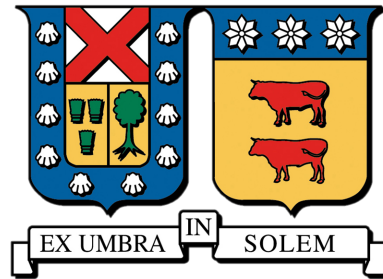


UNIVERSIDAD FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO - CHILE



Caracterización de canal inalámbrico en ambiente
interior para señales de 2.45 y 3.55 GHz

DIEGO ALEXIS ALFARO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRÓNICO

Profesor Guía: Melissa Diago

Profesor Correferente: Ricardo Olivares

11 de junio de 2025

Resumen

En este trabajo se modela y caracteriza el comportamiento de un canal inalámbrico dentro del contexto de tecnologías 5G. Se describe una campaña de medición realizada en un ambiente interior de pasillo usando antenas direccionales en frecuencia de 2.45 GHz y 3.55 GHz en línea de vista, trabajando con enlaces de variadas configuraciones usando distintas polarizaciones y distancias. Se procesan los datos obtenidos usando MATLAB donde se obtienen, en cada enlace, la dispersión temporal RMS, el ancho de banda de coherencia, y la relación entre estos dos últimos parámetros. Finalmente, se usan estos resultados para proveer información en como implementar redes inalámbricas 5G en este tipo de ambientes.

Abstract

In this paper we model and characterize a wireless channel's behaviour given the context of 5G technologies. We describe a measurement campaign's realization in an indoors hallway environment using directional antennas in 2.45 GHz and 3.55 GHz frequencies in Line-of-Sight, working through various types of link configurations using different polarizations and distances. We process the gathered data using MATLAB to obtain, for each link, the RMS delay spread, the coherence bandwidth, and the relationship between these two parameters. Finally, we use the results to provide insight on how to implement wireless 5G networks on these kinds of environments.

Glosario

auto-correlación Medida estadística que se usa para medir patrones repetitivos dentro de una señal. Se define como la correlación cruzada de una señal consigo misma.. 16

canal inalámbrico Canal físico por donde se transmite señales electromagnéticas con las que se comunican dispositivos inalámbricos.. 6

desvanecimiento Efecto en el que la magnitud y la fase de la señal se ven afectadas en ciertas frecuencias o a ciertos tiempos. Estos pueden ser a corto plazo, causado por multitrayectos, o a largo plazo, causados por eventos de obstrucción.. 13

ergodicidad concepto matemático que sugiere que un punto de un sistema en movimiento eventualmente visitará todas las partes del espacio en el que se mueve el sistema de manera uniforme y aleatoria.. 7

multi-trayectoria Fenómeno de propagación donde se presentan varias reflexiones que afectan a la recepción de señales.. 6, 7, 18

VNA Analizador de redes vectorial (Vector Networ Analyzer). Herramienta que mide la magnitud y fase de una señal que pasa en un sistema específico.. 8-12

Índice general

1. Introducción	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Estado del arte	4
1.3. Objetivos	5
1.4. Desarrollo del escrito	5
2. Fundamentos teóricos	6
2.1. Interferencia intersimbólica	6
2.2. Perfil de potencia de retraso	6
2.3. Retardo promedio y dispersión temporal RMS	7
2.4. Ancho de banda de coherencia	7
2.5. Resumen	8
3. Campaña de medición	8
3.1. Calibración	9
3.2. Escenario	12
4. Resultados y Análisis	14
4.1. Procesamiento	14
4.2. Análisis	17
5. Conclusiones	20

Capítulo 1: Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Se ha invertido mucha atención en la caracterización y descripción de una gran variedad de canales inalámbricos bajo diferentes configuraciones de antenas en varias frecuencias y ancho de bandas de transmisión específicas. Recientemente estos estudios se han realizado dentro del contexto de las nuevas tecnologías de quinta generación 5G, cuyos desafíos incluyen acomodar una creciente cantidad de usuarios, distribuir eficientemente el ancho de banda y trabajar con altas frecuencias de transmisión. Los rangos espectrales que más han atraído la atención de investigadores y diseñadores están centrado en 3.6 GHz y 28 GHz, las cuáles entran en la categoría de ondas milimétricas.

Se decide posicionarse dentro de este contexto en el que debemos describir a través de variables temporales y espectrales un canal físico de transmisión. Se necesita definir tanto un sistema de sondeo de la cual podemos extraer mediciones de varios puntos con configuraciones específicas. Planear las herramientas a usar, las técnicas a utilizar y la campaña de medición en sí también es parte del desafío, por lo que se decide incluir como parte de los objetivos a cumplir.

1.2. Estado del arte

El caso de un ambiente de pasillo es común entre los estudios que se enfocan en caracterizar un ambiente interior. En [1] se realizaron campañas en distintos lugares, incluyendo un corredor de 2.24m de ancho y 14.52m de longitud en 3.5 GHz a 300 MHz. Se encontró que la dispersión temporal RMS es de 26 ns y el ancho de banda de cohenrecia de 5.8 MHz.

[2] se mide en un corredor y se prueba con tres frecuencias distintas, entre ellas 2.4 GHz. Los resultados dieron 5.4 ns para dispersión temporal RMS.

La campaña en [3] también es realizada en un pasillo, utilizando 5 frecuencias distintas con un ancho de 500MHz. Se hizo notar que la dispersión temporal es

casi constante al cambiar la frecuencia central, pero que la potencia de la señal recibida depende fuertemente en la frecuencia.

El análisis hecho en un ambiente de oficina en [4] incluye el path loss (PL), la dispersión temporal RMS, y la relación de esta última con la variación de frecuencia central. Tanto este estudio como en [3] no encontraron una relación entre la dispersión RMS y la frecuencia central.

En [5] el análisis se enfoca en la dispersión temporal RMS, el ancho de banda de coherencia para configuraciones de igual polarización entre antenas y distintas polarización. Se encontró que dado que la configuración de igual polarización contiene mayores contribuciones del rayo directo, los valores de la dispersión temporal RMS son menores que para los de diferente polarización.

1.3. Objetivos

Dado todo lo anterior podemos entonces definir nuestros objetivos principales y específicos del trabajo:

- **Objetivo general:** Caracterizar un canal de transmisión inalámbrica de tipo interior pasillo, para una frecuencia de 2.4GHz y 3.5 GHz.
- **Objetivos específicos:**
 1. Calibrar la unidad de sondeo en una cámara anecoica.
 2. Realizar campañas de medición para obtener bases empíricas del modelo a proponer empleando diferentes configuraciones del sistema de radio-propagación, principalmente diferentes polarizaciones y distancias de separación.
 3. Describir el comportamiento del canal inalámbrico mediante los siguientes parámetros: ancho de banda de coherencia, dispersión temporal RMS y el modelo que describe la relación entre los dos.

1.4. Desarrollo del escrito

En este informe presentamos algunas de las características de propagación correspondientes a un ambiente interior de pasillo, basados en mediciones centrados en 2.45 GHz y 3.55 GHz, tomando diferentes configuraciones en cuanto a distancias y polarización. El capítulo 2 desarrolla la base teórica para las siguientes características: Perfil de potencia de retraso, dispersión temporal RMS y ancho de banda de coherencia. El capítulo 3 describe detalladamente las decisiones hechas

para la campaña de medición. Revisamos los resultados del procesamiento de datos en el capítulo 4 y resumimos las conclusiones en el capítulo 5.

Capítulo 2: Fundamentos teóricos

2.1. Interferencia intersimbólica

Como consecuencia del fenómeno multi-trayectoria, uno de los problemas principales que afecta la transmisión inalámbrica es la interferencia inter-simbólica (ISI). Varias de estas trayectorias son producidas por reflexiones, las cuales se suman en el receptor con la misma forma de la señal pero retrasada en el tiempo, con magnitud disminuida y desfasada. Este fenómeno impacta en situaciones donde se transmite un símbolo después de otro, tal como en el contexto de una transmisión digital inalámbrica, donde las reflexiones del primero interfieren en el siguiente introduciendo distorsión.

Podemos pensar en este espacio físico como un sistema de dos puertas, donde su función de transferencia incluye la pérdida de propagación más la suma de las reflexiones multi-trayectoria. El canal inalámbrico se puede denotar como la suma de la línea de vista más todas las reflexiones. La forma de la función de transferencia depende altamente de las propiedades del lugar físico: si es interior o exterior, de que materiales son hechos los pisos y las paredes, o si hay presencia de obstáculos en la línea directa.

2.2. Perfil de potencia de retraso

Es posible visualizar con más claridad las reflexiones en relación a los tiempos de retrasos τ a través de la respuesta a impulso del canal $h(t, \tau)$. Para obtener esto aplicamos la transformada inversa de Fourier a la función de transferencia H_{ch} en (2.2.1) [6].

$$h(t, \tau) = IDFT\{H_{ch}(f, \tau)\} \quad (2.2.1)$$

El perfil de potencia de retraso, o PDP instantáneo, es obtenida a través del

cuadrado de la magnitud de h . Lo llamamos instantáneo dado que depende no solo del delay bin τ si no que también del tiempo en el que se realiza la medición. Asumiendo ergodicidad, el PDP medio es obtenido aplicando la media en función de t , librando la influencia del tiempo y dejando la función solo en términos de τ :

$$PDP(t, \tau) = |h(t, \tau)|^2 \quad (2.2.2)$$

$$PDP(\tau) = E[|h(t, \tau)|^2] \quad (2.2.3)$$

2.3. Retardo promedio y dispersión temporal RMS

Dos parámetros que describen la cualidad de propagación de un canal multi-trayectoria es el retardo medio en exceso (τ_{mean}) y la dispersión temporal RMS (τ_{RMS}). Este último es útil para estimar la velocidad máxima de flujo de datos de un sistema que puede evitar ISI. El parámetro τ_{mean} representan el primer momento en el que llega una de las reflexiones multi-trayectoria, y se calcula según 2.3.1 donde L corresponde al total de los delay bins τ . [6]

$$\tau_{mean} = \frac{\sum_{\tau=1}^L PDP^2(\tau)\tau}{\sum_{\tau=1}^L PDP(\tau)} \quad (2.3.1)$$

Usando este parámetro calculamos τ_{RMS} , valor que representa el tiempo de retraso donde ciertas reflexiones se puede considerar como "significativas". Éste se calcula como:

$$\tau_{RMS}^2 = \frac{\sum_{\tau=1}^L PDP(\tau)(\tau - \tau_{RMS})^2}{\sum_{\tau=1}^L PDP(\tau)} \quad (2.3.2)$$

2.4. Ancho de banda de coherencia

Otro parámetro que nos ayuda corresponde al ancho de banda de coherencia B_c . Corresponde al rango de frecuencia con respecto a la frecuencia central en la que el sistema se puede considerar "plano" (con ganancia unitaria y fase lineal). Dos frecuencias dentro de este rango tienen alto potencial de correlación de amplitud.

En otras palabras, se define como la distancia espectral que se toma con respecto a la frecuencia central antes de que la función de autocorrelación $|R(f)|$ decaiga a cierto umbral. Valores menores a este umbral la señal puede considerarse

aproximadamente con ganancia unitaria y en fase (desvanecimiento plano). En caso contrario ocurre desvanecimiento selectivo en frecuencia y desde ahí ocurre interferencia intersimbólica. Matemáticamente B_c se obtiene calculando el rango espectral f tal que $R(f) = c$, con c siendo el nivel de correlación. La función de auto-correlación es calculada como en la ecuación (2.4.1).[6]

$$R(\Delta f) = E[H(f)^*H(f + \Delta f)] \quad (2.4.1)$$

Se ha propuesto una relación entre B_c y τ_{RMS} que es inversamente proporcional. Una de las varias ecuaciones que se han propuesto es definido por un coeficiente *alpha* en la forma:

$$B_c = \frac{1}{\alpha\tau_{RMS}} \quad (2.4.2)$$

2.5. Resumen

En esta sección se han descrito las variables que mediremos en la campaña de medición, dando sus definiciones y mostrando cómo teóricamente podemos calcularlos. Debemos medirlos para describir el canal físico de pasillo interior con dos antenas direccionales. Las variables que se han elegido son el perfil de potencia de retraso, la dispersión temporal RMS y el ancho de banda de coherencia.

Capítulo 3: Campaña de medición

Uno de los objetivos es diseñar y utilizar un canal de sondeo. Para esto hay que diseñar en qué consistirá el canal, averiguar cuánto influye en las estimaciones las pérdidas de cada componente del sistema y cómo restar esta influencia. La Figura 1 muestra un diagrama de bloques que explica cómo funciona este sistema. Una unidad de medición envía a la puerta S1 una señal en una frecuencia dada. Ésta es conectada a una antena transmisora cuya transmisión es capturada por una antena receptora, también conectada a la unidad de medición a través de la puerta S2. La estimación $S21$ corresponde a la resta entre la puerta S1 y la S2. Se decide que la unidad de medición corresponde a un VNA, las antenas serán direccionales

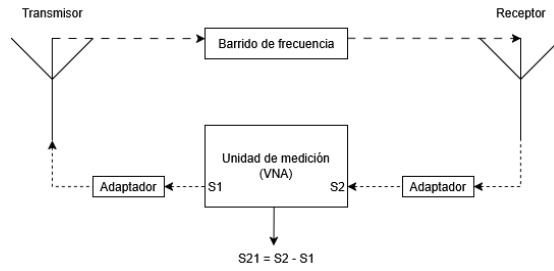


Figura 1. Diagrama de bloques del canal de sondeo

y para acomodar las distancias se utilizan adaptadores que conectan más de un cable. A continuación se revisan las componentes del canal de sondeo y la forma en que se calibra, o sea, se descuentan las pérdidas propias del sistema.

3.1. Calibración

Los valores que son obtenidos como salida del VNA son esencialmente la diferencia entre la potencia recibida en la puerta de recepción y la enviada a la puerta de transmisión. La variable S_{21} corresponde al valor complejo de esta diferencia, ejemplificada en el diagrama que se muestra en la Figura 1. Esta variable contiene varias de las ganancias y pérdidas que son entregados tanto por la unidad de sondeo como la trayectoria medida. Generalmente se puede resumir con la ecuación (3.1.1), donde G_{Tx} y G_{Rx} corresponden a las ganancias de las antenas, H_{ch} es la pérdida causada por la trayectoria en el espacio, y $L_{sistema}$ corresponde a las pérdidas dadas por los mecanismos internos de la VNA más los cables y los adaptadores usados.

$$S_{21}(f) = G_{Tx}(f)G_{Rx}(f)L_{sistema}(f)H_{ch}(f) \quad (3.1.1)$$

El interés principal se encuentra únicamente en las pérdidas del canal físico H_{ch} , por lo que es necesario obtener G_{Tx} , G_{Rx} y $L_{sistema}$ para restar sus influencias en las mediciones obtenidas por el VNA. Las dos primeras son dadas por el proveedor y la tercera se obtiene calibrando el canal de sondeo.

Para esto se utiliza la cámara anecoica provista por la Universidad Técnica Federico Santa María. La Figura 2 presenta la configuración que se usó para el proceso de calibración dentro de esta cámara. Dentro de la cámara anecoica no se registran reflexiones, por lo que las pérdidas de trayectoria pueden describirse por la ecuación de transmisión de Friss descrita en (3.1.2). Según esta ecuación las pérdidas que se pueden obtener a través de $L_{fs} = 20\log((4\pi d)/\lambda)$.

$$P_r^{dBm} = P_t^{dBm} + G_t^{dB} + G_r^{dB} + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)[dB] \quad (3.1.2)$$

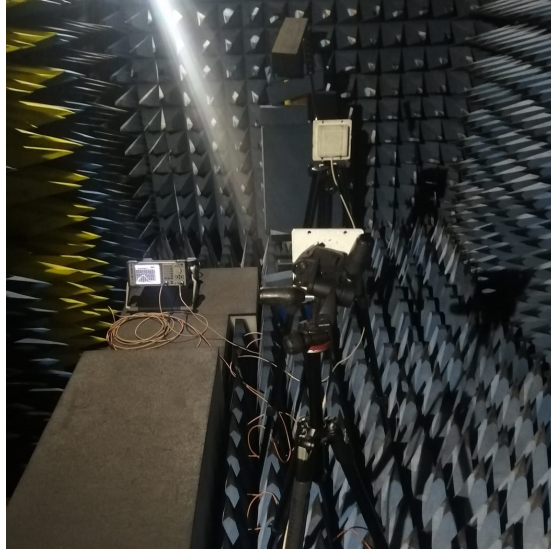


Figura 2. Foto de la cámara anecoica con un sistema de unidad siendo medida

Las pérdidas del canal de sondeo ($L_{sistema}$) son obtenidos en dB y calculados como la diferencia entre la potencia recibida en la VNA dentro de la cámara anecoica y las pérdidas de espacio libre más las ganancias de la antena y la potencia de transmisión. La fórmula (3.1.4) y (3.1.5) presenta el total de las componentes que son capturadas en la antena receptora en su forma logarítmica. El valor que nos interesa es $L_{sistema}$, que incluye las pérdidas asociadas al sistema de sondeo como errores sistemáticos o aleatorios. Prx corresponde a los datos extraídos directamente del analizador. Los modelos de las antenas y sus ganancias correspondientes se muestran en la Tabla I.

Se asegura que la distancia entre las antenas, para cada caso, sea mayor a la distancia de Fraunhofer, la cual delimita los campos próximos y lejanos. Su ecuación es dada por 3.1.3, donde D es el diámetro máximo de la antena y λ es la longitud de onda de la frecuencia. Estas distancias son reportadas en la Tabla I. La distancia de Fraunhofer es mayor para 3.55 GHz dado que su relación con la frecuencia es directamente proporcional.

$$d_{fraunhofer} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.1.3)$$

$$P_{rx}^{dBm} = P_{tx}^{dBm} + G_{tx}^{dB} + G_{rx}^{dB} + L_{fs}^{dB} + L_{sistema} \quad (3.1.4)$$

$$L_{sistema} = P_{rx} - L_{fs} - (G_{tx} + G_{rx}) - P_{tx} \quad (3.1.5)$$

TABLA I. Detalles de antenas y distancias usadas.

Frecuencia (GHz)	Tipo Antena	Modelo	Diámetro (m)	Ganancia (dBi)	Distancia Fraunhofer (m)	Distancia en cámara (m)
2.45 GHz	Direccional Patch	HyperLink HG2409P	9 cm	8	0.132 m	0.880 m
2.45 GHz	Direccional Patch	HyperLink HG2409P	9 cm	8	0.132 m	0.880 m
3.55 GHz	Direccional Patch	HyperLink HG3509P	9 cm	8	2.134 m	2.310 m
3.55 GHz	Direccional Patch	AN 1074	30 cm	8	2.134 m	2.310 m

Este valor se usa en la etapa de procesamiento para compensar por la influencia de las herramientas usadas. Las antenas, cables y adaptadores son los mismos que se usan en la campaña de medición.

Los resultados son mostrados en las imágenes 3a y 3b. Se visualizan las magnitudes en dB de S21 extraído directamente del VNA, la pérdida de espacio libre y las pérdidas sin contar las ganancias de las antenas. Se muestran para el primer caso un rango de magnitud de 26.61 dB a 27.46 dB, con 27.25 dB en el centro, mientras que en el segundo se reporta un rango de 23.58 dB a 27.19 dB, con 25.86 dB en el centro. Ambas muestran un comportamiento lineal consistente con lo predicho por la ecuación de Friss. Para las frecuencias de 2.45 GHz se introduce un adaptador extra, lo que puede explicar que las pérdidas sean mayores a las de 3.55 GHz.

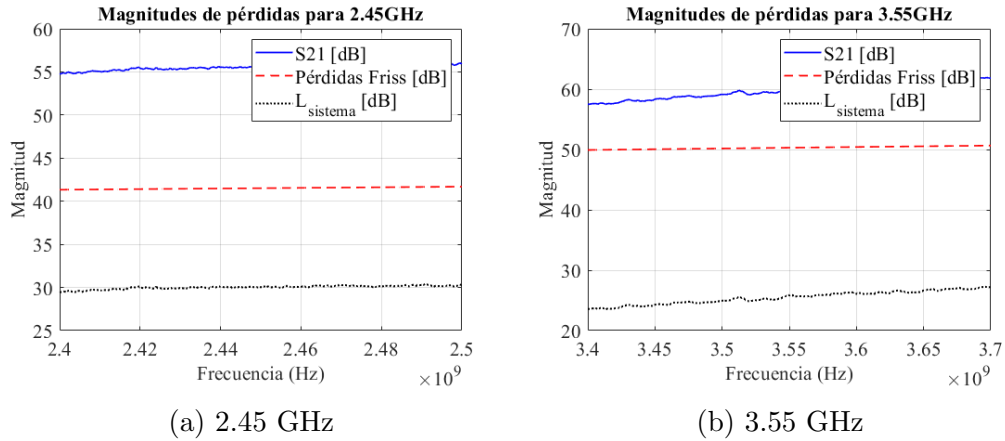


Figura 3. Magnitudes de pérdidas medidas en cámara anecoica

Los resultados de las pérdidas de Friss para cada frecuencia central son 41.5143 dB para 2.45 GHz y 50.2948 dB para 3.55 GHz. La forma en la que se calculan las pérdidas de sistema para el barrido de frecuencia es mostrado en las figuras en 3.1.8.



Figura 4. Foto del pasillo del tercer piso del departamento de electrónica UTFSM, Valparaíso Chile, donde se realiza la campaña de medición

$$S_{21} = P_{rx} - P_{tx} = (G_{rx} + G_{tx}) - L_{Friss} - L_{sistema} \quad (3.1.6)$$

$$S_{21} = 16dBi - L_{Friss} - L_{sistema} \quad (3.1.7)$$

$$L_{sistema} = 16dBi - S_{21} - L_{Friss} \quad (3.1.8)$$

3.2. Escenario

La campaña de medición se realizó en uno de los pasillos del segundo piso del Departamento de Electrónica de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) ubicado en Valparaíso, Chile. Sus paredes son reforzadas con concreto, su piso es de porcelana y cuenta con la presencia de varias puertas que llevan a laboratorios y oficinas. También resulta bastante espacioso, con dimensiones de 2.5 m de ancho y 4 m de altura. La Figura 4 muestra una foto de la antena transmisora en dirección al pasillo a caracterizar.

La unidad de sondeo será el sistema con la que caracterizaremos el ambiente interior de pasillo. Esta consiste en dos antenas direccionales tipo patch, un par con un ancho de banda de 3.4 - 3.7 GHz y otro par con 2.4 - 2.5 GHz, todas con ganancias de 8 dBi. El diagrama de esta unidad se muestra en la Figura 6. Cada antena es instalada en un trípode a una altura de 1.5 m del suelo, donde son conectadas a las puertas de la VNA Rhode&Schwarz ZVL a través de cables de baja potencia y tres adaptadores. Los datos fueron guardados en una memoria para futuro procesamiento en MATLAB.

TABLA II. Características de la unidad de sondeo.

Característica	Valor	
Frecuencia central	2.45 GHz	3.55 GHz
Ancho de banda	100 MHz	300 MHz
Resolución dominio del tiempo	10 ns	3.33 ns
Tipo de antena	Direccional Patch	
Potencia de transmisión	0 dBm	

Para eliminar el efecto de desvanecimiento a corto plazo, se realizaron 30 mediciones por cada enlace con la idea de promediar a una respuesta en frecuencia que solo considera la influencia del desvanecimiento a largo plazo. Cada medición es posicionadas en un arreglo de anillo con 12.3 m de diámetro. Cada posición en el anillo es separado por pasos de 12 grados, lo que asegura una distancia de por lo menos 8.33 cm (longitud de onda de una señal de 3.6 GHz) entre los puntos. Esto garantiza que no haya correlación entre las mediciones obtenidas. Se asiste con un brazo mecánico en la antena receptora programado por Arduino y controlado desde un laptop.

Cada medición consiste en un barrido de frecuencia con un intervalo de 100 MHz para la campaña de 2.45 GHz (2.4 GHz a 2.5 GHz) y de 300 MHz para la de 3.55 GHz (3.4 GHz y 3.7 GHz). Esto resulta en una resolución temporal de $10ns$ y de $3,33ns$ respectivamente, lo que significa que en cada caso no se puede discernir información en tiempos menores. El intervalo que se puede estudiar en cada caso son de $2000ns$ y $666,67ns$. Todos los parámetros son resumidos en la Tabla II. Se llevaron a cabo en total 8 tipos de enlace: separación de antenas de 6 m y 12 m y polarización horizontal-horizontal y horizontal-vertical.

En la campaña de medición sólo se tomó en cuenta los casos LOS (línea de vista) donde la vista entre las antenas están no obstruidas, y se descartaron los casos NLOS (no línea de vista), donde sí hay obstrucciones entre las antenas. LOS y NLOS son estudiadas frecuentemente como configuración espacial de antenas en un canal, pero que nosotros nos saltamos en este trabajo. La Figura 5 muestra un diagrama de como se posicionan las antenas para lograr cada enlace.

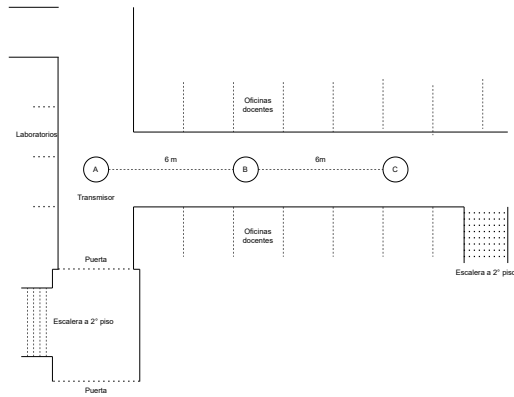


Figura 5. Plano del espacio físico a caracterizar y posiciones de las antenas (pasillo del tercer piso del departamento de electrónica UTFSM Casa Central)

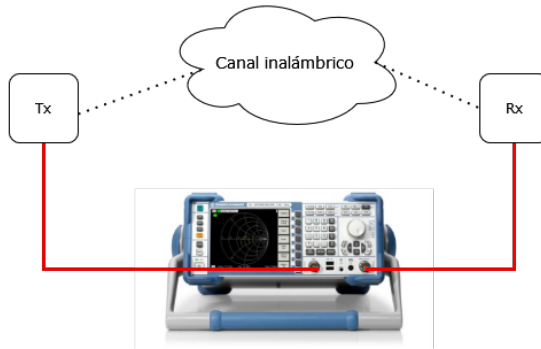


Figura 6. Diagrama de la unidad de sondeo

Capítulo 4: Resultados y Análisis

4.1. Procesamiento

Los datos de la campaña de medición que han sido exportados corresponden a S21 (dB) para magnitud y grados para los ángulos, juntos con las frecuencias

correspondientes. Lo primero que se calcula es la respuesta a impulso $H(f)$. Antes de utilizar la transformada inversa de Fourier una ventana Blackman-Harris es aplicada a $H(f)$ para descartar ruido de alta frecuencia causada por discontinuidad. El resultado de la media de todas las mediciones se le divide el valor obtenido por la calibración y se le aplica la función 'ifft' de MATLAB. Para evitar tomar en cuenta el ruido en el cálculo del τ_{RMS} se utilizan sólo los datos que se encuentran arriba de un umbral de -40 dBm por debajo del máximo valor del PDP normalizado.

Los PDP se muestran en las Figuras 8 y 7 para 2.45 GHz y 2.55 GHz respectivamente. Se puede apreciar el efecto de la distancia: el rayo directo para 12m a la derecha de ambas Figuras 8 y 7 tienen un mayor retraso que para 6 m a la izquierda. También se puede notar mayor presencia de componentes multi-trayectoria para la configuración de diferente polarización dado que el rayo directo no llega con menor potencia que en el caso opuesto. Sin embargo, se puede decir que en general las componentes multi-trayectoria no tienen el suficiente poder como para poder notarse en las figuras, y esto se asume como un error al no utilizar una mayor potencia de transmisión con tal de que se hagan notar.

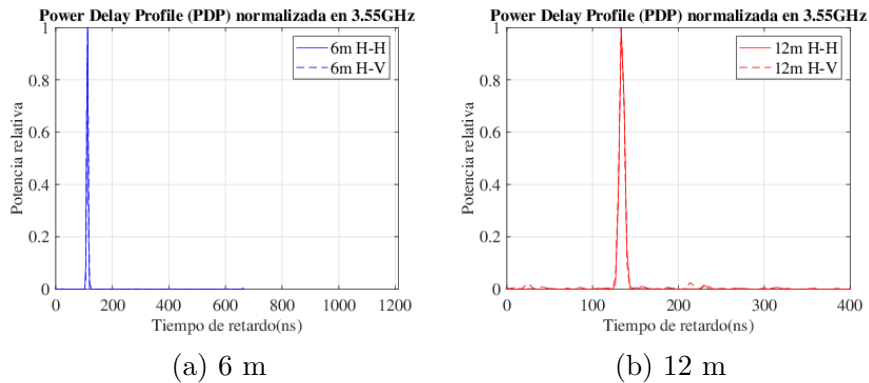
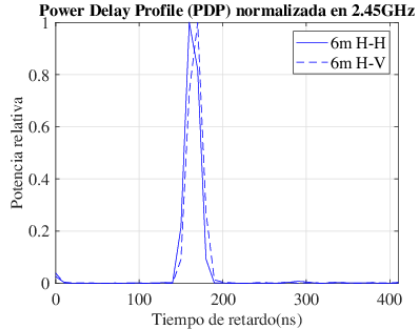
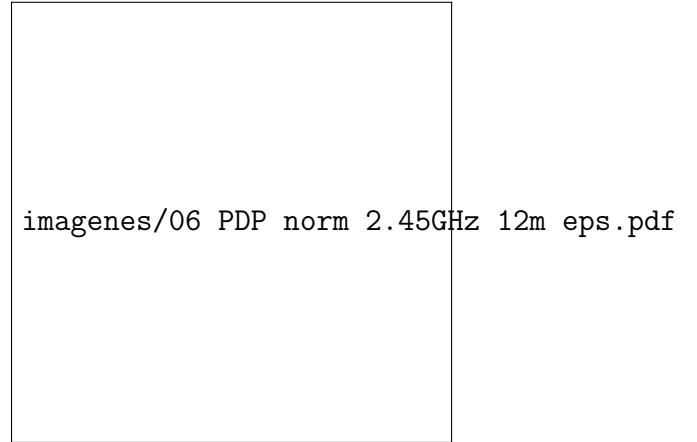


Figura 7. PDP para 3.55 GHz



(a) 6 m



(b) 12 m

Figura 8. PDP para 2.45 GHz

El ancho de banda de coherencia B_c es definido calculando la función de auto-correlación $R(\Delta f)$ dada por la ecuación 4.4.1. Se calcula tomando la función de transferencia $H(f)$, desplazarlo por un valor Δf múltiplo de la resolución de frecuencia correspondiente, multiplicar este valor por el conjugado de $H(f)$ y calcular la media de todas las multiplicaciones. De esta manera obtenemos la curva de auto-correlación en función de Δf . El B_c para un umbral c , entonces, se calcula como el valor Δf tal que $R(\Delta f) = c$. Los valores de c que se usan en el procesamiento de datos son 0.9 y 0.7, valores comúnmente usados en varios trabajos de caracterización.

Se han propuesto varios modelos para describir la relación entre τ_{RMS} y B_c ([5]), con el más estudiado siendo (4.1.1). Uno de los valores propuestos para α son de 2π ([7]), pero se han reportado valores más pequeño y variados en ambientes interiores ([2], [1]).

$$B_c = \frac{1}{\alpha \tau_{RMS}} \quad (4.1.1)$$

El factor α se calcula a través de MATLAB usando la técnica de mínimo cuadrados. Para cada frecuencia se utilizan los τ_{RMS} y los B_c del cada una del total de las 60 mediciones efectuadas. Así tendremos como resultado dos valores de α por frecuencia. Todos los resultados de los parámetros τ , $B_{0,9}$ y $B_{0,7}$ son mostrados en la Tabla III IV, para 3.55 GHz y 2.45 GHz respectivamente y V para los coeficientes α .

TABLA III. Resumen de parámetros de cada enlace para 3.55 GHz.

Enlace	Distancia	Polarización	Mean Excess Delay (ns)	Dispersión temporal RMS (ns)	Ancho de banda de coherencia (MHz)	
					c = 0.9	c = 0.7
A-B	6 m	Horizontal-Horizontal	112.13	2.45	16.5	36
A-B	6 m	Horizontal-Vertical	113.14	3.99	13.5	34.5
A-C	12 m	Horizontal-Horizontal	131.21	10.15	3	25.5
A-C	12 m	Horizontal-Vertical	124.70	26.13	3	15

TABLA IV. Resumen de parámetros de cada enlace para 2.45 GHz.

Enlace	Distancia	Polarización	Mean Excess Delay (ns)	Dispersión temporal RMS (ns)	Ancho de banda de coherencia (MHz)	
					c = 0.9	c = 0.7
A-B	6m,	Horizontal-Horizontal	163.32	26.65	1	2.5
A-B	6m,	Horizontal-Vertical	165.13	29.06	1	1
A-C	12m,	Horizontal-Horizontal	182.91	63.53	1	2.5
A-C	12m,	Horizontal-Vertical	169.19	70.02	1	1

TABLA V. Valores de constante α para regresión lineal.

Frecuencia (GHz)	c = 0.9	c = 0.7
2.45	20.863	9.574
3.55	4.481	1.266

4.2. Análisis

Los parámetros τ_{RMS} y B_c proveen indicaciones directas que son útiles para cualquier planificador que necesite instalar redes de 5G en ambientes interiores. El valor de τ_{RMS} para 2.45 GHz nos entrega 26.66 ns y 29.06 ns, disimilares a las obtenidas en [8]. Esto se puede atribuir al efecto de sobrestimación producida por la ventana Blackman-Harris. Los valores para el estudio anterior son alrededor de 6.32 ns a 12.21 ns para 2.4 GHz con 500 MHz de ancho de banda.

En el caso de 3.55 GHz, nuestros resultados son de 8.7 ns para 6 m y 9.54 ns para 12 m. [9] calcula 10.55 ns para 100 MHz y 9.42 ns para 200 MHz en un mismo ambiente de corredor. La disminución general de los valores al pasar de 2.45 GHz a 3.55 GHz se puede explicar como consecuencia de aumentar el ancho de banda de transmisión ([9]) más que por el cambio de frecuencia central, dado que no se han encontrado relación clara entre frecuencia central y τ_{RMS} ([3], [10]).

El hecho de que ambas antenas son direccionales y fueron ubicadas en una misma altura pueden explicar los valores pequeños de τ_{RMS} , ya que podemos observar en 8a y 7a que el rayo directo domina por sobre las reflexiones, haciendo ver como si fuera un impulso. Las Figuras 8b y 7b muestran la presencia de reflexiones alrededor de 50 ms después del rayo directo.

Los valores de τ_{RMS} disminuye en promedio con respecto a la distancia de enlaces. Esto resulta una confirmación de la teoría también reportada en [4].

Se puede notar la relación proporcionalmente inversa entre τ_{RMS} y B_c en III, lo cual es consistente con lo reportado en [8]. Los valores para $B_{0,9}$ van entre 3 a 4.5 MHz, menor de lo que se reporta en [1].

El aumento en la distancia provoca mayor τ_{RMS} en la función de auto-correlación, tal como se nota en las Figuras 9 y 10, sobre todo cuando se conFiguran con polarización distinta. Estas irregularidades son consecuencia de una presencia más marcada de las reflexiones multi-trayectoria. Los anchos de banda para 2.45 GHz y 100 MHz tienen una pendiente más alta que en el caso de 3.55 GHz y 300 MHz.

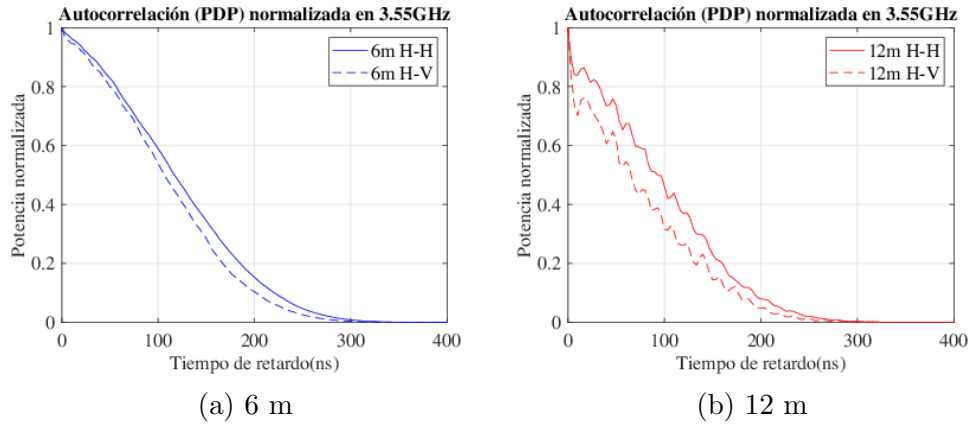


Figura 9. Curvas de auto-correlación para 3.55 GHz

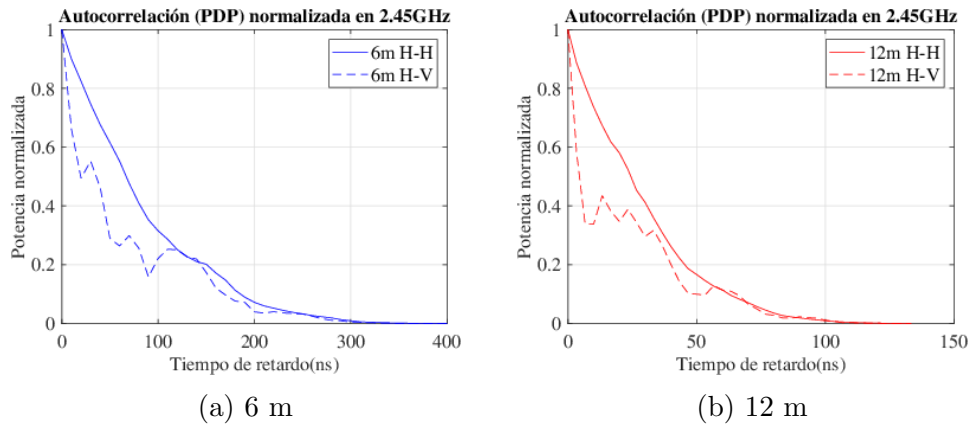


Figura 10. Curvas de auto-correlación para 2.45 GHz

La relación entre τ_{RMS} y B_c se muestran en las Figuras 12 y 11. La primera muestra que los valores se desvían de la regresión lineal en menor grado que la primera. La Tabla V reporta un valor de 4.481 para 0.9 para 3.55 GHz, lo cual es consistente con los valores de entre 4 a 6 que se reportan en la literatura

([1], [8]). Para el segundo caso los valores reportados por [8] son de 16,9 y 4,49 respectivamente, la cual mantiene la proporcionalidad pero difiere en magnitud. Esto puede ser por el efecto de sobre-estimación de la ventana.

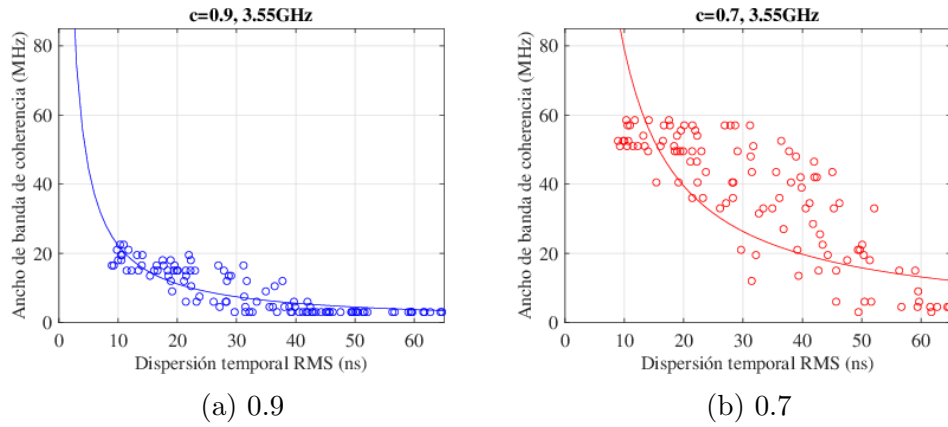


Figura 11. Curvas para dispersión temporal RMS vs ancho de banda de coherencia en 2.45 GHz

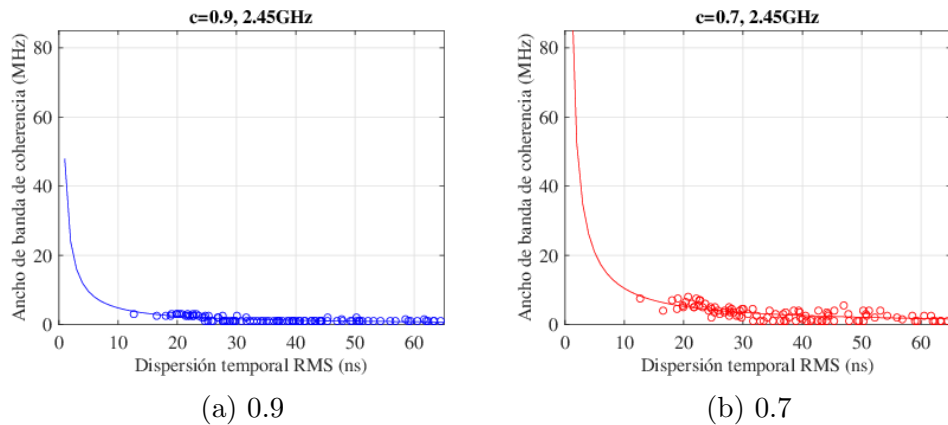


Figura 12. Curvas para dispersión temporal RMS vs ancho de banda de coherencia en 3.55 GHz

Capítulo 5: Conclusiones

A través de los datos coleccionados en nuestra campaña de medición se caracterizó un ambiente interior del pasillo. Nos hemos enfocado en las frecuencias centrales de 2.45 GHz y 3.55 GHz con 100 MHz y 300 MHz de ancho de banda respectivamente. No se planea el estudio con diferentes anchos de banda dado que se adapta a las dadas por las antenas disponibles, aunque el estudio más amplio del efecto a diferentes anchos de banda puede ser considerado para una futura investigación.

Primero se mide las pérdidas entregadas por la unidad de sondeo que se utiliza dentro de una cámara anecoica, y luego se traslada al pasillo y se mide las pérdidas para ciertas combinaciones de separación entre antenas y polarización. Usando MATLAB se calcula la dispersión temporal RMS y el ancho de banda de coherencia.

Se observa un aumento de la dispersión al disminuir la frecuencia en ambos casos de polarizaciones. Esto se conecta con el cambio de ancho de banda de transmisión más que por la frecuencia. Los valores de dispersión temporal RMS disminuye a medida que se aumenta la distancia y se proponen razones que pueden explicar este resultado. En cuanto al ancho de banda de coherencia, el aumento en la distancia provoca mayor dispersión en la función de auto-correlación, la cual es exaltada al operar en polarizaciones distintas dada la mayor influencia de las componentes multi-trayectoria.

Se revisa la relación entre la dispersión temporal RMS y el ancho de banda de coherencia para ambos niveles de correlación c usando un modelo hiperbólico. Los resultados han dado mayores resultados que los reportados en otros experimentos

Estos resultados pueden servir como una ayuda al momento de instalar sistemas 5G en un ambiente interior de pasillo, así como un incentivo para desarrollar simulaciones de canales inalámbricos. Además, estos resultados han podido confirmar otros reportados anteriormente, lo cual crea la necesidad futuras investigaciones para seguir confirmando estos análisis. Se recomienda, como una mejora, el uso de amplificadores para que las componentes multi-trayectorias

estén más presentes en los resultados.

Bibliografía

1. Debaenst, W., Feys, A., Cuiñas, I., García Sánchez, M. y Verhaevert, J. RMS Delay Spread vs. Coherence Bandwidth from 5G Indoor Radio Channel Measurements at 3.5 GHz Band. *Sensors* **20**, 750. ISSN: 1424-8220. <http://dx.doi.org/10.3390/s20030750> (ene. de 2020).
2. Janssen, G., Stigter, P. y Prasad, R. Wideband indoor channel measurements and BER analysis of frequency selective multipath channels at 2.4, 4.75, and 11.5 GHz. *IEEE Transactions on Communications* **44**, 1272-1288. ISSN: 0090-6778. <http://dx.doi.org/10.1109/26.539768> (1996).
3. Jamsa, T., Hovinen, V., Karjalainen, A. y Linatti, J. Frequency dependency of delay spread and path loss in indoor ultra-wideband channels. <http://dx.doi.org/10.1049/ic:20060520> (2006).
4. Huang, F., Tian, L., Zheng, Y. y Zhang, J. *Propagation Characteristics of Indoor Radio Channel from 3.5 GHz to 28 GHz* en *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* (IEEE, sep. de 2016). <http://dx.doi.org/10.1109/vtcfall.2016.7881180>.
5. Varela, M. y Sanchez, M. RMS delay and coherence bandwidth measurements in indoor radio channels in the UHF band. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **50**, 515-525. ISSN: 0018-9545. <http://dx.doi.org/10.1109/25.923063> (mar. de 2001).
6. Rappaport, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice* (Prentice Hall, 2001).
7. Jakes, W. C. *Microwave Mobile Communications* ISBN: 0470545283. <http://dx.doi.org/10.1109/9780470545287> (IEEE, 1994).
8. Rolando Bettancourt O Héctor Carrasco E, R. F. L. Medición de ancho de banda de coherencia y dispersión temporal en la banda de 2.4GHz en ambientes interiores. *Revista Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá* **13**, 30-37. ISSN: 0718-1337. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-13372005000300005> (dic. de 2005).
9. Hadji S.E. and Nedil, M., Seddiki, M. y Mabrouk, I. *Wideband Indoor Channel characterization of Massive MIMO System at 3.5 GHz* en *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)* (IEEE, dic. de 2021). <http://dx.doi.org/10.1109/aps/ursi47566.2021.9704661>.

-
10. Xu, C., Zhang, J., Zheng, Q., Yu, H. y Tian, L. *Measurement-based delay spread analysis of wideband massive MIMO system at 3.5 GHz* en *2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)* (IEEE, mar. de 2017). <http://dx.doi.org/10.1109/compem.2017.7912838>.

Fecha: 11 de junio de 2025