



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES
Y REDES**

**“DETERMINACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN
EMPÍRICO PARA ESTABLECER LAS PÉRDIDAS DE
PROPAGACIÓN EN UNA CÁMARA ANECOICA”**

TRABAJO DE TITULACIÓN:

TIPO: PROYECTO TÉCNICO

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO ELECTRÓNICO EN TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

**AUTORES: MARCO JAVIER SUÁREZ CHÁVEZ
EDISON MAURICIO SARMIENTO LÓPEZ**

TUTOR: Ing. JEFFERSON ALEXANDER RIBADENEIRA RAMIREZ PhD.

Riobamba - Ecuador

2019

©2018, Marco Javier Suárez Chávez y Edison Mauricio Sarmiento López

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: el proyecto técnico, “DETERMINACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN EMPÍRICO PARA ESTABLECER LAS PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN UNA CÁMARA ANECOICA, de responsabilidad de los señores MARCO JAVIER SUÁREZ CHÁVEZ y EDISON MAURICIO SARMIENTO LÓPEZ, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

FIRMAS

FECHA

M.Sc. Washington Luna Encalada

**DECANO DE LA FACULTAD
DE INFORMÁTICA Y
ELECTRÓNICA**

Ing. Patricio Romero

DIRECTOR DE LA EIETR

Ing. Jefferson Ribadeneira PhD.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Ing. Hugo Moreno PhD.

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, MARCO JAVIER SUÁREZ CHÁVEZ Y EDISON MAURICIO SARMIENTO LÓPEZ, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados en este trabajo de titulación y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Marco Javier Suárez Chávez

Edison Mauricio Sarmiento López

DEDICATORIA

A Dios como ser supremo y creador nuestro y de todo lo que nos rodea y por haberme dado la inteligencia, paciencia y ser nuestro guía en nuestras vidas. A mis padres, quienes siempre han estado ahí para mí, brindándome su apoyo incondicional. A nuestro director del Trabajo de Titulación, Ing. Jefferson Alexander Ribadeneira Ramírez PhD.

Edison Mauricio Sarmiento López

Quiero dedicar este trabajo de titulación. En primer lugar, a Dios, por haberme permitido llegar a este momento de mi formación profesional. A mi madre Cleopatra por ser quien me ha impulsado a lo largo de mi vida y me ha dado su apoyo incondicional, por haber sido mi ejemplo. A ella que me enseñó a salir adelante, afrontando retos y a vencer las dificultades de cada día. A mi familia entera y en especial a mi abuelita Marujita por aconsejarme y estar pendiente de mi formación tanto personal como académica.

Marco Javier Suárez Chávez

AGRADECIMIENTO

A Dios todo poderoso por brindarme la oportunidad de obtener este triunfo, y darme salud, sabiduría, y entendimiento para lograr esta meta. A mis queridos padres, por ser siempre incondicionales y darme siempre su apoyo en todo momento, gracias por existir, y que Dios los bendiga siempre.

A la ilustre ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, a mis maestros que han sido parte fundamental de mi formación profesional. A mis amigos y compañeros de la ESPOCH, quienes me han permitido formar parte de sus vidas y compartir gratos momentos, gracias a todos de corazón.

Edison Mauricio Sarmiento López

Agradezco a Dios por bendecirme con vida, y darme la oportunidad de superar esta etapa, a mi madre y mi familia por ser los promotores de mis sueños, por confiar y creer que los puedo cumplir. Gracias por todos los consejos y valores que me han inculcado.

Agradecemos a todos nuestros docentes de la ESPOCH, por haber compartido sus conocimientos y experiencias a durante nuestra formación, en especial a nuestro tutor Ing. Jefferson Alexander Ribadeneira Ramírez PhD, por habernos guiado con paciencia y rectitud desde la primera clase.

Marco Javier Suárez Chávez

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
1.1 Cámara anecoica	5
1.1.1 <i>Diseño de cámaras anecoicas</i>	6
1.1.1.1 <i>Dimensión</i>	6
1.1.1.2 <i>Aislamiento</i>	7
1.1.1.3 <i>Paredes</i>	8
1.1.1.4 <i>Temperatura y humedad</i>	8
1.1.1.5 <i>Absorción</i>	9
1.2 Campo lejano (Far-field)	10
1.3 Tecnologías celulares	12
1.3.1 5G	12
1.4 Espectro	12
1.5 mmWAVE	14
1.6 Modelos de propagación	14
1.6.1 <i>Modelos empíricos</i>	15
1.6.1.1 <i>Modelo de Okumura</i>	15
1.6.1.2 <i>Modelo de LEE</i>	15
1.6.1.3 <i>Modelo de Young</i>	16
1.6.2 <i>Modelos Semi-Empíricos</i>	16
1.6.2.1 <i>Modelo de Okumura-Hata</i>	17
1.6.2.2 <i>Modelo de Walfish-Ikegami</i>	18
1.7 Parámetros y tipos de antenas	19
1.7.1 <i>Características de las antenas</i>	20
1.7.1.1 <i>Diagrama de radiación</i>	20
1.7.1.2 <i>Ganancia</i>	20
1.7.1.3 <i>Directividad</i>	21
1.7.1.4 <i>Polarización</i>	21
1.7.2 <i>Antenas Tipo Corneta</i>	21
1.7.3 <i>Frecuencia de una antena de bocina</i>	22
CAPITULO 2	
2.1 Diseño e implementación de la cámara anecoica	25

2.1.1	<i>Campo lejano</i>	25
2.1.2	<i>Dimensiones de la camara</i>	26
2.1.3	<i>Modelado de la camara</i>	27
2.1.4	<i>Materiales</i>	27
2.1.4.1	<i>Ángulo de acero (6) y varilla cuadrada (3)</i>	27
2.1.4.2	<i>Told galvanizado (3 planchas)</i>	28
2.1.4.3	<i>Electrodos (9)</i>	28
2.1.4.4	<i>Ruedas (6)</i>	28
2.1.4.5	<i>Bisagras</i>	29
2.1.4.6	<i>Manijas de presión</i>	29
2.1.4.7	<i>Caucho Sintético</i>	29
2.1.4.8	<i>Espuma de poliuretano</i>	29
2.2	Caracterización de cable vs antenas	30
2.3	Metodología de medición	32
2.3.1	<i>En el espacio libre</i>	32
2.3.2	<i>En condiciones de presión</i>	33
2.3.3	<i>En presencia de humedad</i>	34
2.4	Variación de las condiciones climatológicas	34
2.4.1	<i>Condiciones de humedad</i>	34
2.4.2	<i>Condiciones de presión</i>	35
CAPÍTULO 3		
3.1	Resultados y discusión	37
3.2	Ganancia de la antena y perdidas de los cables	37
3.3	Construcción y prueba de la cámara anecoica	37
3.4	Perdidas de propagación medidas	39
3.4.1	<i>Perdidas de propagación variando la distancia</i>	39
3.4.2	<i>Perdidas de propagacion variando la frecuencia</i>	42
3.5	Determinacion de un modelo de propagacion	42
3.5.1	<i>Deduccion de un modelo de propagacion</i>	42
3.5.2	<i>Modelo de propagacion</i>	43
3.5.2.1	<i>En el espacio libre</i>	43
3.5.2.2	<i>En condiciones de presión</i>	47
3.5.2.3	<i>En condiciones de humedad</i>	49
CONCLUSIONES		52
RECOMENDACIONES		53
GLOSARIO		
BIBLIOGRAFÍA		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Coeficientes de Absorción de Diversos Materiales	9
Tabla 2-1 Propiedades Eléctricas de Polímeros	10
Tabla 3-1 Campo Lejano Según la Antena.....	12
Tabla 4-1 Distribución del Espectro por Tecnologías Hasta 3 GHz	13
Tabla 1-3 Resultados funcionamiento Cámara Anecoica	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Partes Cámara Anecoica.....	5
Figura 2-1 Jaula de Faraday	6
Figura 3-1 Dimensiones de una Cámara Anecoica	7
Figura 4-1 Esquema del Recinto, Vista de Corte	8
Figura 5-1 Región de Campo Lejano	11
Figura 6-1 Illustration of Milimeter-wave Mobile Access.....	14
Figura 7-1 Parámetros de Radiación	20
Figura 8-1 Antena Corneta.....	22
Figura 9-1 Patrón de Radiación de una Antena Horn	22
Figura 10-1 Antena Tipo Corneta	24
Figura 1-2 Diseño Cámara Anecoica en Software de Simulación	28
Figura 2-2 Implementación de la Cámara Anecoica.....	30
Figura 3-2 Medidas de Potencia con un Cable para Determinar la Pérdida del Mismo-----	31
Figura 4-2 Medidas de Potencia con dos Cables para Determinar la Pérdida del Mismo y sus Conectores-----	31
Figura 5-2 Medidas de Potencia con dos antenas Frente a Frente para Determinar la Ganancia de la Antena y Perdida del Acoplador-----	32
Figura 6-2 Válvula de Flujo de Oxígeno-----	36
Figura 1-3 Estructura Cámara Anecoica -----	38

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2 Funcionamiento de la Antena	30
Gráfico 2-2 Medición Condiciones de Vacío	33
Gráfico 3-2 Medición Condiciones de Presión	33
Gráfico 4-2 Medición Condiciones de Humedad	34
Gráfico 1-3 Perdidas Medidas de 10, 11, 12 y 13 GHz.....	40
Gráfico 2-3 Perdidas Medidas a 14, 15, 16 y 17 GHz.....	40
Gráfico 3-3 Perdidas Medidas a 18, 19 y 20 GHz.....	41
Gráfico 4-3 Perdidas Medidas a 0.25, 0.85, 1.15 y 1.95 m variando la frecuencia.....	42
Gráfico 5-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Vacío a 10, 11, 12 y 13 GHz.....	44
Gráfico 6-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Vacío a 14, 15, 16 y 17 GHz.....	45
Gráfico 7-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Vacío a 18, 19, y 20 GHz.....	46
Gráfico 8-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Presión a 10, 11, 12 y 13 GHz	47
Gráfico 9-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Presión a 14, 15, 16 y 17 GHz	48
Gráfico 10-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Presión a 18, 19 y 20 GHz	49
Gráfico 11-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Humedad a 10, 11, 12 y 13 GHz...	50
Gráfico 12-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Humedad a 14, 15, 16 y 17 GHz...	50
Gráfico 13-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Humedad a 18, 19 y 20 GHz.....	51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A Mediciones en Vacío, Presión y Humedad

Anexo B Calculo Constantes en Vacío

Anexo C Calculo Perdidas en Vacío

Anexo D Programa para Cálculos en el Vacío

Anexo E Calculo de Constantes y perdidas en Presión

Anexo F Programa para Cálculos Presión

Anexo G Calculo de Constantes y perdidas en Humedad

Anexo H Programa para Cálculos Humedad

Anexo I Programa para cálculo del Error Cuadrático Medio

Anexo J Manual Generador de Señales

Anexo K Manual de Usuario del Analizador de Espectros

Anexo L Fotos Tomadas del Durante la Realización del proyecto de Titulación

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	6
Ecuación 2.....	6
Ecuación 3.....	7
Ecuación 4.....	10
Ecuación 5.....	10
Ecuación 6.....	15
Ecuación 7.....	16
Ecuación 8.....	16
Ecuación 9.....	17
Ecuación 10.....	17
Ecuación 11.....	17
Ecuación 12.....	17
Ecuación 13.....	17
Ecuación 14.....	18
Ecuación 15.....	18
Ecuación 16.....	18
Ecuación 17.....	18
Ecuación 18.....	18
Ecuación 19.....	19
Ecuación 20.....	19
Ecuación 21.....	19
Ecuación 22.....	19
Ecuación 23.....	19
Ecuación 24.....	22
Ecuación 25.....	23
Ecuación 26.....	23
Ecuación 27.....	24
Ecuación 28.....	34
Ecuación 29.....	35
Ecuación 30.....	43
Ecuación 31.....	45

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se determinó un modelo de propagación empírico para establecer las pérdidas de propagación de 10 GHz a 20GHz en una cámara anecoica. Para dicha determinación se diseñó, simuló y construyó una cámara anecoica de dimensiones 0.8x0.8x2.40 m, la misma que fue recubierta internamente con espuma de poliuretano, dentro de la cámara antes mencionada se realizaron medidas de potencia para el cálculo de pérdidas en el enlace, estas medidas se las realizó a través de un generador de señales ANRITSU MG3692C, un analizador de espectro ANRITSU MS2724C y dos antenas tipo corneta, dichas medidas se las realizó variando distancia de 0.15 a 2.40m y frecuencia de 10 a 20 GHz con variaciones de 0.10 m y 1 GHz respectivamente. Las medidas fueron tomadas bajo las condiciones climatológicas de la región andina y a través de la inserción de O₂ y vapor de agua se simularon las condiciones climatológicas de la costa. Una vez ejecutadas las medidas se alcanzaron los valores promedios representados en gráficas a través de software de procesamiento de datos, las mismas que permitieron comparar las pérdidas obtenidas dentro de la cámara anecoica en el espacio libre y haciendo variaciones en el medio, como resultado de estas medidas se logró determinar de forma empírica un modelo de propagación de 10GHz a 20 GHz en la que se establecen las pérdidas de propagación dentro de un ambiente controlado (cámara anecoica).

PALABRAS CLAVE: <INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES>, <CAMPO ELECTROMAGNÉTICO>, <ANTENAS>, <CAMARA ANECOICA>, <MODELO DE PROPAGACION>, <PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN>.

ABSTRACT

In the current research, an empirical propagation model was determined in order to establish the propagation losses from 10 GHz to 20 GHz in an anechoic chamber. For this determination, an anechoic chamber of 0.8x0.8x2.40 m dimensions was designed, simulated and built, which was internally coated with polyurethane foam. Within the aforementioned chamber, power measurements were made to calculate losses in the communication link. These measurements were made through an ANRITSU MG3692C signal generator, an ANRITSU MS2724C spectrum analyzer and two cornet antennas. These measurements were made by varying the distance from 0.15 to 2.40 m and frequency from 10 to 20 GHz with variations of 0.10 m and 1 GHz respectively. The measurements were taken under the weather conditions of the Andean region and through the insertion of O₂ and water vapor the weather conditions of the coast region were simulated. Once the measurements had been carried out, the average values represented in graphs were reached through the data processing software, which allowed comparing the obtained losses inside the anechoic chamber in the free space and making variations in the medium. As a result of these measures, a propagation model from 10 GHz to 20 GHz was determined empirically, in which the propagation losses were established within a controlled environment (anechoic chamber).

KEYWORDS: <ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS>, <ELECTROMAGNETIC FIELD>, <ANTENNAS>, <ANECHOIC CHAMBER>, <PROPAGATION MODEL>, <PROPAGATION LOSSES>.

INTRODUCCIÓN

Resulta imprescindible aclarar los objetivos que abarcan el presente trabajo de titulación. En primer lugar, se surte una descripción del estado del arte de las principales aproximaciones a transmisiones en altas frecuencias, las mismas que se encuentran en estudios hasta la actualidad, especialmente en posibles aplicaciones de tecnología 5G de transmisiones celulares, a lo que hace énfasis el presente trabajo de titulación, este trabajo determina de forma empírica un modelo de propagación en frecuencias de 10GHz a 20 GHz para establecer las pérdidas de propagación dentro de una cámara anecoica, en su determinación se evaluarán medidas de potencia realizando variaciones de distancia y frecuencia bajo condiciones normales del medio en la región andina y realizando variaciones de O_2 y humedad para simular las condiciones climatológicas de la región costera del Ecuador. Por consiguiente, se efectúan gráficas mediante un software de procesamiento de datos permitiendo la determinación de dicho modelo empírico.

ANTECEDENTES

El término de bandas milimétricas (30-300GHz) aparenta ser nuevo al hablar de tecnologías de comunicaciones inalámbricas, pero se estudió en la década de 1890 cuando J. C. Bose experimentó con las mismas, casi al mismo tiempo que Marconi, quien en esa época había inventado las comunicaciones de radio. Como resultado de este estudio, en 1960 se presentó por primera vez al público a través de aplicaciones de Radio Astronomy, seguido de aplicaciones en el ejército en los años 70. (Adhikari, 2008).

En 2013 se realizó una investigación en el “Polytechnic Institute of New York University”, debido a la continua evolución de la tecnología y el uso masivo de internet, en la que estiman que para el 2020 las redes inalámbricas enfrentarán congestión, se propone un futuro en las comunicaciones inalámbricas donde las tasas de datos móviles se expandan a rangos de múltiples Gbps, siendo posible con el uso de antenas direccionales y espectro de ondas milimétricas soportando simultáneamente las comunicaciones móviles, con una posible convergencia de servicios celulares y de redes inalámbricas. Un espectro de ondas milimétricas permitirá a los proveedores de servicios celulares expandir en gran medida los anchos de banda del canal más allá de los actuales 20 MHz, que se usa actualmente en 4G. (Rappaport & others, 2013)

De igual manera en New York, el centro de investigación NYU Wireless se realizaron estudios donde se permitió visualizar coeficientes de reflexión y pérdidas de penetración para materiales de construcción a 28 GHz, para el diseño y despliegue de futuras redes de comunicación móvil

de onda milimétrica. Se utilizó un emisor de sonido y antenas orientables de 24,5 dBi para emular futuros dispositivos móviles con antenas adaptativas que probablemente se utilizarán en los futuros sistemas celulares milimétricos, este trabajo permitió concluir que según el material de construcción utilizado la penetración interior-exterior será bastante difícil a 28 GHz, mientras que la propagación interior-interior y exterior-exterior se apoya fácilmente en la fuerte reflectividad de los materiales de construcción externos y la baja atenuación de los materiales interiores. (Zhao et al., 2013)

Entre tanto el trabajo de mediciones realizado en Alemania en 2015 permite analizar la calidad de señal alcanzable de una arquitectura de sistema para unidades remotas de células pequeñas. Donde se utilizó conversión directa entre frecuencias de acceso y retorno, transmiten señales de datos compatibles con 3GPP a 60 GHz con el enlace de retroceso, lo cual permitió deducir que la simple conversión de frecuencia analógica omite por completo las partes digitales entre la red de retorno y el acceso, simplificando así la ruta de la señal dentro de la unidad remota de celda pequeña, sugiriendo así la aplicabilidad de este concepto para futuros sistemas de comunicaciones móviles de células pequeñas con altas tasas de datos y enlaces de retroceso de 60 GHz. (Maier et al., 2015)

Con respecto a Ecuador en 2017, en la Escuela Politécnica Nacional, se realizó un proyecto donde se realizó un análisis y simulación de la propagación en ondas milimétricas en un ambiente indoor de hasta 73.5 GHz, en dicho proyecto se demostró que una transmisión en un ambiente indoor sería posible con los modelos de antenas adecuado; considerando que, en la propagación radioeléctrica a altas frecuencias, las ondas son más propensas a pérdidas por propagación y diversos efectos dispersivos.(Vaca, 2017)

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la sociedad se encuentra en una era donde la movilidad, y la conectividad se han convertido en una necesidad para todos los usuarios de redes de telecomunicaciones, de acuerdo al INEC en Ecuador el 70,5% de las personas que usan Internet lo hacen por lo menos una vez al día (INEC, 2016), este uso se realiza en su mayoría desde dispositivos móviles, se espera que para el 2020 el 66% de tráfico de internet provendrá de los teléfonos celulares (Gemalto, 2016), esta dependencia de consumo de datos se traduce en un crecimiento exponencial del volumen de tráfico móvil, llegando a alcanzar los 49 Exabytes de acuerdo a CISCO (CISCO, 2017). Las tecnologías implementadas actualmente no dan abasto para dar soporte a dichas cantidades. Además, las bandas inferiores de frecuencias están parcialmente copadas; es por esto que se están

realizando estudios en bandas superiores de frecuencia como posibles candidatas para futuros sistemas de telecomunicaciones, considerando que las condiciones de propagación a dichas frecuencias se ven más afectadas por cambios del ambiente.

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo se va a determinar las pérdidas de propagación en la señal al viajar por el espacio libre y su variación con la frecuencia y distancia?

¿Cuáles son las pérdidas de propagación producto de la manipulación o alteración del entorno?

¿Cuáles son las características de propagación en bandas de frecuencia cercanas a las milimétricas?

JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

JUSTIFICACIÓN TEORICA

El mayor inconveniente que presenta la atmósfera para las ondas electromagnéticas es el agua, debido a que cuando la onda pasa a través de las partículas de agua, una parte de su energía se absorbe y una parte se dispersa. Por lo tanto, la onda electromagnética se atenúa. La atenuación debida a la lluvia y niebla puede provocar perturbaciones en las comunicaciones inalámbricas, móviles, satelitales y de otro tipo. (C.C.Chen, 1975) Generalmente en el diseño de los enlaces de radio, las frecuencias operativas más deseables están por debajo de 10 GHz, porque en tales casos la absorción atmosférica y la pérdida de lluvia pueden descuidarse en general. (Freeman, 2007) Sin embargo, en la mayoría de los países, la banda de frecuencias por debajo de 10 GHz está muy congestionada, por lo que se pretende determinar un modelo de propagación que permita determinar las pérdidas en frecuencias altas. El presente proyecto de titulación utilizará medidas experimentales, de esta manera será el próximo paso para continuar con las investigaciones de esta tecnología en Ecuador, este acercamiento se debe al grupo de investigación "GRUPO DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS", la FIE y la ESPOCH.

JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

Con las mediciones de las pérdidas de propagación producidas dentro de la cámara anecoica, en un entorno controlado, se puede generar de forma empírica un modelo de propagación general aplicable a frecuencias de 10 a 20 GHz. El modelo puede ser utilizado para la planificación de futuras redes celulares. Sin embargo, también podría ser utilizada para otras tecnologías que se desee implementar en dichas frecuencias. El presente proyecto establecerá las bases para estudios a frecuencias superiores, al trabajar en estas bandas se posibilita el trabajo con tecnologías como MIMO masivo, debido a que la longitud de onda se vería reducida drásticamente y se podrían instalar arreglos con un gran número de antenas en las estaciones base en un espacio reducido.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar un modelo de propagación empírico para establecer las pérdidas de propagación en una cámara anecoica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir una cámara anecoica de 10 a 20 GHz, que simule un entorno controlado.
- Medir las pérdidas de propagación de la señal al transmitirse en la cámara y su variación con la frecuencia y distancia.
- Analizar las pérdidas de propagación producto de la manipulación o alteración del entorno.
- Generar un modelo de propagación empírico para establecer las pérdidas en frecuencias de 10 a 20 GHz.

CAPITULO I

El actual capítulo presenta de forma detallada los conocimientos teóricos manejados para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

1.1 Cámara anecoica

“Una cámara anecoica es un recinto que absorbe la energía que incide en sus paredes, consta de dos partes primordiales: la jaula de Faraday y los materiales absorbentes.” (Campos Mónica and Flores Paulina, 2006)

En la figura 1-1 se observan los componentes de una cámara anecoica, indicando el posible comportamiento de las ondas dentro de la misma.

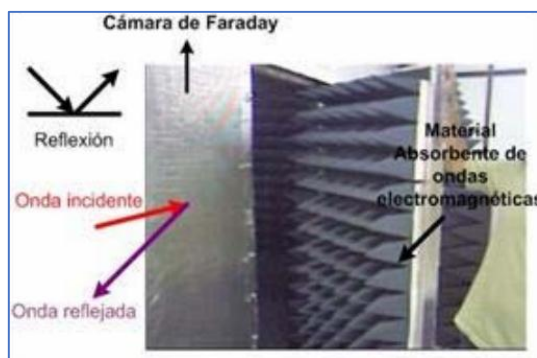


Figura 1-1 Partes Cámara Anecoica

Realizado por: (Campos Mónica and Flores Paulina, 2006)

Se conoce que la jaula de Faraday es un escudo hecho de materiales conductores que bloquea las señales electromagnéticas confinándolas en un perímetro determinado, estos materiales generalmente están presentes en forma de malla o plancha metálica que se conectan a tierra para disipar la corriente generada por campos electromagnéticos, como se muestra en la figura 2-1.

La efectividad de los materiales conductores varía dependiendo de la composición y geometría del material, pero un blindaje de Faraday es más efectivo mientras más altas sean las frecuencias, de la misma manera con placas más gruesas atenúa mejor las bajas frecuencias.

Los materiales absorbentes están diseñados para absorber la radiación de radiofrecuencia incidente, de la manera más efectiva posible, para evitar los errores de medición. Uno de los más utilizados son los arreglos de piezas en forma piramidal, usualmente están hechas de espuma de goma impregnada con carbón activo.



Figura 2-1 Jaula de Faraday

Realizado por: (Ccafyde Digital, 2012)

1.1.1 Diseño de cámaras anecoicas.

Parte de la energía transportada por las ondas son reflejadas cuando la mismas inciden en determinadas superficies de una cámara anecoica y la diferencia se convierte en energía cinética o calórica dependiendo de las particularidades del material con la que fue construida.

A continuación, se plantean las pautas generales para el diseño de cámaras anecoicas, en primera instancia se hace un estudio de las particularidades más importantes de la cámara tales como la frecuencia en la que se pretende utilizar, y los materiales que funcionan para dicho propósito.

1.1.1.1 Dimensión

La mayoría de las cámaras anecoicas son implementadas de forma rectangular puesto que las ondas se reflejan en las paredes de esta, así mismo la energía electromagnética es disipada debido a la ley del inverso del cuadrado de la distancia, así el tamaño de la cámara es afectado directamente, motivo por el cual un recinto pequeño precisará más absorción para que los resultados se asemejen a una cámara de mayores dimensiones.

Según la norma UNE-EN ISO 3745 los cálculos de campo cercano se determinarán a partir de una distancia de un cuarto de la longitud de onda con relación a la pared absorbente.(Juan Mosquera, 2012). Con lo anterior mencionado se establecerán las ecuaciones (1), (2) y (3) para fundamentar las medidas mínimas de la cámara (Flores Jimenez, Villanueva Jesus and Almaraz Angelica, 2007; Dennis Cruz Altamirano, 2009).

$$L = l + \frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

$$W = w + \frac{\lambda}{2} \tag{2}$$

$$H = h + \frac{\lambda}{4} \quad (3)$$

Donde:

L : Largo útil de la cámara [m]

W : Ancho útil de la cámara [m]

l : Largo máximo de la fuente [m]

w : Ancho máximo de la fuente [m]

λ : Longitud de onda de corte [m]

H : Altura útil de la cámara [m]

h : Altura máxima de la fuente [m]

Dos tipos de medidas son caracterizadas, las útiles que se establecen entre las puntas de las pirámides del aislamiento, y las mínimas que encierran el sistema absorbente sobre las paredes.

Figura 3-1 se observa la estructura, partes y dimensiones de la cámara anecoica.

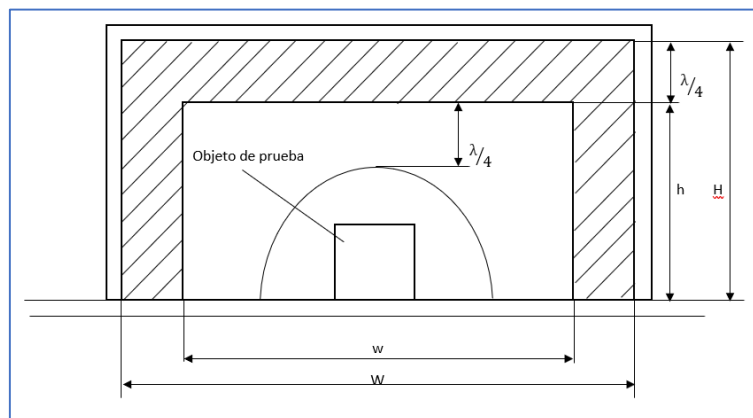


Figura 3-1 Dimensiones de una Cámara Anecoica

Realizado por: (Dario and Juan, 2012)

1.1.1.2 Aislamiento

Las diversas mediciones que se puedan desarrollar dentro de una cámara anecoica pueden ser afectadas por el tipo de material de aislamiento colocadas dentro de la cámara, el nivel de aislamiento efectivo es determinado por las frecuencias más bajas con las que se va a trabajar, razón por la cual se puede definir un rango de frecuencias en las que la cámara aísla las ondas

procedentes de una fuente electromagnética o sonora. (Flores Jimenez, Villanueva Jesus and Almaraz Angelica, 2007).

1.1.1.3 Paredes

Al diseñar las paredes se debe considerar como primera instancia la absorción y aislamiento. Las paredes de baja densidad y espesor ayudan a la transmisión de ondas de baja frecuencia, razón por la cual se implementa dos recintos desligados con un material poroso y absorbente con valores elevados de factores electromagnéticos o sonoros para bandas de baja frecuencia, de esta forma las ondas emitidas en el interior de la cámara no saldrán al exterior y al mismo tiempo evitando que las señales exteriores no ingresen a la cámara. (Guzmán Gallegos Enrique Fabio and Echeverria, 2008).

Para el caso de nuestro interés, cámaras anecoicas electromagnéticas, el exterior de las paredes internas de la cámara se recubre con una lámina metálica para así lograr el efecto de jaula de Faraday, como se muestra en la figura 4-1, alcanzando atenuación de los campos incidentes. (Campos Mónica and Flores Paulina, 2006).

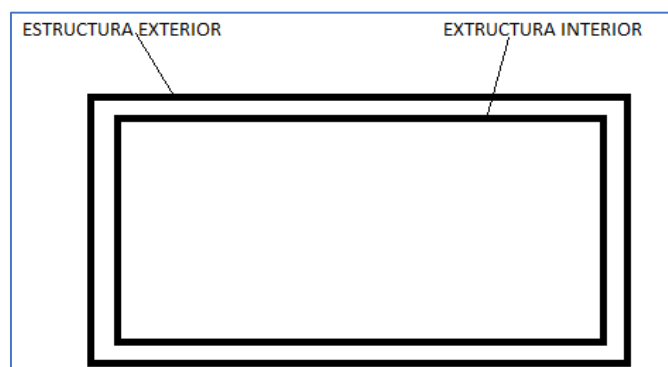


Figura 4-1 Esquema del Recinto, Vista de Corte

Realizado por: (Dario and Juan, 2012)

1.1.1.4 Temperatura y humedad

Para despreciar las diversificaciones de humedad que se pueda llegar a producir dentro de la cámara, la temperatura debe permanecer dentro del rango de 15°C a 30°C, la misma que se puede controlar ventilando dicha cámara. (Guzmán Gallegos Enrique Fabio and Echeverria, 2008).

1.1.1.5 Absorción

Según la norma ISO 3745, para ondas planas el coeficiente de absorción debe ser mayor o igual a 0.99 en el rango de frecuencias con las que se hará las medidas. Por lo general se especifica que dentro de la cámara la reflectividad debe estar dentro del rango de -30 dB a -40 dB. (Cox, 2009; Intelkia, 2014).

Dependiendo de la frecuencia de trabajo, dicho coeficiente varía en los materiales porosos, se da una disminución notable para frecuencia inferiores a la de corte, dada por un cuarto de la longitud de onda derivado de la medida del espesor del material.

La tabla 1-1 especifica los coeficientes de absorción en relación de la frecuencia por octava en varios materiales que fueron considerados para la construcción de la cámara.

Tabla 1-1 Coeficientes de Absorción de Diversos Materiales

MATERIAL	Coeficiente de absorción					
	125.00	250.00	500.00	1000.00	2000.00	4000.00
Hormigón pintado	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Ladrillo visto pintado	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Lana de vidrio (fieltro 14kg/m3) 25mm / 50mm	0.15 0.25	0.25 0.45	0.40 0.70	0.50 0.80	0.65 0.85	0.70 0.85
Lana de vidrio (fieltro 35kg/m3) 25mm / 50mm	0.20 0.30	0.40 0.75	0.80 1.00	0.90 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00
Espuma de poliuretano (fonac) 35mm/50mm/75mm	0.11 1.15 0.17	0.14 0.25 0.44	0.36 0.50 0.99	0.82 0.94 1.03	0.90 0.92 1.00	0.97 0.99 1.03
Espuma de poliuretano (sonex) 35mm/50mm/75mm	0.06 0.07 0.13	0.20 0.32 0.53	0.45 0.72 0.90	0.71 0.88 1.07	0.95 0.97 1.07	0.89 1.01 1.00
Madera aglomerada en papel	0.47	0.52	0.50	0.55	0.50	0.63
madera en paneles	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10

Realizado por: ('LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES', 2015)

En el caso de absorción de campos eléctricos los materiales deben conservar alta resistividad eléctrica y bajos factores de perdidas, siendo los polímeros los materiales óptimos para este empleo, en la tabla 2-1 se especifica las principales peculiaridades eléctricas de algunos polímeros.

Tabla 2-1 Propiedades eléctricas de polímeros

Propiedades eléctricas	A	B	C
Resistividad del volumen $\Omega.cm$	10^{16}	10^{16}	10^{16}
resistencia dieléctrica/mil	364.00	420.55	30.00
Constante dieléctrica 6 Hz	3.20	2.40	3.40
Constante dieléctrica 10^3 Hz	3.00	2.40	3.20
Constante dieléctrica 10^6 Hz	3.00	2.40	3.10
Factor de disipación 60 Hz	0.0009	<0.0005	0.0004
Factor de disipación 10^3 Hz	0.0021	<0.0005	0.0004
Factor de disipación 10^6 Hz	0.0100	<0.0005	0.0004

Realizado por: ('LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES', 2015)

En referencia a lo antes mencionado se puede determinar que los materiales blandos y porosos consienten la penetración de ondas dando como resultado gran impregnación, mientras que los materiales con superficies de acabados no porosos ordinariamente impregnan menos del 5%.

1.2 Campo lejano (Far-field)

Al mencionar la máxima distancia de separación de dos antenas en la que se puede considerar un campo lejano no se considera tan sencillo, esto dependerá del uso que se le dé en la práctica. Por lo general para aplicaciones de compatibilidad electromagnética se obtiene utilizando la ecuación (4):

$$\frac{5\lambda}{2\pi} \quad (4)$$

Es consiguiente que para un ingeniero en telecomunicaciones dicha distancia está dada por la ecuación (5):

$$\frac{2D^2}{\lambda} \quad (5)$$

Donde, D es la apertura de la antena, en el caso de utilizarse antena parabólicas D es el diámetro de dicha antena.

Las dos expresiones anteriores son validas dependiendo de los criterios que se tomaron en cuenta en el momento de calcular el campo lejano.(Charles Capps, 2001).

Haciendo referencia a la primera expresión mencionada, esta fue calculada tomando en cuenta la distancia en la que la impedancia de onda propagada se torne aproximadamente constante (377Ω). Indispensable para el modelado de apantallados electromagnéticos, es decir que la relación entre la impedancia del material y el campo que se propaga definen el porcentaje de protección proporcionado por dicho material.

Mientras que en la segunda expresión se ha tomado en cuenta la diferencia de fase generada por la antena por un frente de onda no plana en relación con las dimensiones de la antena utilizada, dicha expresión es generalmente utilizada en aplicaciones en las que sea indispensables una diferencia de fase mínima.

En la figura 6-1 se evidencia el efecto producido en las tres regiones en las que se modela el concepto de campo cercano/lejano sobre el diagrama de radiación de la antena utilizada en el presente trabajo de titulación, de esta forma podemos hablar de campo cercano reactivo y campo cercano radiante, las mismas que se diferencian del campo lejano por el diagrama de radiación, siendo éste independiente de la distancia de separación de las antenas en el campo lejano. (*N E A R-F I E L D 11 Near-field vs Far-field*, no date).

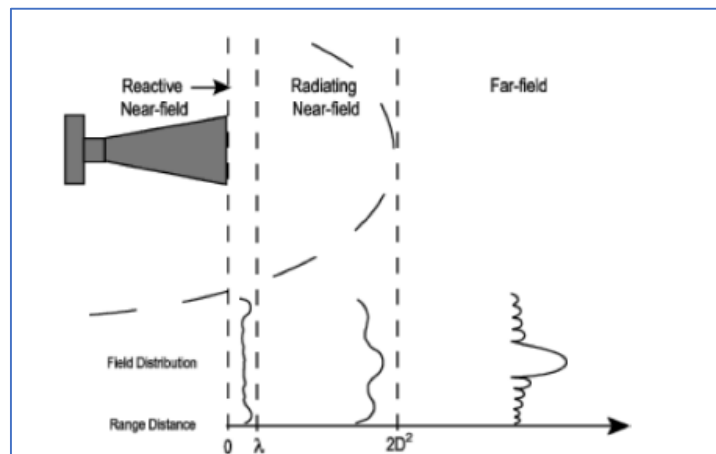


Figura 5-1 Región de campo lejano

Fuente: (*N E A R-F I E L D 11 Near-field vs Far-field*, 2018)

En la tabla 3-1 se ha preparado una serie de expresiones para el cálculo del campo lejano entre dos antenas tomando en cuenta diversas consideraciones o con diversos fines de uso práctico:

Tabla 3-1 Campo Lejano Según la Antena

EXPRECIÓN	OBSERVACIONES
$5\lambda/2\pi$	Para aplicaciones de compatibilidad electromagnética.
3λ	Cuando las dimisiones de la antena no son mucho mayores que la longitud de onda.
$\lambda/2\pi$	Usando el criterio de Rayleigh. Para antenas cuyas dimensiones son mucho menores que la longitud de onda.
$2D/\lambda$	Para antenas cutas dimensiones sean mucho mayores que la longitud de onda. Usada comúnmente para antenas de apertura.
$50D/\lambda$	Usada para antenas de alta precisión.

1.3 TECNOLOGÍAS CELULARES

1.3.1 5G

5G es un avance en cuanto a redes celulares, sin embargo, para que este tipo de tecnologías se ha visto necesario hacer uso de frecuencias muy altas con anchos de bandas masivos. Pero a cambio de todos sus requerimientos nos puede proporcionar una amplia cobertura con altas velocidades. Sería imposible hablar del avance de tecnologías celulares sin mencionar la densificación de red, ya que este es el mecanismo clave para buscar la evolución inalámbrica. Una densificación de la red incluye, densificación en el espacio (por ejemplo, despliegue denso de celdas pequeñas) y la frecuencia (utilizando partes del espectro de radio en diversas bandas). La densificación espacial rentable a gran escala es facilitada por redes autoorganizadas e intercelulares por manejo de interferencia. (Bhushan *et al.*, 2014)

1.4 ESPECTRO

Uno de los puntos más relevantes para el adelanto de las redes móviles es el incremento del espectro disponibles, de esta manera se podrá obtener mayor ancho de banda de canal. En la actualidad se han estado dando con el paso de los años una saturación del espectro entre 700 MHz y 2.6 GHz debido al incremento de tecnologías y servicios que operan en dicha banda. La mayoría de las comunicaciones radio comerciales, televisión, GPS, WIFI o comunicaciones móviles trabajan en la banda del espectro radioeléctrico en el rango de 300 MHz a 3GHz, lo que se evidencia en la tabla 1-4.

Hoy en día la distribución de ancho de banda aprovechable para comunicaciones móviles no se destaca de los 780 MHz, dentro de este rango los operadores más importantes de red cuentan con menos de 200 MHz entre todas las bandas móviles que se les ha asignado en el espectro disponible. En la tabla 4-1 se muestra cómo se encuentra dividido el espectro por tecnologías de hasta 3 GHz.

Tabla 4-1 Distribución del espectro por tecnologías hasta 3 GHz

SERVICIO	UPLINK (MHz)	DOWNLINK (MHz)
GSM 900	880-915	925-960
GSM y LTE 1800	1710-184.8	1805.2-1879.8
Servicio de TV	470-790	
Wi-Fi	2.400	
WiMAX	3.400-3.480	3.500-3.580
UMTS FDD	1.920-1.980	2.110-2.170
UMTS TDD	1.900-1.920	2.010-2.025
LTE 800	790-862	
LTE 2600	2500-2690	

Realizado por: ('LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES', 2015)

Situación por la cual en la actualidad el espectro se encuentra parcialmente copado o saturado lo que hace difícil dar a 5G un alto rango en el espectro para ser utilizado por debajo de 3GHz. Se dice que una medida de solución se daría por la reorganización del espectro en las bandas mencionadas, el mismo que es un procedimiento ya anteriormente realizado en LTE donde se habilitó la banda de GSM (1.8 GHz) y parcialmente la banda de servicios de radio difusión de televisión (800 MHz), según (Barrado, 2017), dicho procedimiento se está llevando a cabo en la Unión Europea para la reasignación de la banda de 700 MHz (694 – 790 MHz), el mismo que pertenece a los servicios de televisión digital, para servicios de banda ancha inalámbrica hasta el 30 de junio de 2020, con el objetivo de promocionar el avance tecnológico de 5G.

A pesar de ser una iniciativa prometedora, no parece suficiente 100 MHz, se está tomando la elección de aprobar la banda de frecuencia superiores a 6 GHz, bandas de frecuencia milimétricas (mmWAVE), donde el espectro radio eléctrico se encuentra disponible.

1.5 mmWAVE

La mayoría de los sistemas celulares móviles se implementan en espectro sub-3 GHz. Una solución posible para 5G es explorar una mayor frecuencia portadora, tal como bandas de onda milimétrica (30 a 300 GHz) que están siendo investigadas recientemente. Una de las características destacadas de las bandas de ondas milimétricas es el reducido tamaño que poseen sus antenas permitiendo una gran cantidad de diminutas antenas en un área. Los principales desafíos para la banda de ondas milimétricas son las comunicaciones que incluyen una gran pérdida de ruta (especialmente con la propagación sin línea de vista, NLoS), bloqueo y absorción de señal por varios objetos en el medio ambiente y baja potencia de transmisión, aunque la atenuación de la señal puede ser combatida utilizando grandes arreglos de antenas impulsadas por haz inteligente, algoritmos de selección y seguimiento.

Los haces altamente direccionales mejoran el presupuesto de enlace y permiten la reutilización espacial como se ilustra en la figura 7-1. Esta ortogonalización espacial masiva conduce a una arquitectura celular muy diferente donde las estaciones base de ondas milimétricas pueden ser muy densamente desplegadas con superposición significativa, pero no de interferencias fuertes entre las células. (Bhushan *et al.*, 2014).

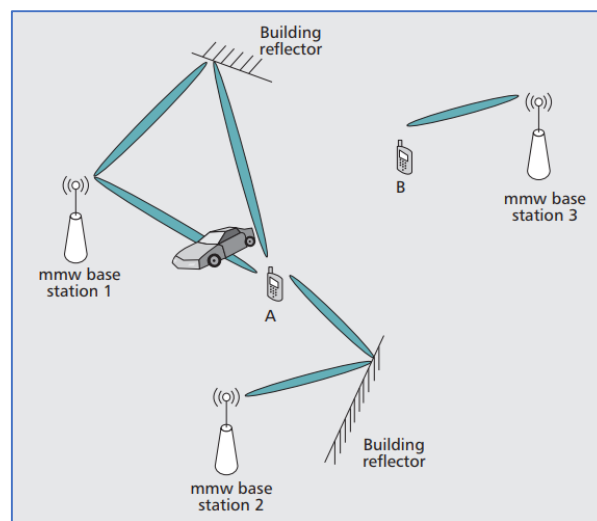


Figura 6-1 Ilustración de Milimeter-wave Mobile Access

1.6 Modelos de Propagación

Existen 3 tipos de modelos de propagación predictivos: Empíricos, Semi-Empíricos y Teóricos, cabe recalcar que ninguno de estos modelos entrega alguna predicción totalmente acertada, pero se puede obtener una aproximación bastante cercana.

Los modelos teóricos, también conocidos como modelos determinísticos, están contruidos bajo la teoría de propagación de rayo, es un modelo valido para diversos estudios, pero requiere de una alta capacidad computacional para obtener resultados.

1.6.1 Modelos Empíricos

Son modelos basados en la experimentación de campo, en ambientes determinados, donde las variables se someten a diversas medidas para simular condiciones reales. Este tipo de modelo es muy útil como primera aproximación en un estudio.

1.6.1.1 Modelo de Okumura

La ecuación (6) se utiliza en ambientes urbanos para frecuencias de 150 a 1920 MHz.

$$L_p(dB) = L_F + A_{mu} - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{area} \quad (6)$$

Donde:

L_p pérdidas en decibeles

L_F Atenuación en el espacio libre

A_{mu} Atenuación relativa promedio

$G(h_{te})$ Ganancia de la altura de la antena transmisora

$G(h_{re})$ Ganancia de la altura de la antena receptora

G_{area} Ganancia debido al ambiente

$G(h_{re}) = 20 \log(h_{te}/200)$ Para h_{te} entre 30 y 1000 metros

$G(h_{re}) = 10 \log(h_{te}/3)$ Para h_{re} menor a 3 metros

$G(h_{re}) = 20 \log(h_{te}/3)$ Para h_{re} entre 3 y 10 metros

(Salazar Cipriano, 2018)

1.6.1.2 Modelo de LEE

El propósito del modelo de propagación de LEE, mostrado en la ecuación (7), es pronosticar la potencia de recepción en un determinado lugar y a la ves calcular las celdas suficientes para proporcionar cobertura.

- Ajuste de predicciones por ajustes de rectas por regresión lineal.
- Medidas en una ciudad determinada.
- Distancias mayores a 1km.
- C depende de la frecuencia, altura de la antena transmisora y altura de la antena receptora.
- No toma en cuenta las condiciones del entorno.

$$L_d = C + 10n \log d \quad (7)$$

Donde:

d es la distancia

n parámetro en función de la altura de la antena transmisora y el tipo de medio

C se estima con recorridos de prueba

N se ajusta con las medidas

(Salazar Cipriano, 2018)

1.6.1.3 Modelo de YOUNG

- Se basa en medidas tomadas en NEW YORK.
- Presenta curvas de β en función del porcentaje de sitios de área comprendidos, como se evidencia en la ecuación (8).

B Clutter-Factor:

$$L_{50} = G_T G_R \left(\frac{h_t h_r}{r^2} \right)^2 \beta \quad (8)$$

(Salazar Cipriano, 2018)

1.6.2 Modelos Semi-Empíricos

Son modelos similares a los empíricos, ya que también se basan en mediciones, pero los resultados se ajustan a modelos establecidos teóricamente, de esta manera realizan predicciones sobre diversos escenarios.

1.6.2.1 Modelo de Okumura-Hata

Se valida en el rango de frecuencias de VHF y UHF que va desde los 150MHz a los 1.5 GHz. Presenta las pérdidas dentro de un are urbana con la ecuación (9):

$$L_{50}(\text{Urbano})(dB) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \log d \quad (9)$$

Donde:

La frecuencia portadora f_c esta entre 150 y 1500 MHz

La altura de la antena transmisora h_{te} está en rango de 30 a 200 m

La altura de la antena receptora está en un rango de 1 a 10 m

d es la distancia entre las antenas

$a(h_{re})$ es el valor de dependencia de la zona de cobertura.

Para ciudades pequeñas y medianas se utiliza la ecuación (10):

$$a_{(hre)} = (1.1 \log f_c - 0.7)a_{(hre)} - (1.56 \log f_c - 0.8) \quad (10)$$

Para ambientes suburbanos la dependencia de la zona de cobertura es calculada con la ecuación (11):

$$a_{(hre)} = L_{50}(\text{urbano}) - 2 \left[\log \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad (11)$$

Para áreas rurales se utiliza la ecuación (12):

$$a_{(hre)} = L_{50}(\text{urbano}) - 4.78(\log f_c)^2 + 18.38 \log f_c - 40.94 \quad (12)$$

Para ciudades grandes con $f_c < 300\text{MHz}$ se calcula a través de la ecuación (13):

$$a_{(hre)} = 8.29(\log 1.54h_{re})^2 - 1.1 \quad (13)$$

(Salazar Cipriano, 2018)

1.6.2.2 Modelo de Walfish-Ikegami

Está compuesta por tres términos las cuales son: pérdidas por difracción, por espacio libre y difracción en múltiples pantallas. El modelo Walfish-Ikegami se rige a las fórmulas (14) a (23) que se detallan a continuación:

$$L_b = \begin{cases} L_o + L_{rts} + L_{mds}, & L_{rts} + L_{mds} > 0 \\ L_o & L_{rts} + L_{mds} \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

Las pérdidas en el espacio libre se hayan por:

$$L_o = 32.4 + 20 \log d + 20 \log f_c \quad (15)$$

Las pérdidas por la azotea al nivel de las calles están dadas por:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f_c + 20 \log \Delta h_m + L_{ori} \quad (16)$$

Donde:

W es el ancho de la calle

Δh_m diferencia entre la altura media de los edificios y la altura de la antena

L_{ori} Son las pérdidas debido al ángulo de incidencia del rayo respecto a la calle

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\phi & 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35^\circ) & 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\phi - 55^\circ) & 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (17)$$

Donde ϕ es el ángulo de incidencia respecto a la calle.

Las pérdidas por difracción múltiples están dadas por:

$$L_{mds} = L_{hte} + K_a + K_d \log d + K_f \log f_c - 9 \log b \quad (18)$$

Donde b es la distancia entre los edificios de centro a centro

d distancia entre transmisor y receptor

$L_{h_{te}}$ pérdidas de la antena transmisora debido a la altura

$$L_{h_{te}} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{te}) & h_{te} > h_{roof} \\ 0 & h_{te} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (19)$$

$$K_a = \begin{cases} 54 & h_{te} > h_{roof} \\ 54 - 0.8\Delta h_{te} & d \geq 0.5 \text{ y } h_{te} \leq h_{roof} \\ 54 - 1.6\Delta h_{te} & d < 0.5 \text{ y } h_{te} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (20)$$

Donde h_{te} es la altura de la estación base

h_{roof} es la altura media de los edificios del entorno

$$\Delta h_{te} = h_{te} - h_{roof} \quad (21)$$

$$K_d = \begin{cases} 18 & h_{te} > h_{roof} \\ 18 - 15 \left(\frac{\Delta h_{te}}{h_{roof}} \right) & h_{te} < h_{roof} \end{cases} \quad (22)$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) & \textit{suburbano} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) & \textit{urbano} \end{cases} \quad (23)$$

(Salazar Cipriano, 2018)

1.7 PARÁMETROS Y TIPOS DE ANTENAS

Según la IEEE (Institute of Eléctrical and Electronics Engineers) una antena es definida como “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” (IEEE, 1983).

Las antenas son diseñadas para proporcionar que las ondas transportadas a través de un medio (espacio libre) llega a un receptor con mayor receptibilidad y eficiencia viable con la finalidad de emitir un óptimo rendimiento del sistema. (Darwin Javier Jaramillo Granda and Luis Giovanni Quishpe Rea, 2013)

1.7.1 Características de las antenas

Generalmente una antena es diseñada e implementada para radiar y recibir ondas electromagnéticas.

A continuación, se mencionan varias características importantes a tomar en cuenta al momento de elegir una antena, según el trabajo que se necesite hacer:

1.7.1.1 Diagrama de radiación

El diagrama o patrón de radiación depende directamente de las dimensiones y/o geometría de las antenas, sin embargo, es suficiente tener datos como los de los planos transcendentales E (campo eléctrico) y H (campo magnético) para evidenciar información de polarización lineal y antenas directivas. (Constantine Balanis, 1982)

El lóbulo principal (vector de mayor radiación de la antena), lóbulo secundario (lóbulos diferentes al principal) y el ancho de Haz principal, definido como el ancho de haz, tienen la mitad de la potencia que es generalmente -3dB o la medida angular entre los puntos, como se puede evidenciar en la figura 8-1.

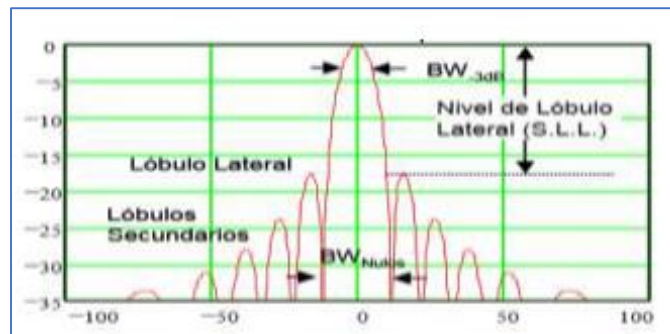


Figura 7-1 Parámetros de Radiación

Realizado por: (Giros, 2012)

1.7.1.2 Ganancia

Se define como la ganancia de una antena a la cantidad de energía radiada, la misma que es determinada entre la potencia necesaria a la entrada de una antena receptora expresada en

decibelios, con la finalidad de que entre las antenas se produzca la misma intensidad independientemente de la distancia entre ellas, la ganancia de una antena afectará de manera directa al desempeño de la misma en una frecuencia determinada. (Constantine Balanis, 1982)

1.7.1.3 Directividad

“Se define como la propiedad que tiene una antena de transmitir o recibir la energía irradiada en una dirección específica.” Se debe considerar que las antenas de apertura tienen una alta directividad (Constantine Balanis, 1982)

1.7.1.4 Polarización

La orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética en función del tiempo es definida como la polarización de una antena, la misma que se encuentra representada por una elipse en dos casos: polarización lineal (vector que describe a una coordenada en el espacio en función del tiempo) y polarización circular (rota con un movimiento con un movimiento circular en dirección de la propagación, ya sea a la derecha o izquierda hasta completar un giro en cada periodo de conector). (Constantine Balanis, 1982)

1.7.2 Antenas Tipo Corneta

También conocidas como Horn, Bocina o de apertura, consisten en guías de onda donde el área de una sección se incrementa de manera progresiva, obteniendo así una apertura.

Estas pertenecen al grupo de antenas que utilizan su superficie para concentrar su emisión y recepción. Poseen un patrón de radiación directivo con una ganancia alta, pueden alcanzar los 25dB. Generalmente están diseñadas para operar a altas frecuencias.

Uno de los mayores beneficios de este tipo de antenas por su forma es que poseen muy poca pérdida.

Una antena de bocina es alimentada de una guía de onda, las antenas bocina rectangulares propagan en el modo fundamental TE₁₀, al igual que las piramidales, mientras que las circulares propagan en el modo fundamental TE₁₁.

En la figura 9-1 se puede observar antenas de bocina o corneta, rectangular y circular.

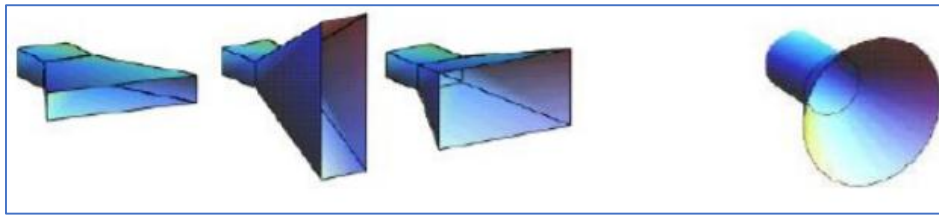


Figura 8-1 Antena Corneta

Realizado por: (Universidad Rey Juan Carlos, 2012)

La ganancia de las antenas tipo corneta aumenta a medida que aumenta la frecuencia de operación, esto se debe a que el tamaño de la apertura se mide en longitud de onda, y en altas frecuencias la antena es “Eléctricamente” mayor. Por esto se puede decir que las antenas con aperturas mayores tienen más longitudes de ondas a altas frecuencias. (*The Horn Antenna - Radiation Pattern*, no date) En la figura 10-1 se puede observar el patrón de radiación de una antena Horn.

1.7.3 Frecuencia de una Antena de Bocina

Cuando se realiza el diseño de antenas lo primero que se debe considerar es la frecuencia a la que se desea operar, en este caso para un sistema de 2.4 GHz. Se debe calcular la longitud de onda con la ecuación (24):

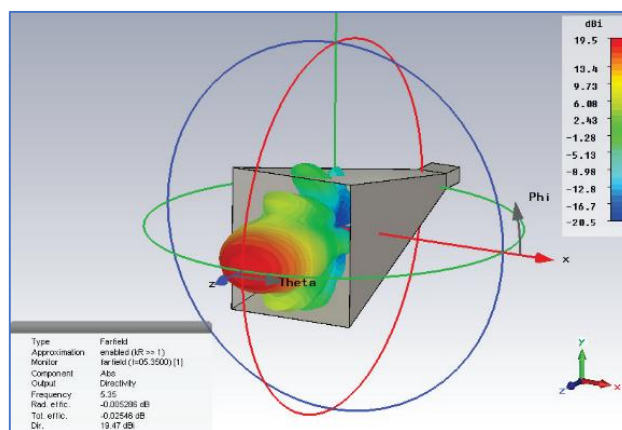


Figura 9-1 Patrón de Radiación de una Antena Horn

Realizado por: (Reis *et al.*, 2014)

$$\lambda = \lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (24)$$

Donde:

λ : longitud de la onda en el espacio libre en metros (m).

C: Velocidad de luz en espacio libre en la unidad de m/s.

f: Frecuencia de trabajo en GHz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.4 \times 10^9 \text{ Hz}}$$

$$\lambda = 0.125 \text{ m}$$

La longitud de onda de corte en el Modo TE₁₀ viene dada por la ecuación (25):

$$\lambda_c = 2 \cdot a \tag{25}$$

Donde:

a : distancia del ancho interno de la guía.

Para el diseño del ancho interno de la cavidad igual a 7cm.

$$\lambda_c = 2(7 \times 10^{-2} \text{ m})$$

$$\lambda_c = 0.14 \text{ m}$$

Frecuencia en el modo TE₁₀, viene dada por la ecuación (26):

$$f_c = \frac{u}{\lambda_c} \tag{26}$$

Donde:

f_c : frecuencia de corte.

u : velocidad de propagación ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

λ_c : longitud de onda de corte en metros.

Se sustituyen los valores y se obtiene:

$$f_c = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times (7 \times 10^{-2} \text{ m})} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{0.14 \text{ m}}$$

$$f_c = 2.14 \times 10^9 \text{ Hz}$$

La longitud de onda en la guía es descrita en la ecuación (27):

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (27)$$

Donde:

λ_g : longitud de onda en la guía en metros.

λ : longitud de onda en el espacio libre en metros.

f_c : frecuencia de corte GHz

f : frecuencia de diseño 2.4GHz

Se realiza el cálculo:

$$\lambda_g = \frac{0.125m}{\sqrt{1 - \left(\frac{2.14 \times 10^9}{2.4 \times 10^9}\right)^2}} = \frac{3.125m}{\sqrt{1 - 0.797}} = \frac{0.125m}{\sqrt{0.202}}$$

$$\lambda_g = \frac{0.125m}{0.450} = 0.277m$$

En la figura 11-1 se muestra las dimensiones que tendría una antena para trabajar de manera más eficiente a una frecuencia de 2.4 GHz.

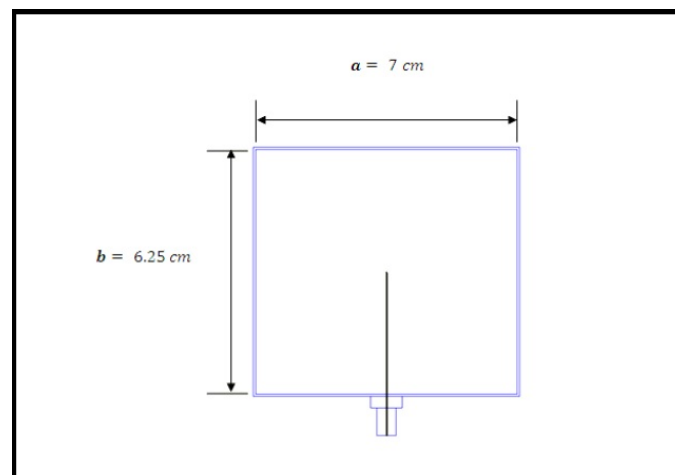


Figura 10-1 Antena Tipo Corneta

Realizado por: (Giros, 2012)

CAPITULO 2

El presente capítulo hace mención de materiales como procedimientos para la obtención de medidas de potencia (dB). Para lograr el cálculo de pérdidas en el presupuesto de enlace con dos antenas tipo corneta, apertura de antena igual a 5 cm, dentro de una cámara anecoica diseñada en el rango de frecuencia de 10 GHz a 20 GHz, las mismas que fueron colocadas una frente de otra dentro de dicha cámara a una distancia inicial de 0.15 m (determinado por el cálculo de campo lejano, Far Field) haciendo variaciones de distancia cada 0.1 m y frecuencia cada 1 GHz, y así lograr determinar de forma empírica una expresión que nos permita calcular las pérdidas basándonos en la fórmula general de propagación; para ello se manipuló el medio dentro de la cámara atrapando y simulando las condiciones climatológicas tanto la región andina como costera del Ecuador a través de la inserción de O₂ y vapor de agua a dicha cámara.

2.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA CÁMARA ANECOICA

2.1.1 CAMPO LEJANO

Para el diseño de la cámara anecoica se utilizó la ecuación de campo lejano (Far Field), ecuación (5). La cual permite hallar el valor mínimo que debe tener la caja para comenzar a tomar las medidas de altura y ancho, así como de profundidad con la que se fabricó, se dio un valor arbitrario mayor a la distancia mínima, pero con la condición de que permita incrementar varias veces la distancia.

$$L = \frac{2 * D^2}{\lambda}$$

Donde:

D Es la apertura de la antena tipo corneta en nuestro caso igual a 0.05m.

λ Es la longitud de onda la cual se obtuvo mediante la ecuación (24).

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde c es la velocidad de la luz = 300000000 m/s

f es la frecuencia a la que trabaja la antena en nuestro caso 10 GHz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9}$$

$$\lambda = 0.03 \text{ m}$$

$$L = \frac{2 * 0.05^2}{0.03}$$

$$L = 0.1667 \text{ m}$$

Obteniendo un valor de 0.166 m a nuestra menor frecuencia la que es de 10 GHz, pero como se necesita obtener valores un poco antes de este campo para poder compararlo se tomó las medidas desde 0.15 m.

2.1.2 DIMENSIONES DE LA CAMARA

Por lo general las cámaras anecoicas se construyen de forma rectangular, debido a que en esta forma se maximiza la absorción de las ondas reflejadas en las paredes.

Se puede considerar 0.01667 metros como la longitud mínima para que exista transmisión entre la antena receptora y antena transmisora, considerando lo anteriormente mencionado, se establece una dimensión del largo de la cámara de 2.4 metros de largo para poder tomar varias mediciones, 0.8 metros de ancho y ato para que las antenas puedan desplazarse con holgura.

Sin embargo, el espesor del aislante varía dependiendo del tamaño de la cámara por la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, la misma que se refiere a algunos fenómenos ondulatorios cuya intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al centro donde se originan. Es decir, en un tamaño menor se necesita mayor absorción para que los resultados obtenidos sean similares a una cámara real. De esta manera se determinan las ecuaciones (1), (2) y (3) para establecer el espesor mínimo del absorbente que aseguren la confiabilidad de las mediciones dentro de la cámara.

$$L = l + \frac{\lambda}{2}$$

$$W = w + \frac{\lambda}{2}$$

$$H = h + \frac{\lambda}{2}$$

Donde:

L es el largo de la coraza de la cámara [m]

W es el ancho de la coraza de la cámara [m]

H es la altura de la coraza de la cámara [m]

l es el largo de la parte interna de la cámara [m]

w es el ancho de la parte interna de la cámara [m]

h es la altura de la parte interna de la cámara [m]

λ es la longitud de onda de corte

Para la frecuencia más baja que se pretende analizar 10 GHz la longitud de onda sería 0.03 metros, por lo que:

$$Espesor = L - l = \frac{\lambda}{2}$$

$$Espesor = \lambda/2 = 0.015m$$

Es decir que el espesor mínimo del material absorbente es de 0.015m, sin embargo, se utiliza un absorbente con 0.05 metros para garantizar una mayor absorción.

2.1.3 MODELADO DE LA CAMARA

Para proceder a la implementación del cámara, se la dibujo en un software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D y modelado 3D, generando así la estructura final y obteniendo valores de cantidad de material que se necesita adquirir para su construcción, tal como se muestra en el diseño de la figura 1-2.

2.1.4 MATERIALES

Para la implementación de esta cámara se utilizaron los materiales siguientes:

2.1.4.1 Ángulo de acero (6) y Varilla Cuadrada (3)

El ángulo de acero a más de su forma lo cual facilita la implementación y delimitación de la estructura de la cámara anecoica, su material brinda la posibilidad de unión o fusión a través de suelda eléctrica brindando firmeza y durabilidad.

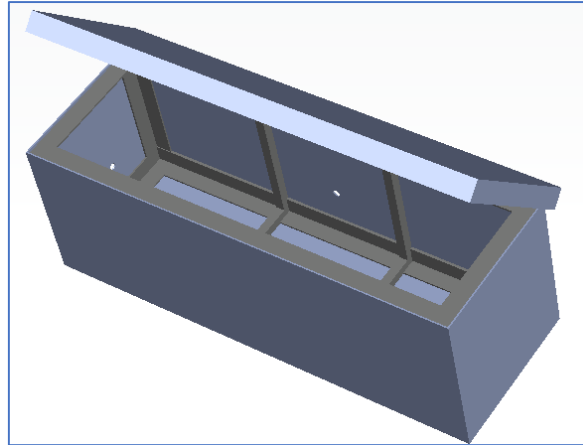


Figura 1-2 Diseño Cámara Anecoica en Software de Simulación

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018

La varilla cuadrada fue utilizada por su dureza y facilidad de manipulación al momento de la fabricación de la estructura de dicha cámara, así como por su material el cual nos brinda la unión a través de suelda eléctrica, logrando así reforzar la estructura implementada con los ángulos.

2.1.4.2 Told Galvanizado (3 planchas)

Se utilizo told galvanizado debido a sus propiedades de dureza y flexibilidad en los ángulos requeridos para recubrimiento de la estructura de la cámara anecoica y así lograr un entorno cerrado y aislado el ambiente permitiendo que éste pueda ser manipulado, a su vez dándonos las propiedades de una jaula de Faraday

2.1.4.3 Electroodos (9)

Fue requerido para unir tanto la varilla, los ángulos de acero y el told galvanizado permitiendo dar firmeza y dureza a la cámara y soportar la manipulación en las en las medidas de potencia, así como en su transportación.

2.1.4.4 Ruedas (6)

Utilizadas estas por su forma circular en la parte inferior de la caja para facilitar el transporte de esta de un lugar a otro dependiendo de donde se la necesite o sea más conveniente de usar.

2.1.4.5 *Bisagras*

Fueron utilizadas por sus características de eje rotacional ya que facilitan al abrir y/o cerrar la caja para ventilación y manipulación de las antenas.

2.1.4.6 *Manijas de presión*

Implementadas en la estructura para hermetizar la cámara, atrapar y/o manipular el medio de propagación de las antenas y así simular las condiciones climatológicas de la región costera del Ecuador.

2.1.4.7 *Caucho Sintético*

Manipulado para sellar las ranuras ocasionadas entre la estructura y la tapa de la cámara logrando aislar en interior y disminuir fugas tanto de oxígeno como de vapor de agua.

2.1.4.8 *Espuma de Poliuretano*

Se recubre todo el interior de la cámara con esta espuma que tiene forma piramidal para que absorba todas las ondas, esta forma aumenta la superficie efectiva de absorción evitando la reflexión de las ondas. En este caso se utilizó espuma de poliuretano puesto que de los materiales disponibles en el mercado este presenta el mejor coeficiente de absorción; en 4 kHz tiene un coeficiente de absorción de 1.03dB.

Una vez implementada la cámara anecoica se hicieron pruebas de las antenas tanto en el exterior como en el interior de ésta obteniendo valores ligeramente mejorados dentro de la cámara, comprobando de esta manera su correcto funcionamiento para su posterior uso dentro en la obtención de los valores deseados en el experimento a realizar.

Después de la fabricación de esta se procede a la comprobación de su correcto funcionamiento, para lo cual se tomaron medidas de potencia de la antena tanto dentro como fuera de la cámara anecoica.

En la figura 2-2 se muestra la cámara anecoica terminada.



Figura 2-2 Implementación de la Cámara Anecoica

Realizado por: Suarez y Sarmiento. 2018.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE CABLE VS ANTENAS

Para la comprobación del correcto funcionamiento de la antena dentro del rango de frecuencias deseado se procede a realizar la simulación de la antena con ayuda del software HFSS obteniendo los resultados mostrados en el gráfico 1-2.

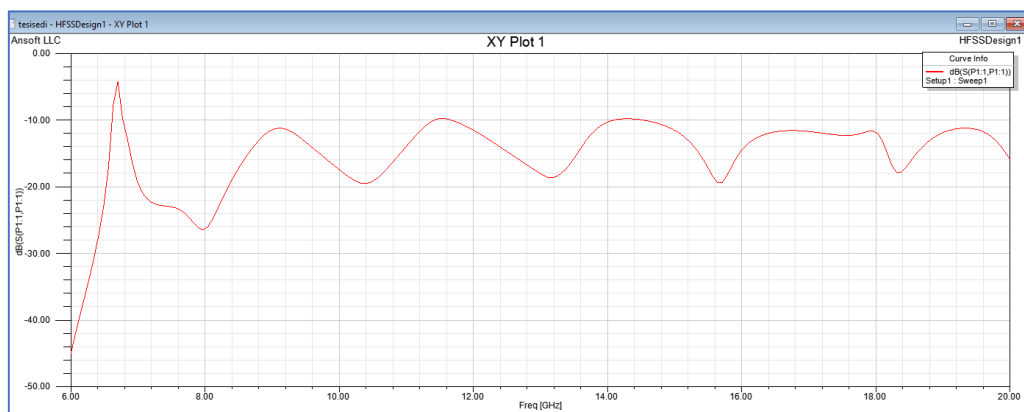


Gráfico 1-2 Funcionamiento de la Antena

Realizado por: Suárez y Sarmiento. 2018.

En la gráfica se puede observar que efectivamente la antena tiene un correcto funcionamiento por debajo de 10 dB en el rango de frecuencias deseado que va desde los 10 GHz a los 20 GHz, pero con un funcionamiento no óptimo en las frecuencias de 11.5 GHz y 14.3 GHz, las cuales no nos

afectan en nada ya que los cálculos se harán en los valores entero de frecuencia con respecto a los GHz.

La determinación de las pérdidas existentes en los cables a utilizar se realiza de forma empírica, para lo cual se conecta directamente un cable entre el generador de señales y el analizador de espectros, como se muestra en la figura 3-2, con lo cual se obtiene un valor de pérdidas en dB, en esta medida constan tanto las pérdidas del cable como las pérdidas de los conectores.



Figura 3-2 Medida de Potencia con un Cable para Determinar la Pérdida del Mismo.

Realizado por: Suarez y Sarmiento. 2018.

Después se realizó el mismo procedimiento, pero esta vez conectando dos cables en serie, como se muestra en la figura 4-2, y de la misma manera estos se conectan al generador de señales y al analizador de espectros, obteniendo nuevamente una medida de pérdidas, pero en esta ocasión serán las pérdidas en dB de dos cables con sus conectores.



Figura 4-2 Medida de Potencia con dos Cables para Determinar la Pérdida del Mismo y sus Conectores.

Realizado por: Suarez y Sarmiento. 2018.

Para la obtención de las pérdidas únicamente existentes en cada cable se procede a restar los dos valores de pérdidas obtenidos anteriormente, dando como resultado las pérdidas de los cables y los conectores buscadas para el posterior análisis a realizar.

Se tiene un valor de pérdidas establecido para el modo de propagación TE₁₀ el cual es el modo de propagación fundamental de la línea de transmisión rectangular, la cual se encuentra conectada a las antenas Horn a utilizar, en ese caso al conectar las dos antenas, la una al generador de señales y la otra al analizador de espectros y al ubicarlas a una distancia de 0 m, como se muestra en la figura 5-2, se puede visualizar un valor de pérdidas totales.

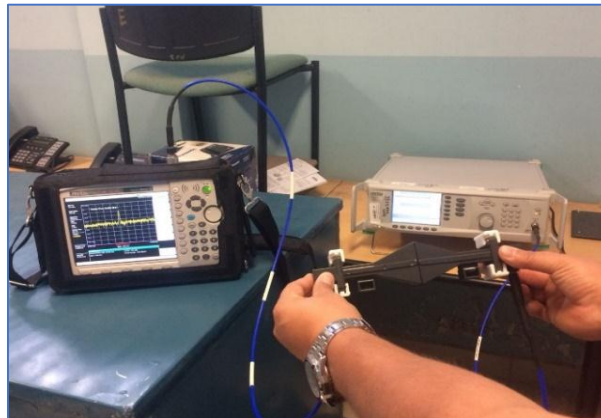


Figura 5-2 Medida de potencia con dos Antenas Frente a Frente para determinar la Ganancia de la Antena y Pérdida del Acoplador.

Realizado por: Suarez y Sarmiento. 2018.

Para calcular el valor de la ganancia de la antena en dB se suman las pérdidas de cada cable más las pérdidas establecidas para el modo TE₁₀ y se compara con las pérdidas totales medidas, la diferencia existente entre estas dos es la ganancia de la antena en dB.

2.3 METODOLOGIA DE MEDICIÓN

2.3.1 *En el espacio libre*

En el gráfico 2-2 se puede observar la metodología de medición para condiciones de vacío dentro de la cámara anecoica.

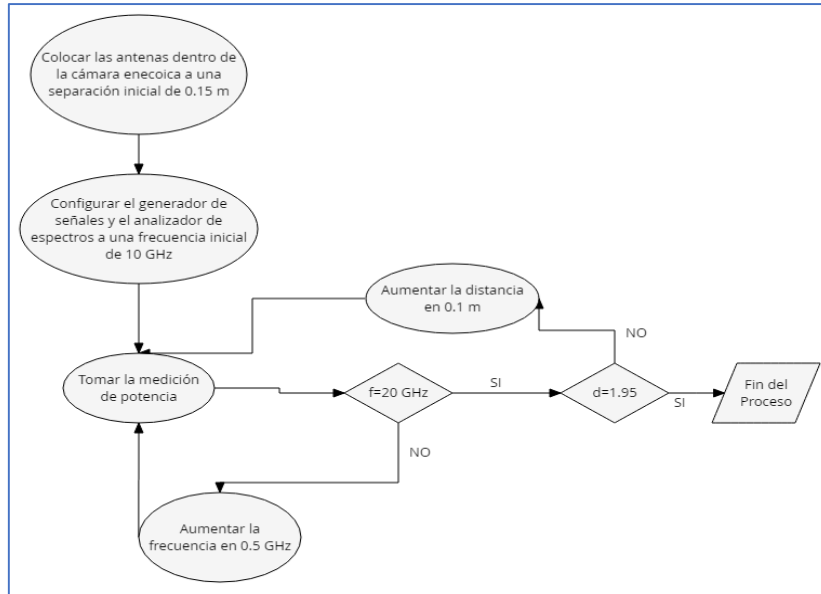


Gráfico 2-2 Medición Condiciones de Vacío
 Realizado por: Suárez y Sarmiento, 2018.

2.3.2 En condiciones de presión

Metodología de medición para condiciones de presión, mostrada en el gráfico 3-2.

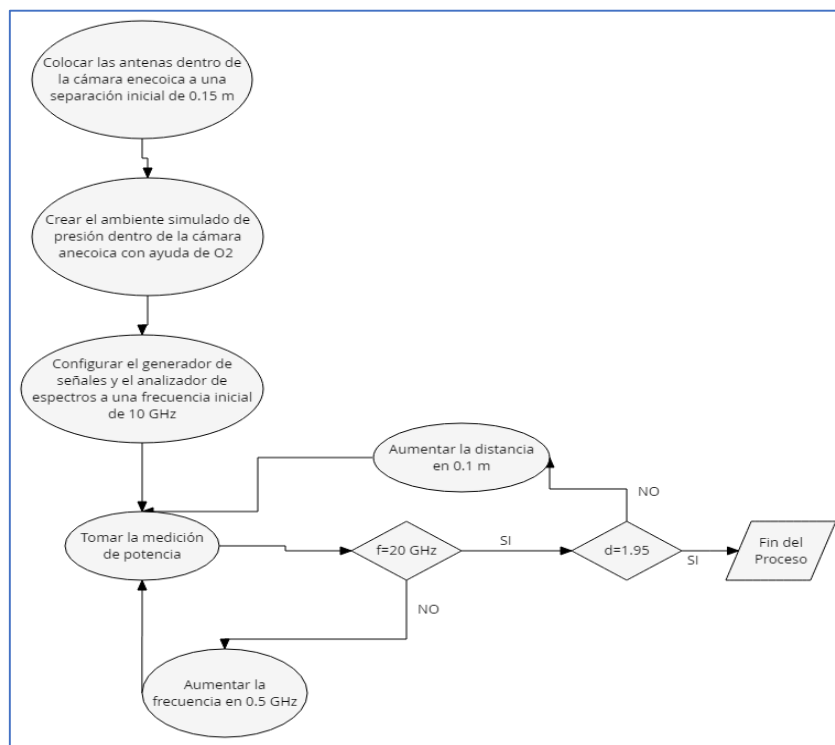


Gráfico 3-2 Medición Condiciones de Presión
 Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

2.3.3 En presencia de humedad

En el gráfico 4-2 se hace evidencia de la metodología de medición para condiciones de humedad.

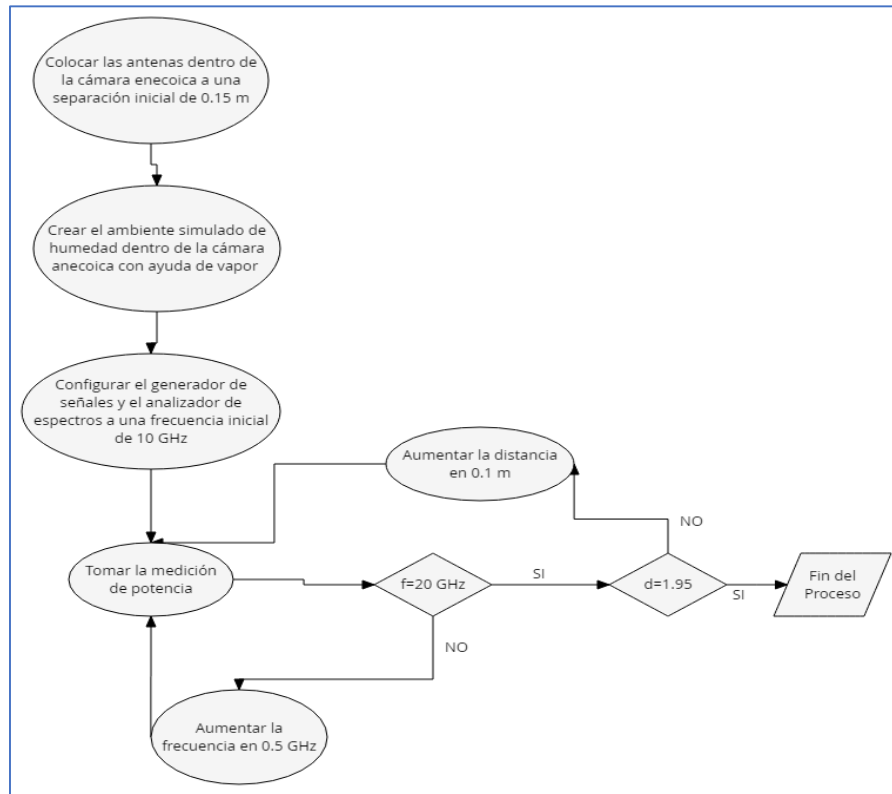


Gráfico 4-2 Medición Condiciones de Humedad

Realizado por: Suárez y Sarmiento, 2018.

2.4 VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

2.4.1 Condiciones de humedad

Se simula el ambiente de humedad de la costa dentro de la cámara. Esto se obtuvo considerando los porcentajes de humedad existentes tanto en la región andina (Riobamba) como en la región costera (Santo Domingo de los Tsachilas), teniendo los valores de 49% y 87% respectivamente (The Weather Channel, 2018). Entonces dentro de la misma se insertará un porcentaje de humedad dado por la ecuación (28):

$$H_f = H_c - H_s \quad (28)$$

Donde:

H_f porcentaje de humedad faltante en la cámara.

Hc porcentaje de humedad en la costa.

Hs porcentaje de humedad en la sierra.

$$Hf = 87 - 49$$

$$Hf = 38\%$$

Por lo tanto, se debe aumentar un porcentaje igual a 38 % de humedad dentro de la cámara para llegar a obtener el objetivo planteado.

Paralo lo cual se colocó un higrómetro dentro de la cámara y comprobando que éste marque un porcentaje del 87% de humedad siendo visualizado a través de webcam, de esta manera se puede comprobar cuando el higrómetro marca el porcentaje de humedad necesario.

2.4.2 Condiciones de presión

Se simula la presión atmosférica de la costa introduciendo oxígeno en el interior de la cámara anecoica sellada. Lo cual se pudo hacer obteniendo los datos de presión y cantidad de oxígeno de la costa como de la sierra, para con cálculos obtener el valor necesario.

Se obtiene el volumen de la cámara anecoica a través de la ecuación (29).

$$v = h \times l \times a \tag{29}$$

En donde:

h es la altura de la cámara.

l es la longitud de la cámara.

a es el ancho de la cámara.

$$v = 0.8 \times 0.8 \times 2.4$$

$$v = 1.536 \text{ m}^3$$

Se sabe que la concentración de oxígeno en Riobamba es de 20.95 %.

$$1.536 * 0.2095 = 0.32179 \text{ m}^3$$

Es decir, la caja en condiciones normales de la sierra tiene 0.32179 m^3 de oxígeno. Entonces si sabemos que en 1 m^3 existen 1000 litros de oxígeno tendremos un total 321.79 litros de oxígeno.

Se sabe que la costa tiene un porcentaje de oxígeno mayor en 14.64% que el existente en la sierra, lo que nos da.

$$1.536 * 0.3559 = 0.54679 \text{ m}^3$$

Teniendo 546.79 litros de oxígeno en la costa:

$$546.79 - 321.79 = 225 \text{ lt}$$

Teniendo un total de 225 litros de oxígeno faltante en la cámara para llegar al porcentaje de la región costera del Ecuador.

Dicha cantidad de oxígeno se mide por medio de la válvula existente en los tanques de oxígeno, se procedió a abrir la válvula a un flujo de litros por minuto durante el intervalo de tiempo requerido. En el caso de este experimento se abre la válvula a 15 litros por minutos, como se observa en la figura 6-2, por un lapso de 15 minutos obteniendo de esta manera la cantidad de oxígeno faltante para simular el ambiente de presión atmosférica de la costa.



Figura 6-2 Válvula de Flujo de Oxígeno

Realizado por: Suarez y Sarmiento. 2018.

CAPÍTULO 3

3.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se describe todos los resultados obtenidos al realizar cada una de las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos propuestos anteriormente, la descripción y discusión de cada uno y su análisis dentro del resultado final al que se quiere llegar para el cumplimiento del objetivo general.

3.2 GANANCIA DE LA ANTENA Y PERDIDAS DE LOS CABLES.

Para las pérdidas de los cables se sigue la metodología puesta en la sección “Caracterización de la antena vs cable” obteniendo el valor de 6 dB al medir un solo cable y un valor de 11 dB en la medición de los dos cables, al hacer la diferencia de estos valores se tiene que cada cable incluido sus conectores una pérdida de 5dB como se muestra.

$$P_c = 11 - 6$$

$$P_c = 5 \text{ dB}$$

Para la ganancia de la antena se sigue la misma metodología obteniendo unas pérdidas totales de 10 dB, conociendo que las pérdidas dentro del modo TE₁₀ de la línea de transmisión rectangular es de 1 dB. Por lo tanto, las pérdidas de los cables y de la línea de transmisión de tiene un total de 11 dB.

Se compara las pérdidas totales con las sumadas y se comprueba que hace falta 1 dB para que estos valores sean iguales, se puede deducir de esta forma que la antena tiene una ganancia de 1 dB cuando trabaja en frecuencias de 10 a 20 GHz.

3.3 CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE LA CÁMARA ANECOICA

Para la construcción de dicha cámara se dedujo la distancia mínima la cual es la de campo lejano dado por la ecuación (5).

$$\frac{2D^2}{\gamma}$$

Obteniendo una distancia mínima de 0.16m, y la longitud máxima de la cámara se la dio de manera en la que se pueda tomar varios valores de distancia variando en pasos de 0.1 m. Además, el ancho y altura de la misma se la dio de manera que haya el espacio suficiente dentro de la cámara para poder acomodar las antenas sin mayor dificultad.

Antes de la construcción se simuló un plano con la ayuda del software AutoCAD mediante el cual se pudo observar como quedara la estructura de la cámara para obtener los materiales y su cantidad adecuada.

Se presenta en la figura 1-3 la estructura simulada para la cámara anecoica.

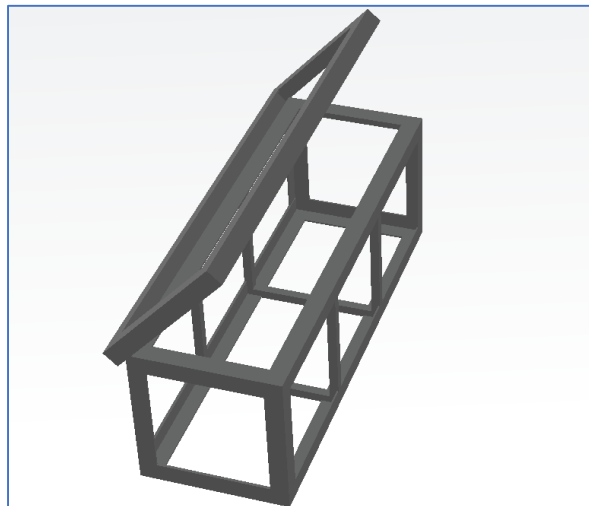


Figura 1-3 Estructura Cámara Anecoica

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

A esta estructura se la recubrió con todos los materiales especificados en el capítulo 2 para poder generar un ambiente aislado dentro de esta y con la espuma correspondiente para poder evitar la reflexión de las ondas.

Para la comprobación del correcto funcionamiento de la cámara se tomaron medidas de potencia en dB tanto en el exterior como en el interior de la cámara obteniendo los valores mostrados en la tabla 1-3.

Tabla 1-3 Resultados funcionamiento cámara anecoica

Fuera de la cámara			Dentro de la cámara		
10 GHz	11 GHz	12 GHz	10 GHz	11 GHz	12 GHz
-24.72 dB	-23.6 dB	-22.14 dB	-23.8 dB	-22.33 dB	-20.17 dB

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

En la tabla 1-3 se puede observar la diferencia de potencia medida tanto fuera como dentro de la cámara anecoica, se realizó el cálculo para cada medida a en ambas situaciones y en promedio la cámara anecoica mejoro la medición en un promedio de 1.54 dB.

3.4 PERDIDAS DE PROPAGACIÓN MEDIDAS

Para determinar las pérdidas de propagación dentro de la cámara anecoica se debe tomar en cuenta la configuración de los equipos tales como la potencia y la frecuencia con la que se realizaron las medidas, en este caso se utilizó una potencia constante de 5 dB con una variación de frecuencia de 1 GHz en el rango de 10 a 20 GHz.

3.4.1 *Perdidas de propagación variando la distancia*

Se tomaron medidas de potencia con las cuales se determinaron las perdidas en el espacio libre, esto se logró restando 5 dB a la potencia medida, puesto que 5 dB es la potencia que se colocó en el generador de señales y cambiándola de signo ya que se necesitó las perdidas con signo positivo además se restaron las perdidas por los cables y conectores. De esta manera se obtuvo los valores de perdidas en el espacio libre teniendo las diferentes tablas que se muestran en el anexo 1, en los gráficos 1-3, 2-3 y 3-3 se muestran las perdidas variando la distancia a una frecuencia determinada.

Como se puede ver en el gráfico 1-3 las perdidas oscilan entre 25 y 40 dB en las frecuencias de 10, 11,12 y 13 GHz además de que las perdidas no son constantes, pero se observa que existe menor perdidas justo en el inicio de far field, y desde esta distancia comienzan a aumentar, pero no de manera constante ya que se tiene subidas como bajadas de perdidas según aumenta la distancia.

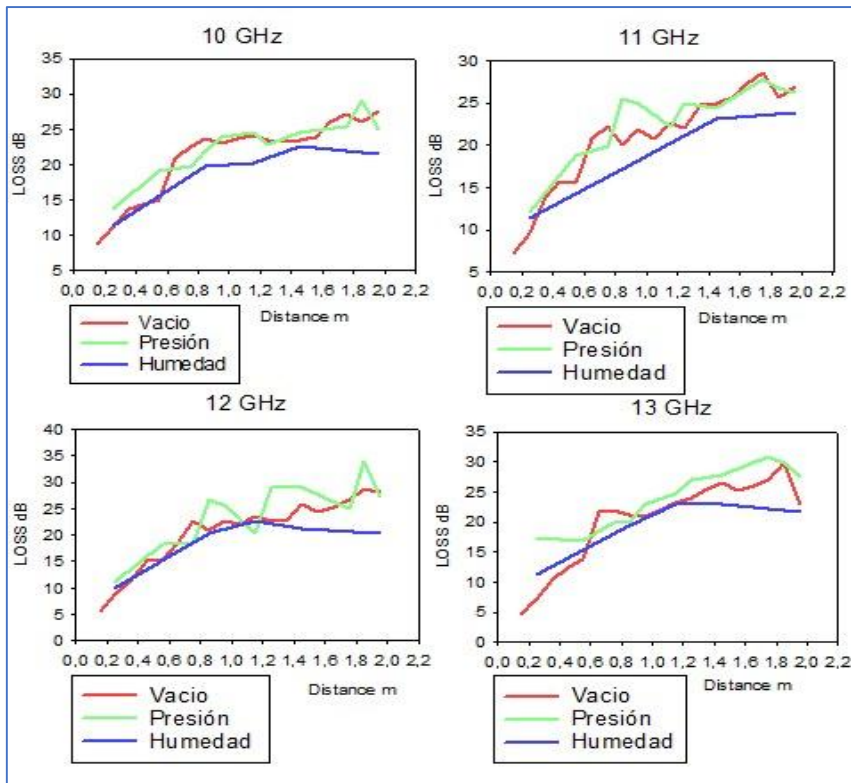


Gráfico 1-3 Perdidas Medidas a 10, 11, 12 y 13 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

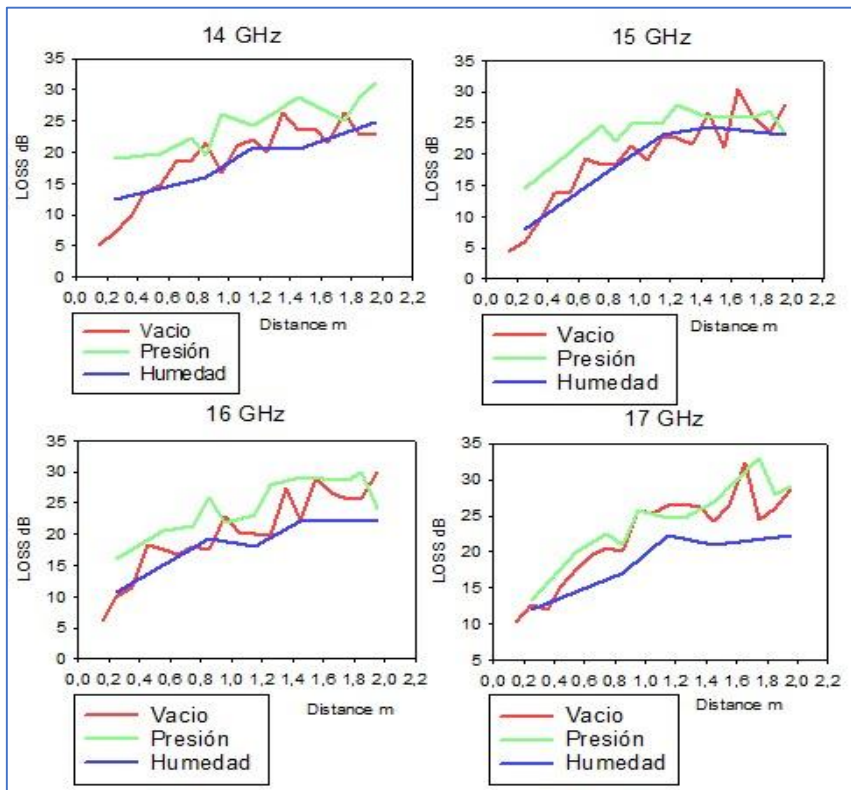


Gráfico 2-3 Perdidas Medidas a 14, 15, 16 y 17 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

En el gráfico 2-3 se puede visualizar las perdidas oscilan entre 4 y 34 dB en las frecuencias de 14, 15,16 y 17 GHz además de que las perdidas no son constantes, pero se observa que existe menor perdidas justo en el inicio de far field, y desde esta distancia comienzan a aumentar, pero no de manera constante ya que se tiene subidas como bajadas de perdidas según aumenta la distancia.

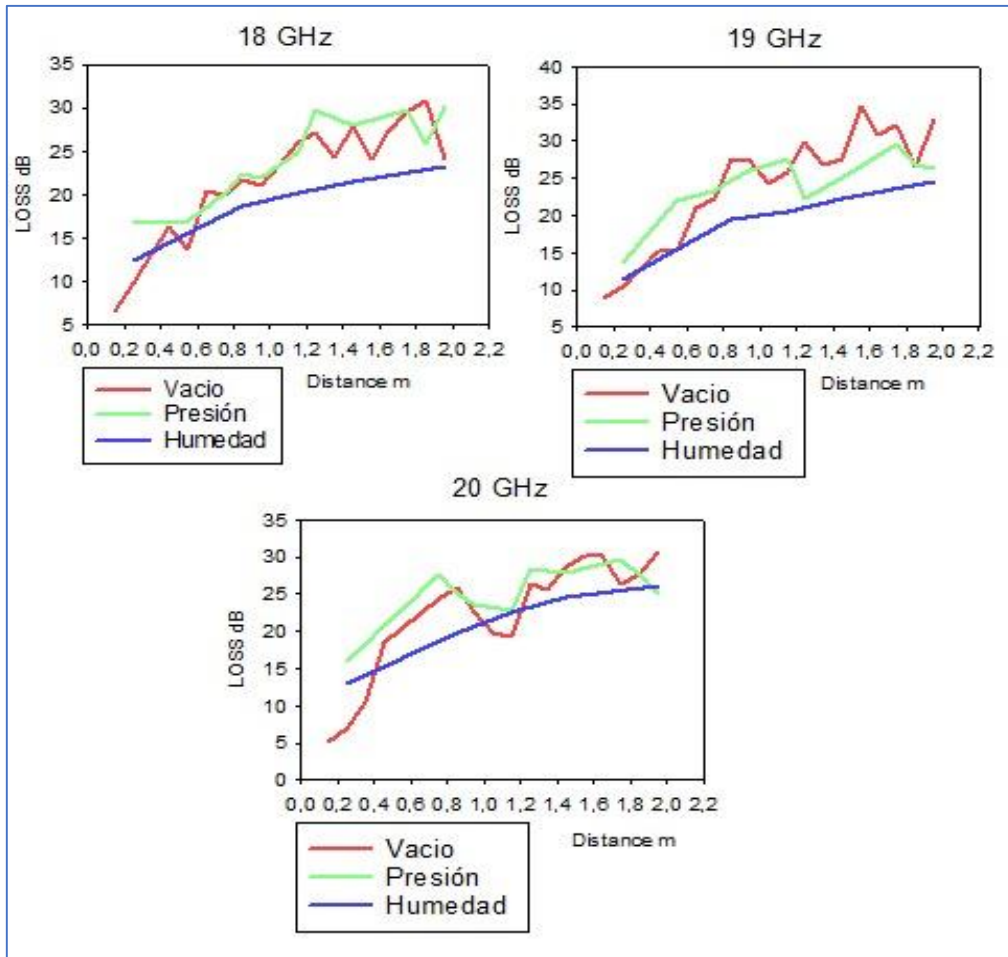


Gráfico 3-3 Perdidas Medidas a 18, 19 y 20 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

En el gráfico 3-3 las perdidas oscilan entre 2 y 44 dB en las frecuencias de 18, 19 y 20 GHz además de que las perdidas no son constantes, pero se observa que existe menor perdidas justo en el inicio de far field, y desde esta distancia comienzan a aumentar, pero no de manera constante ya que se tiene subidas como bajadas de perdidas según aumenta la distancia.

3.4.2 *Perdidas de propagación variando la frecuencia*

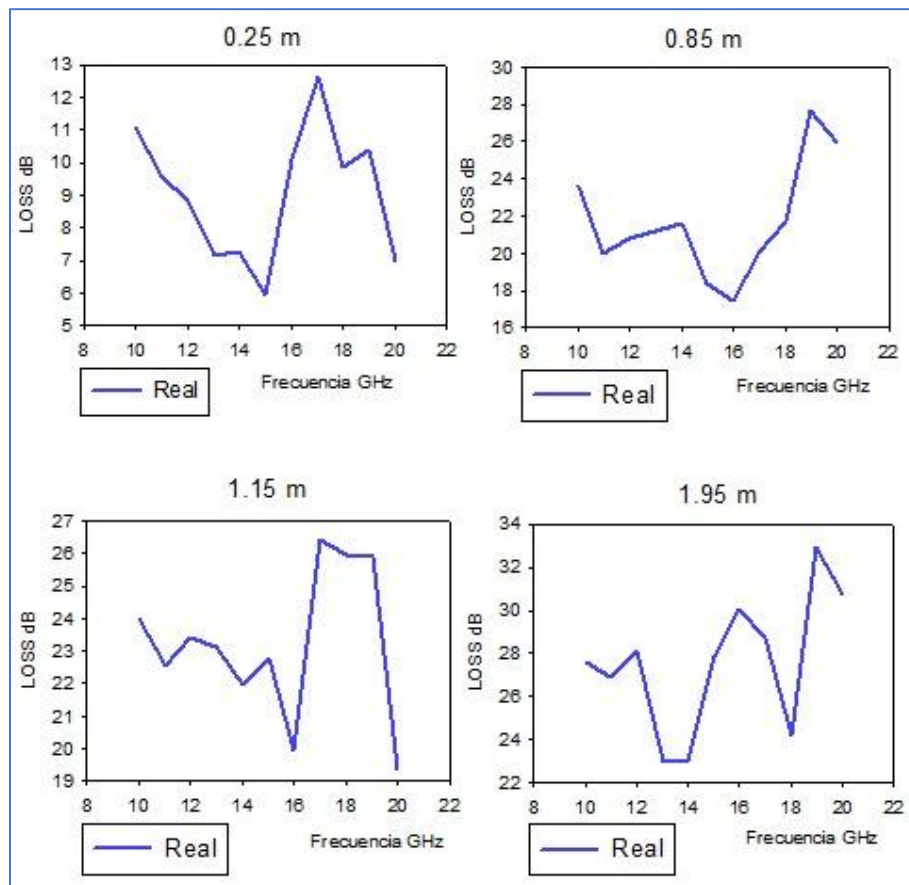


Gráfico 4-3 Perdidas Medidas a 0.25, 0.85, 1.15 y 1.95 m variando la frecuencia

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

En el gráfico 4-3 se observan que las pérdidas no presentan una tendencia de crecimiento o decrecimiento, cómo se observa en las gráficas 1-3, 2.3 y 2-4. Esto se debe a la absorción molecular de las partículas de hidrógeno y oxígeno a diferentes frecuencias; por lo que al desarrollar el modelo estos factores de variación estarán implícitos.

3.5 DETERMINACION DEL MODELO DE PROPAGACION

3.5.1 *Deducción del modelo de propagación*

Como se puede observar en los gráficos 1-3, 2-3 y 3-3 los valores son distintos y no siguen una curva (patrón). Por lo que se realizó cálculos para obtener una curva la cual sea muy próxima a estas medidas, esto fue realizado en base a la “Determinación del Modelo de Propagación de Friss” como se muestra en la ecuación (30).

$$L = A \log f + B \log d \quad (30)$$

En donde A y B son las constantes que encontrar

d es la distancia entre las antenas

f es la frecuencia a la que se trabaja en GHZ

Con las medidas dentro de la cámara anecoica sin ningún ambiente simulado se realizaron los siguientes cálculos generando dos ecuaciones las cuales son:

$$L_n = A_n \log f_n + B_n \log d_n$$
$$L_{n+1} = A_1 \log f_{n+1} + B_1 \log d_{n+1}$$

Cuando n es igual al máximo valor posible dentro de las medidas tomadas, entonces el valor de n+1 será la primera medida obtenida.

3.5.2 Modelo de propagación

Después de hallar un valor para A y B, se comparó con las medidas tomadas y se estableció un valor determinado para cada situación

3.5.2.1 En el espacio libre

Resolviendo el sistema de ecuaciones resultantes de la aplicación de la ecuación (30) se obtiene los siguientes resultados de L, A y B que se presentan en el anexo 2.

Posteriormente se calcula un valor promedio tanto de A como de B obteniendo los siguientes resultados.

$$A = 5,5126$$

$$B = 20,4949$$

Con estos nuevos valores de A y B se calculan un nuevo valor de pérdidas para comprobar si los valores de A y B generan una gráfica de pérdidas que se aproxime a la gráfica real.

Al hacer la comparación entre valores de perdidas medidas con valores de pérdidas calculadas tenemos los gráficos 5-3, 6-3 y 7-3. La tabla correspondiente se encuentra en el anexo 3.

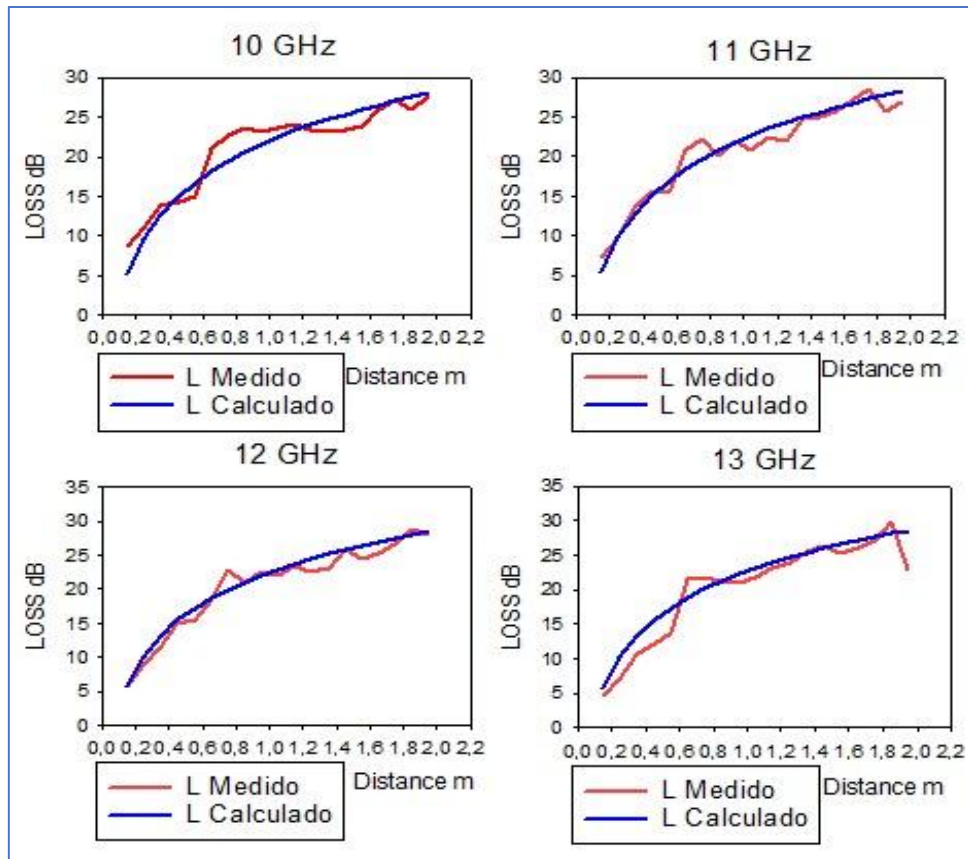


Gráfico 5-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Vacío a 10, 11, 12 y 13 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

En el gráfico 4-3 se puede observar las pérdidas calculadas con las perdidas medidas, tienden a reflejar el mismo resultado, las gráficas calculadas aumentan sus pérdidas según las frecuencias, pero con valores casi despreciables entre frecuencias, en las frecuencias de 10, 11, 12 y 13 GHz, las gráficas medidas pueden ser reemplazadas por estas, dándonos un error cuadrático medio de 1.82, 1.42, 1.33 y 2.28 respectivamente.

El error cuadrático medio se ha calculado a partir de la ecuación (31), el mismo que fue calculado con la ayuda de un software de procesamiento de datos como se puede ver en el anexo I.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (31)$$

Donde:

P es el valor predicho.

O es el valor medido.

n es la cantidad de datos a analizar.

El error cuadrático medio (RMSE) es inversamente proporcional a la efectividad de la expresión matemática hallada de manera experimental para el cálculo de pérdidas en el espacio libre dentro de la cámara anecoica.

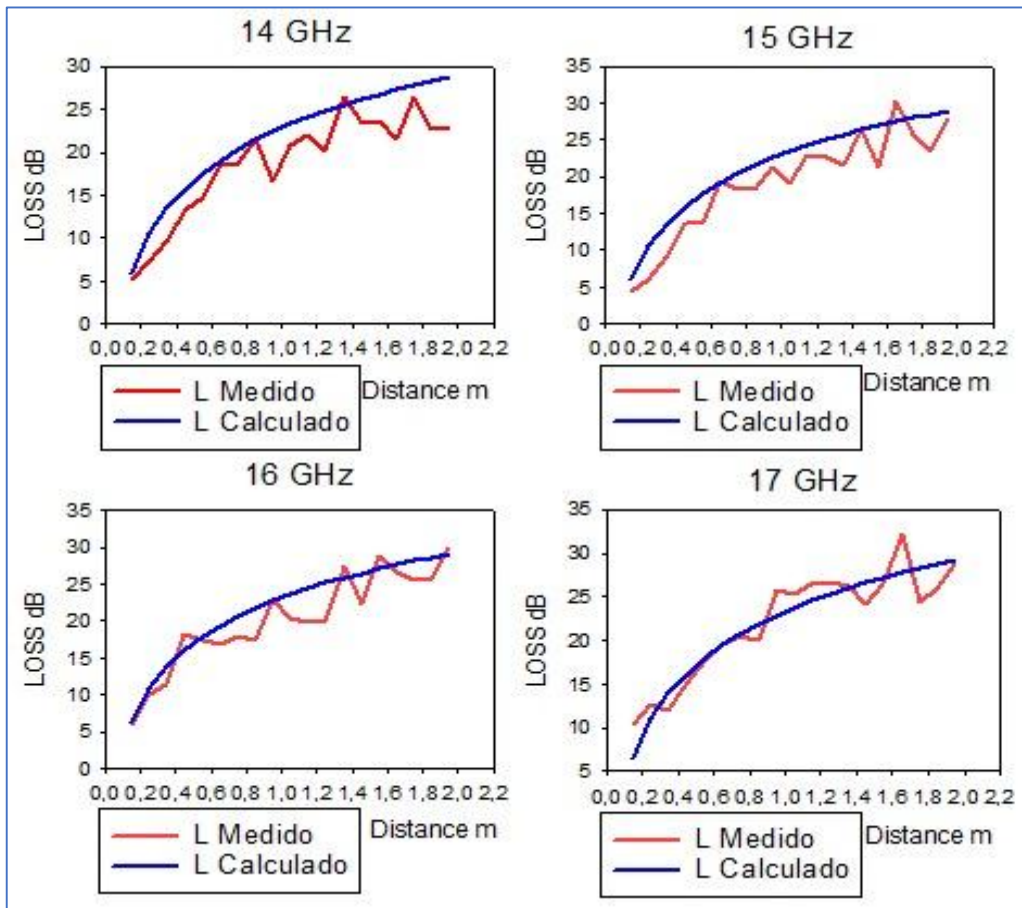


Gráfico 6-3 Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Vacío a 14, 15, 16 y 17 GHz para diferentes distancias

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

En el gráfico 6-3 se puede observar las pérdidas calculadas y las pérdidas medidas, tienden a reflejar el mismo resultado, las gráficas calculadas aumentan sus pérdidas según las frecuencias, pero con valores casi despreciables entre frecuencias, en las frecuencias de 14, 15, 16 y 17 GHz,

las gráficas medidas pueden ser reemplazadas por estas dándonos un error cuadrático medio de 3.45, 3.23, 2.73 y 2.19 respectivamente.

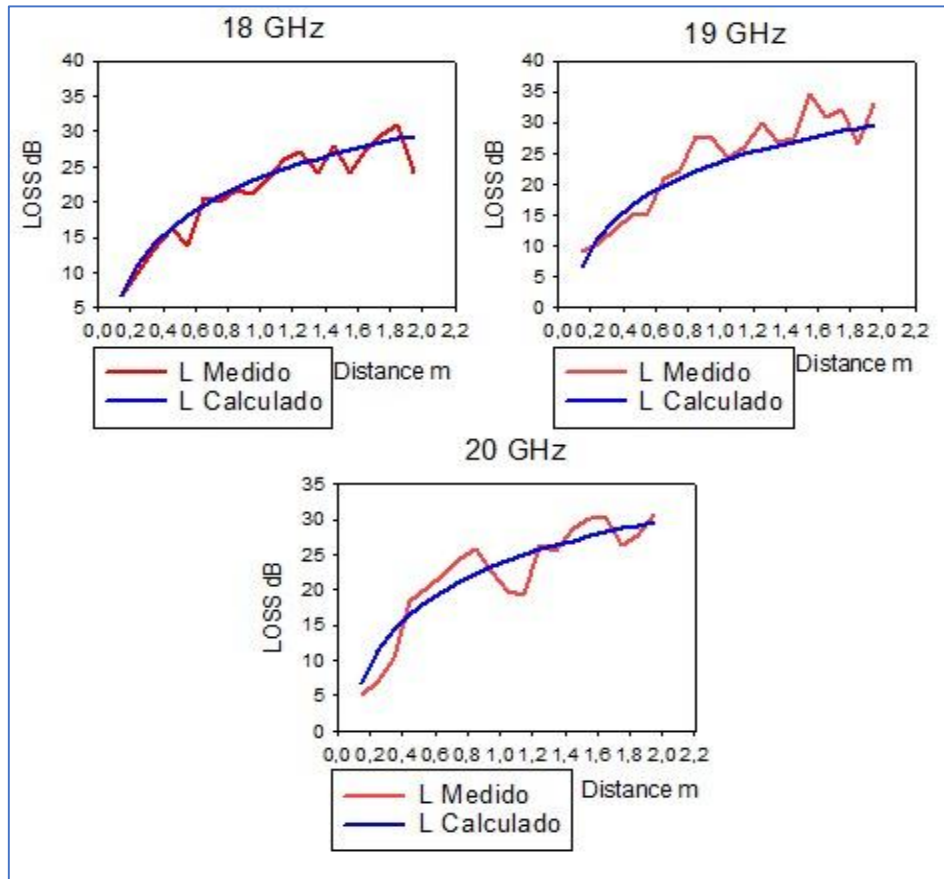


Gráfico 7-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Vacío a 18, 19, y 20 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

Se puede observar en el grafico 7-3 las pérdidas calculadas y las perdidas medidas, tienden a reflejar el mismo resultado, las gráficas calculadas aumentan sus pérdidas según las frecuencias, pero con valores casi despreciables entre frecuencias, en las frecuencias de 18, 19 y 20 GHz, las gráficas medidas pueden ser reemplazadas por estas dándonos un error cuadrático medio de 2.06, 3.07 y 2.81 respectivamente.

Todos los cálculos fueron realizados con ayuda de un software de procesamiento de datos, el código utilizado se muestra en el anexo 4.

3.5.2.2 En Condiciones de Presión

Para las condiciones de presión se hicieron los mismos cálculos teniendo los valores calculados de A, B de las pérdidas en el anexo 5 y en el anexo 6 el programa utilizado mediante el software de procesamiento de datos.

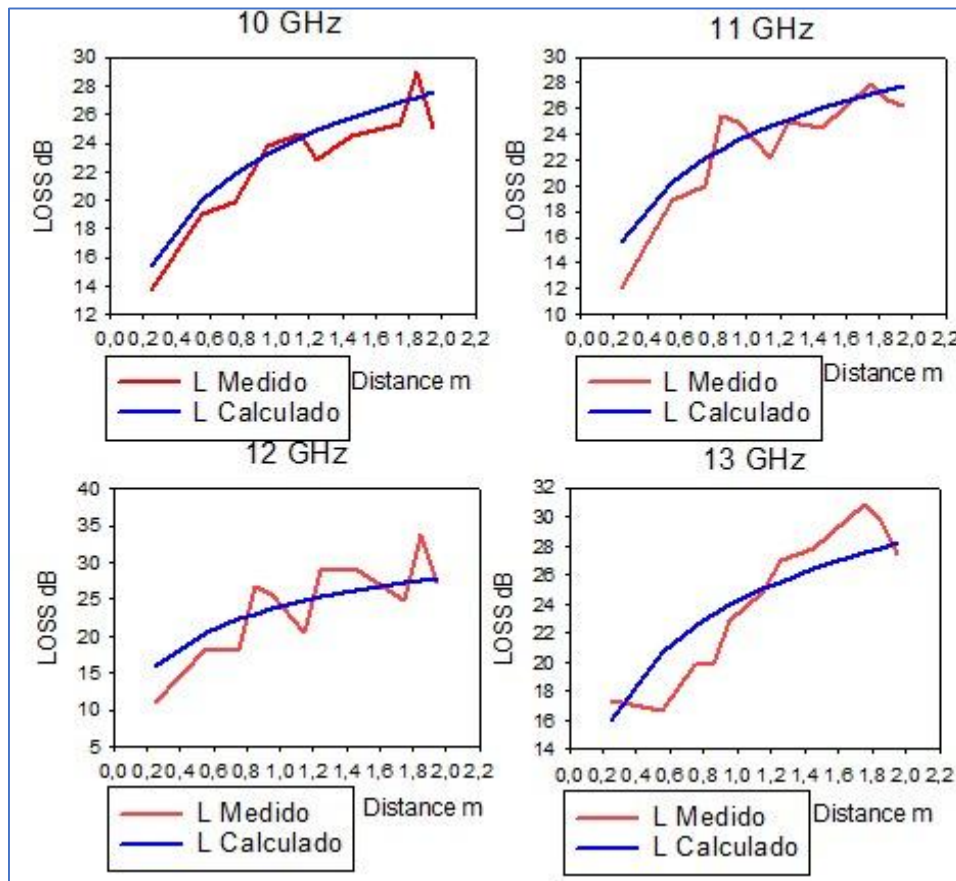


Gráfico 8-3 Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Presión a 10, 11, 12 y 13 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

En el gráfico 8-3 se puede observar que la curva calculada tiende a acoplarse con la curva medida, dando de esta forma una solución aproximada a la real, con valores definidos para sus cálculos. En 10, 11, 12 y 13GHz se aproxima más a los valores reales dando un error cuadrático medio de 1.53, 1.89, 3.69 y 2.27.

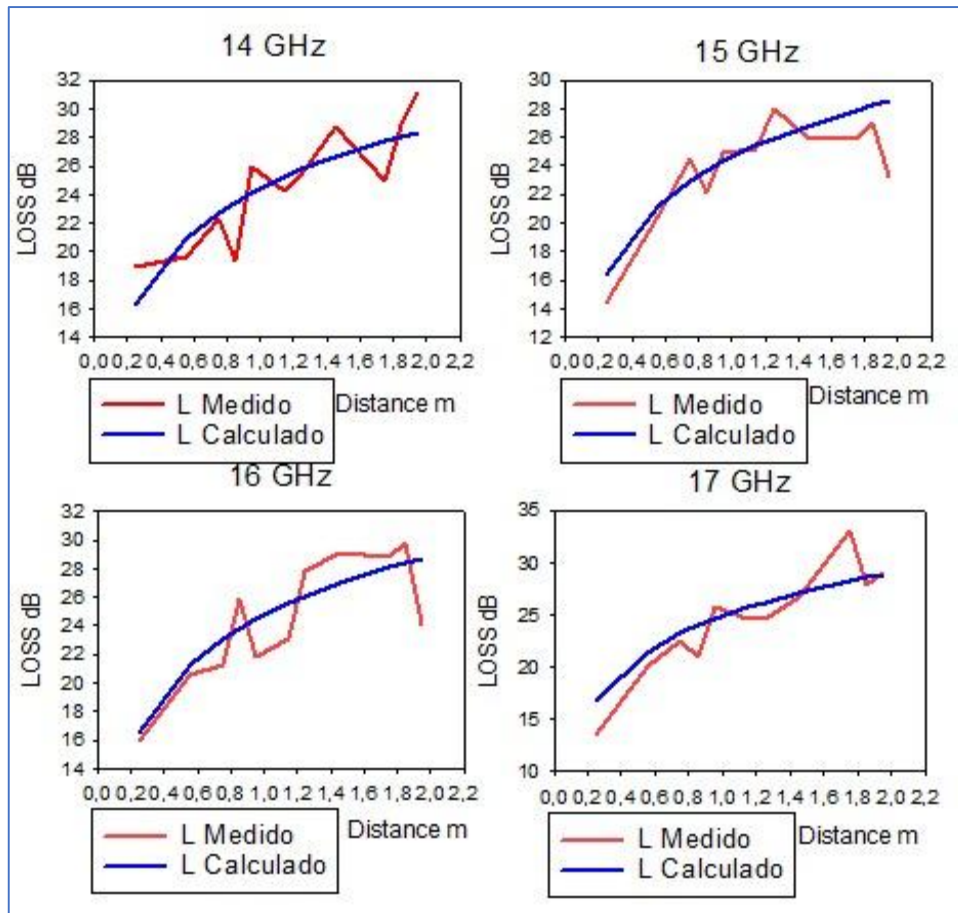


Gráfico 9-3 Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Humedad a 14, 15, 16 y 17 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

Se puede observar en el gráfico 9-3 que los valores calculados se aproximan de manera muy eficaz a los valores reales, dándonos ecuaciones que se establecen para los cálculos en las frecuencias de 14, 15, 16 y 17 GHz, dando un error cuadrático medio de 2.13, 2.11, 2.21 y 2.12 respectivamente.

Podemos observar en el gráfico 10-3 que los valores calculados se aproximan a los valores medidos dándonos un resultado eficiente en el cálculo de las constantes a establecer para este tipo de propagación, en las frecuencia de 19 y 20 GHz las tenemos muy aproximadas con un error cuadrático medio de 2.2 y 2.23 respectivamente, mientras que en la frecuencia de 18 GHz tenemos graficas no tan aproximadas con un error cuadrático medio de 8.75 debido a que las constantes son generales y en unas frecuencias coincidirán mejor que en otras frecuencias.

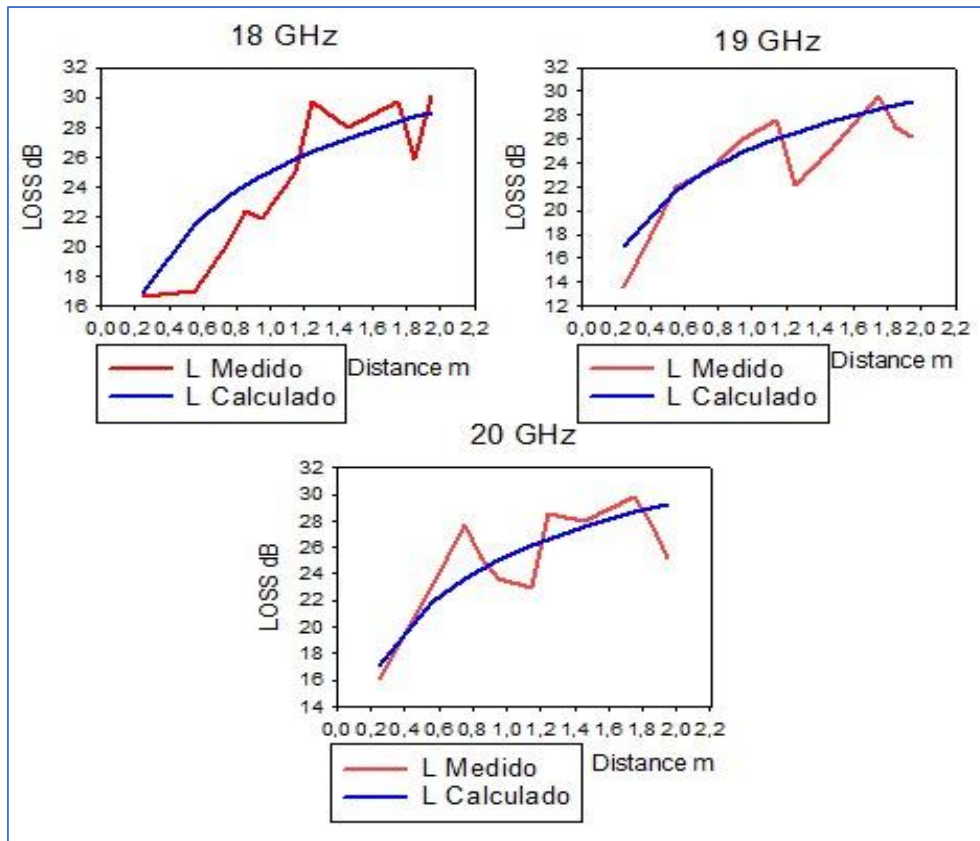


Gráfico 10-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Humedad a 18, 19 y 20 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

En condiciones de presión los valores tanto de A como de B:

$$A=5.8903$$

$$B=13.6388$$

3.5.2.3 En Condiciones de Humedad

Para las condiciones de humedad se hicieron los mismos cálculos teniendo los valores calculados de A, B de las perdidas en el anexo 7 y en el anexo 8 el programa utilizado mediante el software de procesamiento de datos.

En el gráfico 11-3 se visualiza como la gráfica calculada se aproxima con la gráfica medida dándonos valores positivos ante lo requerido, y efectivamente poder establecer estas constantes para la propagación de ondas, vemos que, en 10, 11, 12 y 13 GHz los valores son más aproximados dándonos un error cuadrático medio de 1.36, 1.08, 2 y 1.54 respectivamente.

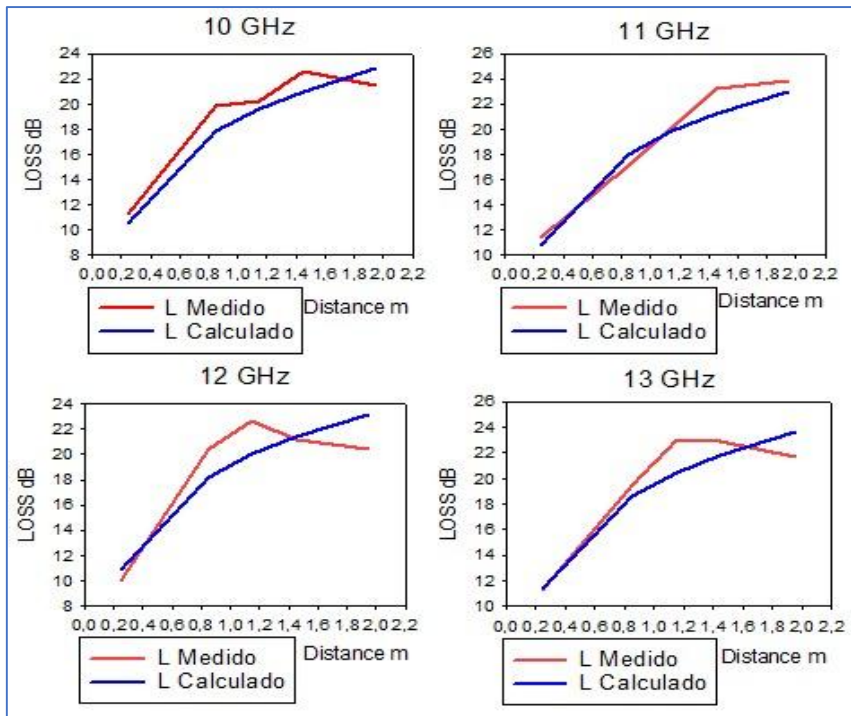


Gráfico 11-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Humedad a 10, 11, 12 y 13 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

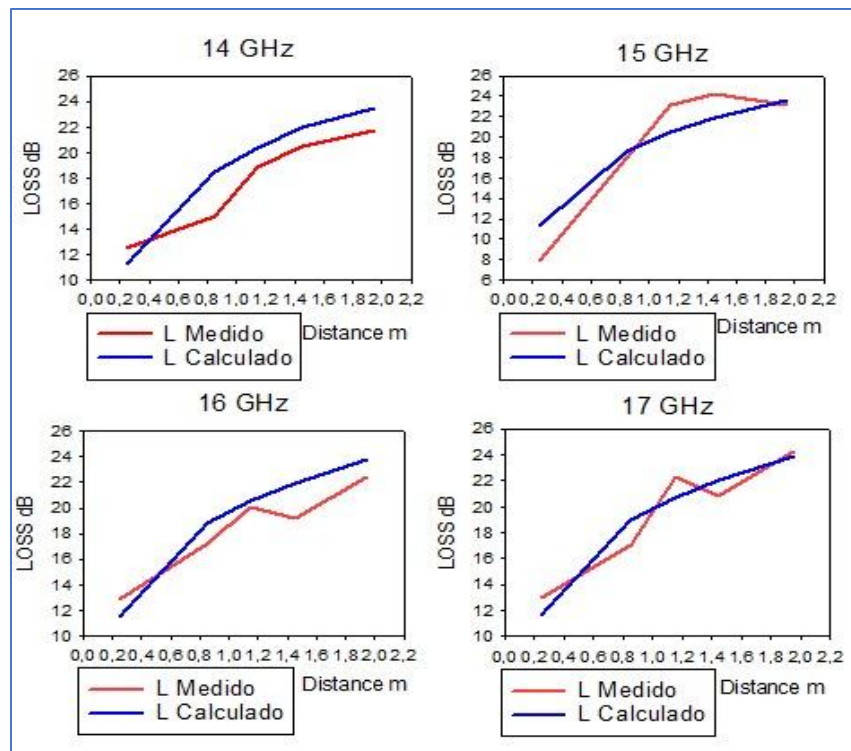


Gráfico 12-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Humedad a 14, 15, 16 y 17 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

Podemos ver en el gráfico 12-3 que efectivamente la formula calculada nos da valores muy aproximados a los reales, en las frecuencias de 14, 15, 16 y 17 GHz, dándonos un error cuadrático medio de 1.49, 2.26, 1.34 y 1.42 dB respectivamente.

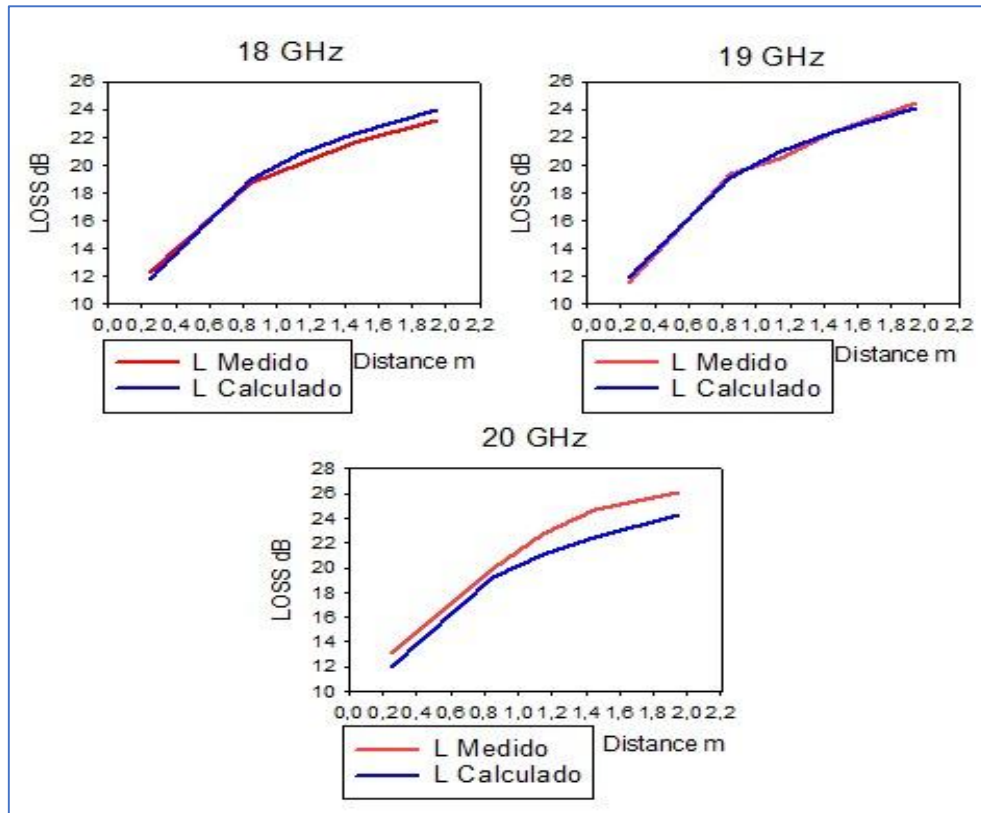


Gráfico 13-3 Perdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en Humedad a 18, 19 y 20 GHz para diferentes distancias.

Realizado por: Suarez y Sarmiento, 2018.

El gráfico 13-3 evidencia que las constantes calculadas dan valores muy aproximados a los reales, además en la frecuencia de 18, 19 y 20 GHz se nos aproxima dando un error cuadrático medio de 0.62, 0.32 y 1.61 dB respectivamente.

En condiciones de humedad los valores tanto de A como de B:

$$A=2.1381$$

$$B=6.2442$$

CONCLUSIONES

- Se ha construido una cámara anecoica de 2.4 metros de largo, 0.8 metros de ancho y 0.8 metros de altura puesto que la distancia mínima de campo lejano para que funcione de 10 a 20 GHz es de 0.16 m, la potencia promedio medida dentro de la cámara es 1.54 dB menor que la medida fuera de la cámara construida. Esto se debe principalmente a la absorción de las paredes de la cámara y al aislamiento de posibles señales externas en las frecuencias de estudio.
- Tomando en cuenta que en la sierra la humedad es del 49% con un promedio de 21.88 dB de pérdidas de propagación y que en la costa es del 89% con un promedio de 18.96 dB; existe una diferencia de 2.92 dB, es decir que las condiciones ambientales en la costa generan un ambiente propicio para la propagación de señales radioeléctricas debido a la conductividad presente en un medio con mayor humedad.
- Considerando que los niveles de oxígeno en la costa superan a los de la sierra en un 14.64%, y que en las pérdidas en la sierra y costa son de 21.88 dB y 22.95 dB respectivamente, se determina una diferencia de 1.06 dB. Es decir que en ambientes con menor concentración de oxígeno existen menores pérdidas de propagación, esto se debe a que las moléculas de O₂ absorben energía electromagnética, produciendo atenuación sobre todo en frecuencias superiores a 10GHz.
- En promedio el RMSE de los resultados obtenidos con las mediciones y de los obtenidos con el modelo de propagación generado es de 2.40 en condiciones normales, 2.83 con variación de oxígeno y de 1.37 en condiciones de humedad, lo que nos muestra que el modelo de propagación descrito permite una buena aproximación a los datos reales; sin embargo cabe destacar que en condiciones de humedad la diferencia se debe a las crestas de atenuación que producen las moléculas de O₂ y H₂O cuando alcanzan su frecuencia de resonancia molecular.
- Se ha determinado un modelo empírico a través de la fórmula general de propagación $L = A \log f + B \log d$, con constantes establecidas para la determinación de las pérdidas de propagación de ondas entre antenas según su distancia y frecuencias que van de 10 a 20 GHz, para un entorno aislado dentro de una cámara anecoica, se determinó A es 5.5126 y B es 20.494; para un entorno con alto porcentaje de oxígeno A es 5.8903 y B es 13.6388; para ambientes húmedos A es 2.1381 y B es 6.2442.

RECOMENDACIONES

- Se debe tener en consideración las propiedades de los materiales a utilizar según sus propiedades de absorción para impedir la atenuación, y las propiedades de aislamiento para impedir las interferencias de señales existentes al exterior de la cámara, además de hacer una simulación de la cámara a construir para evitar la falta de material al momento de construirla.
- Para tener una aproximación más cercana y con un error medio menor, se deben realizar más mediciones con un rango de frecuencias de al menos 28 GHz ya que es la banda que utilizarían los móviles, además de que se deben hacer mediciones fuera del laboratorio en condiciones reales.
- El analizador de espectros limita el rango de trabajo de la cámara debido a que funciona de manera correcta hasta frecuencias próximas a 20 GHz presentando un error en esta frecuencia. Para obtener resultados óptimos en 20 GHz y frecuencias mayores, se debe utilizar un analizador de espectro con un rango mayor de funcionamiento.
- Tener en cuenta el rango de correcto funcionamiento de los instrumentos a utilizar, para conocer a que frecuencias nos darán error en medidas, y comprobar si existe mejoría en las pérdidas de la señal dentro de la cámara anecoica con respecto al exterior para iniciar con la toma de medidas.
- Ser precisos al momento de tomar medidas, para poder evitar los errores humanos y de esta manera obtener valores más aproximados a los valores reales, además se debe analizar y comparar la variación de pérdidas existentes entre cada ambiente simulado y reales.
- Tener conocimientos para la utilización de un software que facilite la manipulación de datos, para de esta manera acelerar el proceso de cálculo y se minimizan los errores de cálculo.

GLOSARIO

Comunicaciones Inalámbricas: Son aquellas que se llevan a cabo sin el uso de cables de interconexión como los teléfonos celulares.

Radio Astronomy: Es una radio de difusión

Gbps: Gigabits por segundo

Onda Milimétrica: Es una onda electromagnética con longitud de onda de 1 a 10 milímetros

3GPP: Es una colaboración de grupos asociados de telecomunicaciones cuyo objetivo era asentar las especificaciones de un sistema global de telecomunicaciones de tercera generación

Exabytes: Son 10^{18} bytes

Copadas: Que se encuentra ocupadas

Atenuada: Es la pérdida de potencia de una señal al transitar por un medio de propagación

Tecnología MIMO: Se consigue por el desfase de la señal, de tal forma que los rebotes de la señal WiFi, en vez de ser destructivas, sean constructivas para de esta forma proporcione mayor velocidad al haber menos datos perdidos.

Baja Frecuencia: Se refiere a la banda de radiofrecuencia que esta entre los 30 y 300 KHz

Desligados: Separa una cosa de otra a la que generalmente va unida

Polímero: Son macromoléculas unidas por enlaces covalentes, tienen elevadas masas moleculares, algunos ejemplos son la madera, el cuero, la lana.

Impregnación: Introducir las moléculas de un cuerpo sobre otro sin que se unan.

5G: Son las siglas para referirse a tecnología de quinta generación

Incidencia: Sucede en el desarrollo de una acción con el que tiene relación, pero no es esencial

Degradación: Reducir o desgastar las cualidades de un objeto, es decir se daña.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Barrado, A. D.** 'Estudio y caracterización del canal y de la propagación en ondas milimétricas, orientada a su utilización en redes de comunicaciones móviles 5G'. *Modelo de integración de tecnologías para la provisión de servicios móviles basados en localización y contexto*. 2017.
2. **Bhushan, N. et al.** 'Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G'. *IEEE Communications Magazine*. 2014, pp. 82–89. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736747.
3. **Campos, Mónica L; & Flores, Pauina B.** *Implementación de una cámara anecoica en la banda de 2-3 GHz*. 2006.
4. **Ccafyde Digital.** Habitación científica: Jaula de Faraday. 2012. Disponible en: <http://habitacioncientifica.blogspot.com/2012/02/jaula-de-faraday.html>.
5. **Capps, Charles.** *How do we define the far field of an antenna system, and what criteria define the boundary between it and the near field? The answer depends on your perspective and your design's tolerances*. 2001. [Consulta: 14 September 2018]. Disponible en: www.ednmag.com.
6. **Balanis, Constantine.** *Antenna Theory - Analysis and Design*. 2nd ed. 1982. [Consulta: 26 August 2018]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/166296230/Antenna-Theory-Analysis-and-Design-2nd-Edition-Constantine-a-Balanis-pdf>.
7. **Cox, T. J.** *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. USA. 2009. Disponible en: www.ergonomicsarena.com.
8. **Dario, B; & Juan, G.** *Criterios generales para el diseño de cámaras anecoicas*. Argentina. 2012.
9. **Jaramillo, Darwin; & Quishpe, Luis.** *Estudio, diseño y construcción de un prototipo de arreglo*

de antenas microstrip para recepción en la banda x comparable a la ganancia de una antena parabólica proyecto previo a la obtención del título de ingeniero en electrónica y telecomunicaciones, 2013. [Consulta: 14 September 2018]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7119/1/CD-5306.pdf>.

10. **Altamirano, Dennis.** *Proyecto de una cámara semi-anechoica.* Barcelona. 2009.
11. **Flores, Villanueva; & Almaraz, Angelica.** *Mini Caamara Anechoica.* Mexico. 2007.
12. **Giros ángulos, aperturas y diagramas.** *Lo que 've' la antena | AntiRadars.Net.* 2012. [Consulta: 14 September 2018]. Disponible en: <http://portalvasco.com/blog/2012/03/angulos-aperturas-y-diagramas-lo-que-ve-la-antena/>.
13. **Guzmán, Enrique; & Echeverria, M. X.** *Diseño de una Camara Anechoica y una Camara Reverberante.* Quito.2008.
14. **Intelkia.** Acústica y Sonido. [Consulta: 26 August 2018]. Disponible en: http://acusticaysonido.com/?option=com_content&view=article&id=127%3Acamarasanecoicas&catid=55%3Aequipos-y-medicionesacusticas&Itemid=107&fb_source=message. 2014.
15. **Mosquera, Juan.** *Salas Anechoicas (Acústica).* [Consulta: 25 August 2018]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos4/salasanecoicas/salasanecoicas.shtml>. 2012.
16. **'LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES'** (2015).
17. **N E A R-F I E L D II.** *Near-field vs Far-field.* [Consulta: 26 August 2018]. Disponible en: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/NSI-near-far.pdf?&cc=ES&lc=eng.

18. **Reis, J. et al.** 'Two-dimensional transmitarray beamsteering using stacked tunable metamaterials', in *2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*. IEEE. 2014, pp. 495–499. doi: 10.1109/LAPC.2014.6996433.

19. **Salazar, Cipriano** 'Capítulo 5 modelos de propagación'. 2018. [Consulta: 14 September 2018]. Disponible en: https://www.academia.edu/7634985/CAPÍTULO_5_MODELOS_DE_PROPAGACIÓN. (2018)

20. **The Horn Antenna - Radiation Pattern**, [Consulta: 14 September 2018]. Disponible en: <http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn3.php>.

21. **The Weather Channel**, *National and Local Weather Radar, Daily Forecast, Hurricane and information from The Weather Channel and weather*. 2018. Accessed: 14 September 2018 Available at: <https://weather.com/>. (2018).

22. **Universidad Rey Juan Crlos**. *Tema 5. Antenas de apertura*, 2012, [Consulta: 14 September 2018]. Disponible en: [http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Tema_5_Antenas de aperturaV_3.pdf](http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Tema_5_Antenas_de_aperturaV_3.pdf) . (2012).

Anexo A Mediciones en Vacío, Presión y Humedad

VACIO

Frecuencia	10GHz		10.5GHz		11GHz		11.5GHz	
Distancia	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow
0.15	-23.8	-23.8	-23.84	-23.7	-22.33	-22.2	-21.64	-21.5
0.25	-26.06	-26	-26.22	-26.1	-24.55	-24.5	-25.3	-24.9
0.35	-28.77	-28.7	-27.44	-27.3	-28.88	-28.7	-26.9	-26.7
0.45	-29.34	-29.2	-31.17	31	-30.75	-30.07	-28.08	-27.9
0.55	-30	-30	-32.7	-32.6	-30.49	-30.4	-30.92	-30.8
0.65	-35.95	-35.9	-34.21	-34.1	-35.74	-35.6	-35.64	-35.5
0.75	-37.6	-37.6	-37.47	-37.3	-32.4	-32.2	-38.44	-38.3
0.85	-38.66	-38.7	-40.04	-40	-31.77	-31.7	-39.97	-39.8
0.95	-38.1	-38.1	-36.42	-36	-33.88	-33.8	-38.69	-38.5
1.05	-38.66	-38.7	-42.08	-42.2	-35.75	-35.8	-44.02	-43.9
1.15	-51.38	-51.3	-37.24	-37.6	-37.52	-37.5	-34.96	-34.9
1.25	-46.2	-46.5	-35.96	-35.8	-39.94	-39.9	-35.71	-35.6
1.35	-44.13	-44.1	-37.8	-37.3	-42.96	-42.8	-39.92	-39.7
1.45	-41.35	-41.3	-40.31	-40	-35.63	-35.6	-38.97	-38.8
1.55	-38.96	-38.7	-46.52	-46.4	-38.4	-38.4	-36.12	-35.9
1.65	-47.2	-47.1	-43.5	-43	-37.53	-37.5	-41.64	-41.4
1.75	-42.12	-42	-50.12	-49.9	-35.52	-35.5	-41.12	-41
1.85	-35.7	-35.5	-45.95	-45.6	-46.66	-46.1	-38.45	-38.2
1.95	-42.56	-42.4	-40.97	-40.9	-47.92	-47.6	-40.38	-39.9
Frecuencia	12GHz		12.5GHz		13GHz		13.5GHz	
Distancia	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow
0.15	-20.72	-20.7	-19.74	-19.7	-19.58	19.5	-19.77	-19.6
0.25	-23.83	-23.8	-22.88	-22.8	-22.15	-22.1	-21.02	-20.8
0.35	-26.52	-26.5	-25.41	-25.3	-25.44	-25.3	-23.36	-23.1
0.45	-30.01	-30	-27.58	-27.5	-27.15	-27.1	-25.92	-25.7
0.55	-30.41	-30.4	-32.25	-32.1	-28.7	-28.6	-27.88	-27.7
0.65	-33.44	-33.5	-33.58	-33.5	-38.66	-38.6	-33.25	-33.1
0.75	-37.75	-37.7	-35.44	-35.3	-36.92	-36.8	-35.58	-35.8
0.85	-35.82	-35.8	-37.06	-37	-36.24	-36.2	-37.92	-37.7
0.95	-37.69	-37.7	-35.58	-35.5	-35.87	-35.8	-38.4	-38.1
1.05	-37.06	-37.1	-38.47	-38.4	-35.88	-35.7	-36.7	-36.5
1.15	-44.44	-44.4	-36.62	-36.6	-36.11	-36	-38.95	-38.8
1.25	-45.5	-45.5	-40.52	-40.5	-36.88	-36.8	-39.22	-39
1.35	-42.04	-42	-36.97	-36.9	-40.54	-40.4	-40.36	-40.2
1.45	-50.78	-50.6	-44.85	-44.9	-40.47	-40.4	-39.7	-39.5
1.55	-39.42	-39.4	-52.5	-52.4	-40.35	-40.3	-44.88	-44.6
1.65	-46.3	-46.4	-37.83	-37.7	-54.13	-54.2	-38.35	-38
1.75	-46.66	-46.6	-35.12	-35	-38.16	-38.2	-41.76	-41.6
1.85	-34.86	-34.8	-40.96	-40.9	-44.94	-44.9	-40.3	-40.1
1.95	-37.08	-37.1	-41	-40.9	-38.02	-38	-45.88	-45.7
Frecuencia	14GHz		14.5GHz		15GHz		15.5GHz	
Distancia	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow
0.15	-20.17	-20	-19.02	-18.8	-19.5	-19.3	-19.9	-19.7
0.25	-22.24	-22	-22.16	-21.9	-20.94	-20.7	-23.3	-23.1
0.35	-24.68	-24.5	-24.48	-24.3	-24.43	-24.2	-22.92	-22.7
0.45	-28.38	-28.1	-25.56	-25.4	-28.66	-28.4	-26.22	-26
0.55	-29.66	-29.4	-29.1	-28.9	-28.66	-28.4	-26.54	-26.4
0.65	-33.49	-35.2	-35.2	-35	-34.4	-34.2	-29.88	-29.8
0.75	-33.73	-33.5	-33.4	-33.3	-33.32	-33.1	-32.3	-32.1
0.85	-36.6	-36.3	-34.1	-33.9	-33.32	-33.1	-33.63	-33.5
0.95	-31.7	-31.5	-39.2	-39	-36.22	-36	-35.44	-35.3
1.05	-35.92	-35.6	-34.44	-34.2	-34.1	-33.9	-37.7	-37.4
1.15	-36.95	-36.7	-37.17	-37.2	-37.8	-37.9	-35.15	-35.1

1.25	-35.12	-35	-41.8	-41.7	-37.52	-37.2	-35.93	-35.8
1.35	-41.44	-41.2	-39.98	-39.7	-36.51	-36.3	-40.43	-40.3
1.45	-38.45	-38.2	-37.81	-37.5	-41.54	-41.3	-39.23	-39
1.55	-38.68	-38.5	-39.12	-39	-36.2	-37.2	-43.22	-43
1.65	-36.52	-36.3	-33.75	-33.5	-45.33	-45.3	-35.15	-34.9
1.75	-41.36	-41.2	-33.98	-33.6	-40.77	-40.6	-36.74	-36.6
1.85	-37.7	-37.5	-40.6	-40.3	-38.48	-38.2	-38.76	-38.5
1.95	-37.94	-37.7	-43.02	-42.7	-42.84	-42.5	-51.03	-50.5
Frecuencia	16GHz		16.5GHz		17GHz		17.5GHz	
Distancia	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow
0.15	-19.08	-19.3	-21.15	-21	-25.36	-25.6	-22.8	-23
0.25	-19.07	-18.9	-23.84	-23.2	-27.66	-27.4	-24.42	-24.2
0.35	-22.4	-22.1	-25.8	-25.4	-26.99	-27	-28.4	-28.3
0.45	-25.34	-25.1	-29.43	-28.8	-30.2	-30	-29.66	-29.4
0.55	-24.5	-24.2	-32.2	-31.6	-32.79	-32.5	-32.47	-32.2
0.65	-31.9	-31.7	-38.72	-38	-34.62	-34.4	-32.98	-32.8
0.75	-33	-32.8	-35.28	-34.6	-35.44	-35.2	-35.05	-34.9
0.85	-32.49	-32.3	-33.1	-32.5	-35.12	-34.9	-36.62	-36.3
0.95	-34.77	-34.6	-32.79	-32.2	-40.68	-40.5	-39.92	-38.8
1.05	-35.37	-35.1	-41.38	-40.6	-40.25	-40.1	-40.35	-40
1.15	-34.96	-34.8	-37.5	-36.9	-41.42	-41.2	-40.52	-40.4
1.25	-34.74	-34.5	-40.93	-40.5	-41.72	-41.6	-36.24	-36
1.35	-32.52	-32.3	-38.56	-37.9	-41.3	-41.1	-45.06	-44.8
1.45	-37.3	-37	-40.54	-40.2	-39.22	-39	-39.7	-39.2
1.55	-34.85	-34.5	-50.25	-50.2	-41.46	-41.4	-40.94	-40.6
1.65	-33.66	-33.4	-45.36	-45	-47.27	-47.2	-37.22	-36.9
1.75	-40.52	-40.2	-39.3	-38.6	-39.46	-39.2	-38.97	-38.8
1.85	-40.96	-40.7	-44.56	-43.7	-41.03	-40.8	-49.41	-49.3
1.95	-34.05	-33.8	-48.08	-48.1	-43.7	-43.1	-44.18	-44
Frecuencia	18GHz		18.5GHz		19GHz		19.5GHz	
Distancia	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow
0.15	-21.6	-22	-23.36	-23.6	-23.97	-24.2	-32.02	-31.9
0.25	-24.84	-24.6	-24.02	-23.7	-25.4	-25.2	-36.87	-36.7
0.35	-28.3	-28.3	-27.51	-27.5	-27.88	-27.8	-38	-37.8
0.45	-31.35	-31.1	-29.55	-29.3	-30.12	-29.9	-39.11	-38.8
0.55	-28.68	-28.5	-30.44	-30.2	-30.28	-30	-40.98	-40.7
0.65	-35.47	-35.2	-36.42	-36.2	-35.98	-35.6	-45.72	-45.2
0.75	-35.04	-35.8	-36.72	-36.5	-37.22	-36.9	-49.03	-48.8
0.85	-36.7	-36.5	-37.65	-37.4	-42.65	-42.4	-50.44	-49.3
0.95	-36	-35.7	-39.74	-39.5	-42.43	-42.2	-48.97	-47.6
1.05	-38.34	-38.1	-38.86	-38.5	-39.39	-39.2	-53.82	-52.4
1.15	-40.97	-40.8	-37.3	-37.2	-40.92	-40.6	-46.74	-46.4
1.25	-42.2	-42	-39.2	-39	-44.86	-44.5	-48.9	-48.6
1.35	-39.22	-39	-43.12	-43	-41.92	-41.7	-56.36	-56.1
1.45	-42.8	-42.6	-39.3	-39	-42.56	-42.4	-48.11	-48
1.55	-39.2	-38.7	-41.27	-41.1	-49.63	-49.5	-49.93	-49.7
1.65	-52.3	-52.6	-38.88	-38.7	-45.78	-45.4	-47.58	-47.2
1.75	-44.6	-44.5	-45.11	-44.9	-47.15	-47.4	-64.3	-63.9
1.85	-52.88	-52.8	-41.76	-41.5	-41.5	-41.2	-49.86	-49.2
1.95	-39.17	-39	-51.13	-50.9	-47.91	-47.5	-53.4	-52.5
Frecuencia	20GHz							
Distancia	Pow	CH.Pow						
0.15	-38.2	-37.9						
0.25	-36.98	-36.5						
0.35	-37.4	-37						
0.45	-41.55	-41.2						
0.55	-42.29	-41.8						
0.65	-47.38	-46.8						
0.75	-47.45	-47						
0.85	-53.96	-53.3						

0.95	-53.56	-52.6
1.05	-55.76	-54.7
1.15	-44.37	-43.9
1.25	-51.42	-50.8
1.35	-47.6	-47.3
1.45	-47.7	-47
1.55	-48.22	-47.8
1.65	-45.15	-44.8
1.75	-53.4	-53
1.85	-47.68	-47.1
1.95	-58.72	-57.9

PRESION

Frecuencia	10GHz		11GHz		12GHz		13GHz	
Distancia	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow
0.25	-28.77	-28.8	-27.12	-27	-26	-26	-24.38	-24.3
0.55	-34.08	-34.5	-39.86	-39.2	-33.18	-33.3	-31.73	-31.7
0.75	-34.85	-34.9	-34.95	-34.6	-33.17	-33.4	-32.88	-31.9
0.85	-36.83	-36.8	-40.42	-40.7	-41.83	-41.8	-34.9	-35
0.95	-38.85	-38.6	-39.96	-39.4	-40.66	-40.4	-34.94	-34.9
1.15	-39.63	-34.5	-35.18	-35.2	-35.46	-35.4	-34.8	-34.9
1.25	-37.86	-37.7	-39.96	-40.3	-43.95	-44.3	-41.96	-41.9
1.45	-39.56	-39.4	-39.47	-39.6	-44.15	-44.2	-42.87	-42.4
1.75	-40.3	-40.7	-42.88	-42.9	-39.88	-39.8	-50.92	-50.8
1.85	-44.02	-44.1	-41.74	-42.1	-48.94	-49.4	-44.78	-44.9
1.95	-40.01	-39.6	-41.16	-41.1	-42.3	-42.4	-38.46	-38.2
Frecuencia	14GHz		15GHz		16GHz		17GHz	
Distancia	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow
0.25	-24.88	-24.7	-24.45	-24.2	-23.96	-23.7	-28.44	-28.2
0.55	-30.66	-30.5	-32.38	-32.2	-29.63	-29.6	-35.06	-34.9
0.75	-32.29	-32.1	-33.52	-33.4	-31.28	-31.2	-37.51	-37.3
0.85	-34.4	-34.4	-34.16	-34.1	-32.92	-33	-36.01	-36
0.95	-32.94	-32.7	-33.92	-33.9	-36.77	-36.6	-40.79	-39.9
1.15	-38.22	-38.1	-36.13	-36.1	-33.12	-33.2	-39.6	-39.1
1.25	-37.44	-37.4	-42.95	-42.9	-42.84	-42.1	-39.72	-39.8
1.45	-38.79	-38.7	-37.97	-37.6	-35.07	-35.1	-48.79	-48.6
1.75	-35.02	-35	-40.86	-40.9	-45.76	-45.7	-47.98	-47.3
1.85	-35.94	-35.8	-41.98	-41.7	-44.84	-44.8	-42.95	-42.7
1.95	-46.1	-45.7	-38.2	-38	-39.02	-39.3	-44.08	-44.1
Frecuencia	18GHz		19GHz		20GHz			
Distancia	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow	Pow	CH.Pow		
0.25	-26.7	-26.6	-28.64	-28.3	-41.1	-40.9		
0.55	-32	-32	-36.92	-36.8	-47.97	-36.83		
0.75	-35.29	-35.1	-38.41	-38.2	-52.72	-49.6		
0.85	-34.33	-34.4	-39.74	-39	-45.21	-44.9		
0.95	-36.88	-36.8	-40.96	-40.2	-45.72	-45		
1.15	-36.02	-35.7	-42.6	-42.2	-47.96	-47.6		
1.25	-37.77	-37.4	-37.17	-39	-49.54	-48.7		
1.45	-42.92	-42.3	-39.99	-40	-50.98	-49.8		
1.75	-40.78	-40.8	-44.66	-44.1	-44.77	-44.6		
1.85	-40.88	-41.3	-41.94	-42	-52.78	-50.8		
1.95	-38.05	-37.9	-41.23	-40.5	-50.25	-48.7		

HUMEDAD

FRECUENCIA	10GHz		11GHz		12GHz		13GHz	
DISTANCIA	POW	CH. POW	POW	CH. POW	POW	CH. POW	POW	CH. POW
0.25	-26.27	-26.2	-26.43	-26.13	-25.02	-25	-23.33	-31.68
0.85	-34.82	-34.9	-32.1	-32.1	-35.44	-35.7	-30.48	-30.4
1.15	-41.27	-41.1	-35.16	-35.1	-37.66	-37.6	-33.98	-33.9
1.45	-37.62	-37.4	-38.17	-38	-35.12	-35	-33.93	-33.8
1.95	-36.42	-36.3	-38.78	-38.7	-33.47	-33.4	-31.68	-31.6
FRECUENCIA	14GHz		15GHz		16GHz		17GHz	
DISTANCIA	POW	CH. POW	POW	CH. POW	POW	CH. POW	POW	CH. POW
0.25	-24.5	-24.4	-22.96	-22.7	-21.82	-21.7	-32.96	-32.7
0.85	-29.02	-28.8	-32.95	-32.8	-30.22	-30	-32.04	-31.8
1.15	-30.83	-30.5	-38.15	-38	-28.02	-27.8	-37.28	-37
1.45	-33.54	-33.3	-47.3	-47.2	-33.18	-33	-35.88	-35.8
1.95	-35.72	-35.5	-38.12	-38	-33.48	-33.3	-44.29	-44.1
FRECUENCIA	18GHz		19GHz		20GHz			
DISTANCIA	POW	CH. POW	POW	CH. POW	POW	CH. POW		
0.25	-25.32	-25.1	-26.5	-26.3	-34.02	-33.6		
0.85	-31.7	-31.4	-34.42	-34.2	-37.92	-37.4		
1.15	-33.16	-32.9	-35.52	-35.3	-39.7	-39.2		
1.45	-34.6	-34.4	-37.3	-37.1	-42.7	-42.4		
1.95	-37.22	-37	-44.45	-44.4	-44.13	-43.7		

Anexo B Calculo Constantes en Vacío

En el vacío

FRECUENCIA	10 GHz			10.5 GHz			11 GHz		
DISTANCIA	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B
0.15	8.8	4.30	10.19	8.8400	4.3964	10.7280	7.3300	3.8538	10.0068
0.25	11.06	5.56	18.55	11.2200	4.0402	8.3488	9.5500	6.7774	29.6315
0.35	13.77	4.04	5.22	12.4400	6.9684	34.1749	13.8800	5.3674	17.1333
0.45	14.34	4.24	7.57	16.1700	5.5352	17.5559	15.7500	3.6412	-2.9834
0.55	15	9.07	82.01	17.7000	5.7455	20.8130	15.4900	8.4818	72.3632
0.65	20.95	6.48	26.55	19.2100	7.2177	52.4555	20.7400	2.6440	-53.7428
0.75	22.6	6.26	19.50	22.4700	7.0569	47.2794	17.4000	3.9471	-11.5899
0.85	23.66	5.71	-11.59	25.0400	4.9116	-74.941	16.7700	4.9124	43.6811
0.95	23.1	5.85	12.88	21.4200	6.0482	130.217	18.8800	4.9088	43.0224
1.05	23.66	4.21	321.9	27.0800	7.3799	-122.50	20.7500	4.8995	44.8004
1.15	36.38	11.2	-143.0	22.2400	6.0643	-35.347	22.5200	4.5686	66.8284
1.25	31.2	9.30	-61.93	20.9600	3.8857	55.0507	24.9400	4.0045	90.3549
1.35	29.13	10.2	-89.58	22.8000	3.0486	80.8784	27.9600	14.535	-236.190
1.45	26.35	9.92	-82.52	25.3100	-2.3098	214.406	20.6300	1.2860	95.6370
1.55	23.96	-8.4	303.4	31.5200	13.103	-111.22	23.4000	7.2991	-32.0415
1.65	32.2	18.8	-198.7	28.5000	-6.9236	259.058	22.5300	9.8076	-78.6566
1.75	27.12	22.9	-266.0	35.1200	19.176	-172.78	20.5200	-22.68	461.5956
1.85	20.7	-14.8	300.05	30.9500	22.1689	-217.82	31.6600	4.1906	55.1112
1.95	27.56	5.67	16.84	25.9700	5.3491	15.3778	32.9200	6.4971	22.9724
FRECUENCIA	11.5 GHz			12 GHz			12.5 GHz		
DISTANCIA	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B
0.15	6.6400	4.9825	16.4977	5.7200	4.2337	14.0186	4.7400	4.0034	14.1538
0.25	10.300	4.1599	10.9493	8.8300	4.8816	18.4085	7.8800	4.4677	17.3136
0.35	11.900	4.1444	10.8114	11.520	6.3981	31.9760	10.410	4.7535	19.8819
0.45	13.080	6.0041	32.5874	15.010	4.0699	4.5898	12.580	7.6064	53.5857
0.55	15.920	8.0803	65.0580	15.410	6.4360	41.7639	17.250	5.3723	18.3320
0.65	20.640	7.1586	45.0538	18.440	7.7012	69.3507	18.580	5.9018	29.9286
0.75	23.440	6.6384	28.1469	22.750	4.4896	-35.505	20.440	5.8980	29.8026
0.85	24.970	5.6886	-26.498	20.820	5.7738	38.7126	22.060	4.8567	-30.638
0.95	23.690	6.5067	122.625	22.690	5.4832	-14.494	20.580	5.3848	66.4892
1.05	29.020	8.3432	-229.31	22.060	4.4376	186.795	23.470	5.9709	-46.825
1.15	19.960	4.6058	20.7113	29.440	6.7816	29.2719	21.620	3.6815	107.698
1.25	20.710	2.0941	125.958	30.500	9.9363	-103.51	25.520	8.7415	-106.21
1.35	24.920	7.1194	-30.611	27.040	-2.3694	281.624	21.970	-2.715	253.913
1.45	23.970	9.8132	-98.399	35.780	24.287	-392.21	29.850	-3.117	264.123
1.55	21.120	-4.3278	203.298	24.420	-5.8363	253.386	37.500	34.253	-540.28
1.65	26.640	7.6503	-20.349	31.300	6.9220	14.0878	22.830	11.202	-106.049
1.75	26.1200	13.0540	-110.63	31.6600	36.8927	-488.94	20.1200	-9.444	241.9855
1.85	23.4500	0.2207	84.4163	19.8600	-1.4911	97.1006	25.9600	6.2224	1.7496
1.95	25.3800	5.0486	16.8231	22.0800	4.3686	14.6866	26.0000	4.9951	19.0854
FRECUENCIA	13 GHz			14 GHz			14.5 GHz		
DISTANCIA	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B
0.15	4.5800	3.4333	11.5845	4.7700	2.2788	5.6345	5.1700	3.1011	9.3307
0.25	7.1500	5.0329	22.5145	6.0200	3.7917	16.0134	7.2400	4.1709	16.6977
0.35	10.4400	4.2741	15.6673	8.3600	4.6132	23.4552	9.6800	6.0625	33.9000
0.45	12.1500	4.4526	17.7854	10.9200	4.5321	22.4899	13.3800	4.4556	14.6873
0.55	13.7000	11.9943	137.2834	12.8800	7.7712	74.0172	14.6600	6.8417	52.7907
0.65	23.6600	4.4779	-27.9977	18.2500	6.1167	37.4912	18.4900	4.6338	3.8618
0.75	21.9200	4.9483	-12.5097	20.5800	6.2848	43.0482	18.7300	6.1085	52.7984
0.85	21.2400	5.0315	-7.6597	22.9200	5.7190	9.9369	21.6000	3.4828	-101.439
0.95	20.8700	5.0742	0.2301	23.4000	5.4545	-39.1113	16.7000	4.5495	97.0881
1.05	20.8800	5.0454	5.8215	21.7000	4.9617	56.9497	20.9200	4.9124	26.0703
1.15	21.1100	4.8176	21.2636	23.9500	5.6890	7.4561	21.9500	6.0339	-50.5355

1.25	21.8800	2.7390	109.5030	24.2200	5.0637	34.1075	20.1200	0.4331	189.0871
1.35	25.5400	6.2796	-2.2556	25.3600	6.8110	-21.2668	26.4400	9.4057	-96.3452
1.45	25.4700	6.3537	-4.1431	24.7000	-1.0071	178.8446	23.4500	5.3468	7.9410
1.55	25.3500	-17.317	507.5087	29.8800	18.3167	-240.495	23.6800	9.3632	-79.5514
1.65	39.1300	42.5495	-624.948	23.3500	-1.3732	133.4424	21.5200	-4.7446	189.4021
1.75	23.1600	-10.967	280.9352	26.7600	10.0386	-60.4964	26.3600	15.2475	-151.655
1.85	29.9400	26.9342	-302.674	25.3000	-9.6619	244.0637	22.7000	4.7985	10.4974
1.95	23.0200	4.4286	16.5538	30.8800	5.8305	23.4393	22.9400	4.4170	15.9523
FRECUENCIA	15 GHz			15.5 GHz			16G Hz		
DISTANCIA	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B
0.15	4.5000	2.3582	6.4909	4.9000	4.1827	15.3258	4.0800	0.9616	-0.0451
0.25	5.9400	4.8656	23.8832	8.3000	1.6071	-2.6005	4.0700	4.2315	22.7882
0.35	9.4300	6.4893	38.7560	7.9200	5.1798	30.2352	7.4000	4.6814	26.9368
0.45	13.6600	3.2710	0.0000	11.2200	2.9815	3.6718	10.3400	1.6644	-9.6385
0.55	13.6600	8.1899	79.1171	11.5400	5.6064	46.0368	9.5000	8.5588	101.9977
0.65	19.4000	3.8670	-17.3779	14.8800	5.2896	38.9394	16.9000	4.8075	17.6997
0.75	18.3200	4.3869	0.0000	17.3000	4.8581	24.4676	18.0000	4.0027	-9.3823
0.85	18.3200	5.4016	60.0356	18.6300	5.0771	37.4705	17.4900	4.9526	47.2004
0.95	21.2200	4.8211	-48.7741	20.4400	5.1543	51.9950	19.7700	4.7757	13.8040
1.05	19.1000	4.0985	93.6506	22.7000	5.7436	-64.5430	20.3700	4.8976	-10.3775
1.15	22.8000	5.5720	-7.7322	20.1500	4.4967	21.5397	19.9600	4.8354	-6.0753
1.25	22.5200	6.0938	-30.2180	20.9300	1.8811	134.6348	19.7400	6.2265	-66.4198
1.35	21.5100	0.0923	162.0791	25.4300	7.2714	-38.6670	17.5200	-0.6076	154.0235
1.45	26.5400	13.4794	-184.368	24.2300	0.4773	137.7587	22.3000	8.5511	-84.5887
1.55	21.2000	-10.248	336.2521	28.2200	20.2344	-297.213	19.8500	6.7057	-43.8269
1.65	30.3300	16.5559	-178.444	20.1500	1.5793	62.2209	18.6600	-9.4487	268.4500
1.75	25.7700	11.6931	-94.8881	21.7400	0.3335	83.7005	25.5200	5.0163	18.2318
1.85	23.4800	-6.5780	190.7021	23.7600	-28.547	536.6777	25.9600	25.3820	-302.236
1.95	27.8400	5.2113	20.9526	36.0300	6.6641	27.9458	19.0500	3.6042	13.4387
FRECUENCIA	16.5 GHz			17 GHz			17.5G Hz		
DISTANCIA	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B
0.15	6.1500	3.8270	12.1254	10.3600	4.4680	10.3674	7.8000	3.2563	7.3023
0.25	8.8400	4.0108	13.4129	12.6600	2.3401	-4.5850	9.4200	6.0848	27.2364
0.35	10.8000	6.1562	33.2587	11.9900	6.0039	29.4106	13.4000	4.3986	11.5443
0.45	14.4300	6.0350	31.7842	15.2000	6.0292	29.7188	14.6600	6.0903	32.2432
0.55	17.2000	9.6107	89.8682	17.7900	5.7533	25.2238	17.4700	4.5475	7.0296
0.65	23.7200	3.1688	-55.3518	19.6200	5.2213	13.1943	17.9800	5.7062	33.3076
0.75	20.2800	3.6205	-40.1047	20.4400	4.6578	-5.8869	20.0500	5.5759	28.8828
0.85	18.1000	4.1843	-6.4176	20.1200	6.6764	115.1027	21.6200	6.2318	68.3164
0.95	17.7900	5.2620	197.6271	25.6800	6.0182	-9.8929	24.9200	5.9251	9.8929
1.05	26.3800	6.7483	-98.2066	25.2500	5.8203	29.6138	25.3500	5.9530	4.3029
1.15	22.5000	3.9717	94.7195	26.4200	6.1263	8.2845	25.5200	7.7053	-118.192
1.25	25.9300	7.7775	-70.9077	26.7200	6.6040	-12.5659	21.2400	-1.0212	263.8842
1.35	23.5600	3.6146	63.8005	26.3000	8.2817	-67.0228	30.0600	12.3898	-172.712
1.45	25.5400	-6.7714	335.2473	24.2200	2.7751	77.3382	24.7000	4.1931	42.8122
1.55	35.2500	16.4856	-180.095	26.4600	-3.3724	213.9786	25.9400	12.2592	-137.005
1.65	30.3600	19.4275	-237.143	32.2700	23.3400	-305.626	22.2200	1.7266	68.4821
1.75	24.3000	-6.7981	217.9527	24.4600	2.0445	65.0543	23.9700	-19.129	432.5905
1.85	29.5600	-2.7443	153.9613	26.0300	-1.2224	116.7832	34.4100	22.5138	-228.755
1.95	33.0800	6.1810	24.1754	28.7000	5.6554	16.4640	29.1800	5.5652	19.1931
FRECUENCIA	18 GHz			18.5 GHz			19G Hz		
DISTANCIA	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B
0.15	6.6000	4.3788	14.6045	8.3600	2.5336	2.9750	8.9700	3.3376	6.4458
0.25	9.8400	5.6625	23.6779	9.0200	5.4835	23.8832	10.4000	4.8186	16.9714
0.35	13.3000	6.1197	27.9446	12.5100	4.9287	18.6908	12.8800	5.1971	20.5233
0.45	16.3500	1.3455	-30.6368	14.5500	4.2397	10.2123	15.1200	3.6825	1.8359
0.55	13.6800	8.9253	93.5898	15.4400	8.6335	82.4252	15.2800	8.3386	78.5658
0.65	20.4700	4.5063	-6.9190	21.4200	5.2314	4.8272	20.9800	5.7757	19.9524
0.75	20.0400	5.6061	30.5385	21.7200	5.5910	17.1089	22.2200	8.1100	99.8939
0.85	21.7000	4.8592	-14.4913	22.6500	6.0236	43.2670	27.6500	6.3870	-4.5544

0.95	21.0000	5.2169	53.8356	24.7400	5.6921	-20.2459	27.4300	6.0466	-69.9402
1.05	23.3400	5.1535	66.5679	23.8600	5.7876	-39.4851	24.3900	5.5085	38.7258
1.15	25.9700	5.6185	33.9665	22.3000	4.4796	52.4685	25.9200	4.5144	108.8032
1.25	27.2000	8.4226	-89.1581	24.2000	3.0077	117.2819	29.8600	8.9709	-87.9614
1.35	24.2200	2.1585	115.3565	28.1200	10.3494	-123.089	26.9200	5.6634	20.6224
1.45	27.8000	11.2465	-124.293	24.3000	3.1225	68.0162	27.5600	-2.7648	244.0987
1.55	24.2000	-15.892	482.4647	26.2700	10.0824	-88.0222	34.6300	14.4009	-141.793
1.65	37.3000	24.1659	-301.321	23.8800	-6.8293	243.7965	30.7800	4.4687	53.6117
1.75	29.6000	-12.639	343.0890	30.1100	14.9622	-138.810	32.1500	20.8117	-234.112
1.85	37.8800	46.5523	-599.661	26.7600	-19.389	409.8346	26.5000	-11.313	280.3671
1.95	24.1700	4.6050	15.7728	36.1300	6.7725	24.9295	32.9100	6.2347	21.4912
FRECUENCIA	19.5 GHz			20 GHz					
DISTANCIA	Esp.lib	A	B	Esp.lib	A	B			
0.15	17.0200	8.1659	21.8617	23.2000	4.3406	-5.4992			
0.25	21.8700	6.1831	7.7329	21.9800	5.5127	2.8742			
0.35	23.0000	6.4421	10.1700	22.4000	9.2387	38.0230			
0.45	24.1100	7.3545	21.4572	26.5500	6.8576	8.4911			
0.55	25.9800	10.0100	65.3337	27.2900	10.5802	70.1579			
0.65	30.7200	9.4834	53.2600	32.3800	7.5774	1.1263			
0.75	34.0300	8.6878	25.9393	32.4500	11.0236	119.7623			
0.85	35.4400	7.7603	-30.4318	38.9600	8.9224	-8.2808			
0.95	33.9700	8.4978	111.5823	38.5600	9.2274	50.6146			
1.05	38.8200	9.9340	-179.201	40.7600	10.8971	-288.292			
1.15	31.7400	6.5546	59.6485	29.3700	4.0811	194.6859			
1.25	33.9000	2.8602	223.1945	36.4200	11.0429	-114.290			
1.35	41.3600	17.7172	-265.835	32.6000	7.4819	3.2222			
1.45	33.1100	5.3543	62.8373	32.7000	6.9292	17.9535			
1.55	34.9300	11.9820	-86.5490	33.2200	12.7272	-113.066			
1.65	32.5800	-25.575	654.2980	30.1500	-9.3149	322.8444			
1.75	49.3000	45.3884	-598.334	38.4000	22.3210	-237.013			
1.85	34.8600	-1.5170	154.8361	32.6800	-22.397	482.8787			
1.95	38.4000	7.6534	19.1931	43.7200	8.9228	18.4210			

Anexo C Calculo Perdidas en Vacío

FRECUENCIA	10GHz	10.5GHz	11GHz	11.5GHz	12GHz	12.5GHz	13GHz
DISTANCIA	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc
0.15	5.1647	5.2815	5.3929	5.4993	5.6012	5.6990	5.7929
0.25	9.7115	9.8283	9.9397	10.0461	10.1480	10.2457	10.3396
0.35	12.7064	12.8232	12.9346	13.0410	13.1429	13.2406	13.3345
0.45	14.9433	15.0601	15.1715	15.2779	15.3798	15.4775	15.5714
0.55	16.7294	16.8462	16.9576	17.0640	17.1659	17.2637	17.3576
0.65	18.2164	18.3332	18.4445	18.5510	18.6529	18.7506	18.8445
0.75	19.4901	19.6069	19.7183	19.8247	19.9266	20.0243	20.1182
0.85	20.6041	20.7209	20.8323	20.9387	21.0406	21.1384	21.2323
0.95	21.5941	21.7109	21.8223	21.9287	22.0306	22.1284	22.2223
1.05	22.4850	22.6018	22.7131	22.8196	22.9215	23.0192	23.1131
1.15	23.2947	23.4115	23.5229	23.6293	23.7312	23.8289	23.9228
1.25	24.0368	24.1537	24.2650	24.3715	24.4733	24.5711	24.6650
1.35	24.7219	24.8387	24.9500	25.0565	25.1584	25.2561	25.3500
1.45	25.3579	25.4747	25.5861	25.6925	25.7944	25.8921	25.9860
1.55	25.9515	26.0683	26.1797	26.2861	26.3880	26.4857	26.5796
1.65	26.5080	26.6248	26.7362	26.8426	26.9445	27.0422	27.1361
1.75	27.0317	27.1485	27.2599	27.3663	27.4682	27.5660	27.6599
1.85	27.5263	27.6432	27.7545	27.8610	27.9628	28.0606	28.1545
1.95	27.9949	28.1117	28.2231	28.3295	28.4314	28.5292	28.6231
FRECUENCIA	13.5GHz	14GHz	14.5GHz	15GHz	15.5GHz	16GHz	16.5GHz
DISTANCIA	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc
0.15	5.8832	5.9703	6.0543	6.1355	6.2140	6.2900	6.3637
0.25	10.4300	10.5171	10.6011	10.6822	10.7607	10.8368	10.9104
0.35	13.4249	13.5119	13.5960	13.6771	13.7556	13.8316	13.9053
0.45	15.6618	15.7489	15.8329	15.9140	15.9925	16.0685	16.1422
0.55	17.4479	17.5350	17.6190	17.7002	17.7787	17.8547	17.9284
0.65	18.9348	19.0219	19.1059	19.1871	19.2656	19.3416	19.4153
0.75	20.2086	20.2956	20.3796	20.4608	20.5393	20.6153	20.6890
0.85	21.3226	21.4097	21.4937	21.5749	21.6534	21.7294	21.8030
0.95	22.3126	22.3997	22.4837	22.5649	22.6434	22.7194	22.7930
1.05	23.2034	23.2905	23.3745	23.4557	23.5342	23.6102	23.6839
1.15	24.0132	24.1002	24.1842	24.2654	24.3439	24.4199	24.4936
1.25	24.7553	24.8424	24.9264	25.0076	25.0861	25.1621	25.2358
1.35	25.4403	25.5274	25.6114	25.6926	25.7711	25.8471	25.9208
1.45	26.0764	26.1635	26.2475	26.3286	26.4071	26.4832	26.5568
1.55	26.6700	26.7571	26.8411	26.9222	27.0008	27.0768	27.1504
1.65	27.2265	27.3136	27.3976	27.4787	27.5572	27.6332	27.7069
1.75	27.7502	27.8373	27.9213	28.0025	28.0810	28.1570	28.2306
1.85	28.2448	28.3319	28.4159	28.4971	28.5756	28.6516	28.7253
1.95	28.7134	28.8005	28.8845	28.9657	29.0442	29.1202	29.1938
FRECUENCIA	17GHz	17.5GHz	18GHz	18.5GHz	19GHz	19.5GHz	20GHz
DISTANCIA	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc	L.calc
0.15	6.4351	6.5045	6.5720	6.6376	6.7014	6.7636	6.8242
0.25	10.9819	11.0513	11.1187	11.1843	11.2482	11.3104	11.3710
0.35	13.9768	14.0462	14.1136	14.1792	14.2431	14.3053	14.3659
0.45	16.2137	16.2831	16.3505	16.4161	16.4800	16.5422	16.6028
0.55	17.9998	18.0692	18.1367	18.2023	18.2661	18.3283	18.3889
0.65	19.4867	19.5561	19.6236	19.6892	19.7530	19.8152	19.8758
0.75	20.7605	20.8299	20.8973	20.9629	21.0267	21.0889	21.1496
0.85	21.8745	21.9439	22.0114	22.0770	22.1408	22.2030	22.2636
0.95	22.8645	22.9339	23.0014	23.0670	23.1308	23.1930	23.2536
1.05	23.7553	23.8247	23.8922	23.9578	24.0216	24.0838	24.1444
1.15	24.5651	24.6345	24.7019	24.7675	24.8314	24.8935	24.9542
1.25	25.3072	25.3766	25.4441	25.5097	25.5735	25.6357	25.6963
1.35	25.9923	26.0617	26.1291	26.1947	26.2585	26.3207	26.3813
1.45	26.6283	26.6977	26.7651	26.8307	26.8946	26.9568	27.0174

1.55	27.2219	27.2913	27.3587	27.4243	27.4882	27.5504	27.6110
1.65	27.7784	27.8478	27.9152	27.9808	28.0447	28.1069	28.1675
1.75	28.3021	28.3715	28.4390	28.5046	28.5684	28.6306	28.6912
1.85	28.7967	28.8661	28.9336	28.9992	29.0630	29.1252	29.1858
1.95	29.2653	29.3347	29.4022	29.4677	29.5316	29.5938	29.6544

Anexo D Programa para Cálculos en el Vacío

```
clear all;

a=xlsread('FSL.xlsx');
A=zeros(2,2);
B=zeros(2,1);
for j=0:20
for i=1:19
    if i ==19
A(1,1)=log10( a(i,3+2*j));
A(1,2)= log10(a(i,1));
A(2,1)=log10( a(1,3+2*j));
A(2,2)= log10(a(1,1));
B(1,1)=a(i,2+2*j);
B(2,1)=a(1,2+2*j);
S=inv(A)*B;
C(i,1+2*j)=S(1,1);
C(i,2+2*j)=S(2,1);
    else
A(1,1)=log10( a(i,3+2*j));
A(1,2)= log10(a(i,1));
A(2,1)=log10( a(i+1,3+2*j));
A(2,2)= log10(a(i+1,1));
B(1,1)=a(i,2+2*j);
B(2,1)=a(i+1,2+2*j);
S=inv(A)*B;
C(i,1+2*j)=S(1,1);
C(i,2+2*j)=S(2,1);
    end
end
end
SA=0;
SB=0;
for i=0:20
    for j=1:19
        SA=SA+C(j,1+2*i);
        SB=SB+C(j,2+2*i);
    end
end
PA=SA/(19*21);
PB=SB/(19*21);
for j=0:20
for i=1:19
LC=PA*log10(a(i,3+2*j))+PB*log10(a(i,1));
L(i,j+1)=LC;
    end
end
```

Anexo E Calculo de Constantes y perdidas en Presión

FRECUENCIA	10GHz				11GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	13.7700	5.7766	15.5072	17.1811	12.1200	8.5416	37.2055	17.4356
0.55	19.0800	5.1411	5.7165	21.3960	24.8600	3.8095	-36.4518	21.6504
0.75	19.8500	6.1002	36.4254	23.0540	19.9500	8.0474	100.6298	23.3084
0.85	21.8300	6.1954	41.8179	23.7230	25.4200	6.1236	-9.5229	23.9775
0.95	23.8500	6.0149	9.4005	24.3176	24.9600	5.8585	-57.6082	24.5721
1.15	24.6300	6.8992	-48.8786	25.3390	20.1800	3.0108	131.9998	25.5934
1.25	22.8600	5.0760	26.3738	25.7847	24.9600	6.3584	-7.6019	26.0392
1.45	24.5600	5.7745	9.0608	26.5781	24.4700	4.3877	41.7534	26.8326
1.75	25.3000	-3.0406	154.1414	27.5834	27.8800	9.7393	-47.2369	27.8379
1.85	29.0200	18.9700	-175.393	27.8804	26.7400	8.2936	-25.3686	28.1349
1.95	25.0100	5.3389	12.5996	28.1619	26.1600	5.3435	15.7382	28.4163
FRECUENCIA	12GHz				13GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	11.0000	5.7914	20.9682	17.6679	9.3800	5.4213	21.4647	17.8816
0.55	18.1800	4.4521	-0.0742	21.8828	16.7300	4.6055	8.5376	22.0965
0.75	18.1700	9.3339	159.3152	23.5408	17.8800	5.4748	37.1613	23.7545
0.85	26.8300	6.1582	-24.2213	24.2099	19.9000	4.8514	0.8281	24.4236
0.95	25.6600	5.9482	-62.6701	24.8044	19.9400	4.8378	-1.6873	25.0182
1.15	20.4600	1.5271	234.4515	25.8258	19.8000	1.8957	197.7236	26.0395
1.25	28.9500	7.0233	3.1028	26.2715	26.9600	6.2208	14.1177	26.4852
1.45	29.1500	9.2143	-52.2836	27.0649	27.8700	2.9083	98.5673	27.2786
1.75	24.8800	-16.267	375.4090	28.0702	35.9200	23.761	-254.416	28.2839
1.85	33.9400	27.3422	-290.427	28.3673	29.7800	25.191	-276.430	28.5810
1.95	27.3000	5.3934	18.2716	28.6487	23.4600	4.5898	15.7831	28.8624
FRECUENCIA	14GHz				15GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	9.8800	4.8341	16.8797	18.0795	9.4500	5.6016	23.1585	18.2637
0.55	15.6600	4.5348	12.1011	22.2943	17.3800	4.6880	8.4633	22.4786
0.75	17.2900	5.3399	38.8170	23.9524	18.5200	4.7870	11.7739	24.1366
0.85	19.4000	4.1645	-30.2248	24.6214	19.1600	4.5040	-4.9685	24.8057
0.95	17.9400	4.6688	63.6342	25.2160	18.9200	4.6726	26.6348	25.4002
1.15	23.2200	5.9157	-21.5397	26.2374	21.1300	2.3224	188.3345	26.4216
1.25	22.4400	4.9227	20.9439	26.6831	27.9500	8.4857	-77.2596	26.8673
1.45	23.7900	7.5345	-46.1614	27.4765	22.9700	4.1330	35.3863	27.6607
1.75	20.0200	2.5940	38.1210	28.4818	25.8600	3.4916	46.4082	28.6660
1.85	20.9400	-23.585	444.3884	28.7788	26.9800	17.038	-165.333	28.9630
1.95	31.1000	5.8370	23.7867	29.0603	23.2000	4.4850	15.4132	29.2445
FRECUENCIA	16GHz				17GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	8.9600	4.5025	16.5585	18.4360	13.4400	5.9283	19.3328	18.5979
0.55	14.6300	4.2364	12.2496	22.6509	20.0600	5.8581	18.1888	22.8127
0.75	16.2800	4.7690	30.1705	24.3089	22.5100	4.5060	-27.5950	24.4708
0.85	17.9200	5.6006	79.7024	24.9780	21.0100	6.6174	98.9552	25.1398
0.95	21.7700	4.9452	-43.9896	25.5726	25.7900	6.0208	-14.3418	25.7344
1.15	18.1200	0.4347	268.4180	26.5939	24.6000	5.7674	3.3138	26.7558
1.25	27.8400	9.4008	-120.543	27.0396	24.7200	2.6200	140.7118	27.2015
1.45	20.0700	-0.2502	130.8925	27.8330	33.7900	8.3656	-9.9180	27.9949
1.75	30.7600	9.5204	-38.1210	28.8383	32.9800	19.769	-208.422	29.0002
1.85	29.8400	23.2751	-254.561	29.1354	27.9500	3.4854	49.4251	29.2972
1.95	24.0200	4.5488	16.8816	29.4168	29.0800	5.6720	17.5318	29.5787
FRECUENCIA	18GHz				19GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	11.7000	4.9394	15.4779	18.7505	13.6400	6.5903	24.1806	18.8948
0.55	17.0000	5.4853	24.4249	22.9654	21.9200	5.7942	11.0617	23.1097
0.75	20.2900	4.2497	-17.6608	24.6234	23.4100	6.1857	24.4676	24.7677

0.85	19.3300	5.4182	52.7899	25.2925	24.7400	6.1987	25.2564	25.4368
0.95	21.8800	5.0876	-10.3647	25.8870	25.9600	6.1701	19.7652	26.0314
1.15	21.0200	4.2504	48.3263	26.9084	27.6000	8.5776	-149.949	27.0527
1.25	22.7700	3.5314	79.8970	27.3541	22.1700	4.1905	43.7494	27.4985
1.45	27.9200	7.5549	-26.2030	28.1475	24.9900	3.6840	57.1813	28.2919
1.75	25.7800	5.8217	4.1436	29.1528	29.6600	13.333	-112.705	29.2972
1.85	25.8800	13.8536	-123.781	29.4499	26.9400	8.2353	-31.0547	29.5942
1.95	23.0500	4.5496	12.7229	29.7313	26.2300	5.1737	14.1129	29.8756
FRECUENCIA	20GHz							
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc				
0.25	26.1000	8.8767	20.0629	19.0318				
0.55	32.9700	9.7944	35.2639	23.2467				
0.75	37.7200	4.7567	-138.159	24.9047				
0.85	30.2100	7.1972	10.5580	25.5738				
0.95	30.7200	7.2823	26.9963	26.1684				
1.15	32.9600	7.0475	43.6317	27.1897				
1.25	34.5400	7.5273	22.3401	27.6354				
1.45	35.9800	11.2183	-76.0377	28.4288				
1.75	29.7700	-11.833	331.9013	29.4341				
1.85	37.7800	15.6579	-110.659	29.7312				
1.95	35.2500	7.5041	10.2568	30.0126				

Anexo F Programa para Cálculos Presión

```
clear all;

a=xlsread('O2.xlsx');
A=zeros(2,2);
B=zeros(2,1);
for j=0:10
for i=1:11
    if i ==11
A(1,1)=log10( a(i,3+2*j));
A(1,2)= log10(a(i,1));
A(2,1)=log10( a(1,3+2*j));
A(2,2)= log10(a(1,1));
B(1,1)=a(i,2+2*j);
B(2,1)=a(1,2+2*j);
S=inv(A)*B;
C(i,1+2*j)=S(1,1);
C(i,2+2*j)=S(2,1);
        else
A(1,1)=log10( a(i,3+2*j));
A(1,2)= log10(a(i,1));
A(2,1)=log10( a(i+1,3+2*j));
A(2,2)= log10(a(i+1,1));
B(1,1)=a(i,2+2*j);
B(2,1)=a(i+1,2+2*j);
S=inv(A)*B;
C(i,1+2*j)=S(1,1);
C(i,2+2*j)=S(2,1);
        end
    end
end
SA=0;
SB=0;
for i=0:10
    for j=1:11
        SA=SA+C(j,1+2*i);
        SB=SB+C(j,2+2*i);
    end
end
PA=SA/(11*11);
PB=SB/(11*11);
for j=0:10
for i=1:11
LC=PA*log10(a(i,3+2*j))+PB*log10(a(i,1));
L(i,j+1)=LC;
    end
end
```

Anexo G Calculo de Constantes y perdidas en Humedad

	10GHz				11GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	11.27	5.24	16.09	10.5451	11.43	4.4175	10.6683	10.7398
0.85	19.82	5.82	49.13	17.8462	17.1	4.6382	23.3091	18.0409
1.15	26.27	7.12	-36.26	19.6496	20.16	4.5393	29.8996	19.8443
1.45	22.62	6.03	-9.33	21.0325	23.17	5.5438	4.7409	21.2272
1.95	21.42	4.53	11.38	22.8001	23.78	4.8905	13.8438	22.9948
FRECUENCIA	12GHz				13GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	10.02	5.3500	19.6057	10.9176	8.33	3.9936	13.4530	11.0811
0.85	20.44	5.3034	16.9106	18.2187	15.48	4.2202	26.6608	18.3822
1.15	22.66	5.9305	-25.2309	20.0221	18.98	4.6209	-0.4967	20.1856
1.45	20.12	5.4397	-12.8238	21.4050	18.93	5.2873	-17.4871	21.5686
1.95	18.47	3.8544	9.4721	23.1726	16.68	3.3946	9.3600	23.3361
FRECUENCIA	14GHz				15GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	9.50	3.5262	8.5046	11.2325	7.9600	4.6160	18.7966	11.3735
0.85	14.02	3.6162	13.7874	18.5336	17.9500	4.9677	39.6103	18.6746
1.15	15.83	3.4239	26.9196	20.3370	23.1500	4.2224	90.8909	20.4780
1.45	18.54	3.8122	16.9430	21.7200	32.3000	10.4914	-71.3472	21.8609
1.95	20.72	4.1176	12.5771	23.4875	23.1200	4.3560	16.9937	23.6284
FRECUENCIA	16GHz				17GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	6.82	3.8856	15.8050	11.5053	17.9600	3.9991	-1.7310	11.6292
0.85	15.22	3.3389	-16.7582	18.8064	17.0400	4.6939	39.9150	18.9303
1.15	13.02	2.3569	51.2565	20.6098	22.2800	5.4661	-13.9068	20.7337
1.45	18.18	4.2348	2.3316	21.9927	20.8800	2.4424	65.3627	22.1166
1.95	18.48	3.4940	13.0704	23.7603	29.2900	6.0529	12.7004	23.8841
FRECUENCIA	18GHz				19GHz			
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc	ESP.Libre	A	B	L.calc
0.25	10.32	4.1237	12.0042	11.7459	11.5000	4.7845	14.9018	11.8564
0.85	16.70	4.1090	11.1214	19.0470	19.4200	4.6769	8.3791	19.1575
1.15	18.16	4.0636	14.3041	20.8504	20.5200	4.5450	17.6815	20.9609
1.45	19.60	3.8339	20.3627	22.2334	22.3000	3.1160	55.5700	22.3438
1.95	22.22	4.3126	13.3394	24.0009	29.4500	5.5189	20.1212	24.1114
FRECUENCIA	20GHz							
DISTANCIA	ESP.Libre	A	B	L.calc				
0.25	19.02	5.4494	7.3380	11.9612				
0.85	22.92	5.5515	13.5589	19.2623				
1.15	24.70	5.3223	29.8003	21.0657				
1.45	27.70	6.0233	11.1140	22.4486				
1.95	29.13	6.0086	11.3329	24.2161				

Anexo H Programa para Cálculos Humedad

```
clear all;

a=xlsread('HUM.xlsx');
A=zeros(2,2);
B=zeros(2,1);
for j=0:10
for i=1:5
    if i ==5
A(1,1)=log10( a(i,3+2*j));
A(1,2)= log10(a(i,1));
A(2,1)=log10( a(1,3+2*j));
A(2,2)= log10(a(1,1));
B(1,1)=a(i,2+2*j);
B(2,1)=a(1,2+2*j);
S=inv(A)*B;
C(i,1+2*j)=S(1,1);
C(i,2+2*j)=S(2,1);
        else
A(1,1)=log10( a(i,3+2*j));
A(1,2)= log10(a(i,1));
A(2,1)=log10( a(i+1,3+2*j));
A(2,2)= log10(a(i+1,1));
B(1,1)=a(i,2+2*j);
B(2,1)=a(i+1,2+2*j);
S=inv(A)*B;
C(i,1+2*j)=S(1,1);
C(i,2+2*j)=S(2,1);
        end
    end
end
SA=0;
SB=0;
for i=0:10
    for j=1:5
        SA=SA+C(j,1+2*i);
        SB=SB+C(j,2+2*i);
    end
end
PA=SA/(11*5);
PB=SB/(11*5);
for j=0:10
for i=1:5
LC=PA*log10(a(i,3+2*j))+PB*log10(a(i,1));
L(i,j+1)=LC;
    end
end
```

Anexo I Programa para cálculo del Error Cuadrático Medio

```
datos<-read.table("FSL_ECM_17.txt",header=T)
```

```
datos
```

```
attach(datos)
```

```
sqrt(sum((Pi-Oi)^2)/19)
```

Datos reflejados en el programa.

```
> datos<-read.table("FSL_ECM_17.txt",header=T)
```

```
> datos
```

```
      Pi      Oi
1  10.36  6.435125
2  12.66 10.981897
3  11.99 13.976780
4  15.20 16.213688
5  17.79 17.999824
6  19.62 19.486744
7  20.44 20.760460
8  20.12 21.874516
9  25.68 22.864517
10 25.25 23.755343
11 26.42 24.565068
12 26.72 25.307233
13 26.30 25.992251
14 24.22 26.628295
15 26.46 27.221903
16 32.27 27.778387
17 24.46 28.302116
18 26.03 28.796734
19 28.70 29.265307
```

```
> attach(datos)
```

```
>
```

```
> sqrt(sum((Pi-Oi)^2)/19)
```

```
[1] 2.193554
```

```
>
```


Anexo J Manual Generador de Señales

Para leer el manual de nuestro generador de señales dirigirse al siguiente enlace:

<https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Manuals/Operation-Manual/10370-10373H.pdf>

Anexo K Manual de Usuario del Analizador de Espectros

Para leer el manual de nuestro generador de señales dirigirse al siguiente enlace:

<https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/datasheet/11410-00525K.pdf>

Anexo L Fotos Tomadas del Durante la Realización del proyecto de Titulación



Estructura de la cámara anecoica.



Laminado y pintura.



Recubrimiento interno de espuma de poliuretano.



Cámara anecoica terminada