pp. 366-385, 2014.
- [3] N Cardona, J Olmos, M García, J Monserrat, 3GPP LTE: Hacia la 4G móvil, Barcelona: Marcombo, 2011.
- [4] M. R. Akdeniz, Y. L. Mathew, K. Simimi, S. Sun, S. Rangan, T.S. Rappaport, E. Erkip, «"Millimeter Wave channel modeling and cellular capacity evaluation",» *Proc IEE Journal on selected areas in communications*, vol. 32, n° 6, pp. 1164-1179, 2014.
- [5] «ericsson,» 24 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.ericsson.com/news/2076554>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [6] «ElMercurio,» 5 Marzo 2017. [En línea]. Available: <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=341170> [Último acceso: 7 marzo 2017].
- [7] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES; SUBSECRETARIA DE TELECOMUNICACIONES, «leychile,» 6 marzo 2006. [En línea]. Available: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=249068>. [Último acceso: 20 abril 2017].
- [8] «Cisco,» 8 marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>. [Último acceso: 20 abril 2017].
- [9] «subtel,» Octubre 2005. [En línea]. Available: http://www.subtel.gob.cl/images/stories/articles/subtel/asocfile/6_espectro_vol2.pdf. [Último acceso: 7 Mayo 2017].
- [10] COST telecommunications, "Digital mobile radio towards future generation systems", Luxembourg: European Communities, 1999.

- [11] IST-2003-507581 WINNER, Final Report on Link Level and System Level Channel Models, Information Society Technologies, 2005.
- [12] Cheikh A. L., Jean M., Jean C., Alain S, «Millimeter-Wave Outdoor-to-indoor Channel Measurements at 3, 10, 17 and 60 GHz,» European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), vol. 11, pp. 1798-1802, 2017.
- [13] M. G. T. Schwengler, «Propagation models at 5.8 GHz - path loss and building penetration,» *IEEE Radio and Wireless Conference*, pp. 119-124, 2000.
- [14] Daniel S. Baum, Hassan El-Sallabi, Tommi Jämsä, Juha Meinilä, Pekka..., «"Final report on link level and system level channel models",» Information Society Technologies, 2005.
- [15] P. Kyösti, J. Meinilä, L. Hentilä, X. Zhao, T. Jämsä..., «Part 1 Channel Models,» Information Society Technologies, 2007.
- [16] M. Lei, J. Zhang, T. Lei, D. Du, "28-GHz indoor Channel Measurements and Analysis of propagation Characteristics" 2014 IEEE 25th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Communications (PIMRC), pp. 208-212.
- [17] Y. Zhu, H. Wang, W.Hong, J. Dou, S. Mei, Xi. Yuan, "28-GHz Path-Loss Measurement and Modeling in Indoor Environments" 2015 IEEE 6th International Symposium on Antenna Propagation and EMC Technologies (MAPE), pp. 234-237.
- [18] M. Don Kim, J. Liang, J. Lee, J. Park, and B. Park, "Path Loss Measurements and Modeling for Indoor Office Scenario at 28 and 38 GHz" 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 64-65.
- [19] G. MacCartney, T. Rappaport, S. Sun, S. Deng, «Indoor Office Wideband Millimeter-Wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G wireless Networks,» *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2389 -2424, 2015.
- [20] X. Wu, Y. Zhang, C. Xiang Wang, G. Goussetis, E. Hadi and M. Alwakeel, "28 GHz Indoor Channel Measurements and Modelling in Laboratory Environment Using Directional Antennas" 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).
- [21] D Fleisch, A Student's Guide to Maxwell's Equations, Ohio: Cambridge University, 2008.
- [22] s, Jordi. P y Oriol, Fundamentos de diseño y gestión de sistemas de comunicaciones móviles, Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya, 2014.
- [23] T. S. Rappaport, Wireless Communications principles and practice, Perason.
- [24] A. Goldsmith, Wireless Communications, California : Cambridge University, 2005.
- [25] A. F. Molisch, Wireless communications, California: John Wiley and Sons, Ltd, 2011.

- [26] M. Rodriguez, R. Feick, R. A. Valenzuela, Dmitry Chizhik, "Achieving Near Maximum Ratio Combining Diversity Gains with Directive Antennas", IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 66, pp. 7782-7796, 2017
- [27] R. Feick, M. Rodríguez, L. Ahumada, R. A. Valenzuela, M. Derpich and O. Bahamonde, "Achievable Gains of Directional Antennas in Outdoor-Indoor Propagation Environments", IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 3, pp. 1446-1456, Marzo 2015
- [28] Chizhik, J. Du, G. Castro, M. Rodriguez, R. Feick, R.A Valenzuela, "Path Loss Measurements and models at 28 GHz for 90% Indoor Coverage", submitted to IEEE EUCAP, 2018.
- [29] A-Info, «"Data Sheet, LB-28-10, Standar Gain Horn Antenna",» AINFO inc, Chengdu, 2017.
- [30] A-Info, «"Data Sheet, LB-28-25, Standar Gain Horn Antenna",» AINFO inc, Chengdu, 2017.

A Especificaciones del equipo

A.1 Componentes de RF

Módulos transmisor y receptor: Ambos módulos fueron construidos por Nexyn de acuerdo con las características requeridas.

Atenuadores: Se utilizan atenuadores en el transmisor para poder hacer mediciones en distancias cortas sin saturar el receptor tomando en cuenta que el rango de operación del equipo receptor va desde los -50 y los 5 [dB].

A.2 Adquisición de datos

Aquí veremos la tercera versión de la Raspberry Pi. La cual posee un mayor poder de cálculo para la adquisición de datos en tiempo real que la Raspberry Pi 3. También se escogieron otros componentes para alimentación de los dispositivos, como para el control del motor. Todos los componentes electrónicos se describen y se explica por qué se usaron a continuación:

Raspberry pi 3: La actualización de su antecesora Raspberry Pi 3. Cuenta con un módulo Wifi lo que facilita en gran medida la comunicación con el equipo en forma remota, utilizado para las mediciones y adquisición en tiempo real.

Además, cuenta con una gran presencia en línea lo que facilita mucho encontrar información y librerías al respecto con lo cual se hace más fácil la solución de posibles errores.

Powermeter: Para la medición de potencia se utiliza un Powermeter desarrollado por *HCF Engineering*. La solución de esta compañía se basa en un amplificador logarítmico que captura la señal en IF y entrega un valor análogo en volts. Este valor es digitalizado por microcontrolador *Atmega328*. Este valor es convertido posteriormente a través de una interpolación lineal por tramos a una potencia en dBm para la frecuencia configurada. Es importante tener un filtro de banda angosta a la entrada del Powermeter dado que el amplificador integra la señal en todo su ancho de banda, 100 [kHz] a 500 [MHz], y no solamente en banda o frecuencia de interés.

Encoder: El Encoder utilizado se caracteriza por generar dos ondas cuadradas que permiten identificar el inicio de cada vuelta e incremento angular, lo que permite calcular velocidad angular y posición angular.

RTC: El RTC o Real Time Clock, es el encargado de que la Raspberry Pi siempre tenga actualizada su hora y fecha. De fábrica la Raspberry Pi no incluye este módulo ya que suele estar conectada internet y actualizar su fecha y hora desde internet. Dado que la plataforma no estará conectada a Internet es necesario este módulo para que los archivos generados tengan “time stamps” correctos. El módulo se conecta a la Raspberry Pi por medio una conexión I2C y la batería que usa es necesaria cambiarla cada 10 años aproximadamente.

A.3 Alimentación

Batería 5 [V]: Se utiliza una batería externa de celulares que posee un conector USB para proveer a la plataforma de una línea de 5 [V]. Esta se conecta a la Raspberry Pi 3, la cual utiliza un conector micro-USB. Los demás componentes que utilizan 5V obtienen su energía directamente desde la Raspberry Pi. La ventaja de usar una batería externa de celulares es que ya poseen integrados reguladores de voltajes y medidas de seguridad tanto para su carga como para corto circuitos, etc. Esto se traduce en una gran ventaja ya que, en ocasiones, por descuidos del operario, la batería puede quedar conectada por más del tiempo necesario de carga, y gracias a dichos sistemas de seguridad la batería no sufriría consecuencias, lo mismo pasa en el caso de que se utilice toda su carga. Además de lo anterior son altamente reemplazables debido a su gran disponibilidad en el mercado ante cualquier falla.

Batería 14.8 [V]: Esta batería tiene la función de alimentar al regulador de tensión (Anyvolt) para proveer una línea de 12 [V] sobre la plataforma. La batería es de tipo LiPo y se compone de 4 celdas en serie de 3.7 [V]. Esta batería no cuenta con protección contra sobre descarga, como la batería antes mencionada, por lo que debe ser utilizada monitoreada con una alarma para evitar daños. Es de vital importancia siempre cargarla en un cargador de baterías de Lipo que sea capaz de realizar carga balanceada. Además, siempre se debe cargar junto al sensor de temperatura para evitar cualquier incendio dado que estas baterías son altamente inflamables. Se escogió una batería LiPo dada su gran autonomía y a que son capaces de entregar la suficiente corriente a los componentes RF durante la inicialización y encendido de la plataforma.

Regulador de tensión: Se utiliza un regulador comercial llamado Anyvolt, basado en un elevador y reductor de tensión fabricado por Dimension Engineering, el cual mantiene una tensión fija a la salida independiente si la entrada está por sobre o debajo de la salida. Es importante mencionar que no se debe colocar a menos de 5 [cm] de cualquier componente RF ya que puede introducir ruido según la documentación del producto. Adicionalmente no se le debe demandar más de 3 [A] bajo la configuración actual según indicaciones del fabricante.

A.4 Componentes mecánicos y control

Disco superior: El disco superior sobre el cual está montado todo el equipamiento RF y los componentes necesarios para la adquisición de datos está fabricado en Robanit, un polietileno similar al tecnil pero más fácil de mecanizar. El diámetro escogido fue de 35 [cm] y la altura de 12 [mm]. El diámetro fue escogido de manera holgada para que cupiesen todos los componentes cuando aún no sabía las dimensiones definitivas del equipo de RF. La altura fue escogida para darle suficiente rigidez al disco.

Adaptador de discos: Este es un disco que sujeto al eje del motor. La razón de esta pieza es que permite cambiar sin mayor dificultad cualquier disco plano encima de él sin tener que intervenir en la sujeción con el eje del motor.

Base de la plataforma: La base de la plataforma también está fabricada en Robanit, es cuadrada y tiene una arista de 35 [cm]. Se dejó un espacio de 7 [cm] para alojar el motor y todo el control, además al reducir la separación se le dio mayor estabilidad que a la versión anterior. Eventualmente se podría reducir más aún este espacio, lo cual está sujeto a evaluación.

Motor: Se escogió un motor capaz de sostener 6 [kg], con la finalidad de soportar todos los componentes que se instalan sobre la plataforma sin que se vea afectada el rendimiento del motor.

Disco ranurado encoder: En esta versión se consideró un disco ranurado en que aprovechando las mayores dimensiones de la plataforma se utilizan 180 ranuras, con lo presenta una gran resolución disponible.

Arduino + Shield display: Es la configuración escogida para el control de velocidad del motor de la plataforma. Arduino controla por medio de un controlador PI el giro del motor, fijando los parámetros para el ciclo de trabajo para el puente H. La retroalimentación la obtiene desde un segundo encoder que solo registra el paso por el "Home" del disco (Ranura de mayor tamaño, que identifica el inicio de vuelta). El shield con display es utilizado para indicar la velocidad actual de la plataforma y que a través de su botonera integrada permite fijar la velocidad deseada, además de iniciar y detener el giro del motor. La Arduino es alimentada con 9 [V], su rango de operación recomendado es de 7 [V] a 12 [V] sin embargo puede soportar hasta 20 [V] con el riesgo que se sobrecaliente.

Puente H: Es el encargado de accionar el motor. El puente H es controlado desde la Arduino. El puente H se puede alimentar con un máximo de 15 [V], dado que se está alimentando la lógica y el motor con la misma fuente. Además, el puente H puede disipar un máximo de 25 [W]. Por seguridad se agregó un ventilador al disipador para que un ambiente de trabajo exigente no se sobrecaliente.