



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



**“CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES AL PROPAGAR ONDAS
ELECTROMAGNÉTICAS, OBTENIENDO LA PERMITIVIDAD”**

**REPORTE DE RESIDENCIA DE INVESTIGACIÓN
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

PRESENTA

CARLOS OCADIZ GONZÁLEZ

ASESOR: DRA. LAURA LUZ VALERO CONZUELO

CO-ASESOR: DR. GIORGIO MACKENZIE CRUZ MARTÍNEZ

ASESORES EXTERNOS: DR. JUAN PASCUAL GARCÍA

JOSÉ MARÍA MOLINA GARCÍA-PARDO





RESUMEN

El presente trabajo de titulación reporta la estancia de investigación realizada en la Universidad Politécnica de Cartagena, en Cartagena España, con el Grupo de investigación Sistemas de Comunicaciones Móviles (SiCoMo), donde se describe los conceptos más importantes de experimentación de las tecnologías de frontera 4G y 5G.

La estancia de residencia de investigación realizada se estableció bajo el convenio de colaboración interinstitucional de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) y la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) en España, con el fin de formación de recursos humanos e intercambio de conocimientos en áreas tan especializadas como es la electrónica de telecomunicaciones, enfocándose en la residencia en la tecnología de medición de ondas electromagnéticas, y su comportamiento en diferentes materiales.

A lo largo de este reporte se refleja la serie de conocimientos y experiencias del trabajo de investigación realizado con el grupo SiCoMo dentro de los cuales se enumera los conceptos importantes de telecomunicaciones aplicadas a tecnologías 4G y 5G, y la formación adquirida como residente investigador en la aplicación de una tecnología de alta generación que promete resultados de alto impacto en el área de las comunicaciones. Se presenta el desarrollo de pruebas experimentales para valorar la permitividad de ondas electromagnéticas, así como su valoración dentro de un sistema propio del grupo de investigación que va desde el lanzamiento de rayos utilizando diferentes sistemas, conocer el comportamiento de las ondas electromagnéticas haciendo uso de simuladores y equipos especializados de medición, así como el uso de antenas.



ABSTRACT

The present qualifications work brings the stay of investigation realized in the Polytechnical University of Cartagena, in Cartagena Spain, with the Group of investigation Systems of Mobile communications (SiCoMo), where there are described the most important concepts of technologies of border 4G and 5G.

The stay of residence of realized investigation was established under the agreement of interinstitutional collaboration of the University of the State of Mexico (UAEM) and the Polytechnical University of Cartagena (UPCT) in Spain, in order to formation of human resources and exchange of knowledge in areas as specializing as it is the telecommunications electronics focusing in the residence in the technology of measurement of electromagnetic waves, and its behavior in different materials.

Along this report there is reflected the series of knowledge and experiences of the research work realized with the group SiCoMo inside which there are enumerated the important concepts of telecommunications applied to technologies 4G and 5G and the formation acquired like investigative resident in the application of a technology of tall generation who promises results of high impact in the field of the communications. The development of experimental tests appears to value the electromagnetic waves permittivity, as well as its evaluation inside a proper system of the group of investigation that goes from the beams throwing using different systems, to know the behavior of the electromagnetic waves making use of pretenders and specializing teams of measurement, as well as the use of antennas.



INDICE

TABLA DE ILUSTRACIONES.....	9
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO 1.....	12
INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES.....	12
Historia sobre las primeras comunicaciones móviles.....	12
Primeras aplicaciones de telefonía inalámbrica.....	12
Redes móviles privadas.....	13
Sistemas de telefonía móvil.....	13
Los sistemas celulares: digitalización.....	14
Bandas de frecuencia.....	15
Dispositivos inalámbricos móviles.....	15
Sistemas de localización o búsqueda.....	16
Sistemas de telefonía inalámbrica.....	16
Sistemas de telefonía móviles: celulares.....	16
CAPITULO 2.....	17
CARACTERIZACIÓN DEL CANAL MÓVIL EN GRAN ESCALA (“Large Scale Fading” o “Long Term Fading”).....	17
Propagación de señales electromagnéticas.....	17
Formas de propagación de las ondas electromagnéticas.....	18
Efecto multi-trayecto.....	19
Modelo de espacio libre: rayo directo.....	20
Mecanismos de propagación.....	20
<i>Reflexión.....</i>	<i>20</i>
<i>Difracción.....</i>	<i>20</i>
<i>Difusión (“Scattering”).....</i>	<i>20</i>
CAPITULO 3.....	21
CARACTERIZACIÓN CANAL MÓVIL EN PEQUEÑA ESCALA (“Small Scale Fading”).....	21
Lanzador de rayos.....	21
Propagación radioeléctrica para un lanzador de rayos.....	23



Rayo directo.....	23
Reflexión.....	24
Permitividad dieléctrica compleja.....	25
Polarización.....	26
<i>Lineal</i>	26
<i>Circular</i>	26
Capítulo 4.....	28
EQUIPOS DE MEDICIÓN Y CAMPAÑAS DE MEDIDAS.....	28
Introducción.....	28
Computadora (laptop).....	29
Analizador de redes vectorial (VNA) Rhode ZVA67.....	29
Antena de cuerno de ganancia estándar MOD 27240.....	30
Convertidor de ondas milimétricas ZVA-Z110E.....	31
Posicionador lineal de un solo eje de arrick robotics.....	32
Metodología de campañas de medidas.....	34
RESULTADOS.....	37
I.- CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	37
Estimación de la permitividad.....	37
II.-SIMULADOR LANZADOR DE RAYOS UTILIZANDO EL PROGRAMA UNITY.....	45
CONCLUSIONES.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	54
GLOSARIO DE TERMINOLOGIA.....	56
APÉNDICE A.....	58
APÉNDICE B.....	61



TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1 <i>Transmisión del canal móvil</i>	17
Figura 2 <i>formas de ondas electromagnéticas</i>	18
Figura 3 <i>caminos de propagación</i>	20
Figura 4 <i>Lanzador de rayos y su área de recepción</i>	22
Figura 5 <i>Polarización lineal Horizontal</i>	26
Figura 6 <i>Polarización Lineal Vertical</i>	26
Figura 7 <i>Polarización Circular</i>	27
Figura 8 <i>Esquema general del escenario</i>	28
Figura 9 <i>Computadora (LAPTOP)</i>	29
Figura 10 <i>Analizador de redes Rohde ZVA67</i>	30
Figura 11 <i>Analizador de redes montado</i>	30
Figura 12 <i>Especificaciones</i>	30
Figura 13 <i>Antena MOD 27240</i>	30
Figura 14 <i>Antena colocada a uno de los convertidores</i>	31
Figura 15 <i>Convertidor de ondas milimétricas ZVA-Z110E</i>	31
Figura 16 <i>Convertidor de ondas en el laboratorio</i>	32
Figura 17 <i>Posicionador lineal de un solo eje</i>	32
Figura 18 <i>Control MD2, C4 y motores de paso</i>	33
Figura 19 <i>Convertidores montados sobre los posicionadores lineales</i>	33
Figura 20 <i>Escenario real montado en el edificio ELDI</i>	34
Figura 21 <i>Calibración de los convertidores de ondas milimétricas</i>	34
Figura 22 <i>Bases cuadradas para colocación de materiales</i>	35
Figura 23 <i>Material en configuración rayo directo</i>	36
Figura 24 <i>Gráfica de la potencia recibida sin material entre Tx y Rx</i>	39
Figura 25 <i>Grafica de la potencia recibida con material entre Tx y Rx</i>	40
Figura 26 <i>Modelo de transmisión de las ondas electromagnéticas en el material</i>	41
Figura 27 <i>Transmisión medida y simulada en espacio libre. El eje horizontal es la frecuencia en GHz y el eje vertical el valor de transmisión en valor absoluto [0,1]</i>	42
Figura 28 <i>Transmisión medida y simulada para aglomerado. El eje horizontal es la frecuencia en GHz y el eje vertical el valor de transmisión en valor absoluto [0,1]</i>	42
Figura 29 <i>Transmisión medida y simulada para el material pino. Eje horizontal es la frecuencia en GHz y el eje vertical el valor de la transmisión en valor absoluto [0,1]</i>	43
Figura 30 <i>Transmisión medida y simulada para el material aglomerado. Eje horizontal es la frecuencia en GHz y el eje vertical el valor de la transmisión en valor absoluto [0,1]</i>	44

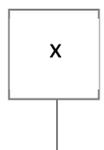


INTRODUCCIÓN

El Desarrollo e implementación de modelos de propagación electromagnéticos para la predicción de parámetros del canal de radiocomunicaciones es una de las funciones prioritarias del grupo de investigación SiCoMo de la UPCT, en esta línea se desarrollan modelos de propagación que estiman las pérdidas por propagación, la dispersión en el tiempo y en el espacio de la señal introducidas por el canal de radiocomunicaciones. Los modelos son desarrollados a partir de teorías electromagnéticas de Óptica Física y Óptica Geométrica, junto con técnicas de trazado de rayos y son implementados en un lenguaje de alto nivel como el C++. Actualmente, se está investigando en entornos microcelulares urbanos y entornos especiales como túneles, desarrollando modelos para canales MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) que consiguen mayores velocidades de transmisión de datos ya en la interfaz radio sin necesidad de mayor ancho de banda.

El programa educativo de ingeniería en electrónica contiene en su plan curricular un área importante en comunicaciones, por lo cual fue motivante contactar al grupo SiCoMo para poder aprender y experimentar tecnologías de medición de vanguardia.

Las medidas que se realizan en el laboratorio investigación de comunicaciones de la UPCT están encaminadas a validar y ajustar los modelos de propagación desarrollados y a conocer las particularidades del canal de radiocomunicaciones en cada tipo de entorno (rural, urbano, interiores, etc.). Además de medidas en banda estrecha para estimar las pérdidas por propagación y que encuentran aplicación en la planificación de sistemas de comunicaciones móviles de primera y segunda generación (como el GSM), en estos momentos, se están llevando a cabo medidas de banda ancha que evalúan no sólo las pérdidas sino también la dispersión del canal en el tiempo y en el espacio y que encuentran aplicación en sistemas de tercera generación como el UMTS. Las medidas se centran en entornos microcelulares y entornos especiales como túneles. Sus líneas de investigación más importantes son: Desarrollo de prototipos y planificación de redes de sensores, Desarrollo e implementación de modelos de propagación electromagnéticos para la predicción de parámetros del canal de radiocomunicaciones, Medidas experimentales del canal de radiocomunicaciones.





El grupo de investigación de Sistemas de comunicaciones móviles (SiCoMo), está integrado por los siguientes investigadores: el *Investigador Responsable*: Dr. D. José María Molina García-Pardo, *Investigador*. Dr. D. Leandro Juan Llácer, *Investigador*. D. Juan Pascual García; quienes estuvieron como tutores durante la estancia de investigación realizada

El objetivo de esta estancia de investigación fue Caracterizar diferentes materiales para obtener su permitividad relativa compleja, excitando cada material con ondas electromagnéticas a una frecuencia en el rango de los GHz.

Dado los avances en tecnología en 4G y 5G se justifica la necesidad del desarrollo de metodologías de reconocimiento de la permitividad en diferentes materiales para lograr sistemas de comunicaciones móviles más eficientes y que no afecten la salud.

El contenido de este reporte de Residencia de Investigación está estructurado de la siguiente forma:

Capítulo 1: Se realiza una introducción a los sistemas de comunicaciones móviles, a la evolución de las comunicaciones partiendo desde sus inicios, así también de las aplicaciones que han existido.

Capítulo 2: Se describe sobre cómo se realiza la Caracterización del canal móvil a gran escala, entendiendo las formas y tipos de propagación de las ondas electromagnéticas a gran escala, se explica el efecto multirayecto y por último explica el modelo de espacio libre, en específico para el rayo directo.

Capítulo 3: Se describe como se realiza la caracterización del canal móvil pero ahora a pequeña escala, qué tipos de canales cronovariantes son los más importantes y como objetivo principal del capítulo, comprender el funcionamiento de un lanzador de rayos y conocer sus características principales.

Capítulo 4: Se detallan los equipos de medición utilizados y como se elaboran las campañas de medidas para llevar a buen término la investigación

Resultados: Se divide en dos partes importantes, en la primera parte se describen los resultados obtenidos al realizar las campañas de medidas para cada uno de los materiales, gráficas obtenidas en Matlab. La segunda parte se habla sobre un simulador lanzador de rayos, utilizando como plataforma de desarrollo Unity, se anexan imágenes y códigos y finalmente se presentan las conclusiones de la estancia de investigación



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES.

Historia sobre las primeras comunicaciones móviles

Los primeros experimentos relacionados con la transmisión de energía electromagnética se remontan al año de 1831, año en el que Michael Faraday demostró la inducción electromagnética.

En el año de 1864 James C. Maxwell presentó un trabajo teórico en el que presentaba un conjunto de ecuaciones que permitían explicar los principales fenómenos electromagnéticos.

En el año de 1886 llegó la demostración práctica cuando Heinrich Hertz utilizó una chispa eléctrica de suficiente intensidad y un receptor diseñado adecuadamente.

En el año de 1895 se consiguió la transmisión de señales de telegrafía a una distancia de 2.5 km.

En 1899, **la señal de telegrafía** superó el canal de la Mancha y en 1900 la onda se transmitió más allá de una distancia de 300km. En aquel entonces se creía que las ondas electromagnéticas eran lineales y que serían incapaces de superar o seguir la curvatura de la superficie terrestre.

En 1901 Marconi estableció la primera comunicación inalámbrica más allá del atlántico (3500 km) entre USA y Gran Bretaña.

La primera transmisión de voz inteligible fue llevada a cabo por Graham Bell en 1876. [1]

Primeras aplicaciones de telefonía inalámbrica

Antes de la primera guerra mundial existían entre 2000 y 3000 sistemas o aparatos inalámbricos en todo el mundo, Gran Bretaña tenía la mayor parte.

La Primer Guerra Mundial (1914-1918) impulsó el desarrollo de sistemas inalámbricos, principalmente para la marina. Los primeros experimentos corresponden a los realizados en el departamento de policía de Detroit en 1921. El sistema utilizaba la modulación AM y una banda de alta frecuencia para la época (1.5-3.0 MHz), la transmisión de voz era bidireccional pero no simultánea.



En la telefonía inalámbrica bidireccional la FM se introdujo en 1940, a partir desde entonces prácticamente todos los sistemas de telefonía inalámbricos utilizaron esta modulación hasta la digitalización en los años 90. [1]

Redes móviles privadas

Red móvil privada (**PMR**-Private Mobile Radio, por sus siglas en inglés) es una red de comunicaciones móviles inalámbricas diseñada para grupos cerrados de usuarios que necesitan estar en contacto unos con otros con fidelidad y rapidez.

El principal logro se consiguió durante la segunda guerra mundial (**1939-1945**) donde se adecuó el sistema PMR para que cupiese en una mochila, ya que el tamaño original era muy grande. Motorola construyó el primer equipo realmente portable que podía ser utilizado con una mano, se denominó "*Handie-talkie*" aunque con el tiempo se le llamo "*Walkie-Talkie*".

Uno de los avances más importantes después de la segunda guerra mundial fue la **invención del transistor** en 1947, el cual resultó ser fundamental para el desarrollo de la electrónica, ya que permitió una reducción drástica del tamaño de los equipos y una mejora en la fidelidad. [2]

Sistemas de telefonía móvil

Los sistemas de telefonía móvil son sistemas de comunicación de voz inalámbrica, pretende ofrecer prestaciones similares a la de telefonía fija, por lo que la comunicación debe ser bidireccional y simultánea. Para conseguir una transmisión y recepción simultánea es necesario dotar al móvil de un duplexor, el cual complica y encare el diseño de los dispositivos móviles.

En el año de 1946 se implantó el primer sistema de telefonía móvil en la ciudad de Sant Louis (USA), en un año se extendió a 25 ciudades más, en ese mismo año la compañía ATT solicitó el acceso a partes del espectro de mayor frecuencia (35 a 40 MHz) más apropiadas para la ampliación de los servicios de telefonía móvil.

En Europa la telefonía tuvo incluso un desarrollo más lento que al otro lado del Atlántico, otros países europeos desarrollaron sus propios sistemas de telefonía móvil; en Alemania (RFA) este sistema se extendió a otros países de modo que pudo ser usado por ciudadanos alemanes que vivían en Austria, Luxemburgo y Holanda. [1]



Los sistemas celulares: digitalización.

La división celular consiste en dividir el área n en muchas zonas, relativamente pequeñas y reutilizar los canales disponibles en esas zonas, que se llamarán células, este hecho permite ofrecer un servicio de calidad a una cantidad muy superior de usuarios; este sistema se puede desarrollar en la banda de 450MHz, pero es más apropiado transmitir en frecuencias cercanas a 1 GHz.

En las décadas de los 70 y 80 la división celular se extendió a los sistemas de telefonía móvil en Europa; en el resto del mundo se utilizó la primera generación, el “Global System of Mobile Communication” (GSM) siendo un estándar europeo de telefonía móvil que se logró estandarizar en el año de 1991.

A los sistemas de telefonía móvil digitales se les denominó “sistemas de segunda generación”, la digitalización de la voz aportó una serie de mejoras sustanciales. Las interferencias y ruidos eran muchos menores, el aprovechamiento de la banda era mayor, por lo que se podía dar servicio a más usuarios. Se podían transmitir datos con mayor facilidad. La digitalización y la reducción del precio de las terminales y equipamiento posibilitaron la gran expansión de la telefonía móvil a finales de la década de los 90, de tal modo que el número de teléfonos móviles sobrepasó al número de líneas fijas con rapidez.

Durante la primera década del siglo XXI surgieron los sistemas de tercera generación en telefonía móvil. Estos sistemas presentaron mejoras en la capacidad de transmisión y recepción de datos respecto a los sistemas de segunda generación, (Sistemas celulares y digitales). [3]

A partir del año 2010 comenzó el sistema móvil de cuarta generación, que está basado totalmente en IP (Internet Protocol). El objetivo principal de la tecnología 4G es proporcionar alta velocidad, alta calidad, alta capacidad, seguridad y servicios de bajo coste para servicios de voz y datos, multimedia e internet a través de IP. Para usar la red de comunicación móvil 4G, los terminales de los usuarios deben ser capaces de seleccionar el sistema inalámbrico de destino. Para proporcionar servicios inalámbricos en cualquier momento y en cualquier lugar, la movilidad del terminal es un factor clave en 4G.



Bandas de frecuencia.

En la actualidad se pueden transmitir ondas de radio de frecuencias comprendidas entre las pocas decenas de hertzios (Hz) y los 300 GHz, este amplio espectro electromagnético se divide en diversas bandas como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla I: Diferentes bandas de frecuencias.

Frecuencias	Banda	Servicio Típico
3 - 30 KHz	VLF	Señales Horarias; RadioNavegación
30 - 300 KHz	LF	RadioNavegación
300 - 3,000 KHz	MF	AM
3 - 30 MHz	HF	Onda Corta Internacional
30 - 300 MHz	VHF	FM, TV VHF
300 - 3,000 MHz	UHF	TV UHF, Celulares, Movil por Satelite
3 - 30 GHz	SHF	Espectro Ensanchado, LMDS
30 - 300 GHz	EHF	Móvil por Satelite

Dispositivos inalámbricos móviles

Los dispositivos inalámbricos móviles eran teléfonos portátiles que servían para establecer una comunicación por voz, no existían ninguna transmisión de datos o si existía se limitaba a una cantidad de datos muy reducida. Con la digitalización de las comunicaciones móviles la transmisión de datos se convirtió en una actividad con mayor frecuencia.

Algunos teléfonos móviles se han utilizado en gran medida para transmitir y recibir datos mientras que otros dispositivos diseñados en principio para la transmisión de datos permiten el establecimiento de conversaciones, la voz, con el paso del tiempo fue digitalizada y se pudo transmitir como un dato más

Se enlistan dispositivos de menor a mayor rendimiento (CPU, memoria, pantalla, etcétera).

*Sensores

*Localizador o "busca".



- *Teléfonos móviles.
- *Asistentes digitales personales (PDA).
- *Computador de bolsillo.
- *Computadora portátil.

Los dispositivos del futuro serán más potentes, menos pesados, poseerán nuevas interfaces y podrán acceder a diferentes redes, sin embargo, conforme se incrementan todas estas capacidades aumenta a su vez el principal problema de estos dispositivos, que no es otro que el suministro de energía. [1]

Sistemas de localización o búsqueda.

Los sistemas de búsqueda varían ampliamente en su complejidad el área de cobertura, los sistemas masa simples cubren áreas de entre 2 y 5 km de radio e incluso pueden estar confinados a edificios individuales.

Los sistemas de búsqueda están diseñados para proveer una comunicación fiable a los suscriptores estén donde estén dentro del área de servicio. [1]

Sistemas de telefonía inalámbrica.

Los sistemas de telefonía inalámbrica conectan un dispositivo portátil a una estación base dedicada, la cual se conecta a una línea telefónica dedicada con un número propio.

Sistemas de telefonía móviles: celulares.

Los sistemas de telefonía móvil proveen a los usuarios una conexión de forma inalámbrica con la red de telefonía fija y con otros usuarios de sistemas de comunicaciones móviles, la conexión se establece en áreas geográficas extensa o que cubren la mayor parte de la población de un país.

Un sistema de telefonía móvil está compuesto por muchos elementos y dispositivos, entre los más importantes figuran las estaciones o terminales móviles, las estaciones base y los centros de comunicación móvil. [1]



CAPITULO 2

CARACTERIZACIÓN DEL CANAL MÓVIL EN GRAN ESCALA (“Large Scale Fading” o “Long Term Fading”).

Introducción.

En este capítulo abordaremos temas para conocer sobre la propagación de ondas electromagnéticas, así como los principales efectos que ocurren durante su propagación, conoceremos algunos efectos que ocurren al desplazarse las ondas electromagnéticas en el espacio libre y con obstáculos, por último, que tipos de mecanismos de propagación ocurren para un canal móvil en gran escala.

Propagación de señales electromagnéticas.

La caracterización de la respuesta del canal de radio en los sistemas de comunicaciones móviles se refiere a aquellos sistemas de comunicaciones en los que existe un enlace vía radio entre varios dispositivos que poseen la capacidad de recibir y transmitir señales radioeléctricas. A este dispositivo se le suele denominar estación móvil, el otro dispositivo se encuentra fijo y se le denomina estación base. [4]

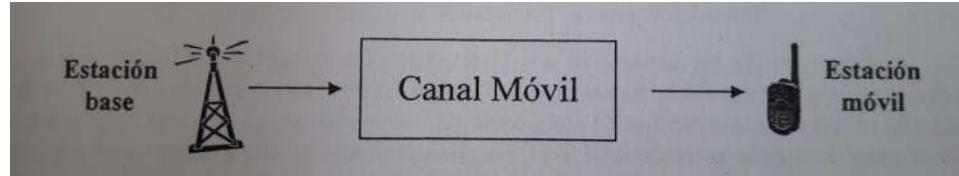


Figura 1 Transmisión del canal móvil.

Entre el transmisor y el receptor van a aparecer multitud de elementos influyentes en la propagación radioeléctrica (edificios, coches, personas, arboles, montañas, etc.)

Los principales efectos sobre la señal pueden ser atribuidos a uno de estos tres mecanismos de propagación siguientes:

- Reflexión.
- Difracción.
- Difusión o “Scattering”



Formas de propagación de las ondas electromagnéticas.

Las ondas ionosféricas y troposféricas se propagan a lo largo de las respectivas capas de la atmosfera, las ondas terrestres son las ondas que viajan por la superficie de la tierra La onda directa es aquella que sigue el camino directo entre el transmisor y el receptor sin interferencia de ningún obstáculo.

Las ondas difundidas son las ondas producidas por la incidencia de la onda transmitida en los obstáculos y elementos del canal de radio.

Las ondas ionosféricas, troposféricas y de superficie tienen importancia en la caracterización de sistemas de comunicaciones móviles o inalámbricas en los que la distancia es muy grande. [5]

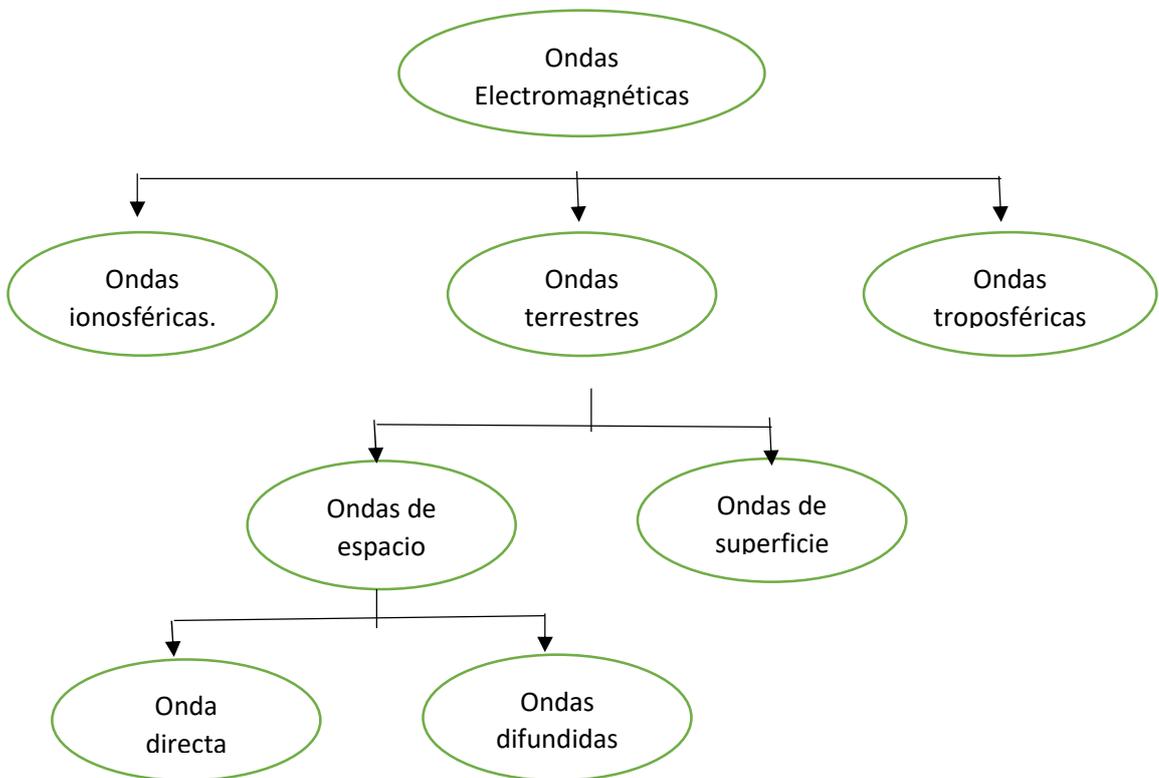


Figura 2 formas de ondas electromagnéticas.

Debido a los mencionados efectos, en el receptor se van a recibir múltiples contribuciones o réplicas de la señal original transmitida, cada replica podrá sufrir diversos procesos de reflexión, difusión (“scattering”) y difracción.



Las réplicas viajarán por diferentes caminos de distinta longitud hasta llegar al receptor, por lo tanto, alcanzan al receptor con diferentes ángulos de incidencia, atenuaciones, desfases y retardos de propagación, este efecto se le denomina efecto multi-trayecto. El canal va a variar con el tiempo debido principalmente al movimiento de la estación móvil. Podemos clasificar los sistemas de comunicaciones en dos grupos, *los sistemas de banda estrecha (“narrowband”)* y *los sistemas de banda ancha (“wideband”)*, en general, un sistema se considera de banda estrecha si el ancho de banda de la señal es pequeño en comparación con la frecuencia de la portadora.

Para caracterizar el canal móvil en banda estrecha se transmite una portadora $x(t)$ sin modular de amplitud A y frecuencia f_c :

$$x(t) = Ae^{j2\pi f_c t} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde A es la amplitud de la senoide y f_c es la frecuencia. La caracterización del canal consiste en la descripción de las variaciones y características de la señal recibida $w(t)$. [1]

Efecto multi-trayecto.

En un entorno real, la señal transmitida sigue más de un camino; el camino que contempla la línea de visión directa y los diferentes caminos que implican las líneas de no visión directa. Estos caminos se someten a diferentes efectos dependiendo de la interacción entre la onda y los objetos que la rodean tales como difracción, reflexión y scattering (dispersión); estos fenómenos repercuten en la atenuación de la señal y en una rotación de fase debida a la diferencia de impedancia entre la impedancia de onda del objeto y la impedancia en espacio libre de la onda incidente. Además, las diferentes longitudes de los caminos entre transmisor y receptor dan lugar a retardos temporales o a cambios de fase en el dominio de la frecuencia.

A la salida de la antena receptora tenemos la suma de los diferentes caminos donde los diferentes mecanismos de propagación multitrayecto pueden dar lugar a una distorsión significativa de la señal recibida.

Cabe destacar que, en situaciones prácticas a efectos de estudio de microondas, la distancia entre el transmisor y el receptor con cualquiera de los objetos es mucho mayor que la longitud de onda. [3]



A continuación, se ilustran los principales mecanismos de propagación:

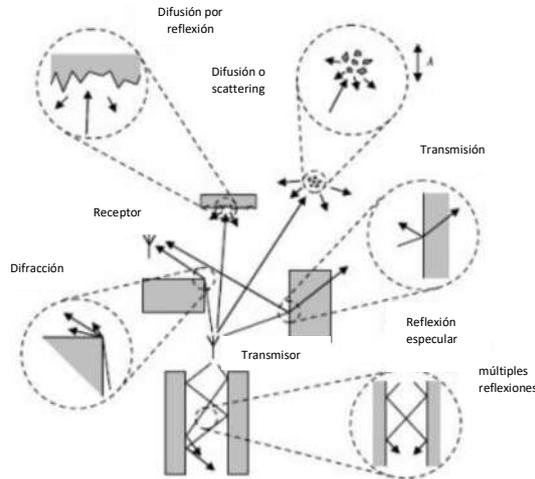


Figura 3 caminos de propagación

Modelo de espacio libre: rayo directo.

Los modelos de propagación de tipo “Large-scale” o de gran escala buscan predecir las pérdidas medias de la señal para distancias arbitrarias entre el transmisor y el receptor. [6]

Mecanismos de propagación.

Los mecanismos básicos de propagación de la señal radioeléctrica son cuatro: el Rayo directo, la reflexión, la difracción, y la difusión. Los modelos del tipo “Large-scale” hacen uso de estos mecanismos para describir las variaciones de la potencia recibida en el móvil. Estos mecanismos también sirven para describir la propagación en pequeña escala y el efecto multicamino. [1]

Reflexión.

Se produce cuando la onda electromagnética incide sobre un objeto que tiene dimensiones muy grandes en comparación con la longitud de onda de dicha onda. [1]

Difracción.

Es un mecanismo de propagación que permite a las ondas electromagnéticas llegar hasta el receptor cuando no existe visión directa. [1]

Difusión (“Scattering”)

La señal recibida en un canal radio suele poseer una potencia superior a la predicha por los modelos de difracción y reflexión. Esto es debido al aporte de potencia que proporciona el mecanismo de difusión. [1]



CAPITULO 3

CARACTERIZACIÓN CANAL MÓVIL EN PEQUEÑA ESCALA (“Small Scale Fading”)

Introducción.

En este capítulo conoceremos sobre el canal móvil a pequeña escala utilizando una técnica de lanzador de rayos basado en la aplicación de la óptica geométrica, aplicando técnicas y mecanismos de propagación de ondas electromagnéticas, tal y como lo vimos en el capítulo anterior.

El “*small-scale fading*” o desvanecimiento en pequeña escala, describe las fluctuaciones rápidas de las amplitudes y fases de la señal de radio a lo largo de un corto periodo de tiempo o a lo largo de un recorrido pequeño del móvil. [7]

Lanzador de rayos.

El lanzador de rayos se basa principalmente que para frecuencias elevadas y obstáculos mayores que la longitud de onda, la onda electromagnética se puede simular como un rayo óptico. Por tanto, esta técnica consiste en la aplicación de la óptica geométrica al problema del cálculo de las pérdidas y campo eléctrico en el receptor. [5]

Cada rayo lanzado representa una onda esférica que se propaga en línea recta hasta que bien encuentra un obstáculo, bien llega al receptor, bien se pierde sin llegar a impactar en el receptor. En el caso de que se tope con un obstáculo, el rayo incidente se puede reflejar, difundir o difractar. En un lanzador se toman en cuenta todos los mecanismos de propagación de onda.

En los lanzadores de rayos para sistemas de comunicaciones móviles, en lugar de calcular la intensidad luminosa se calcula la intensidad de campo eléctrico en cada punto deseado.

Existen dos tipos fundamentales del lanzador de rayos, el primero consiste en el lanzado de rayos con una separación angular constante desde el transmisor, cada rayo lleva una información de dirección, distancia recorrida, reflexiones sufridas, etc.

Esta forma permite predecir el campo radioeléctrico en un área definida por el usuario. Una segunda forma, válida para el caso en el que solo se requiera conocer el campo en una posición, es la denominada “*backward ray-tracing*”, esta técnica lanza rayos del receptor ‘hacia atrás’ tomándose como válidos aquellos que alcanza el transmisor.



Uno de los puntos clave del lanzador de rayos es la determinación de los rayos que llegan al receptor. El método utilizado se basa en la construcción de un área de recepción circular con centro en la posición del receptor. Un rayo se tomará como recibido si su trayectoria intercepta el círculo de recepción. Para la construcción el círculo de recepción es necesaria la definición de un radio, denominado radio de impacto. [4]

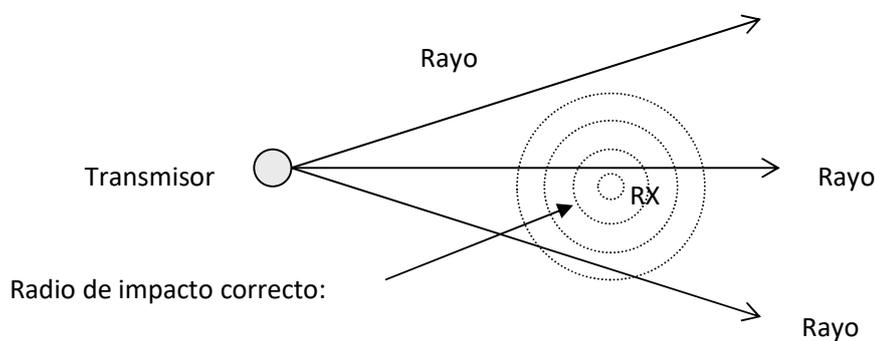


Figura 4 Lanzador de rayos y su área de recepción.

Si el radio de impacto es demasiado grande, se toma en consideración muchos rayos en el cálculo del campo en el receptor, así se incluirían rayos como el que pasa cerca del receptor e incluso rayos alejados del receptor, si el radio de impacto fuera muy grande. Si el radio de impacto es muy pequeño se tomarán pocos rayos de modo que incluso rayos cercanos como el que impacta en el receptor, no se tendrán en consideración en el cálculo del campo eléctrico.

Una definición adecuada del radio de impacto se da en función de la separación angular de los rayos transmitidos y de la distancia recorrida por el rayo por su trayectoria durante su propagación (no la distancia directa entre el receptor y el transmisor).

Un rayo redundante es aquel que llega al receptor y que representa al mismo frente de ondas correspondiente a rayo ya recibido. Los rayos redundantes poseen el mismo origen de lanzado (transmisor o esquina) y sufren los mismos mecanismos de propagación.



Los lanzadores de rayos tanto si son bidimensionales como tridimensionales, son más flexibles que los métodos empíricos y semi-empíricos, además calculan el campo eléctrico en el receptor de forma precisa ya que es un método semi-determinista. [1]

Propagación radioeléctrica para un lanzador de rayos.

La herramienta de trazado de rayos está pensada para su uso en entornos microcélulares. La creación de las microcélulas en los sistemas de telefonía móvil está motivada por la necesidad de dar un servicio de mayor capacidad a los usuarios de un área urbana, para ello se reduce el radio de las células empleadas. [3]

Las microcélulas se caracterizan por tener un radio menor que un kilómetro y unas estaciones transmisoras por debajo de la altura de los edificios, con una potencia de transmisión de unos pocos Watts.

El campo electromagnético emitido puede sufrir los siguientes tres mecanismos de propagación: reflexión, la difracción y la dispersión. Además, un frente de ondas puede llegar a la posición del receptor de forma directa, sin que se haya visto afectado por ninguno de los mecanismos mencionados, es lo que se definió como campo directo.

La reflexión de un frente de ondas se produce cuando la onda que se propaga en un medio incide sobre otro medio con diferentes propiedades electromagnéticas.

Si se supone que la superficie de separación de los dos medios es lisa, se produce una reflexión especular. Las reflexiones se pueden producir tanto en las paredes que forman los bloques de los edificios, como en el suelo.

Las ondas secundarias se propagan en todo el espacio con lo que es posible que receptores sin visión directa con el transmisor reciban campo electromagnético. A frecuencias altas la difracción y la reflexión dependen de la geometría del objeto y de la amplitud, fase y polarización de la onda incidente en el punto de difracción o reflexión. La difracción se modela de diversas formas, pero en el simulador se ha implementado la Teoría Uniforme de la Difracción. [8]

Rayo directo.

La situación de rayo directo se produce cuando entre el transmisor de ondas esféricas y el receptor no hay ningún obstáculo que impida la visión directa entre ambas estaciones. En este caso se considera la expresión de una onda esférica radiada de amplitud E_0 .



La expresión del campo electromagnético es inversamente proporcional a la distancia que separa el transmisor y el receptor, incluyendo un término de fase dependiente de la distancia recorrida.

$$E_{directo} = \frac{E_o}{r} e^{-jkr} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Siendo $E_{directo}$ el campo eléctrico recibido en el receptor como contribución de una onda de rayo directo, E_o la amplitud de la onda esférica radiada, r la distancia recorrida entre el transmisor y el receptor y k el número de onda ($2\pi/\lambda$, λ es la longitud de onda en metros).

La distancia depende de la separación entre transmisor y receptor en línea recta, así como de la diferencia de altura entre la antena transmisora y la receptora.

Es habitual que la antena receptora esté a una altura menor que la transmisora, ya que se considera que el receptor es un teléfono móvil y las estaciones base en microcélulas están a la altura de las farolas o los semáforos.

La situación contraria a la habitual podría darse cuando el receptor está en el interior de un edificio, en una planta a mayor altura que la estación transmisora.

Pero este caso, al tratar con simulaciones *outdoor*, no se ha tenido en cuenta. Tampoco se ha supuesto el caso en el que un receptor esté en un balcón por encima del transmisor, ya que las paredes de los edificios se suponen planas, sin balcones, para simplificar el entorno urbano a simular.

La distancia r se puede calcular a partir del teorema de Pitágoras:

$$r = \sqrt{(h_{TX} - h_{RX})^2 + d^2} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Siendo h_{TX} la altura de la antena transmisora, h_{RX} la altura de la antena receptora y d la distancia entre el transmisor y el receptor. [1]

Reflexión.

Cuando un rayo incide sobre la superficie que separa dos medios con diferentes propiedades eléctricas, se produce una reflexión y una transmisión parciales del mismo. Si se incide sobre un medio dieléctrico perfecto, parte de la onda que representa el rayo se refleja y parte se transmite sin pérdida de energía por absorción en el segundo medio. Si la superficie sobre la que incide el rayo separa el aire de un conductor, el rayo es totalmente reflejado sin pérdida de energía.



La onda incidente y la onda reflejada están relacionadas mediante un coeficiente de reflexión R , que depende de las propiedades del material (permitividad y conductividad), de la polarización de la onda incidente (horizontal o vertical), del ángulo de incidencia (medido entre la pared y el rayo incidente) y de la frecuencia a la que se propaga la onda.

La expresión del campo electromagnético asociado a la contribución de una onda reflejada es la siguiente:

$$E_{\text{reflejado}} = R(\psi) \frac{E_0}{r_2} e^{-jk r_2} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde se añade el coeficiente de reflexión como factor del campo directo, teniendo en cuenta que el camino recorrido (r_2) es el que recorre la onda reflejada. La variable ψ representa el ángulo que forma el rayo con la pared sobre la que se refleja.

Se puede obtener, por imágenes respecto a la superficie de reflexión, la siguiente expresión para el ángulo entre el rayo y la pared (Ecuación 5) y la distancia que recorre el rayo reflejado (Ecuación 6). [5]

$$\psi = \arctan \left(\frac{h_{TX} + h_{RX}}{d} \right) \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$r_2 = \sqrt{(h_{TX} + h_{RX})^2 + d^2} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Permitividad dieléctrica compleja.

La permitividad eléctrica está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material. La permitividad dieléctrica, es la relación entre desplazamiento eléctrico e Intensidad de campo eléctrico.

La permitividad dieléctrica compleja es un parámetro constitutivo de cualquier material dieléctrico y de ella depende la interacción de la materia junto con un campo eléctrico incidente y se representa con la siguiente expresión:

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' \quad \text{Ecuación (6)}$$

donde:

ϵ' = Parte real, es la permitividad del campo eléctrico constante,



ϵ'' = Parte imaginaria, es el factor de pérdida del material dieléctrico

Polarización

La polarización de la onda electromagnética se define como la trayectoria descrita por la componente vectorial de campo eléctrico en su propagación, de manera que mantenga la ortogonalidad respecto a la componente vectorial de campo magnético.

Podemos tener los siguientes tipos de polarización:

Lineal

En este caso la trayectoria del campo eléctrico es lineal. A su vez la polarización lineal puede ser:

- Horizontal: Se da cuando la componente vectorial de campo eléctrico de la onda es horizontal a la superficie terrestre.

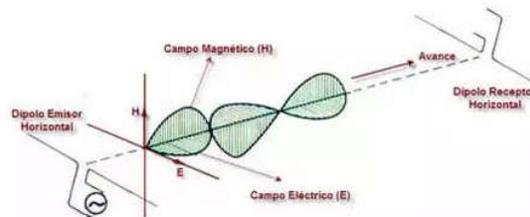


Figura 5 Polarización lineal Horizontal

- Vertical: Se da cuando la componente vectorial de campo eléctrico de la onda es perpendicular a la superficie terrestre.

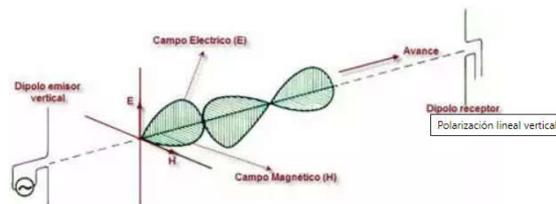


Figura 6 Polarización Lineal Vertical

Circular

En este caso la componente vectorial de campo eléctrico avanza girando sobre el eje de propagación. [10]

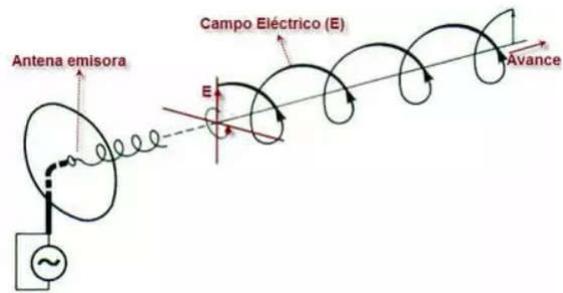


Figura 7 Polarización Circular.



Capítulo 4

EQUIPOS DE MEDICIÓN Y CAMPAÑAS DE MEDIDAS.

Introducción

Una parte esencial para la medición de la permitividad fue el establecimiento de una metodología que refleje la realización y reproducibilidad de cada prueba, a continuación, se enuncia de manera breve la metodología seguida y aprobada por el grupo de investigación responsable para las campañas de medidas.

Cuando hablamos de campañas de medidas, nos referimos a las actividades de medición de los materiales realizadas en el laboratorio de investigación previamente planeadas por el grupo de investigación.

Los materiales para las campañas de medidas elegidos fueron: yeso, pino, aglomerado, aglomerado recubierto y cartón prensado.

El método para la realización de las campañas de medidas; se estableció en la banda de los 94GHz, donde se va a obtener la permitividad relativa compleja.

las pruebas se realizaron en un espacio asignado para las campañas de medidas, siendo el laboratorio de comunicaciones móviles a temperatura ambiente con una humedad de 80-85% en promedio, donde se encuentran los equipos de medición y aditamentos necesarios para las mediciones. A continuación, se presenta un esquema general del escenario de medidas. [6]

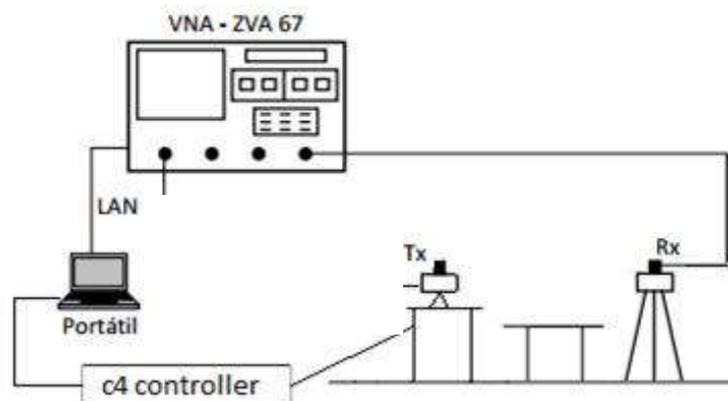


Figura 8 Esquema general del escenario



Equipos

Los equipos utilizados para la realización de las pruebas se describen a continuación.

Computadora (laptop)

Equipo de cómputo para el análisis de los datos obtenidos en los trabajos (actividades) de medición, capturados por el analizador vectorial, procesados en el software Matlab.

Características mínimas:

Pantalla: 12" Pulgadas.

Procesador: Core i3

Almacenamiento: 500GB

RAM: 4GB



Figura 9 Computadora (LAPTOP).

Analizador de redes vectorial (VNA) Rhode ZVA67.

Analizador de redes vectorial Rhode ZVA67 de 4 puertos que trabaja en el dominio de la frecuencia, el generador se encarga de escanear la banda de frecuencias centrada en una portadora mediante frecuencias discretas y para cada frecuencia, dos de sus puertos se encargan de mediar el parámetro S_{21} (parámetro de dispersión, coeficiente de transmisión directa o ganancia con la tensión directa.) con el que se construye la función de transferencia, señal generada conocida en un puerto y señal recibida en otro; para medidas que requieren de cierto tiempo el canal debe permanecer estático.

Los parámetros de dispersión son los coeficientes de reflexión y transmisión entre la onda incidente y la reflejada. Estos parámetros describen completamente el comportamiento de un dispositivo bajo condiciones lineales en determinado rango de frecuencia. Cada parámetro es caracterizado por magnitud, ganancias o pérdidas en decibeles y fase. A pesar de ser aplicables a cualquier frecuencia, los parámetros S son usados principalmente para redes que operan en radiofrecuencia (RF) y frecuencias de microondas. En general, para redes prácticas, los parámetros S cambian con la frecuencia a la que se miden, razón por la cual se debe especificar



la frecuencia para cualquier medición de parámetros S, junto con la impedancia característica o la impedancia del sistema.



Figura 10 Analizador de redes Rohde ZVA67

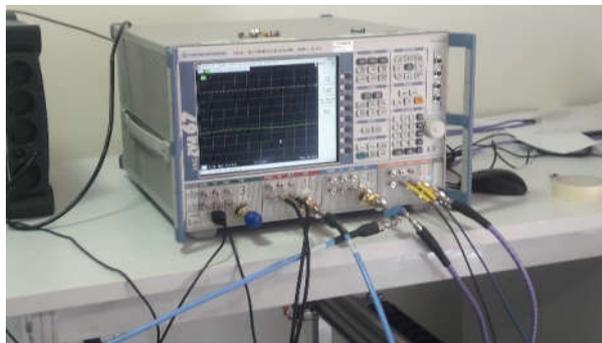


Figura 11 Analizador de redes montado.

Antena de cuerno de ganancia estándar MOD 27240

Dos antenas de tipo cuerno de ganancia estándar fabricadas por Flann Microwave, operan en el rango de frecuencia 73.8 – 112 GHz con valores de ganancia que varían entre 18 y 21,5 dB, una variación de la ganancia de banda media con frecuencia de ± 2 dB.

Tienen una amplia gama de aplicaciones como transmitir, recibir o muestrear antenas o para reflectores de alimentación.



Figura 13 Antena MOD 27240

ORDERING INFORMATION
 Model: Gain Suffix, Description
 Example: Model16240-20 Standard Gain Horn, 20 dB
 -01 Membrane
 -02 Mounting Bracket
 -03 Membrane and Mounting Bracket

Gain	Suffix
10 dB	10
15 dB	15
20 dB	20
25 dB	25

Series 240

Figura 12 Especificaciones



Figura 14 Antena colocada a uno de los convertidores.

Convertidor de ondas milimétricas ZVA-Z110E

Los convertidores de ondas milimétricas fabricados por Rohde & Schwarz, permiten mediciones de ondas milimétricas en la banda V, E, W, F, D, G, J e Y, así como el análisis de red en rangos de frecuencia de 50 GHz a 500 GHz, dependiendo del modelo de convertidor. Con un amplio rango dinámico, los convertidores Rohde & Schwarz ofrecen una alta comodidad de funcionamiento y permiten mediciones rápidas. Permite que la potencia de salida del convertidor ZVA-Z110E se reduzca electrónicamente en 25 dB. La potencia de salida puede reducirse en 70 dB mediante la reducción de potencia de entrada de RF. Esto permite barridos de potencia para las mediciones de compresión en amplificadores, así como la calibración de energía.



Figura 15 Convertidor de ondas milimétricas ZVA-Z110E

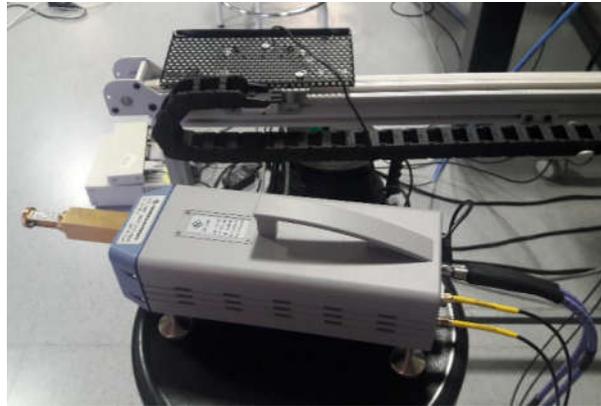


Figura 16 Convertidor de ondas en el laboratorio.

Posicionador lineal de un solo eje de arrick robotics

El posicionador es lineal y nos permite cubrir una longitud de 1 m donde un motor se encarga del movimiento a lo largo del eje; su automatización se realiza añadiendo sistemas de control MD2 y C4 conectados por puerto serie. [6]



Figura 17 Posicionador lineal de un solo eje



Figura 18 Control MD2, C4 y motores de paso



Figura 19 Convertidores montados sobre los posicionadores lineales.



Metodología de campañas de medidas

Para la realización de las campañas de medida, es necesario tener montado un sistema lanzador de rayos en configuración de rayo directo utilizando los convertidores de ondas electromagnéticas a una frecuencia de 94GHz, con una potencia de trabajo del equipo -28 dBm hasta -11 dBm de ajuste electrónico. (como se muestra en la figura 21).



Figura 20 Escenario real montado en el edificio ELDI.

La calibración de los convertidores se realiza en espacio libre, las antenas se retiran de los convertidores, cuando se encuentran sin las antenas, se realiza una conexión entre los dispositivos como se muestra en la figura 13.

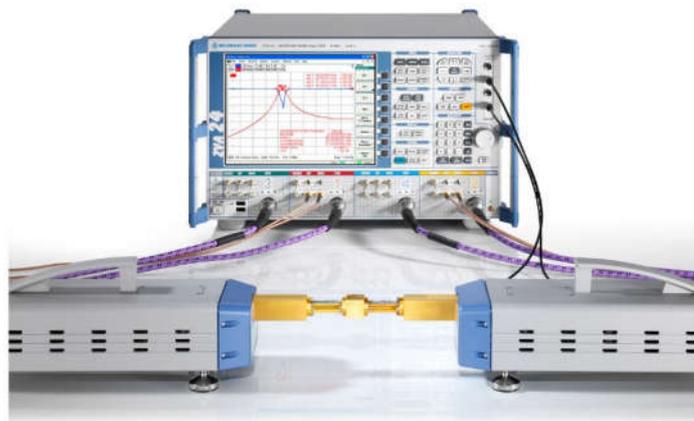


Figura 21 Calibración de los convertidores de ondas milimétricas.

Los convertidores de ondas milimétricas están colocados en unas plataformas que tienen los posicionadores lineales, a una distancia inicial entre sí de $120\text{cm} \pm 3\text{cm}$, permitiendo tener el control y realizar el desplazamiento en 3 distancias diferentes de acuerdo con lo propuesto por el grupo de investigación.



Inicialmente con un algoritmo del grupo de investigación se realizaron las pruebas de variación para definir el comportamiento de cada material en cada una de las 3 distancias, a cada distancia se lanzan ondas del convertidor en modo transmisión al convertidor en modo receptor. Este proceso se realiza por prueba de material al realizar varias pruebas en estas condiciones, se determinó retirar los posicionadores lineales y dejar fijos los convertidores de ondas sobre un par de mesas, lográndose no tener pérdidas en la transmisión de ondas.

Los datos obtenidos en cada medición en modo rayo directo, son enviados al analizador de redes vectorial que a su vez se envían a la laptop que, con un algoritmo desarrollado por el grupo de investigación es procesado para obtener la permitividad relativa compleja.

Para la caracterización de materiales, se coloca cada material sobre bases cuadradas de 80cm x 80 cm con una altura que se puede ajustar a las necesidades (figura 23), permitiendo al material estar fijo y así asegurando que el material se colocara entre el Tx y Rx justo en el punto medio de distancia.



Figura 22 Bases cuadradas para colocación de materiales.

Se realiza el armado de cada escenario para cada material, en configuración de rayo directo los convertidores, así mismo con la configuración de polarización. Para evitar tener reflexiones o difracciones de ondas electromagnéticas generadas por el soporte de material, se colocan 3 espumas acústicas, tal y como se muestra en la figura 23, con el objetivo de absorber las ondas y no influir en los resultados.



Figura 23 Material en configuración rayo directo.



RESULTADOS

Las redes de área local inalámbricas se están expandiendo rápidamente con la creciente demanda de comunicaciones por computadora y los avances en los sistemas de radio digital. La planificación de radio son herramientas que generalmente se usan para planear el despliegue de estas redes. La exactitud de estas herramientas depende de la disponibilidad de los Modelos electromagnéticos, de los obstáculos que están en el entorno a la frecuencia de operación.

La validación de los modelos requiere de medición y captura de datos sobre la propagación de las ondas radioeléctricas a través de materiales de construcción del modelo de multireflexión interna, el cual ha sido ampliamente utilizado para este fin durante los últimos años, pero solo se ha comparado con las mediciones de amplitud.

Los resultados se dividen en dos partes:

La primera parte consiste en mostrar los datos obtenidos de permitividad de cada uno de los materiales analizados (caracterización de materiales).

La segunda parte consiste en el desarrollo del simulador lanzador de rayos, el cual va a permitir la obtención de datos de cada uno de los materiales que se propongan sin la necesidad de realizar un escenario.

I.- CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

Estimación de la permitividad

El valor se optimiza para que el valor de transmisión simulado sea lo más parecido posible al medido en cada frecuencia; por eso se muestran valores medios y la desviación estándar correspondientes a los valores en toda la banda.

Tabla II. Polarización Vertical-Vertical

Material	Valor estimado de $\epsilon'+j\epsilon''$				Valor de la UIT de $\epsilon'+j\epsilon''$ (a 94 GHz)	
	Parte real		Parte imaginaria		Parte real	Parte im.
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.		
Aglomerado recubierto	2.71	0.030	-0.15	0.002	2.58	-0.14
Aglomerado	2.59	0.029	-0.16	0.010	2.58	-0.14
Pino	2.08	0.271	-0.10	0.023	1.99	-0.11
Yeso	3.38	0.060	-0.08	0.013	2.94	-0.05
Cartón prensado	2.19	0.0286	-0.17	0.003	-----	-----



Aglomerado: En la Unión internacional de telecomunicaciones no hay una diferencia entre un aglomerado recubierto con melanina y sin recubrir, en la tabla podemos observar el valor de la desviación estándar que es muy similar en ambos casos, siendo un valor de 0.030 que es muy cercano a cero, con esto confirmamos que los valores medidos de permitividad relativa compleja en configuración de polarización Vertical-Vertical son muy similares con los establecidos en la UIT a la frecuencia de 94GHz.

Yeso: Los resultados del yeso tienen que ser repetidos, debido a que el material se está comportando como si no estuviera presente entre el Tx y Rx cuando pasan las ondas electromagnéticas a través del material; hay que colocar dos placas unidas para que el valor absoluto de la transmisión no se encuentre cerca de 1.

Los resultados actuales corresponden a dos placas, pero una posee “nervios” en una de sus caras por lo que la onda transmitida se puede desviar.

Pino: el valor de la UIT es similar al estimado, sin embargo, vemos una diferencia apreciable en el valor de transmisión. Hay un par de valores de permitividad mal estimados; habría que revisar el proceso de optimización en esos casos. Ocurre en algún otro material.

Eje vertical: Valor absoluto del coeficiente de transmisión de la medida.

Eje horizontal: Frecuencia en GHz.

La transmisión se calcula como:

$$a_{HH} = \frac{S_{21_obstacle_HH}}{S_{21_freespace_HH}} \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$a_{VH} = \frac{S_{21_obstacle_VH}}{S_{21_freespace_VH}} \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$a_{HV} = \frac{S_{21_obstacle_HV}}{S_{21_freespace_HV}} \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$a_{VV} = \frac{S_{21_obstacle_VV}}{S_{21_freespace_VV}} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde se aplica el “time gating” para seleccionar la componente directa en cada caso.

Resultados de pruebas de potencia.



En espacio Libre.

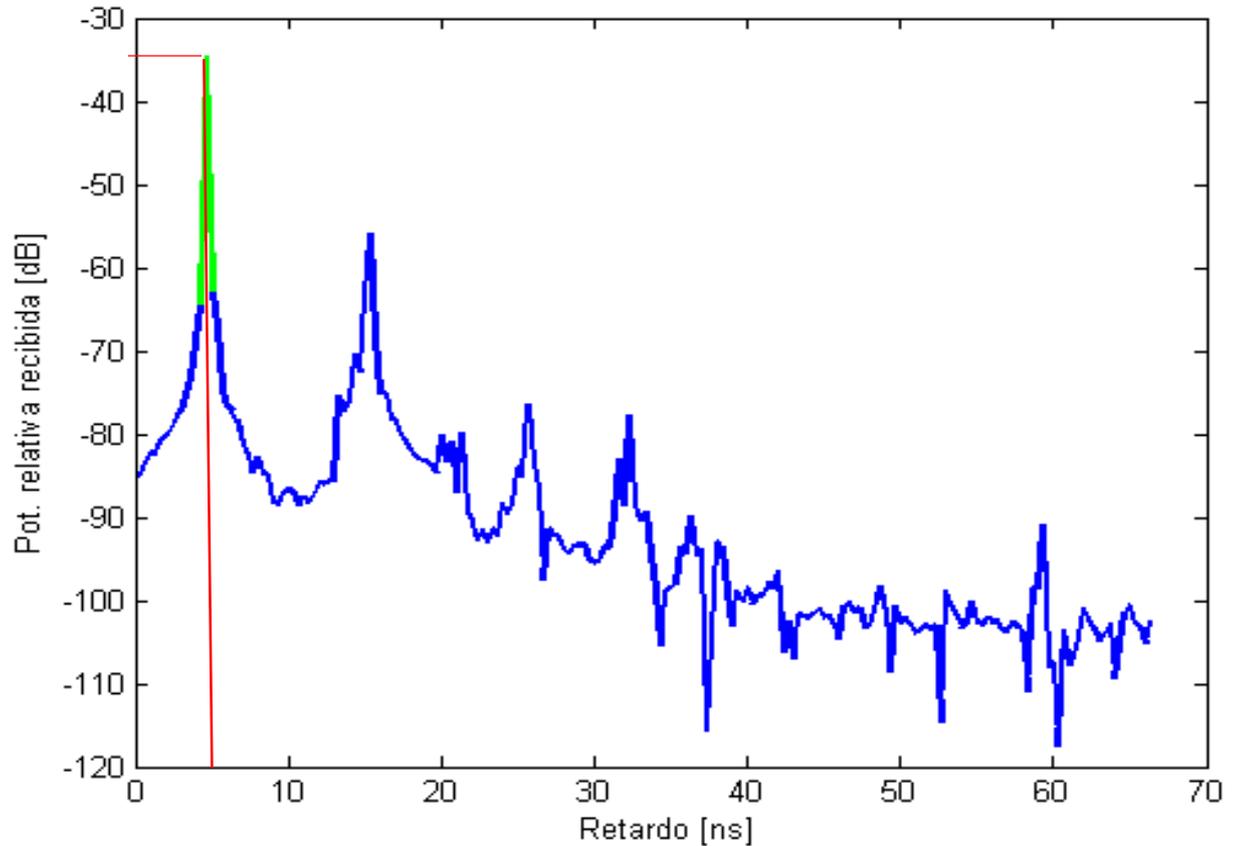


Figura 24 Gráfica de la potencia recibida sin material entre Tx y Rx.

En la Figura 24, tenemos la gráfica de la potencia relativa recibida en espacio libre, sin obstáculo alguno, en un rango de [-120, -30 dB], en un rango de tiempo de [0 ns, 70 ns] en configuración rayo directo, el convertidor configurado como transmisor y el convertidor configurado como receptor están alineados viéndose directamente de frente.

El pico más alto corresponde a -35dB aproximadamente de potencia recibida en un tiempo de 6 ns aproximadamente, este valor es nuestra referencia de potencia recibida en configuración rayo directo del lanzador de rayos construido.

En espacio no libre (Aglomerado recubierto).

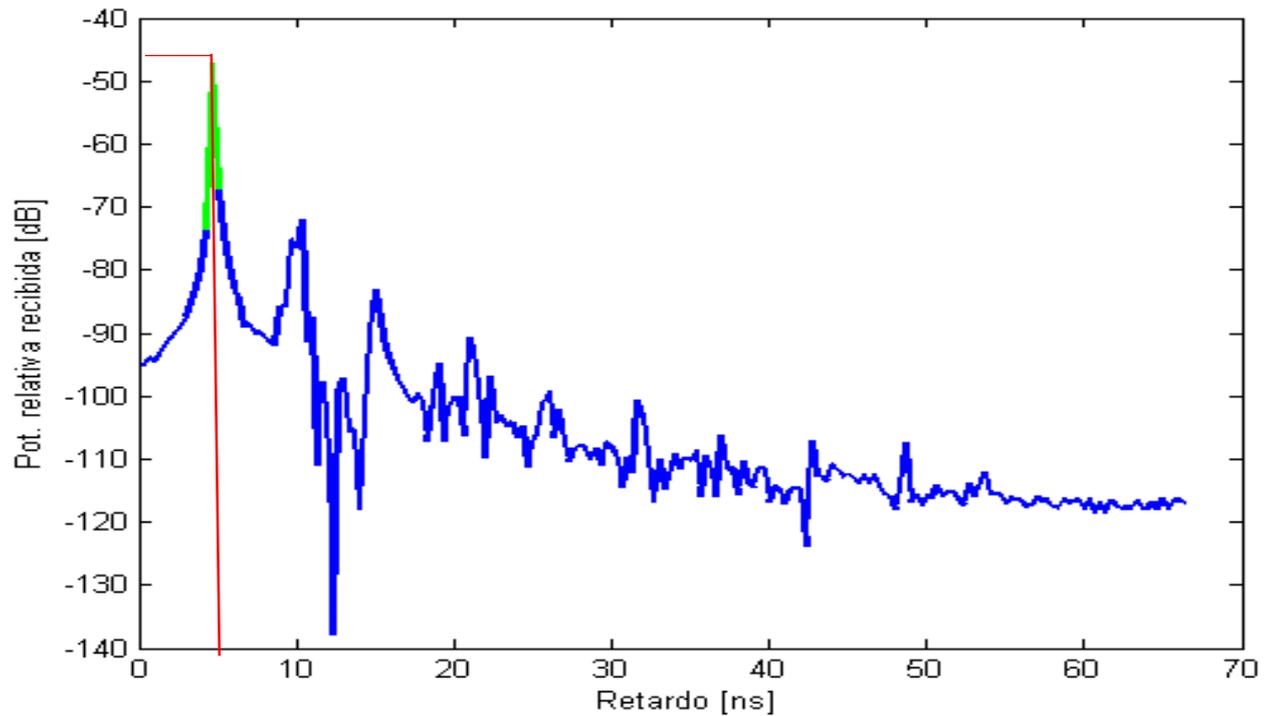


Figura 25 Gráfica de la potencia recibida con material entre Tx y Rx.

En la figura 26, tenemos la gráfica de la potencia relativa recibida teniendo como obstáculo una placa de aglomerado recubierto, que se encuentra exactamente entre el Transmisor y Receptor lo cual impide que haya una transmisión directa y el material influya en la potencia recibida.

Observando la gráfica de la potencia recibida, en el pico más alto tenemos una potencia relativa recibida de aproximadamente de -48dB, con un retardo de 7 ns en promedio, con la configuración de rayo directo el lanzador de rayos.

Se selecciona la muestra del máximo, una anterior y una posterior ya que la resolución espacial son 10 cm y hay una componente difractada que recorre alrededor de 18 cm más que la directa.



La transmisión se simula con la siguiente fórmula:

$$T = \frac{(1 - \Gamma^2)e^{-j \cdot k_s \cdot d_s} e^{-\alpha \cdot d_s} e^{j \cdot k \cdot d_s}}{(1 - \Gamma^2 e^{-j \cdot 2 \cdot k_s \cdot d_s} e^{-2 \cdot \alpha \cdot d_s} e^{j \cdot 2 \cdot k \cdot d_s})}$$

Ecuación (11)

Según el modelo:

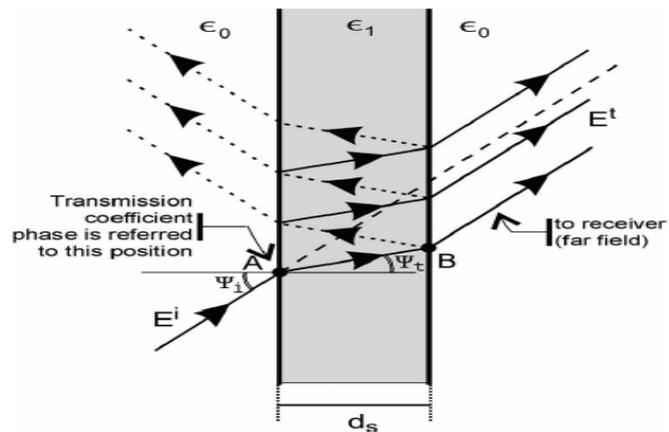


Figura 26 Modelo de transmisión de las ondas electromagnéticas en el material.
Múltiples reflexiones internas.

En la ecuación anterior Γ es el coeficiente de reflexión, d_s es el grosor del material y α y k la atenuación y el número de onda en el material respectivamente. El valor de la transmisión T se simula para diferentes valores de permitividad hasta que se encuentra el valor que mejor ajusta la simulación a la medida; este proceso de ajuste se lleva a cabo utilizando algoritmos de optimización programados en Matlab.

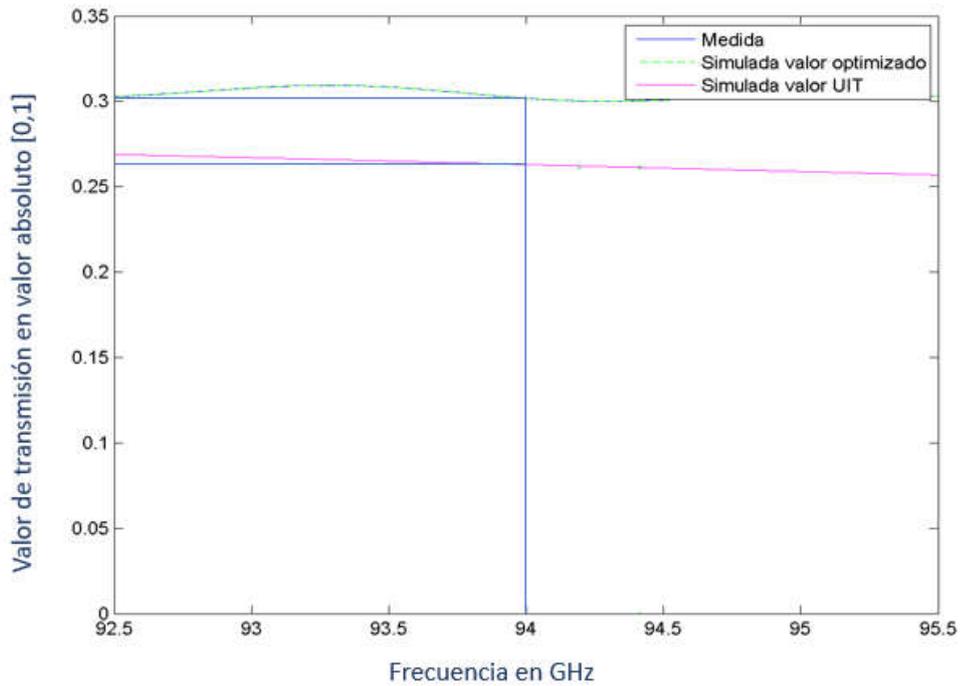


Figura 27 Transmisión medida y simulada en espacio libre. El eje horizontal es la frecuencia en GHz y el eje vertical el valor de transmisión en valor absoluto [0,1].

Aglomerado: El valor de la UIT se encuentra fuera del rango de valor absoluto de donde se encuentra el valor absoluto de la medida y la simulada.

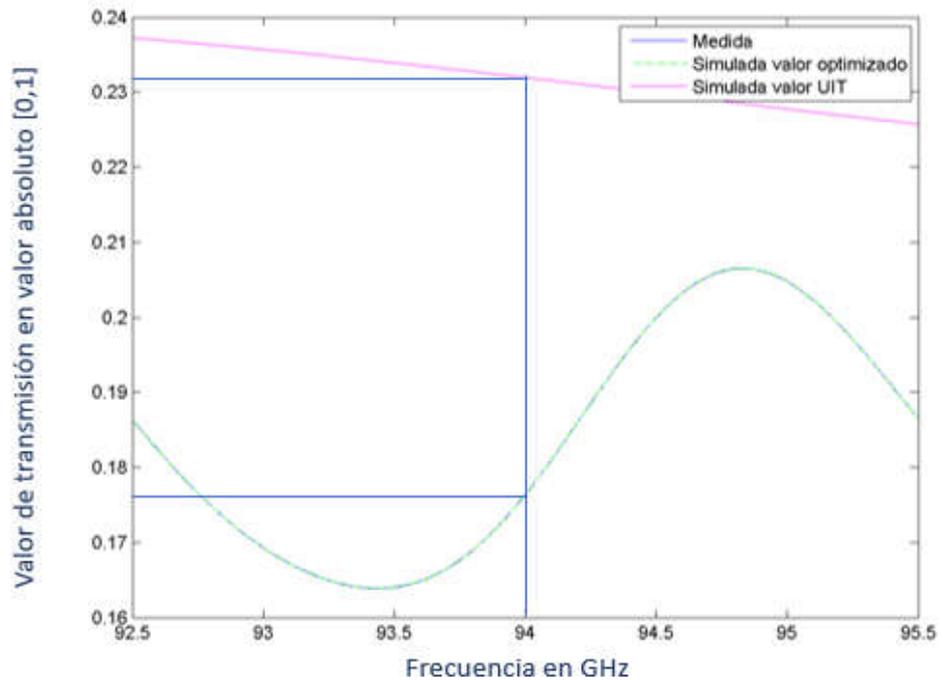


Figura 28 Transmisión medida y simulada para aglomerado. El eje horizontal es la frecuencia en GHz y el eje vertical el valor de transmisión en valor absoluto [0,1].



Se muestran valores medios y la desviación estándar correspondientes a los valores en toda la banda.

Tabla III Polarización Horizontal-Horizontal

Material	Valor estimado de $\epsilon' + j\epsilon''$				Valor de la UIT de $\epsilon' + j\epsilon''$ (a 94 GHz)	
	Parte real		Parte imaginaria		Parte real	Parte im.
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.		
Aglomerado recubierto	2.69	0.028	-0.14	0.0050	2.58	-0.14
Aglomerado	2.55	0.037	-0.14	0.0062	2.58	-0.14
Pino	2.22	0.218	-0.19	0.0102	1.99	-0.11
Yeso	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Cartón prensado	2.32	0.030	-0.19	0.0043	-----	-----

Yeso: No ha sido estimado en polarización Horizontal-Horizontal debido a que como en el caso anterior, el material no estaba comportándose como un objeto que interrumpiera las ondas electromagnéticas, por ello se tomó la decisión de no tomarlo en cuenta.

Pino: El valor de la UIT se encuentra fuera del rango de valor absoluto de donde se encuentra el valor absoluto de la medida y la simulada.

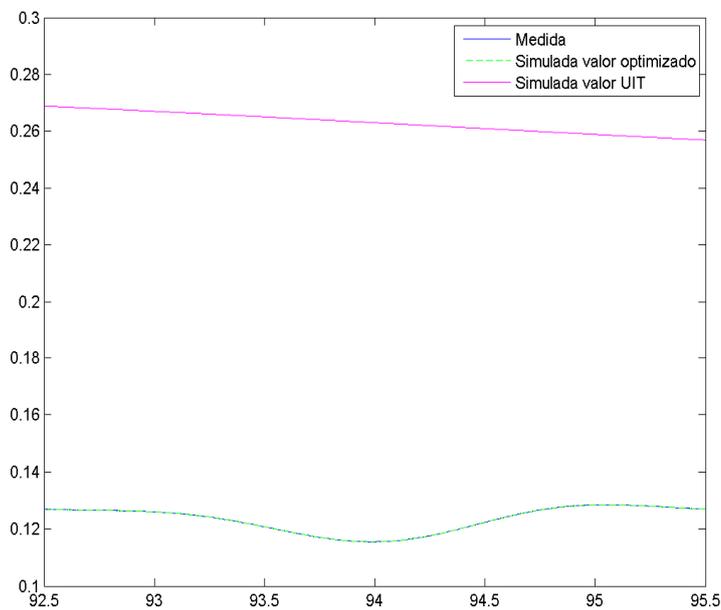


Figura 29 Transmisión medida y simulada para el material pino. Eje horizontal es la frecuencia en GHz y el eje vertical el valor de la transmisión en valor absoluto [0,1].



Aglomerado: el valor de la UIT se encuentra en el rango del valor absoluto de [0.25, 0.2] a 94GHz, donde también se encuentra el valor medido y el valor simulado optimizado, con estos datos podemos decir que el aglomerado y el aglomerado recubierto son buenos materiales, que permiten una transmisión de datos muy accesible a la frecuencia de 94GHz, dado el valor estipulado en la UIT sobre este material.

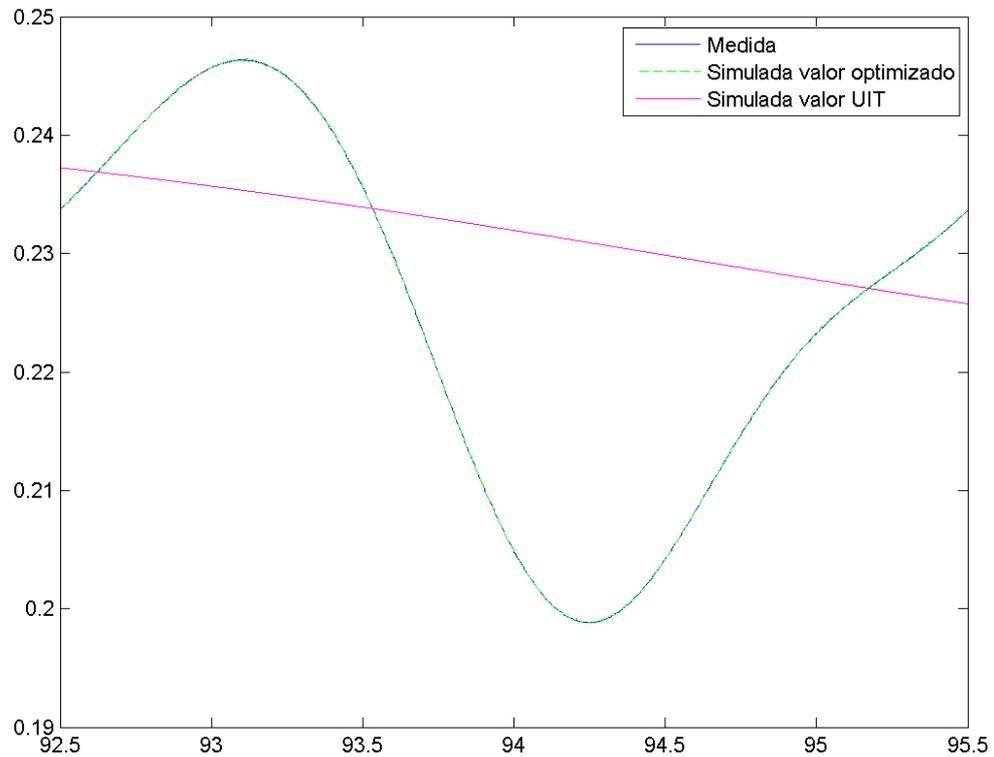


Figura 30 Transmisión medida y simulada para el material aglomerado. Eje horizontal es la frecuencia en GHz y el eje vertical el valor de la transmisión en valor absoluto [0,1].



II.-SIMULADOR LANZADOR DE RAYOS UTILIZANDO EL PROGRAMA UNITY.

¿Qué es Unity?

Unity es un motor de videojuego multiplataforma creado por Unity Technologies. Unity está disponible como plataforma de desarrollo para Microsoft Windows, OS X, Linux. La plataforma de desarrollo tiene soporte de compilación con diferentes tipos de plataformas. [R1]

Características Principales

Unity puede usarse junto con *Blender*, *3ds Max*, *Maya*, *Softimage*, *Modo*, *ZBrush*, *Cinema 4D*, *Cheetah3D*, *Adobe Photoshop*, *Adobe Fireworks* y *Allegorithmic Substance*. Los cambios realizados a los objetos creados con estos productos se actualizan automáticamente en todas las instancias de ese objeto durante todo el proyecto sin necesidad de volver a importar manualmente.

El motor gráfico utiliza OpenGL (en Windows, Mac y Linux), Direct3D (solo en Windows), OpenGL ES (en Android y iOS), e interfaces propietarias (Wii). Tiene soporte para mapeado de relieve, reflexión de mapeado, mapeado por paralaje, pantalla de espacio oclusión ambiental (SSAO), sombras dinámicas utilizando mapas de sombras, render a textura y efectos de post-procesamiento de pantalla completa. [R1]

Puede incluir múltiples variantes y una especificación declarativa de reserva, lo que permite a Unity detectar la mejor variante para la tarjeta de vídeo actual y si no son compatibles, recurrir a un shader alternativo que puede sacrificar características para una mayor compatibilidad. [R1]

El soporte integrado para Nvidia, el motor de física PhysX, (a partir de Unity 3.0) con soporte en tiempo real para mallas arbitrarias y sin piel, ray casts gruesos, y las capas de colisión. [R2]

El script se basa en Mono, la implementación de código abierto de .NET Framework. Los programadores pueden utilizar UnityScript (un lenguaje personalizado inspirado en la sintaxis ECMAScript), C# o Boo (que tiene una sintaxis inspirada en Python). A partir de la versión 3.0 añade una versión personalizada de Mono DEVELOP para la depuración de scripts [R2].

Unity también incluye Unity Asset Server - una solución de control de versiones para todos los assets de juego y scripts, utilizando PostgreSQL como backend, un sistema de audio construido con la biblioteca FMOD, con capacidad para reproducir audio comprimido Ogg Vorbis, reproducción de vídeo con códec Theora, un motor de terreno y vegetación, con árboles con soporte de billboarding, determinación de cara oculta con Umbra, una función de iluminación lightmapping y global con Beast,



redes multijugador RakNet y una función de búsqueda de caminos en mallas de navegación. [R2]

Mecanim

Mecanim es la tecnología de animación de Unity. La tecnología está diseñada para llevar el movimiento fluido y natural de los personajes con una interfaz eficiente. Mecanim incluye herramientas para la creación de máquinas de estados, árboles de mezcla, manipulación de los conocimientos nativos y retargeting automático de animaciones, desde el editor de Unity. [R2]

Lenguaje de Programación C#

C# (pronunciado si Sharp en inglés) es un lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado y estandarizado por Microsoft como parte de su plataforma.NET, Su sintaxis básica deriva de C/C++ y utiliza el modelo de objetos de la plataforma.NET el cual es similar al de Java, aunque incluye mejoras derivadas de otros lenguajes (entre ellos Delphi).

Programación en JavaScript

JavaScript es un lenguaje de programación que se utiliza principalmente para crear páginas web dinámicas. Una página web dinámica es aquella que incorpora efectos como texto que aparece y desaparece, animaciones, acciones que se activan al pulsar botones y ventanas con mensajes de aviso al usuario. Técnicamente, JavaScript es un lenguaje de programación interpretado, por lo que no es necesario compilar los programas para ejecutarlos.

En otras palabras, los programas escritos con JavaScript se pueden probar directamente en cualquier navegador sin necesidad de procesos intermedios. A pesar de su nombre, JavaScript no guarda ninguna relación directa con el lenguaje de programación Java.

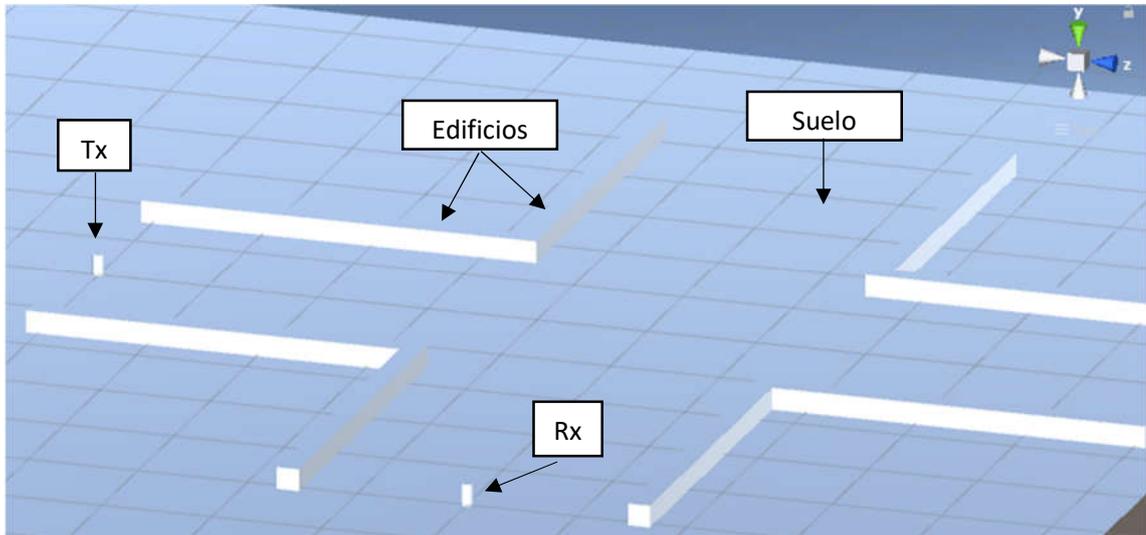
Código en Microsoft Visual Studio.

Al tener instalado Unity debemos ejecutar y crear un nuevo escenario que será nuestra área de trabajo [U25].

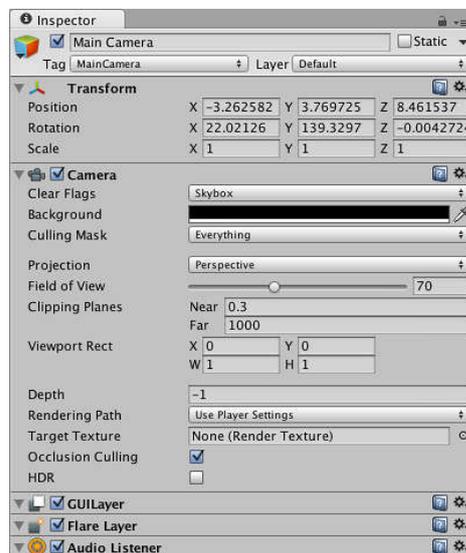
Para llevar a cabo el simulador para trazado de rayos, ocupamos 3 etapas.

Primera etapa: mediante los gráficos que tiene incorporado el software Unity, representamos un cruce vial, los planos y cubos se han de colocar para simular el suelo, casas y edificios.

Colocar un transmisor (Tx) y un receptor (Rx), donde el Tx y Rx se deben construir con un cilindro y una esfera, donde la esfera simula el patrón de radiación que una antena tiene y el cilindro solo simula la posición fija o móvil de la antena [U1].



Para tener las posiciones del Tx y del Rx, de los bloques (edificios), suelo, es necesario observar que en la ventana del escenario del lado derecho superior se encuentra una ventana muy importante, la cual nos permite conocer los datos generales de cada objeto colocado en el área de trabajo.



Cuando se selecciona un GameObject en la vista Jerárquica o Escena, el Inspector muestra las propiedades de todos los componentes y Materiales de ese



GameObject. El Inspector sirve para editar la configuración de estos componentes y materiales.

Cuando los elementos de trabajo tienen componentes de script personalizados adjuntos, el Inspector muestra las variables públicas de ese script. Puede editar estas variables como ajustes de la misma manera que puede editar la configuración de los componentes integrados del Editor. Esto significa que puede configurar los parámetros y valores por defecto en sus scripts fácilmente sin modificar el código.

En este caso el script principal pertenecerá al transmisor (Tx), debido a que de este partirán los rayos que nos permitirán hacer el simulador.

Segunda etapa: El lanzador de rayos debe permitir al usuario manipular el Rx, de tal manera que pueda realizar un desplazamiento horizontal o vertical sobre el área delimitada de trabajo y de recepción de los rayos.

Para ello es necesario implementar el código siguiente:

```
#pragma strict
var velocidad : int;
var velocidad2 : int;

function Start () {
}
function Update ()
{
    if(Input.GetKey("down"))
    {
        //x+
        var x = 1 * Time.deltaTime * velocidad;
        transform.Translate(new Vector3 (1,0,0)*x);
    }
    if(Input.GetKey("up"))
    {
        //x-
        var x1 = 1 * Time.deltaTime * velocidad;
        transform.Translate(new Vector3 (-1,0,0)*x1);
    }
    if(Input.GetKey("right"))
    {
        //z+
        var z = 1 * Time.deltaTime * velocidad2;
        transform.Translate(new Vector3 (0,0,1)*z);
    }
    if(Input.GetKey("left"))
    {
        //z-
        var z1 = 1 * Time.deltaTime * velocidad2;
        transform.Translate(new Vector3 (0,0,-1)*z1);
    }
}
```



El código anterior pertenece a un script que ha sido desarrollado en *JavaScript* y debe ser adjuntado en el Rx, ya que será el objeto que estará en movimiento durante la ejecución del proyecto.

El Rx se podrá desplazar mediante las teclas de navegación de la computadora, derecha, izquierda, arriba, abajo. [U27]

Tercera etapa: La última etapa del lanzador de Rayos, es el desarrollo e implementación del código que nos permita lanzar una esfera de rayos, que a su vez y por consecuencia de las señales electromagnéticas haya rayo directo o rayo reflejado (si el mismo rayo ha detectado una colisión).

Para lanzar una esfera de rayos, principalmente se necesita lanzar un primer Rayo (Raycast Hit) [U28], el cual nos regresa datos para procesarlos, este rayo con un bucle *if* más un comando que nos permitirá girar los vectores (x,z) y con el tiempo maquina permite visualizar una esfera de rayos.[U29]

Enseguida se muestra el comando utilizando para girar vectores en el espacio de trabajo.

```
for (int j = 0; j < 180; j = j + 3)
{
    //Rotacion de los ejes segun los incrementos de las variables i j
    rotation = Quaternion.Euler(0, j, i);
    Ray ray = new Ray(transform.position, rotation * transform.right);
    //lanza un rayo en la direccion y angulo mencionada
    RaycastHit[] hits = Physics.RaycastAll(ray, 100);
```

Para obtener el rayo reflejado de cualquier rayo lanzado se requiere de un comando especial, permitiéndonos también obtener la normal si así se desea, siempre y cuando los datos que solicita el vector sean los adecuados. [U30]

```
RaycastHit[] ReM1 = Physics.RaycastAll(hit1_0.point, Vector3.Reflect(hit1_0.point - transform.position, hit1_0.normal));
// lanza un rayo reflejado con respecto al punto de impacto con el Material
```



Parte importante de conseguir identificar donde cada rayo está golpeando es colocando “tags”, que son identificadores dentro de un programa, se colocan en los GameObject para cuando el programa pida conocer si ha colisionado con algo en específico.

```
if (hit1_1.collider.gameObject.tag == "ERx") // Si colisiona con el receptor
```

El cálculo de ángulos es necesario para poder calcular el campo eléctrico para los rayos reflejados, para ello es importante utilizar el comando siguiente:

```
Angle1_3 = Vector3.Angle(hit1_0.point - target1.position, transform.position-target1.position);
```

Dos puntos importantes se obtienen de la posición del Tx y del Rx, para poder tenerlos se adjunta el Tx y el Rx en un target.position, distinto para cada uno. Este comando nos permite obtener los datos de posición de cualquier Gameobject.

Para realizar operaciones matemáticas en C# script es importante respetar cada una de las funciones que tiene permitido, para la realización del lanzador de rayos, se necesitaron funciones y operadores que Unity sin problema alguno puede ejecutar.

A continuación, se muestra cómo se calculó el campo eléctrico para rayo directo, utilizando funciones y operadores para unity.

```
// Calcular el campo electrico para rayo directo
//float RD1 = ((E0) / (r1_2)) * (Mathf.Exp(((Ima) * (K) * (r)))); // Calcula el valor del
Rayo directo al llegar al receptor
//Debug.Log(RD1);
float A = E0 / r1_2;
float B = (K) * (r1_2);
float RD1 = (A) * (Mathf.Cos(B));
//Debug.Log(RE1);
float IMA1 = (A) * (Mathf.Sin(B));
//Debug.Log(IMA1);

//Modulo
float MD = Mathf.Sqrt(((RD1)*(RD1)) + ((IMA1)*(IMA1)));
//Fase
float FD = Mathf.Atan((IMA1) / (RD1));
```

Al final, obtenemos el programa donde podemos calcular el campo eléctrico para rayo directo y rayo reflejado, utilizado para calcular en futuras simulaciones la transmisión, la potencia, la polarización. El programa final se muestra en el Apéndice A.



CONCLUSIONES

La experiencia de esta estancia de investigación cumplió su objetivo, mi incorporación en este proyecto ha sido muy importante para mi formación profesional y de un gran interés.

El trabajo desarrollado en el área de investigación en ingeniería de comunicaciones estuvo vinculado con el conocimiento adquirido en el aula durante mis estudios en el programa educativo de ingeniería en electrónica que imparte la UAEM, siendo parte fundamental en el desarrollo de los ingenieros en electrónica, aunado que la relevancia actual en las comunicaciones móviles es un gran campo de investigación, el grupo SiCoMo (Sistemas de Comunicaciones Móviles) de la Universidad Politécnica de Cartagena, España, investiga la adquisición de datos y el desarrollo experimental del conocimiento de la tecnología 5G (quinta generación), que permite tener una conexión inalámbrica de gran velocidad para subir y descargar datos.

Durante 3 meses de la estancia, trabajamos con las campañas de medición, para caracterizar diferentes materiales, de los cuales algunos se muestran en los resultados, pero para poder llegar a estos resultados, tuvimos que pasar por más de 20 pruebas con cada material.

Durante febrero-marzo 2017, comenzamos a determinar los materiales que se utilizaron en las campañas de medición, colocarlos en medidas para ponerlos sobre las bases cuadradas que nos ayudarían a tener el material inmovilizado durante la medición. Algunos de los materiales que fueron descartados esta el tabique, el azulejo, debido a las medidas y condiciones físicas que tienen estos materiales, pero lo más importante fue cuando se realizaron las pruebas iniciales.

Durante las pruebas piloto para saber cómo se comportarían los materiales, teníamos los convertidores montados sobre las plataformas lineales las cuales eran controlados para variar la distancia que tenían los convertidores entre si (TX y RX), la calibración de los convertidores siempre fue directa, es decir, interconectando los convertidores utilizando una mesa para mantenerse fijos e inmóviles, cuando se colocaban los convertidores sobre las plataformas y el material colocado a la mitad de distancia de los convertidores, como barrera para la transmisión de las ondas electromagnéticas, se realizaban tres lecturas y capturas de datos, cuando terminaba, se modificaba la distancia que hay entre convertidores aumentándola, se volvía a realizar tres lecturas y capturas de datos, al terminar, se volvía a modificar la distancia y se tomaban nuevamente tres lecturas y capturas de datos, estas lecturas y capturas de datos se realizaban a través del analizador vectorial que a su vez estaba conectado la computadora con ayuda del software Matlab y algoritmos desarrollados por los investigadores procesaban la información



obteniendo la permitividad, la potencia relativa transmitida y el valor absoluto de transmisión.

Cuando terminamos de realizar las pruebas pilotos con cada uno de los materiales y con los convertidores variando su distancia, los resultados obtenidos cambiaban mucho de una medición a otra medición, se realizó el análisis de por qué estaba pasando este efecto y cambio en las mediciones, al reunirnos en el laboratorio y observar el sistema de lanzador de rayos en físico, observamos que los convertidores al cambiar su distancia entre sí, también se modificaba la visión de las antenas una con otra y con ello las ondas electromagnéticas no viajaban correctamente; al encontrar este posible error, se decidió retirar las plataformas lineales y colocar los convertidores de ondas sobre mesas.

Al tener esta posible solución, comenzamos nuevamente a calibrar distancias, altura, y posición de los convertidores, al igual que los materiales fijar su posición entre los convertidores y también fijar la altura de los soportes para materiales, para que las antenas estén direccionadas al centro del material y con ello asegurar la correcta transmisión de las ondas electromagnéticas.

Después de haber realizado la posible solución, se comenzaron a realizar nuevamente pruebas piloto para conocer el comportamiento de los materiales con este ajuste en el sistema de lanzador de rayos en configuración rayo directo.

Al procesar los datos, nos percatamos que las mediciones no están tan alejadas una de otra respecto de cada material, al reportar esta situación al grupo, se toma la decisión de comenzar a caracterizar los materiales que mostraban un comportamiento esperado.

Parte de la experiencia que he adquirido al pertenecer a este equipo de investigación es el uso de instrumentación, que durante la carrera de ingeniería muy poco están presentes y en algunos casos no están en los laboratorios, tal y como es el caso de los convertidores de ondas milimétricas siendo unos dispositivos que permiten trabajar con ondas electromagnéticas en el rango de los GHz y que tienen la flexibilidad de trabajar con múltiples tipos de antenas para diferentes tipos de transmisión de datos.

Organización de tareas, la objetividad que deben tener los proyectos, la responsabilidad que se debe tener al realizar cada proyecto, el compromiso de trabajo, su metodología experimental y el ser constante en el trabajo que se desarrolla.

Los resultados mostrados reflejan el trabajo de investigación realizado, los cuales fueron satisfactorios para el grupo de investigación, en los materiales utilizados en las campañas de medición a cada uno se le realizó el proceso de caracterización, de permitividad, de polarización, de transmisión y campo eléctrico.



El trabajo hecho en cada material requería de un tiempo promedio de 40 minutos, haciendo la colocación del material, ajuste de parámetros, calibración y medición.

De las complicaciones en el desarrollo del proyecto, fue el trabajar con el material “yeso”, debido a la forma de cada placa, no permitía hacer un empalme de dos placas correctamente; cada placa contaba con una parte completamente lisa y por la otra cara contaba con arterias, al realizar las mediciones nos arrojaba un valor de transmisión y de permitividad fuera de los rangos establecidos, al analizar la forma de cada placa nos dimos cuenta que se debía a las arterias que generaban un espacio y a su vez un vacío, después de haber realizado varias pruebas, se tomó la decisión de rebajar las arterias para obtener un mejor empalme.

Al terminar este proceso de caracterización, entender el comportamiento de diferentes materiales en el rango de frecuencia de los 94GHz, las pérdidas que existen cuando se realiza una transmisión como lo hacemos en la vida diaria, permite entender cómo se afectan las comunicaciones en cualquier lugar del mundo, y que se pueden proponer soluciones para mejorar los procesos de comunicación, ese es el objetivo del desarrollo de la tecnología 5G, mejorar la forma de comunicación, tener menores pérdidas en la transmisión de datos y asegurando la comunicación constante.

La simulación de procesos a través de software ha permitido conocer el comportamiento antes de ser realizados físicamente y tener un ahorro en costos de fabricación. La idea de desarrollar un simulador de rayos en el área de comunicaciones puede permitir conocer el comportamiento de los materiales y obtener datos de transmisión, permitividad, entre otros, sin hacer un gasto monetario para armar los escenarios físicos.

La retroalimentación que obtuve al desarrollar este proyecto me ha servido en mi desarrollo profesional de tal forma que me ha permitido realizar un autoempleo donde tiene como objetivo desarrollar proyectos tecnológicos



BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. M. M. L. J. Juan Pascual, *Sistemas de Comunicaciones Móviles (Caracterización del canal móvil)*, Primera ed., Cartagena, España: MORPI, S.L., 2010.
- [2] J. M. D. P. Q. L. J. L. Juan Pascual García, *Comunicaciones Móviles, Lección 1.1 Introducción*, Cartagena, España, 2017.
- [3] (. I. A. M. F. I. (. F. I. ZHENGQING YUN, «Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications,» *IEEE Access*, July 8, 2015,.
- [4] M. G. Sánchez Iñigo Cuiñas, «Building Material Characterization from Complex Transmissivity Measurements at 5.8 GHz,» *IEEE*, vol. 48, nº 8, p. 3, 2000.
- [5] G. A. Sánchez, «Análisis de un canal MIMO en las bandas de 60 y 94 GHz mediante un trazador de rayos.,» Cartagena, España, 2019.
- [6] F. A. C. Giménez, «Estudio de la difracción múltiple a 60Hz,» Cartagena, España, Octubre, 2016.
- [7] J. M. M. L. J. Juan Pascual, *Comunicaciones Móviles Lección 1.6 Sistemas de Medida en banda estrecha y banda ancha.*, Cartagena, España, 2017.
- [8] M. G. S. M. I. a. I. C. Ana Vázquez Alejos, «Measurement and Analysis of Propagation Mechanisms at 40 GHz: Viability of Site Shielding Forced by Obstacles,» *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. 57, nº 6, p. 12, 2008.
- [9] L. d. i. M. (UPC), «PERMITIVIDAD RELATIVA DE UN MATERIAL LINEAS EQUIPOTENCIALES,» Catalunya, 2014, p. 4.
- [10] D. M. C. P. Estremera, *Polarización*, Navarra, España, 2012.
- [11] J. M. D. P. Q. L. J. L. Juan Pascual García, *Comunicaciones Móviles Lección 1.3. Caracterización del Canal Radio en pequeña escala. Funciones de transferencia.*, Cartagena, España, 2017.
- [12] J. M. D. P. Q. L. J. L. Juan Pascual García, *Comunicaciones Móviles Lección 1.4 Parámetros del canal móvil. Tipos de desvanecimiento.*, Cartagena, España, 2017.



- [13] A. A. López, «Desarrollo de una herramienta para predecir la calidad de servicio de redes de interior de siguiente generación,» Cartagena, España, Abril, 2015.
- [14] A. J. N. Gil, «Desarrollo e implementación de un sistema de medidas de coberturas radio basado en un analizador de espectros y un GPS.,» Cartagena, España, Febrero, 2018.
- [15] S. G. López, «Análisis del canal inalámbrico en 60 GHz en un entorno interior mediante el programa Wireless InSite,» Cartagena, España, Octubre, 2016.



GLOSARIO DE TERMINOLOGIA

ELDI: Edificio de Laboratorios Docentes y de Investigación.

GSM Global System of Mobile Communication”.

LOS (Line Of Sight).

narrowband: Sistema de banda estrecha.

PMR: Red móvil privada (-Private Mobile Radio).

PDA. Asistentes digitales personales.

Rx: Receptor.

Scattering: Dispersión.

Small-scale fading: Desvanecimiento en pequeña escala.

Tx: Transmisor.

UIT: Unión internacional de Telecomunicaciones.

Unity: Motor de videojuego multiplataforma creado por Unity Technologies.

VNA: Analizador de redes vectorial.

wideband: Sistemas de banda ancha.

WSS: Canal estacionario en sentido amplio.

Banda estrecha: Término aplicado a las facilidades de telecomunicaciones con capacidad para transportar solamente voz, imágenes de facsímil, imágenes lentas de vídeo y transmisión de datos a velocidad de “kilobyte”.

desviación estándar: La desviación estándar es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos.

Propagación: Hacer llegar ondas desde un punto a muchos lugares y en todas las direcciones.

Trazado: Preparar un plan o proyecto con un fin en común.

C++: Lenguaje de programación a pesar de ser un lenguaje con muchos años, su gran potencia lo convierte en uno de los lenguajes de programación más demandados en 2019.

Microcélulas: Proporcionan cobertura y capacidad adicional en los lugares donde hay una gran cantidad de usuarios



Redes: Organización formada por un conjunto de establecimientos de un mismo ramo, y en ocasiones bajo una misma dirección, que se distribuyen por varios lugares de una localidad o zona geográfica para prestar un servicio.

Radiocomunicaciones: Telecomunicación que se realiza por medio de ondas radioeléctricas.

Excitación: Hacer que se produzca o se intensifique una actividad o estado.

Ondas electromagnéticas: Es la perturbación simultánea de los campos eléctricos y magnéticos existentes en una misma región.

Caracterización: Determinar las cualidades o rasgos característicos de una persona o una cosa.

Multi-trayecto: es un fenómeno consistente en la propagación de una onda por varios caminos diferentes. Ello se debe a los fenómenos de reflexión y de difracción.

Espacio libre: Término usado para describir un área abierta sin obstrucciones.

Inducción: Suposición o conclusión a la que se llega con esta forma de razonamiento.

Modulación AM: La modulación de amplitud o amplitud modulada es una técnica utilizada en la comunicación electrónica, más comúnmente para la transmisión de información a través de una onda transversal.

Bidireccional: tiene dos direcciones.

Duplexor: es un dispositivo electrónico que permite la comunicación bidireccional sobre una misma línea de transmisión.

Ondas ionosféricas: Que son las que se propagan por la ionosfera (capa superior de las atmósferas que va de los 50 a los 500 kilómetros).

Ondas troposféricas: Que son las que se propagan por la troposfera (capa baja de la atmósfera que llega hasta los 10 kilómetros de altura).

Atenuación: Disminución de la intensidad, la importancia o el valor de un hecho o de un suceso.

Desfasamiento: un desajuste, un desacople o una desarticulación.

Empírico: Que está basado en la experiencia y en la observación de los hechos

Dielectrico: Que es aislante o mal conductor del calor o la electricidad.

Algoritmo: Serie de pasos específicos para cumplir un objetivo o tarea.



APÉNDICE A

Programa “Lanzador de rayos”

El siguiente cuadro muestra el código final utilizado para calcular el campo eléctrico de un lanzador de rayos en rayo directo y rayo reflejado.

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class Tx : MonoBehaviour
{
    public float y1;
    public float z1;
    public float Dis;
    public float Tx1;
    public float Ty;
    public float Tz;
    public float Rx;
    public float Ry;
    public float Rz;

    public int wallcase = 5;

    // Use this for initialization
    void Nrayos()
    {
        float NRY = 360 / y1; //calcula el No. de rayos en el eje y
        float NRZ = 360 / z1; // Calcula el No. de rayos en el eje Z
        NR = NRY * NRZ;
        //Debug.Log(NR);}
    }
    void distancia()
    {
        // Modulo para calcular el valor de r con el teorema de pitagoras
        float HTy = ((Ty - Ry) * (Ty - Ry)); // Calcula la Altura total entre el TX y RX
        //Debug.Log(HTy);
        DTx = ((Rx - Tx1) * (Rx - Tx1)); // Calcula la distancia ineal entre el TX y RX
        //Debug.Log(DTx);
        r = (Mathf.Sqrt(HTy + DTx)); // obten el valor de r
        //Debug.Log(r + "valor de r");
        // termina Modulo para callcular el valor de
    }
    void Cdirecto()
    {
        // Calcular el campo electrico para rayo directo
        //float RD1 = ((E0) / (r1_2)) * (Mathf.Exp(((Ima) * (K) * (r)))); // Calcula el valor del Rayo directo al
        //llegar al receptor
        //Debug.Log(RD1);
        float A = E0 / r1_2;
        float B = (K) * (r1_2);
        float RD1 = (A) * (Mathf.Cos(B));
        //Debug.Log(RE1);
        float IMA1 = (A) * (Mathf.Sin(B));
        //Debug.Log(IMA1);

        //Modulo
        float MD = Mathf.Sqrt(((RD1)*(RD1)) + ((IMA1)*(IMA1)));
        //Fase
        float FD = Mathf.Atan((IMA1) / (RD1));
    }
}
```



```
void Creflejado()
{
    // Calcular el campo electrico para rayo reflejadp
    //float RD1 = ((E0) / (r1_2)) * (Mathf.Exp(((Ima) * (K) * (r)))); // Calcula el valor del Rayo
    directo al llegar al receptor
    //Debug.Log(RD1);
    float R = 1;
    float A = E0 / r1_2;
    float B = (K) * (r1_2);
    float RR1 = (A) * (Mathf.Cos(B));
    //Debug.Log(RE1);
    float IMA2 = (A) * (Mathf.Sin(B));
    //Debug.Log(IMA1);

    //Modulo
    float MR = Mathf.Sqrt(((RR1)*(RR1))+((IMA2)*(IMA2)));
    //Fase

    float FR = Mathf.Atan((IMA2)/(RR1));
}

void Start()
{
}

// Update is called once per frame
void Update()
{
    // Modulo para callcular el valor de K
    float dospi = ((2) * (Mathf.PI));
    //Debug.Log(pi);
    float lamda = ((c) / (f));
    //Debug.Log(lamda);

    K = dospi / lamda;
    // termina el calculo de K

    Quaternion rotation = Quaternion.identity;
    // eje z
    for (int i = 0; i < 360; i = i + 15)
    {
        // eje Y
        for (int j = 0; j < 180; j = j + 3)
        {
            Nrayos();
            distancia();
            //Rotacion de los ejes segun los incrementos de las variables i j
            rotation = Quaternion.Euler(0, j, i);
            Ray ray = new Ray(transform.position, rotation * transform.right); //lanza un rayo en la
            direccion y angulo mencionada
            RaycastHit[] hits = Physics.RaycastAll(ray, 100);
            //Debug.DrawRay(transform.position, rotation * transform.right * 100, Color.red); // dibuja el
            rayo en color negro
            //Debug.Log("Material detectado "); //Meciona que has colisionado con el Material

            //Debug.DrawLine(transform.position, hit1_0.point, Color.cyan); // dibuja la linea
            del rayo directo a donde colisiona
            RaycastHit[] ReM1 = Physics.RaycastAll(hit1_0.point, Vector3.Reflect(hit1_0.point -
            transform.position, hit1_0.normal)); // lanza un rayo reflejado con respecto al punto de impacto con el
            Material

            //Debug.DrawRay(hit1_0.point, Vector3.Reflect(hit1_0.point - transform.position, hit1_0.normal), Color.yellow);
            // Dibuja el rayo relfejado con reespecto al punto de impacto con el material
        }
    }
}
```



```
        foreach (RaycastHit hit1_1 in ReM1)
        {
            //Debug.DrawLine(hit1_1.point, Vector3.Reflect(hit1_1.point, hit1_1.normal),
            Color.gray); //Dibuja La normal con respecto al punto de impacto con el Receptor

            if (hit1_1.collider.gameObject.tag == "ERx")    // Si colisiona con el
receptor
            {
                //Debug.DrawRay(hit1_0.point, Vector3.Reflect(hit1_0.point -
transform.position, hit1_0.normal), Color.magenta);    // Dibuja el rayo reflejado con respecto al punto
de impacto con el material
                //Debug.Log("Rayo Reflejado");

                //Debug.DrawLine(transform.position, hit1_1.point, Color.cyan); // dibuja
la linea del rayo directo a donde colisiona

                Debug.DrawRay(hit1_0.point, Vector3.Reflect(hit1_0.point -
transform.position, hit1_0.normal), Color.magenta);    // Dibuja el rayo reflejado con respecto al punto
de impacto con el material

                // Calcular el angulo de llegada del rayo reflejado al Receptor
                Angle1_3 = Vector3.Angle(hit1_0.point - target1.position,
transform.position - target1.position);
                Debug.Log("Angulo de impacto rayo reflejado " + Angle1_3 + "°");

                r1_1 = hit1_0.distance + hit1_1.distance; // fija a r2 la suma de la
distancia del rayo directo con el rayo reflejado
                //Debug.Log(r1_1);
                Creflejado();
            }
        }
    }
}
}
```



APÉNDICE B

Para llevar a cabo el lanzador de rayos mediante Unity fue necesario realizar una investigación a fondo para poder conocer el software, para ello se ocuparon varios canales de internet y enseguida se muestran en una tabla todos y cada uno de los que se consultó.

UNITY CONSULTAS [U]		
Rigidbody 3D	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-Rigidbody.html [U1]
Character controllers	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/CharacterControllers.html [U2]
collinders	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/CollidersOverview.html [U3]
Box Collinders	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-BoxCollider.html [U4]
Sphere Collider	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-SphereCollider.html [U5]
Capsule Collider	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-CapsuleCollider.html [U6]
Mesh Collider	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-MeshCollider.html [U7]
Wheel Collider	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-WheelCollider.html [U8]
Terrain collider	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-TerrainCollider.html [U9]
Physic Material	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-PhysicMaterial.html [U10]
Transform	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-Transform.html [U11]
Meshes	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-Mesh.html [U12]
Particule system	Propiedades	file:///C:/Program%20Files/Unity/Editor/Data/Documentation/en/Manual/class-ParticleSystem.html [U13]
Hinge joint	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-HingeJoint.html [U14]
Spring joint	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-SpringJoint.html [U15]
Carácter joint	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-CharacterJoint.html [U16]



Configurable joint	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-ConfigurableJoint.html [U17]
Constant forcé	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-ConstantForce.html [U18]
Cloth	Propiedades	https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-Cloth.html [U19]
raycasting	Propiedades	https://www.youtube.com/watch?v=P0PHY1hJp5k [U20]
comandos	Propiedades	https://docs.unity3d.com/ScriptReference/ [U21]
Creación de materiales y texturas	Propiedades	https://www.youtube.com/watch?v=pNF1Fwx3tv4 [U22]
Colocar texturas 3D	Propiedades	https://www.youtube.com/watch?v=CFkmgR25ED4 [U23] https://www.youtube.com/watch?v=MbPvuc1--mo [U24]
Unity Interface & essentials	Propiedades	https://unity3d.com/es/learn/tutorials/topics/interface-essentials [U25]
Inspector	Propiedades	https://docs.unity3d.com/Manual/UsingTheInspector.html [U26]
Translate	Propiedades	https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Transform.Translate.html [U27]
Raycast Hit	Propiedades	https://docs.unity3d.com/ScriptReference/RaycastHit.html [U28]
Quaternion	Propiedades	https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Quaternion-identity.html [U29]
Reflect, Normal	Propiedades	https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Vector3.Reflect.html [U30]
Tags (etiquetas)	Propiedades	https://docs.unity3d.com/Manual/Tags.html [U31]
	General	http://www.moddb.com/engines/unity [R1]
	General	http://www.blogs.unity3d.com/ [R2]