

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LAS ANTENAS  
DE TRANSMISIÓN, RECEPCIÓN Y RADIOENLACE DE UNA  
ESTACIÓN DE RADIOAFICIONADO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**GABRIEL SEBASTIÁN ESPÍN ESTÉVEZ  
BYRON ANDRÉS ROMERO CHASIPANTA**

**DIRECTOR: DR. LUIS FERNANDO CARRERA SUÁREZ**

**Quito, Noviembre 2020**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Gabriel Sebastián Espín Estévez y Byron Andrés Romero Chasipanta, bajo mi supervisión.

---

**DR. LUIS FERNANDO CARRERA SUÁREZ**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Nosotros, Gabriel Sebastián Espín Estévez y Byron Andrés Romero Chasipanta, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejamos constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

---

GABRIEL SEBASTIÁN ESPÍN ESTÉVEZ

---

BYRON ANDRÉS ROMERO CHASIPANTA

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme llevar una vida plena llena de objetivos y aventuras y a su vez por darme la oportunidad de alcanzar este logro en mi vida personal y profesional.

A toda mi familia por el apoyo incondicional recibido.

A los profesores quiénes compartieron sus conocimientos, experiencias y consejos para llevar una vida profesional ética y con valores.

A mis amigos, compañeros y hermanos Scout por todas las aventuras y experiencias.

Gabriel Espín E.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por su regalo de vida de cada día.

A mis padres, Fernando y Magdalena, por su apoyo incondicional en todos los objetivos, retos, desafíos y obstáculos que se han presentado en mi vida. A través de su ejemplo de perseverancia, constancia, compromiso y una vida marcada por valores y principios se ven reflejado en lo que me he convertido actualmente.

A mis hermanos, Fernando y David, que han sido un ejemplo a seguir. Gracias por sus consejos, guías, iniciativas y apoyo en todo lo que me he propuesto realizar.

A Andy, Yessi, Pau, a mi sobrino que está por nacer y en sí a toda mi familia agradecerles por la ayuda y apoyo que en algún momento recibí de ustedes.

Un agradecimiento especial para quiénes considero como mi segunda familia que son las/os beneficiarias/os y dirigentes del Grupo Scout #15 – “Transvaal”. Personas con las cuales he compartido muchas aventuras, anécdotas, risas y mucho aprendizaje que me han ayudado en mi desarrollo personal y profesional.

A mis amigos, compañeros y personas muy especiales, con los cuales pude compartir momentos en las aulas y fuera de ellas.

A Byron, colega de Tesis por su amistad y acompañamiento en este trabajo de titulación.

Al Dr. Hernán Barba y al Dr. Fernando Carrera por su amistad, confianza y apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo de titulación.

Al QUITO RADIO CLUB por su acompañamiento, consejo y apoyo en el desarrollo de este trabajo de titulación.

Gabriel Espín E.

## **DEDICATORIA**

Para toda mi familia, pilar fundamental en mi vida, que siempre me han apoyado en cada proyecto y aventura que he decidido realizar.

De manera especial a mis padres y a mi hermano ya que son ejemplo de perseverancia y superación, de ellos aprendí que no existen límites cuando se desea alcanzar una meta.

A mis amigos y compañeros.

Byron Romero Ch.

# AGRADECIMIENTO

A Dios por la vida y por acompañarme siempre.

A mis padres, Marisol y Pablo, que siempre me han apoyado en cada proyecto, reto y objetivo que me he planteado realizar. Por sus palabras de aliento y motivación para seguir hacia adelante. Principalmente por los valores y principios que me han sabido inculcar ya que son el mejor regalo que me llevo de ellos.

A mi hermano, Ricardo, por su ejemplo de perseverancia y constante preparación. Estoy seguro de que vas a alcanzar cada meta que te propones llegando a países donde no imaginaste llegar junto a Yoli y Julieta.

A mis amigos del O.M.A ya que siempre me han apoyado y junto a ellos he crecido como persona con cada lección de vida que nos enseñan los destinatarios del oratorio.

A Lau, Eve, Ale, Tania, Jeff, Joss, mis grandes amigos que la vida universitaria me permitió conocer, con ellos he podido compartir anécdotas, alegrías, risas, momentos de estrés, proyectos. Cada uno supo apoyarme con un gesto o palabra cuando más lo necesitaba. Gracias por su amistad brindada.

A Gabriel, con quién nos conocimos en el colegio y nos volvimos a encontrar en la universidad. Colega y amigo quien supo aportar con grandes ideas para la realización de este trabajo de titulación.

Al Dr. Hernán Barba y al Dr. Fernando Carrera por ser los guías en la realización de este proyecto. Quienes supieron brindarnos su amistad, confianza y apoyo.

Al QUITO RADIO CLUB por su acompañamiento, consejo y apoyo en el desarrollo de este trabajo de titulación.

Byron Romero Ch.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| AVAL.....   | I   |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....  | II  |
| DEDICATORIA .....   | III |
| AGRADECIMIENTO .....  | IV  |
| DEDICATORIA .....   | V   |
| AGRADECIMIENTO .....  | VI  |
| ÍNDICE DE CONTENIDO.....  | VII |
| RESUMEN.....  | IX  |
| ABSTRACT.....   | X   |
| 1 INTRODUCCIÓN.....   | 1   |
| 1.1 OBJETIVOS.....  | 3   |
| 1.2 ALCANCE .....   | 3   |
| 1.3 MARCO TEÓRICO .....   | 5   |
| 1.3.1 BREVE HISTORIA DE LA RADIOAFICIÓN EN EL ECUADOR .....                               | 6   |
| 1.3.2 QUITO RADIO CLUB .....  | 7   |
| 1.3.3 EQUIPAMIENTO DE LAS ESTACIONES REPETIDORAS DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO..... | 7   |
| 1.3.4 OPERACIÓN DEL SERVICIO DE RADIOAFICIONADOS ANTE EMERGENCIAS.....                    | 8   |
| 1.3.5 PROTOCOLO DE RESPUESTA DE LOS RADIOAFICIONADOS ANTE UNA EMERGENCIA .....            | 9   |
| 1.3.6 TOPOLOGÍA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO .....                                 | 11  |
| 2 METODOLOGÍA.....  | 14  |
| 2.1 GENERALIDADES.....  | 14  |
| 2.2 DISEÑO DE LA ESTACIÓN REPETIDORA FIJA.....  | 16  |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.2.1 | ANTENA DIPOLO DOBLADO.....                                | 16 |
| 2.2.2 | ARREGLO LINEAL DE CUATRO ANTENAS DIPOLO DOBLADO.....      | 18 |
| 2.2.3 | ANTENA YAGI-UDA.....                                      | 34 |
| 2.3   | DISEÑO DE LA ESTACIÓN REPETIDORA MÓVIL.....               | 45 |
| 2.3.1 | ANTENA DIPOLO .....                                       | 45 |
| 2.3.2 | ANTENA LANDSTORFER.....                                   | 49 |
| 3     | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                              | 63 |
| 3.1   | IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS EN LA ESTACIÓN FIJA “EPN” ..... | 63 |
| 3.1.1 | GENERALIDADES .....                                       | 63 |
| 3.1.2 | ANTENA YAGI-UDA.....                                      | 65 |
| 3.1.3 | ANTENA ARREGLO CUATRO DIPOLOS.....                        | 68 |
| 3.2   | IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS EN LA ESTACIÓN MÓVIL .....      | 73 |
| 3.2.1 | GENERALIDADES.....  | 73 |
| 3.2.2 | ANTENA LANDSTORFER.....                                   | 73 |
| 3.2.3 | ANTENA DIPOLO DOBLADO.....                                | 77 |
| 3.3   | MEDICIONES DE COBERTURA LOCAL.....                        | 79 |
| 3.4   | MEDICIONES CON ANTENAS PARA RADIOENLACE .....             | 84 |
| 3.5   | MEDICIONES DE CAMPO .....                                 | 88 |
| 4     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                      | 91 |
| 4.1   | CONCLUSIONES .....  | 91 |
| 4.2   | RECOMENDACIONES .....                                     | 94 |
| 5     | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                           | 95 |
|       | ANEXOS.....   | 97 |

## RESUMEN

Este trabajo de titulación presenta el diseño, simulación e implementación de las antenas de transmisión, recepción y radioenlace para una estación de radioaficionado.

El primer capítulo presenta una breve descripción de la radioafición en el Ecuador, la operación, protocolos de respuesta ante emergencias, topología del Sistema Nacional Interconectado y equipos empleados para establecer la comunicación entre estaciones repetidoras del servicio de radioafición.

En el segundo capítulo se presentan las condiciones establecidas por la ARCOTEL para la puesta en operación de una estación de radioaficionado en el país. Seguidamente, este capítulo explica el diseño de las antenas Yagi-Uda, antena arreglo cuatro dipolos para estación repetidora fija y las antenas Landstorfer y dipolo doblado simple para la estación móvil utilizando los simuladores CST Studio Suite y Radio Mobile.

El tercer capítulo describe la implementación de las antenas de la estación fija y móvil "EPN". De igual manera se presenta el coeficiente de reflexión medido y simulado con la ayuda del analizador vectorial de redes.

Por último, en el capítulo cuatro se describe las conclusiones y recomendaciones obtenidas como resultado del trabajo de titulación.

**PALABRAS CLAVE:** Radioaficionados, arreglos de antenas, Yagi-Uda, Landstorfer, radioenlace.

## **ABSTRACT**

This work presents the design, simulation and implementation of the transmission, reception and radio link antennas for an amateur radio station.

The first chapter presents a brief description of amateur radio in Ecuador, the operation, emergency response protocols, the topology of the National Interconnected System and the equipment used to establish communication between relay stations of the amateur radio service.

The second chapter presents the conditions established by ARCOTEL for the commissioning of an amateur radio station in the country. Next, this chapter explains the design of the Yagi-Uda antennas, a four-dipole array antenna for a fixed repeater station, and the Landstorfer and simply folded dipole antennas for the mobile station using the CST Studio Suite and Radio Mobile simulators.

The third chapter describes the implementation of the antennas of the fixed and mobile station "EPN". In the same way, the reflection coefficient parameter measured and simulated with the aid of a vector network analyzer is presented.

Finally, chapter four describes the conclusions and recommendations obtained as result of the work.

**KEYWORDS:** amateur radio, antenna arrays, Yagi-Uda, Landstorfer, radio link.

# 1 INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones a lo largo de la historia han tenido una evolución muy importante ya que han permitido el desarrollo de la sociedad en diferentes ámbitos sin importar clases sociales, religiones u otro aspecto relevante, acortando distancias y brindando algunas aplicaciones y servicios que son herramientas indispensables utilizadas de manera masiva.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, si los servicios de comunicaciones dejan de funcionar por alguna razón [1], se instala la incertidumbre y nuestro entorno se vuelve más hostil por ello buscamos mecanismos para comunicarnos con los demás. Bajo este escenario es que las redes de comunicaciones alternas entran en funcionamiento y cumplen un papel fundamental ya que proveen de los recursos necesarios para solventar dichas deficiencias e inconvenientes.

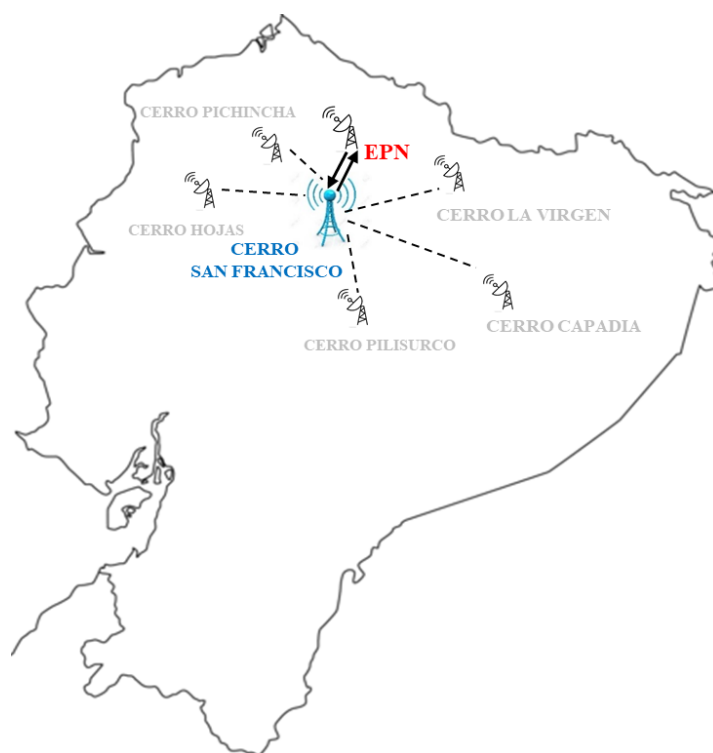
Un ejemplo específico de red alterna es la comunicación de radioaficionados que está formada principalmente de componentes analógicos por ende no está atada a los avances tecnológicos [2], actualmente estos sistemas han perdido protagonismo debido a que existe mayor demanda e interés por las comunicaciones portables e interactivas y que son de fácil manejo para el usuario [3], [4].

Sin quitar el mérito respectivo a este tipo de comunicaciones, la radioafición se ha convertido en el principal aliado de muchos entes gubernamentales ya que en algunos escenarios han sido el único mecanismo de información y con frecuencia el único enlace en situaciones de emergencia como terremotos, tsunamis, inundaciones y diversos desastres naturales [4], [5].

Los desastres naturales se producen sin previo aviso ocasionando destrucción, muerte, alterando el orden público y sobre todo denotan cuales son las deficiencias y requerimientos que deben cubrirse de manera urgente por parte de los organismos de ayuda del Gobierno. Las experiencias obtenidas en nuestro país por el terremoto suscitado en el litoral ecuatoriano en abril de 2016 dejaron en evidencia como los sistemas básicos de comunicaciones fallaron en su totalidad, dichos sistemas fueron reactivados luego de algunos días. Cabe resaltar que ante esta eventualidad el único servicio de comunicaciones que se mantuvo en constante funcionamiento fue el Sistema Nacional Interconectado de Radioaficionados en el Ecuador los mismos que de forma inmediata se enteraron de los hechos acontecidos en Manabí y Esmeraldas e informaron, a los diferentes medios locales que no tenían acceso a este tipo de información, que era lo que estaba sucediendo [5].

Factores como: la falta de interés, la escasez de conocimiento y la poca difusión de este tipo de comunicaciones capaces de ser un medio muy importante de ayuda humanitaria hacen que este proyecto de titulación deba ser considerado relevante ya que permitirá manipular, practicar y dar a conocer a las nuevas generaciones que existe otro tipo de comunicaciones con sus propios códigos interpretativos de lenguajes a los cuales se les puede sacar provecho sin fines de lucro y haciéndolo por el bien de la sociedad en general [6].

El Sistema Nacional Interconectado de Radioaficionados se encuentra distribuido en gran parte del territorio nacional cubriendo 3 de las 4 regiones del país, el sistema cuenta con 21 repetidores en funcionamiento en el rango de frecuencias de 144 MHz – 148 MHz agrupados en 3 anillos los cuales basan su funcionamiento en una topología punto multipunto. La Figura 1.1 muestra un ejemplo de la topología punto multipunto que se utiliza en el Sistema Nacional Interconectado de Radioaficionados. Los anillos se encuentran distribuidos en la zona Norte (11 nodos), Sur (6 nodos) y Oriente (4 nodos). Las estaciones repetidoras se conectan mediante radioenlaces a los nodos centrales o también denominados “CEREBROS” que se encuentran ubicados en el cerro San Francisco y Carshao.



**Figura 1.1** Topología de red punto multipunto del Sistema Nacional Interconectado de Radioaficionados

Con los antecedentes presentados, se propone desarrollar este proyecto de titulación, en el cual se realizará el diseño, simulación e implementación de antenas de transmisión/recepción, radioenlace de una estación de radioaficionado.

## **1.1 OBJETIVOS**

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Realizar el diseño, simulación e implementación de las antenas de transmisión, recepción y radioenlace de una estación de radioaficionado que permitan la operación tanto de manera fija en el Laboratorio de Antenas de la FIEE-EPN como móvil, para uso demostrativo y de aprendizaje para los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Describir los sistemas de radioaficionados en Ecuador.
- Diseñar las antenas para la operación de una estación repetidora.
- Implementar las antenas diseñadas para la operación de una estación repetidora.
- Analizar por medio de simulación e implementación el modo de operación de una antena Landstorfer y su aplicabilidad comparada con una antena Yagi-Uda.
- Ejecutar pruebas de campo y verificar los datos obtenidos a través de mediciones y pruebas.

## **1.2 ALCANCE**

En el presente trabajo de titulación se realizará el diseño, simulación e implementación de las antenas que componen una estación repetidora fija y móvil para el servicio de radioafición las mismas que podrán ser utilizadas en un futuro para completar la implementación de una estación repetidora que se integre al Sistema Nacional Interconectado de Radioaficionados en el país y esté adscrita al Laboratorio de Antenas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. El uso de las antenas será con fines demostrativos enfocados a la línea de investigación de propagación y antenas (específicamente en la materia de Antenas y Propagación); y vinculativos para propuestas futuras de proyectos relacionados a la vinculación social, específicamente para trabajo en zonas sin acceso a la comunicación tradicional. La operación de las antenas en el rango de 144 MHz – 148 MHz será regida por el PLAN NACIONAL DE FRECUENCIAS emitido por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones [7].

Las antenas trabajarán en la banda de frecuencia de VHF dentro del rango de frecuencias de 144 MHz – 148 MHz, específicamente en el valor de 146 MHz, para cobertura local y a una frecuencia de 220 MHz para la conexión con el Sistema Nacional Interconectado por medio del Nodo “CEREBRO” ubicado en el cerro San Francisco.

En primer lugar, se presentará un estudio introductorio de la situación de los radioaficionados en el país, su historia, función y principales aplicaciones en las que se utiliza este tipo de comunicaciones.

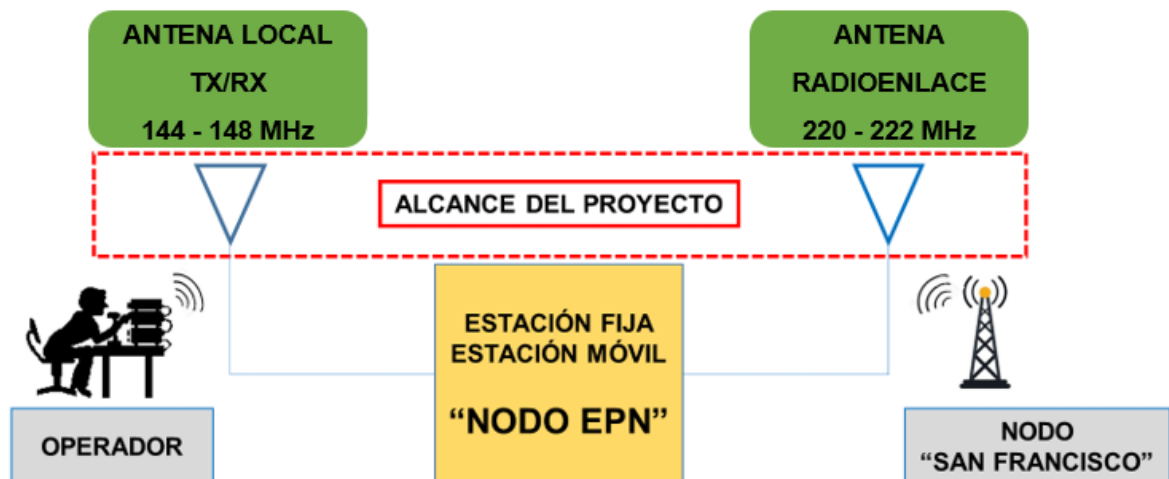
Seguidamente, se realizará el diseño, simulación e implementación de las antenas para transmisión/recepción y de radioenlace para una estación repetidora fija y móvil para radioaficionados. Se analizará, por medio de simulación e implementación, la caracterización estructural de una antena del tipo Yagi-Uda directiva denominada Landstorfer y su aplicabilidad comparada con la antena Yagi-Uda a utilizar para la conexión con el Nodo “CEREBRO” [8].

Para el diseño de componentes, así como para el diseño del radioenlace se utilizarán las herramientas de simulación CST Studio Suite y Radio Mobile respectivamente.

Así mismo se analizará la cobertura por medio de simulaciones de la antena Landstorfer previamente diseñada, implementada y optimizada en CST Studio Suite.

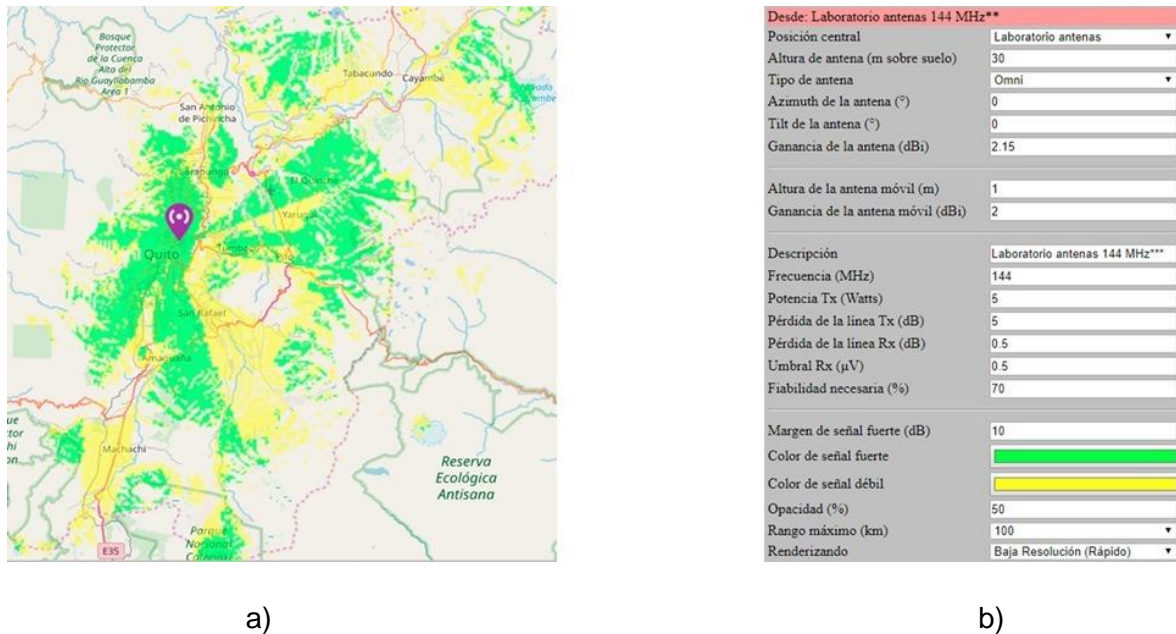
Finalmente, se construirán las antenas que integran una estación repetidora fija y móvil para el servicio de radioafición.

En la Figura 1.2 se detallan las etapas de la estación repetidora (fija y móvil), además de la interconexión al Nodo “CEREBRO”.



**Figura 1.2** Alcance del proyecto de titulación

Se realizó la simulación con Radio Mobile de la antena a utilizar para obtener el área de cobertura esperada (aproximadamente 10 km área recomendada por el QUITO RADIO CLUB) y los parámetros de configuración como se observa en la Figura 1.3.



**Figura 1.3** Simulación del área de cobertura en Radio Mobile. (a) Área de cobertura simulada para el alcance del proyecto de titulación; (b) Parámetros técnicos de simulación – Radio Mobile

Todos los procesos de diseño e implementación de las antenas se coordinarán con el QUITO RADIO CLUB para que los prototipos sean compatibles con la red que ellos poseen. Además, se trabajará con el QUITO RADIO CLUB debido a la experiencia que ellos tienen en el área de radioafición.

El presente trabajo de titulación presenta un producto final demostrable que consta de las antenas a utilizarse en la estación fija “EPN” y la estación móvil. Para utilizarlo de manera fija, las antenas serán sometidas a pruebas de funcionamiento y mediciones en las instalaciones del Laboratorio de Antenas ubicado en el edificio de Química – Eléctrica y para la parte móvil, se establecerá un lugar de prueba para realizar las mediciones necesarias.

### 1.3 MARCO TEÓRICO

En esta sección se presenta información acerca de la historia de la radioafición en el Ecuador, la historia del Quito Radio Club y la topología del Sistema Nacional Interconectado.



### 1.3.1 BREVE HISTORIA DE LA RADIOAFICIÓN EN EL ECUADOR

La radioafición en el Ecuador tuvo sus inicios en el año de 1923 en la ciudad de Guayaquil donde se funda el primer club de radioaficionados denominado “Guayaquil Radio Club”. Posteriormente ocurre la creación de otra organización radicada en la ciudad de Quito en el año de 1931 con el nombre de “Asociación Radio Ecuatoriana”, a la que actualmente se la conoce como el “Quito Radio Club”.

La primera radio emisora que fue instalada en el país tuvo como protagonista al Ing. Carlos Cordovéz Borja, oriundo de la ciudad de Riobamba, personaje que, haciendo uso de los conocimientos obtenidos en EEUU y Europa en Ingeniería Eléctrica, pudo implementar este servicio de comunicaciones poco conocido y explorado en el país [9].

Históricamente, solo en algunas provincias del país se han establecido diferentes estaciones de radioaficionados, a saber, en Pichincha, Guayas, Chimborazo, Tungurahua, Azuay, Loja y Manabí. Acorde a la RESOLUCIÓN 04-03-ARCOTEL-2016 emitida por el ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones – Ecuador), las estaciones de radioaficionados para Ecuador constarán del prefijo HC-HD, asignado por la ITU (*International Telecommunications Union*), un número de distrito y de una a tres letras que serán asignadas por el ente regulador [6].

Ecuador se encuentra dividido en 9 distritos los cuales integran una o varias provincias. Los distritos se encuentran integrados de la siguiente manera:

Distrito 1: Carchi, Imbabura, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas

Distrito 2: Guayas, Los Ríos y Santa Elena

Distrito 3: El Oro y Loja

Distrito 4: Manabí y Esmeraldas

Distrito 5: Chimborazo, Cañar y Azuay

Distrito 6: Cotopaxi, Tungurahua y Bolívar

Distrito 7: Napo, Orellana, Sucumbíos, Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe

Distrito 8: Galápagos

Distrito 9: Estación Maldonado Antártida

Con el inicio de la radioafición se dio apertura a la experimentación, diseño y construcción de equipos y antenas en las bandas HF (*High Frequency*) y VHF (*Very High Frequency*),

siendo esta última la más utilizada por los radioaficionados por el bajo costo de implementación.

### **1.3.2 QUITO RADIO CLUB**

En Julio de 1931, en la ciudad de Quito se funda el primer club de radioaficionados, establecido con el nombre de “Asociación Radio Ecuatoriana” hoy conocido como “Quito Radio Club”.

Los gestores de la creación del club fueron personas que, sin importar la profesión que ejercían o los conocimientos con los cuales contaban, construyeron este proyecto que actualmente continua en constante funcionamiento y al servicio de la sociedad.

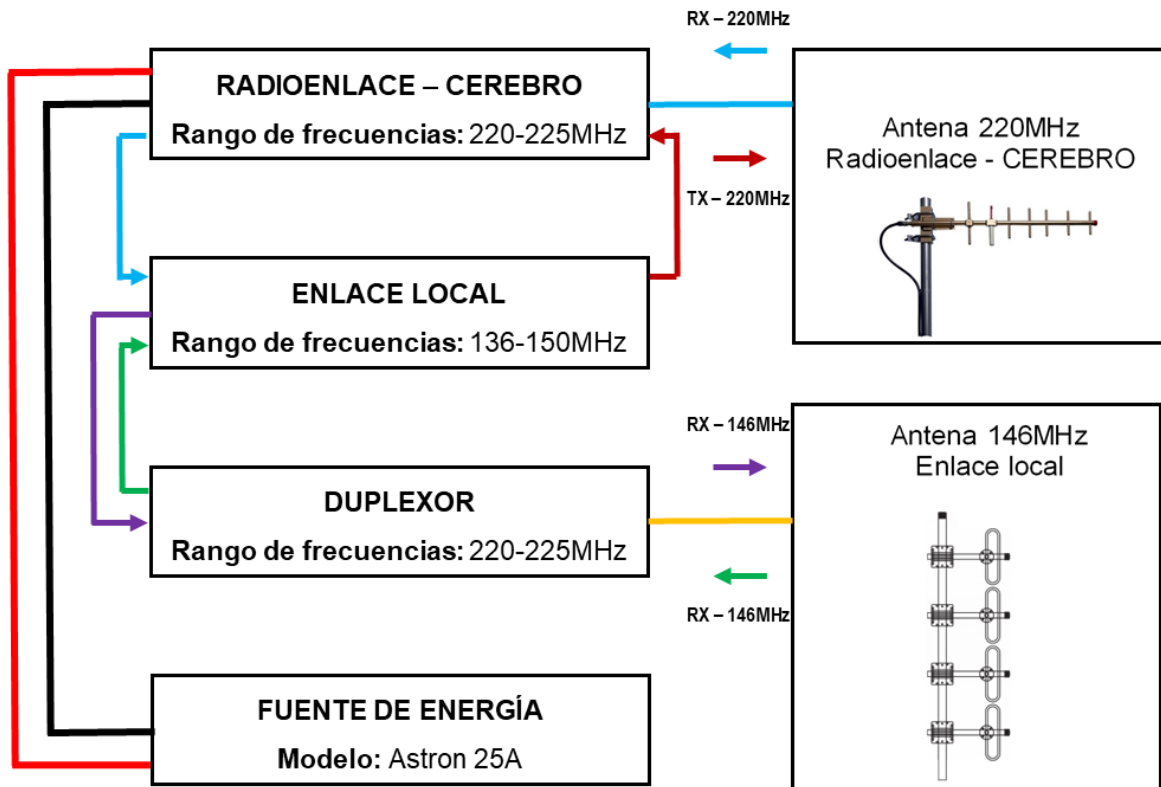
Uno de los motivos principales por los cuales se estableció el “Quito Radio Club”, fue integrar a clubes de radioafición en todo el país para prestar un servicio de información y promover la unión entre más radioaficionados ecuatorianos. Bajo esta premisa, en 1969 se crea la Federación Ecuatoriana de Radioaficionados (FERA) [10].

El “Quito Radio Club” cumplió con una notable participación en el terremoto que afectó a las provincias de Manabí y Esmeraldas. A dos minutos de haber iniciado el fenómeno natural, se establecieron eficientemente los primeros contactos con radioaficionados de Manabí y Guayaquil. Éstos, a través de sus equipos portátiles, reportaron lo que en ese momento estaba sucediendo en la zona cero y facilitaron la comunicación con familiares, rescatistas y organismos de control [5].

### **1.3.3 EQUIPAMIENTO DE LAS ESTACIONES REPETIDORAS DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO**

Todos los dispositivos empleados en el Sistema Nacional Interconectado basan su funcionamiento en sistemas analógicos ya que éstos disponen de dos modos de operación: telegrafía y fonía. Esta última permite transmitir voz utilizando AM, FM o SSB.

Una razón contundente para la elección de los sistemas analógicos radica en la operabilidad independiente de terceros operadores (v.g. ISPs) ante sucesos ajenos al funcionamiento de las estaciones, v.g. suspensión de servicios. Otra razón influyente, es que los sistemas digitales demandan un mayor costo en su adquisición e implementación de aplicaciones que, para el objetivo de las estaciones repetidoras, éstas no son necesarias. En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo de los equipos presentes en una de las estaciones repetidoras que integran el Sistema Nacional Interconectado.



**Figura 1.4** Equipamiento de estación repetidora

### 1.3.4 OPERACIÓN DEL SERVICIO DE RADIOAFICIONADOS ANTE EMERGENCIAS

El papel que cumplen los radioaficionados ante situaciones de emergencia se limita a establecer una comunicación eficiente entre los entes de atención inmediata ante posibles desastres naturales.

Según el reglamento de los radioaficionados elaborado en el año 2000, el servicio de radioaficionados tiene la obligación de integrar los servicios de radiocomunicaciones en apoyo a la seguridad nacional y la conformación de las redes de emergencia necesarias con el fin de informar sobre lo acontecido en las zonas afectadas [11].

*Ecuador – Terremoto del 16 de abril de 2016 (Pedernales-Manabí) [5]*

El terremoto suscitado en Pedernales ocasionó que, en gran parte de las provincias del litoral ecuatoriano, colapsen los servicios de comunicaciones de telefonía fija y móvil dejando en vulnerabilidad a la población de las zonas afectadas sin poder informar a los organismos de gestión de riesgos las consecuencias de este fenómeno natural. Transcurridas las primeras 72 horas del terremoto se reestablecieron los medios de

comunicación convencionales teniendo aún un déficit notorio en el funcionamiento de las mismas tanto en la infraestructura como en la eficiencia de la comunicación.

Los radioaficionados residentes en las provincias afectadas, a tan solo 2 minutos de haberse iniciado el fenómeno natural, establecieron las comunicaciones a través del Sistema Nacional Interconectado reportando los daños a las entidades gubernamentales pertinentes.

Además, el servicio de radioaficionados estableció un canal alternativo preferencial por el cual los damnificados reportaban a sus familiares, en otras provincias del país, cómo era la situación desde las zonas de mayor impacto del terremoto. A través del "Quito Radio Club" y otros radioaficionados de Manabí y Guayas se instauraron varios canales de comunicación los cuales complementaban las comunicaciones con la Secretaría de Gestión de Riesgos para coordinar la movilización de ayuda humanitaria y personal de entidades de Gobierno.

### **1.3.5 PROTOCOLO DE RESPUESTA DE LOS RADIOAFICIONADOS ANTE UNA EMERGENCIA**

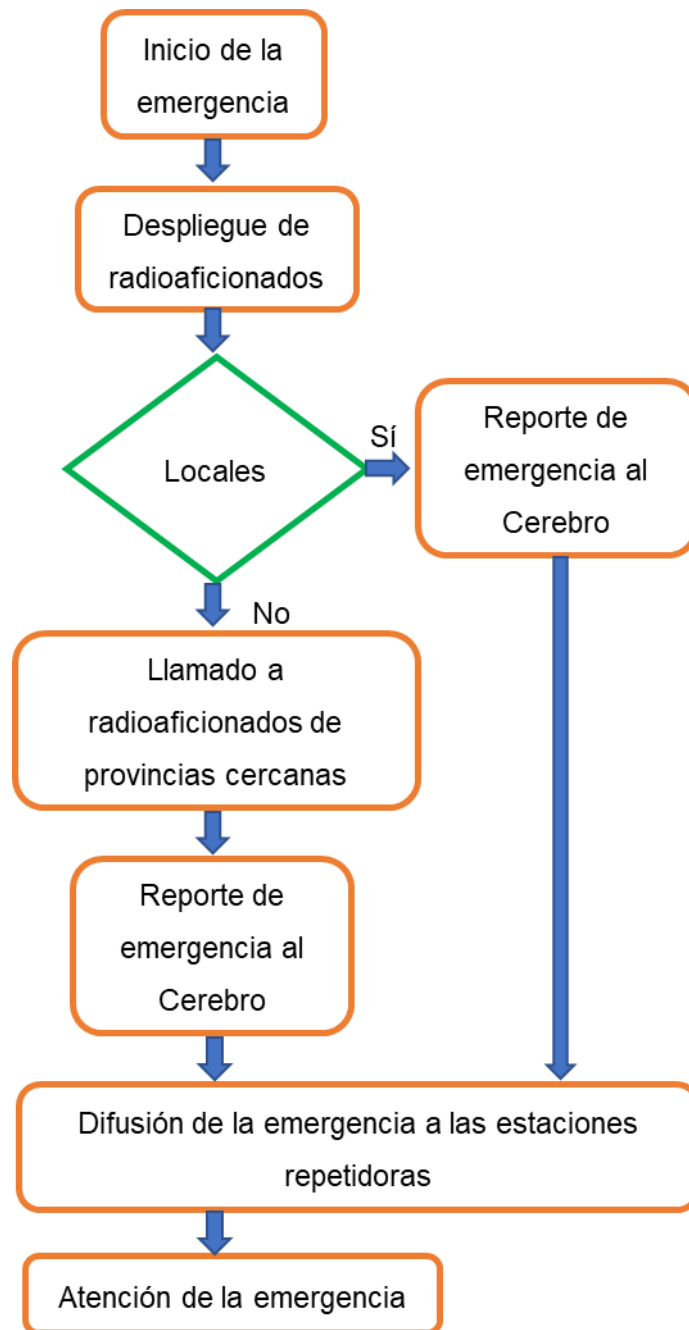
Las comunicaciones en general muestran afectación al momento de suscitarse algún fenómeno natural o evento de emergencia. Las líneas telefónicas convencionales, telefonía celular, correo electrónico, mensajería instantánea se ven vulnerables complicando el contacto entre sobrevivientes y organismos de socorro.

El protocolo a seguir ejecutado por los radioaficionados ante una emergencia se activa a través de procesos tanto internos como externos. A minutos de haberse producido el fenómeno, el servicio de radioafición despliega una delegación de radioaficionados que viven en la zona de afectación con la misión de informar lo que ha sucedido. Si no existen radioaficionados locales, se pide la asistencia de radioaficionados de provincias cercanas. El reporte de la situación de emergencia se informa a los cerebros del Sistema Nacional Interconectado haciendo que las mismas difundan el mensaje a las otras estaciones repetidoras.

De manera inmediata, los operadores que son contacto directo con los entes de respuesta reciben la información de los correspondientes y emiten un comunicado hacia las dependencias gubernamentales correspondientes las mismas que envían el contingente humano y de recursos a las áreas de desastre.

Los radioaficionados desplegados en las localidades afectadas deben enviar reportes continuos y de ser necesario permanecer en la zona hasta una nueva orden.

En la Figura 1.5, se demuestra, a través de un diagrama de flujo, el protocolo de respuesta que los radioaficionados llevan a cabo ante emergencias.



**Figura 1.5** Protocolo de respuesta ante emergencias aplicado por el Quito Radio Club

### 1.3.6 TOPOLOGÍA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

El Sistema Nacional Interconectado consta de 22 repetidoras distribuidas en las tres regiones del país con operación en el rango de frecuencias desde los 144 MHz hasta los 148 MHz. Cada repetidora funciona dentro de un área de influencia denominada anillo los cuales se distribuyen en Norte, Sur y Oriente que a su vez se interconectan entre sí por medio de 2 nodos centrales denominados “CEREBROS”, San Francisco y Carshao.

En la Figura 1.6 se observa la distribución de las repetidoras y nodos centrales. Asimismo, se identifica la ubicación de la repetidora EPN a implementar, objeto del presente proyecto de titulación.



Figura 1.6 Topología del Sistema Nacional Interconectado

### Anillo Norte

El Anillo Norte está integrado por 11 estaciones repetidoras como muestra la Tabla 1.1 las cuales se conectan con el Nodo “San Francisco” en una topología punto - multipunto.

**Tabla 1.1** Estaciones repetidoras – Anillo Norte [12]

| Nombre          | Provincia        | Coordenadas      |                  |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|                 |                  | Latitud          | Longitud         |
| CERRO DE HOJAS  | Manabí           | 01° 02' 41" S    | 80° 32' 41" W    |
| LA MIRA         | Chimborazo       | 01° 30' 10" S    | 78° 35' 47" W    |
| PILISURCO       | Tungurahua       | 01° 09' 20" S    | 78° 40' 06" W    |
| MORETA          | Cotopaxi         | 00° 48' 4,8" S   | 78° 56' 21" W    |
| SAN FRANCISCO   | Pichincha        | 00° 23' 24,93" S | 78° 37' 06,87" W |
| LA FORESTAL     | Pichincha        | 00° 15' 30" S    | 78° 30' 17" W    |
| CERRO PICHINCHA | Pichincha        | 00° 10' 06,3" S  | 78° 31' 32,45" W |
| ALASPUNGO       | Pichincha        | 00° 00' 17" S    | 78° 36' 31" W    |
| CERRO ZAPALLO   | Esmeraldas       | 00° 53' 07" N    | 79° 31' 53" W    |
| SAN BARTOLO     | Pichincha        | 00° 06' 29" N    | 78° 18' 07" W    |
| CERRO BLANCO    | Imbabura         | 00° 12' 32" N    | 78° 20' 19" W    |
| <i>EPN*</i>     | <i>Pichincha</i> | 00° 12' 34" S    | 78° 29' 22" O    |

\* Estación a implementar

### Anillo Sur

El Anillo Sur está integrado por 7 estaciones repetidoras como se presenta en la Tabla 1.2 las cuales se conectan con el Nodo Central “Carshao” en una topología punto-multipunto.

**Tabla 1.2** Estaciones repetidoras - Anillo Sur [12]

| Nombre      | Provincia | Coordenadas      |                 |
|-------------|-----------|------------------|-----------------|
|             |           | Latitud          | Longitud        |
| VILLONACO   | Loja      | 03° 59' 18,7" S  | 79° 16' 06,3" W |
| RADIO LOMA  | Azuay     | 02° 58' 10" S    | 78° 54' 50" W   |
| PILSHUN     | Cañar     | 02° 38' 29,7" S  | 78° 46' 23,5" W |
| CARSHAO     | Cañar     | 02° 26' 23,20" S | 78° 57' 03,8" W |
| TRES CRUCES | Azuay     | 02° 46' 43,2" S  | 79° 14' 27,4" W |
| PADREHURCO  | Bolívar   | 01° 42' 22" S    | 79° 05' 52" W   |

### *Anillo Oriente*

El Anillo Oriente está integrado por 4 estaciones repetidoras como muestra la Tabla 1.3 las cuales se conectan con el Nodo Central “San Francisco” en una topología punto-multipunto.

**Tabla 1.3** Estaciones repetidoras – Anillo Oriente [12]

| <b>Nombre</b> | <b>Provincia</b> | <b>Coordenadas</b> |                  |
|---------------|------------------|--------------------|------------------|
|               |                  | <b>Latitud</b>     | <b>Latitud</b>   |
| CAYAMBE       | Pichincha        | 00° 04' 49" N      | 78° 01' 19" W    |
| LUMBAQUI      | Sucumbíos        | 00° 01' 47,7" N    | 77° 19' 07,9" W  |
| LA VIRGEN     | Pichincha        | 00° 19' 08,9" S    | 78° 11' 27,60" W |
| PASOHURCO     | Orellana         | 00° 44' 24" S      | 77° 31' 12" W    |



## **2 METODOLOGÍA**

En este capítulo se presenta el diseño e implementación de la estación repetidora “EPN”. Durante el desarrollo, se analizarán los componentes pasivos tanto en la estación repetidora fija como en la estación móvil.

La parte pasiva tiene un enfoque relacionado a los elementos radiantes y sus componentes, tomando en cuenta el diseño, simulación, construcción y análisis de resultados.

### **2.1 GENERALIDADES**

La puesta en operación de la estación repetidora depende de algunos parámetros de funcionamiento establecidos por la ARCOTEL por medio de la reglamentación correspondiente al servicio de radioaficionados.

El servicio de radioaficionados puede operar normalmente a través de la adquisición de un título habilitante tipo licencia, permiso que será emitido por parte de la Dirección Ejecutiva de la ARCOTEL la cual permite al titular operar en la banda de frecuencias asignada para la práctica de la radioafición [13].

La instalación de la estación repetidora “EPN” deberá contar con su respectiva autorización de funcionamiento presentando la ubicación geográfica de la estación, un diagrama del área de cobertura, características técnicas de operación de los equipos utilizados y antenas [14].

En el ámbito legal de las telecomunicaciones, el Plan Nacional de Frecuencias es la herramienta de los organismos de control con la cual se puede asignar los valores de frecuencia de operación para el funcionamiento de las comunicaciones en el país.

En el año 2012, el extinto CONATEL aprobó el Plan Nacional de Frecuencias en el cual se especifican normas, estándares, campos de acción, parámetros técnicos y prioridades referentes al uso del espectro radioeléctrico. En dicho documento, las bandas de operación para el servicio de radioaficionados a nivel mundial se encuentran distribuidas tanto en HF como VHF como se indica en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1** Bandas y frecuencias para radioaficionados

| Banda                      | Longitud de onda | Frecuencia |           |
|----------------------------|------------------|------------|-----------|
|                            |                  | Desde      | Hasta     |
| MF: Media frecuencia       | 160 m            | 1800 kHz   | 2000 kHz  |
| HF: Alta frecuencia        | 80 m             | 3500 kHz   | 3800 kHz  |
|                            | 40 m             | 7000 kHz   | 7300 kHz  |
|                            | 30 m             | 10100 kHz  | 10150 kHz |
|                            | 20 m             | 14000 kHz  | 14350 kHz |
|                            | 17 m             | 18068 kHz  | 18168 kHz |
|                            | 15 m             | 21000 kHz  | 21450 kHz |
|                            | 12 m             | 24890 kHz  | 24990 kHz |
|                            | 10 m             | 28000 kHz  | 29700 kHz |
| VHF: Muy alta frecuencia   | 6 m              | 50 MHz     | 54 MHz    |
|                            | 2 m              | 144 MHz    | 148 MHz   |
|                            | 1,25 m           | 219 MHz    | 225 MHz   |
| UHF: Ultra alta frecuencia | 70 cm            | 420 MHz    | 450 MHz   |
|                            | 33 cm            | 902 MHz    | 928 MHz   |
|                            | 13 cm            | 2300 MHz   | 2450 MHz  |
| SHF: Súper alta frecuencia | 9 cm             | 3300 MHz   | 3500 MHz  |

La estación repetidora "EPN" cuenta con las frecuencias de operación que se presentan en la Tabla 2.2, las mismas fueron gestionadas y asignadas a través del QUITO RADIO CLUB.

**Tabla 2.2** Frecuencias asignadas a la estación repetidora "EPN"

| Tipo de estación | Frecuencia de transmisión<br>[MHz] | Frecuencia de recepción<br>[MHz] |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Repetidora       | 146,790                            | 146,190                          |
| Nodo Central     | 220,325                            | 222,000                          |

## 2.2 DISEÑO DE LA ESTACIÓN REPETIDORA FIJA

En esta sección se describirá el proceso de diseño, análisis de las antenas de transmisión, recepción y de radioenlace (Figura 1.4).

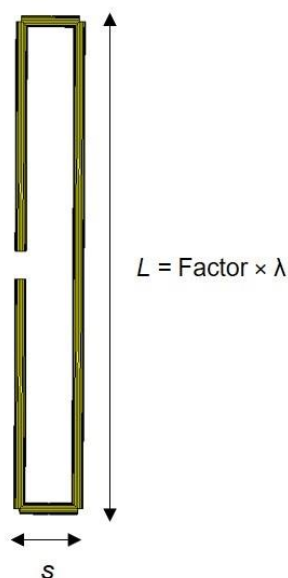
### 2.2.1 ANTENA DIPOLO DOBLADO

Para la implementación de la estación repetidora se deben diseñar, simular y construir las antenas que van a dar cobertura local en la frecuencia de 146 MHz. Para ello, se diseña un dipolo doblado con las características descritas en la Tabla 2.3. El dipolo diseñado será implementado en un arreglo lineal de 4 dipolos con las mismas características.

**Tabla 2.3** Parámetros de diseño del dipolo doblado

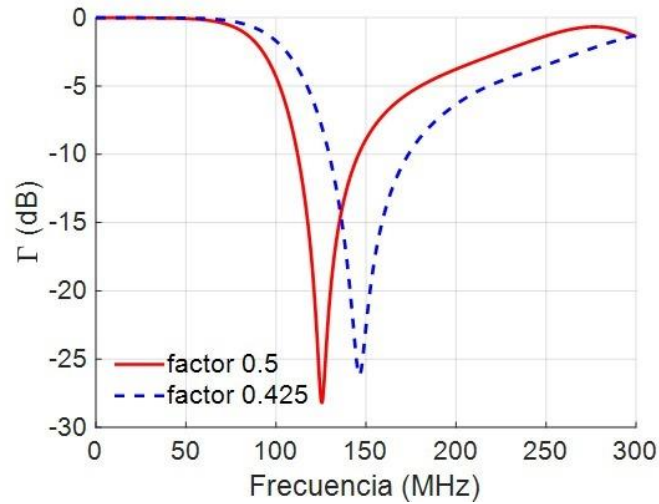
| Parámetro           | Símbolo   | Valor                          | Unidad |
|---------------------|-----------|--------------------------------|--------|
| Frecuencia          | $f$       | 146                            | MHz    |
| Longitud de onda    | $\lambda$ | 2,05                           | m      |
| Ancho de dipolo     | $s$       | $0,005 \lambda$                | m      |
| Factor              | -         | 0,5                            | -      |
| Longitud del dipolo | $L$       | $\text{Factor} \times \lambda$ | m      |

En la Figura 2.1 se observan las dimensiones del dipolo doblado y la estructura modelada en CST Studio Suite.



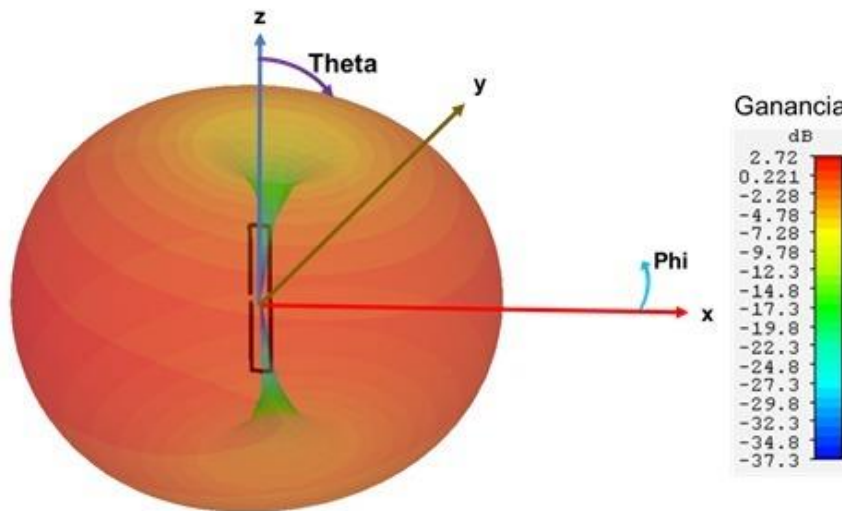
**Figura 2.1** Dipolo doblado - Estructura modelada en CST Studio Suite

La Figura 2.2 muestra el coeficiente de reflexión obtenido al simular la estructura de la Figura 2.1 con las dimensiones indicadas en la Tabla 2.3. Se observa que a la longitud del dipolo de  $0,5 \lambda$  (Factor = 0,5), la estructura es resonante a 130 MHz (línea roja continua). Luego de un proceso de optimización (básicamente modificación de la longitud del dipolo por el parámetro "Factor") se obtiene una resonancia de la estructura a 146,8 MHz para una longitud de  $0,425 \lambda$  (línea azul entrecortada).

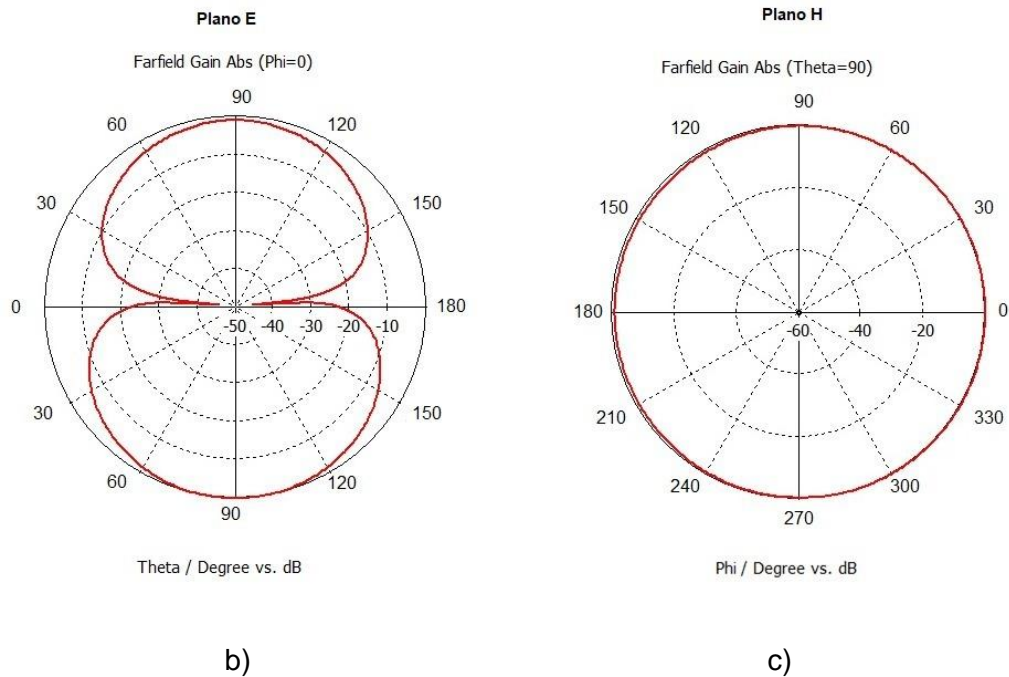


**Figura 2.2** Coeficientes de reflexión del dipolo doblado obtenidos en simulación

En la Figura 2.3 (a) se observa el patrón de radiación correspondiente a la estructura del dipolo doblado optimizada en CST Studio Suite. Los resultados obtenidos de la simulación son  $G_{MÁX} = 2,72$  dB,  $HPBW_E = 81,8^\circ$ ,  $FBR_E$  (Relación Frente Atrás) = 1,2 dB,  $HPBW_H = 88^\circ$ . En la Figura 2.3 (b) y (c) se observan los diagramas de radiación del plano E y H respectivamente.



a)



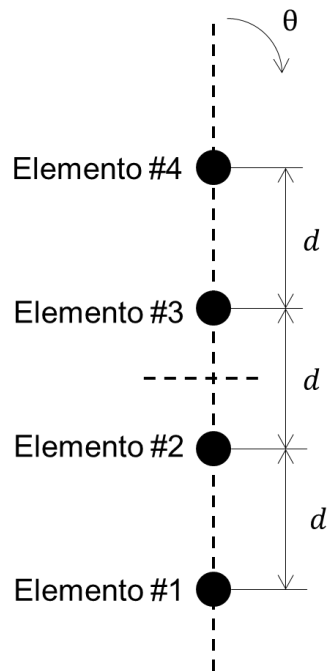
**Figura 2.3** Patrón de radiación de la antena dipolo doblado simulado en CST Studio Suite. (a) Representación tridimensional; (b) Plano E; (c) Plano H

### 2.2.2 ARREGLO LINEAL DE CUATRO ANTENAS DIPOLO DOBLADO

La cobertura local de la estación repetidora se obtiene al formar un arreglo de antenas de tal manera que su patrón de radiación se asemeje al patrón de radiación de una antena omnidireccional.

Para el diseño del arreglo lineal de 4 dipolos se concibe un arreglo *broadside* debido a que todos los dipolos estarán alimentados sin desfaseamiento por una única fuente de alimentación.

La Figura 2.4 esquematiza la distribución lineal de los dipolos.



**Figura 2.4** Disposición del arreglo de antenas

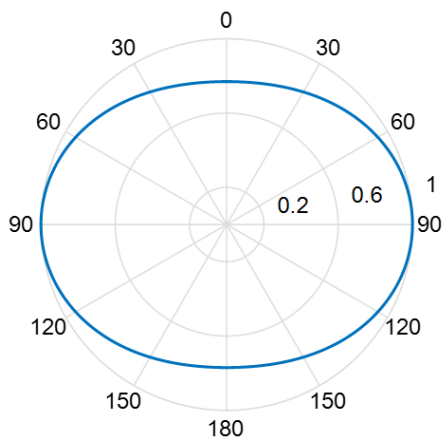
Para determinar la distancia óptima que debe existir entre cada dipolo  $d$  se utiliza el factor de arreglo el cual está determinado por la ecuación (2.1) conforme la disposición de los elementos en la Figura 2.4.

$$AF = e^{-jk\left(r+\frac{3d}{2}\cos\theta\right)} + e^{-jk\left(r+\frac{d}{2}\cos\theta\right)} + e^{-jk\left(r-\frac{3d}{2}\cos\theta\right)} + e^{-jk\left(r-\frac{d}{2}\cos\theta\right)} \quad (2.1)$$

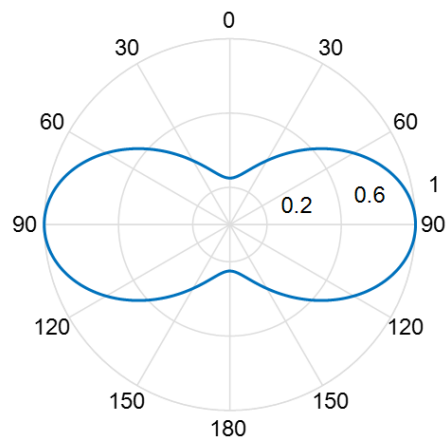
Operando la ecuación (2.1) se obtiene la ecuación (2.2):

$$AF = \cos\left(\frac{3\pi d}{\lambda}\cos\theta\right) + \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\cos\theta\right) \quad (2.2)$$

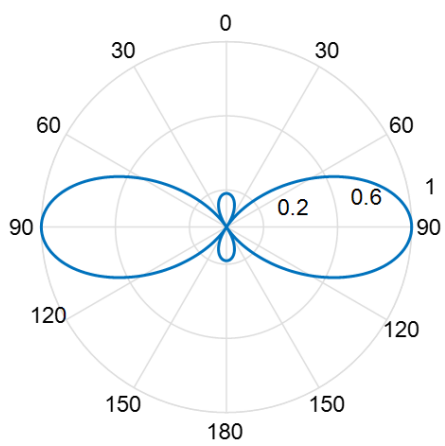
Para determinar la distancia  $d$  que maximice (en lo posible) el arreglo en la dirección en la cual se requiere una mayor radiación ( $\theta = 90$ ), se determinan las características polares del factor de arreglo para diferentes valores de  $d$  y se las multiplica por la característica de radiación correspondiente al dipolo. La Figura 2.5 ilustra los resultados obtenidos de este procedimiento.



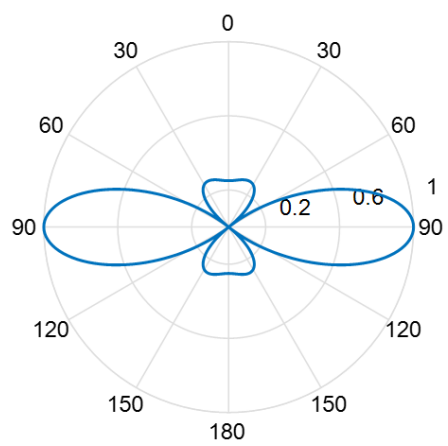
a)



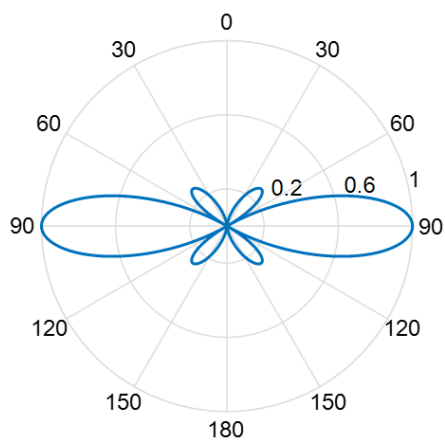
b)



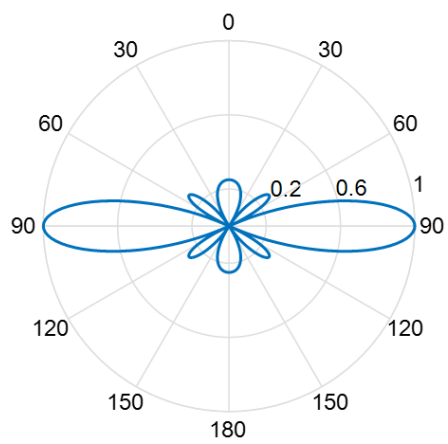
c)



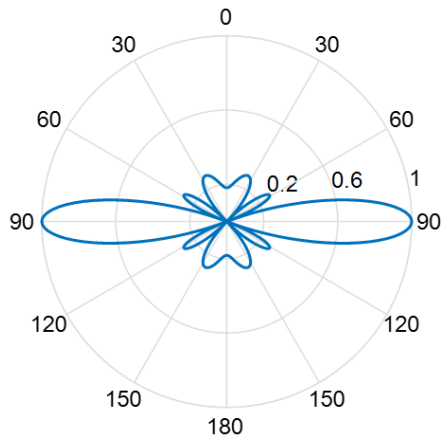
d)



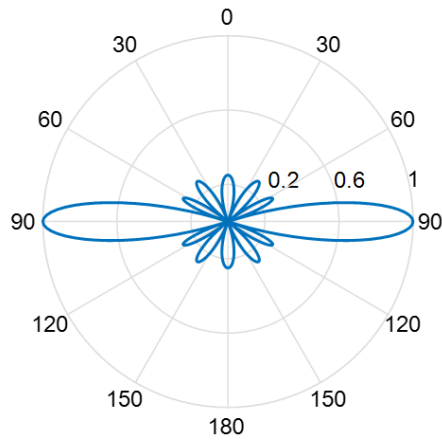
e)



f)



g)

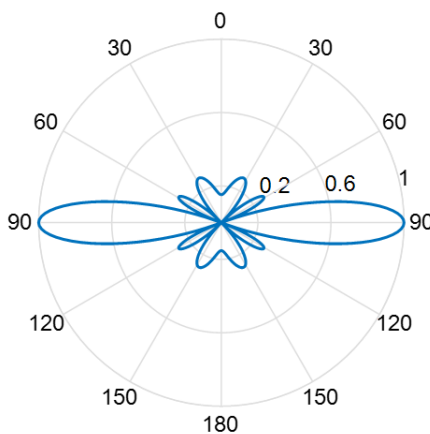


h)

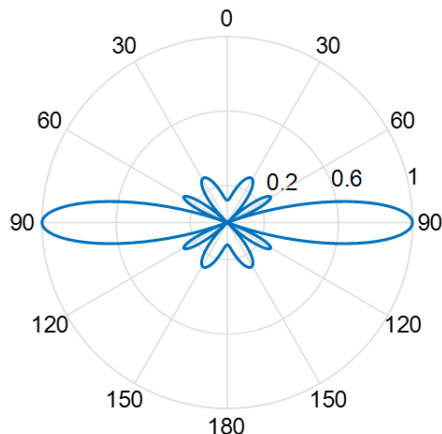
**Figura 2.5** Plano E de la característica de radiación del arreglo de 4 dipolos para valores de  $d$  entre  $0,1\lambda$  y  $0,8\lambda$ . a)  $0,1\lambda$  ; b)  $0,2\lambda$  ; c)  $0,3\lambda$  ; d)  $0,4\lambda$  ; e)  $0,5\lambda$  ; f)  $0,6\lambda$  ; g)  $0,7\lambda$  ; h)  $0,8\lambda$ .

Para optimizar el arreglo de 4 dipolos, luego de un análisis cualitativo de los resultados obtenidos, se elige una distancia en el intervalo entre  $0,7\lambda$  y  $0,8\lambda$  ya que en este rango se obtiene un lóbulo de radiación más directivo en el plano E.

Para minimizar el número de lóbulos secundarios que se generan en el arreglo, se realiza un barrido de la distancia  $d$  a pasos más pequeños. Los resultados de este procedimiento se observan en la Figura 2.6.

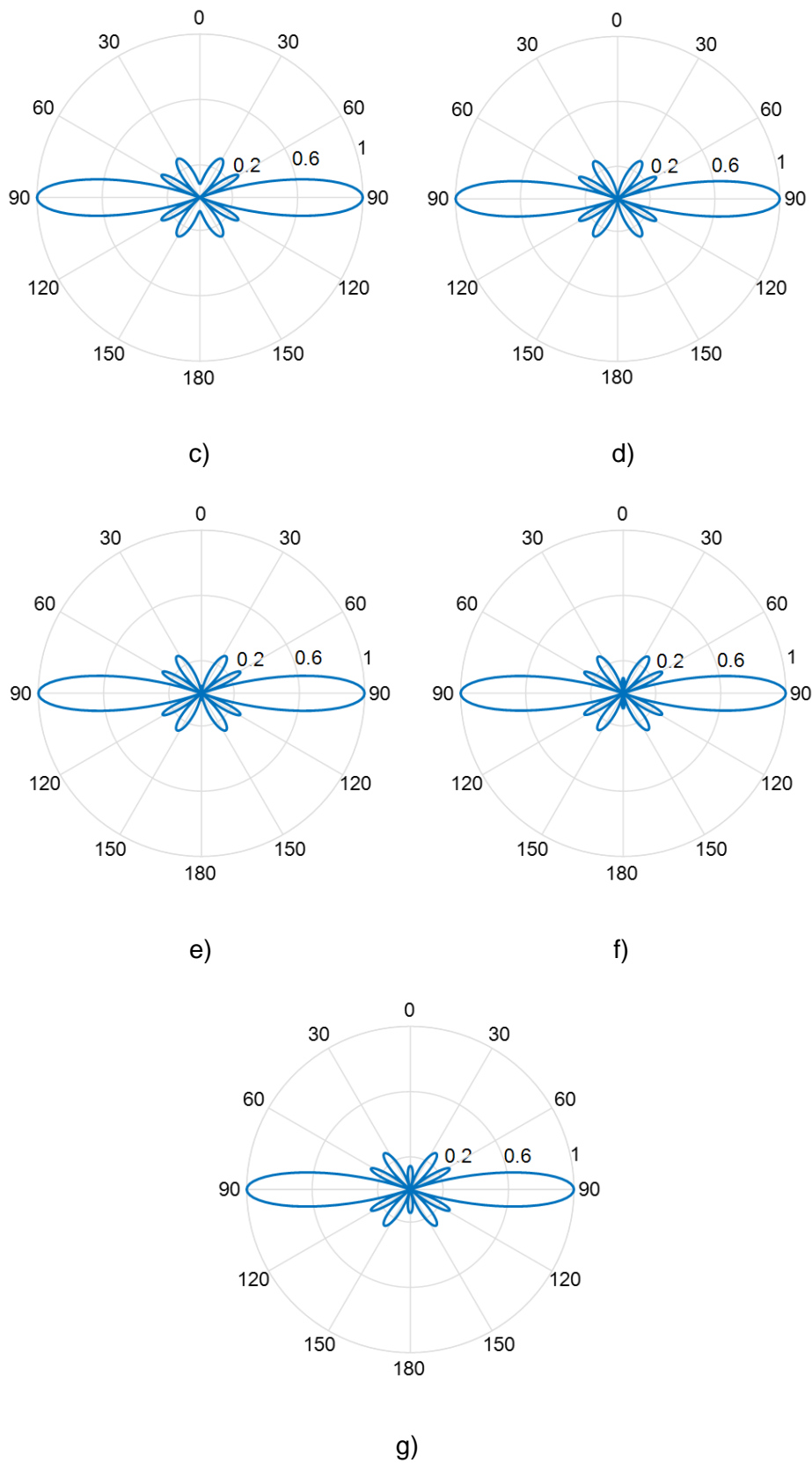


a)



b)



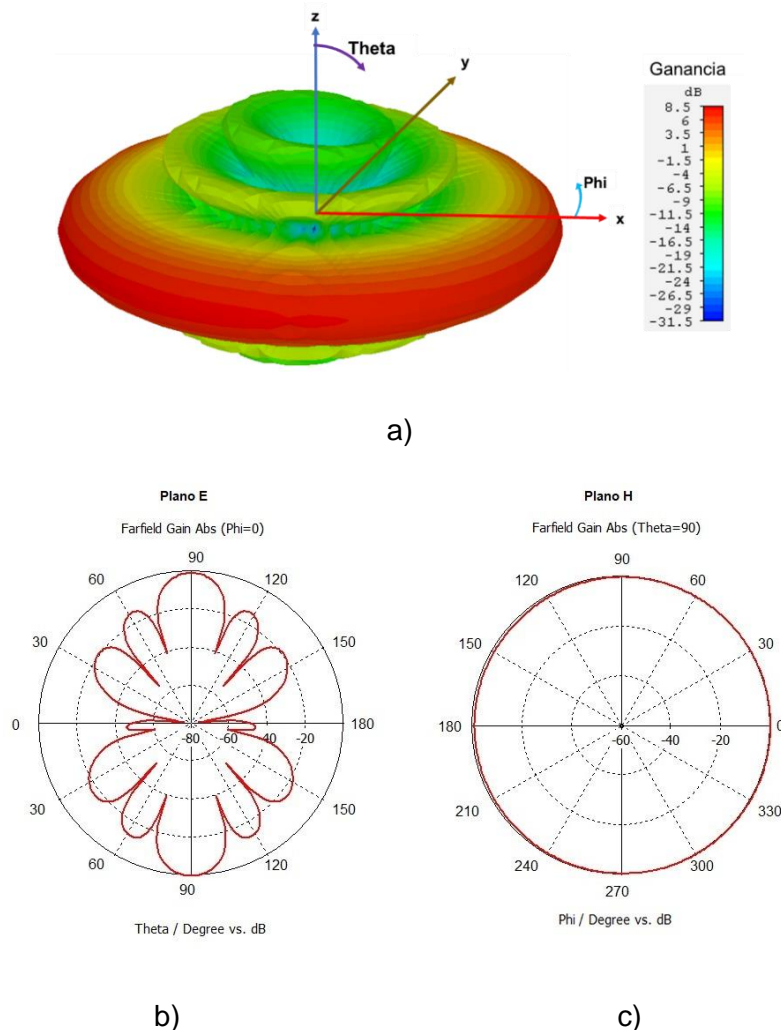


**Figura 2.6** Plano E de la característica de radiación del arreglo de 4 dipolos para valores de  $d$  entre  $0,71 \lambda$  y  $0,78 \lambda$ . a)  $0,71 \lambda$  ; b)  $0,72 \lambda$  ; c)  $0,73 \lambda$  ; d)  $0,75 \lambda$  ; e)  $0,76 \lambda$  ; f)  $0,77 \lambda$  ; g)  $0,78 \lambda$ .

Con los resultados obtenidos, se elige la distancia de  $0,76\lambda$  ya que ésta presenta un diagrama de radiación con un lóbulo principal más estrecho y con un menor número de lóbulos secundarios.

El software CST Studio Suite, permite simular un grupo de antenas únicamente construyendo una de ellas, de esta manera, el programa replica el número de antenas necesarias para el arreglo con las mismas características de diseño que la original. Como resultado, se observa en la Figura 2.7 (a) el patrón de radiación correspondiente al arreglo de 4 dipolos doblados optimizada en CST Studio Suite. Los resultados obtenidos de la simulación son  $G_{MÁX} = 8,5$  dB,  $HPBW_E = 16,8^\circ$ ,  $SLL_E = 1,2$  dB,  $FBR_E = 0$  dB.

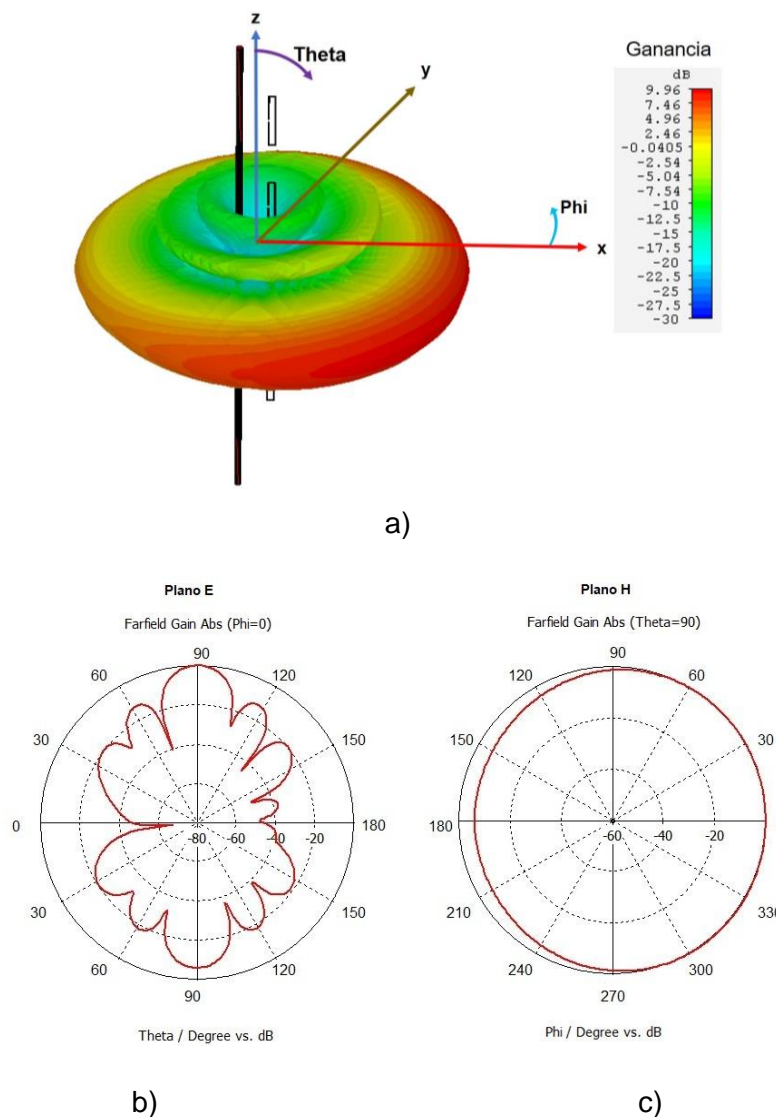
En la Figura 2.7 (b) y (c) se observan los diagramas de radiación correspondientes a los planos E y H respectivamente.



**Figura 2.7** Patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados, simulado en CST Studio Suite, partiendo del dipolo base. (a) Representación tridimensional; (b) Plano E; (c) Plano H

En la Figura 2.8 se observa los diagramas de radiación tanto en el plano E y H de la estructura final, la misma que cuenta con 4 dipolos doblados distribuidos en un arreglo lineal y un mástil de soporte de toda la estructura, éste arreglo de 4 antenas dipolo doblado cumplirá con la función de brindar el servicio de radioafición de manera local.

En la Figura 2.8 (a) se observa el patrón de radiación correspondiente a la estructura del arreglo de 4 dipolos doblados con el mástil de anclaje de la antena optimizada en CST Studio Suite. Los resultados obtenidos de la simulación son  $G_{MÁX} = 9,96$  dB,  $HPBW_E = 16,6^\circ$ ,  $FBR_E = 6,2$  dB,  $SLL_E = 10$  dB,  $HPBW_H = 218,3^\circ$ . En la Figura 2.8 (b) y (c) se observan los diagramas de radiación del plano E y H respectivamente.

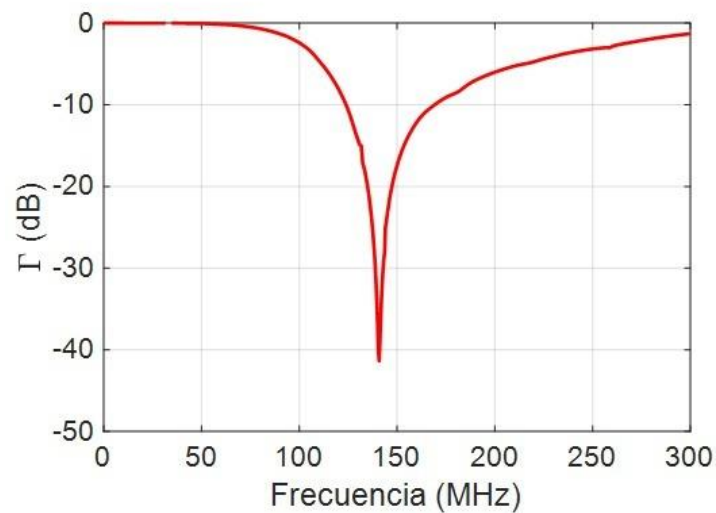


**Figura 2.8** Patrón de radiación de la antena 4 dipolos doblados a implementar.

a) Plano E; b) Plano H

Como se observa en la Figura 2.8, el mástil agregado incide en un aumento de la ganancia con un valor aproximado de 1,5 dB. De esta forma, el plano H se ve afectado por un desplazamiento hacia  $\varphi = 0^\circ$  por lo cual no se tendría una radiación omnidireccional en dicho plano.

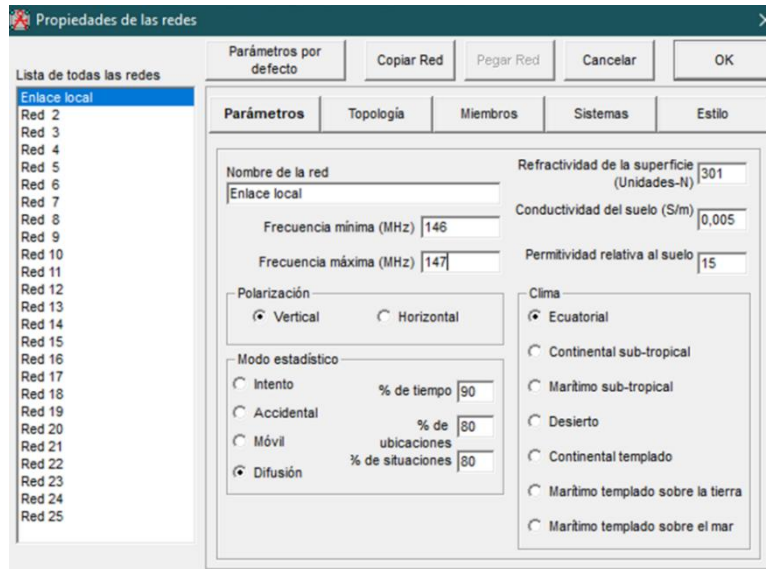
La Figura 2.9 muestra el coeficiente de reflexión obtenido en la simulación del arreglo de los 4 dipolos doblados. Se observa que la resonancia de la estructura se ha desplazado a 140 MHz, posiblemente por la interacción con el mástil y en sí por el acoplamiento mutuo existente entre elementos. Sin embargo, a la frecuencia de 146 MHz, la estructura continúa presentando un coeficiente de reflexión adecuado de -21 dB.



**Figura 2.9** Coeficiente de reflexión del arreglo conformado de 4 dipolos doblados

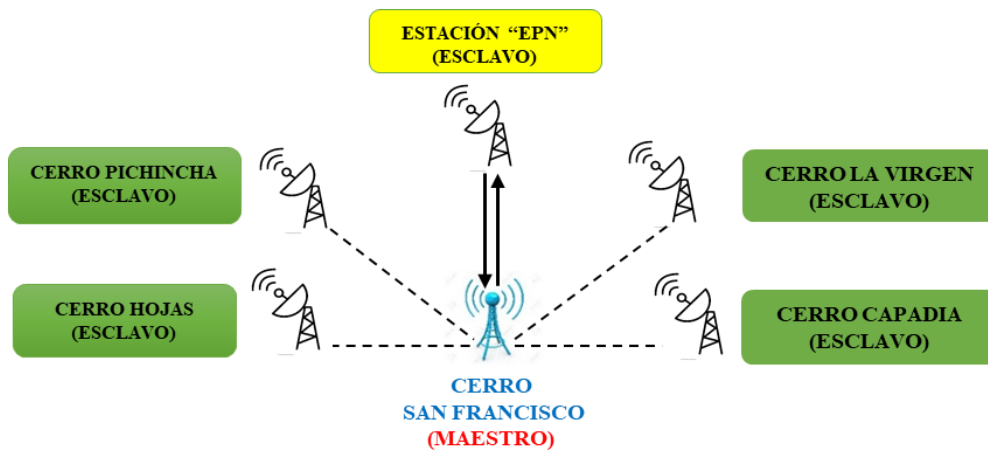
#### *Parámetros de configuración del software Radio Mobile*

La Figura 2.10 muestra la ventana de configuración del software Radio Mobile en el cual es posible establecer algunos parámetros de la red de radio a simular tales como la frecuencia de operación de la antena, el tipo de polarización, clima y el modo estadístico, en este caso de difusión (*broadcasting*).



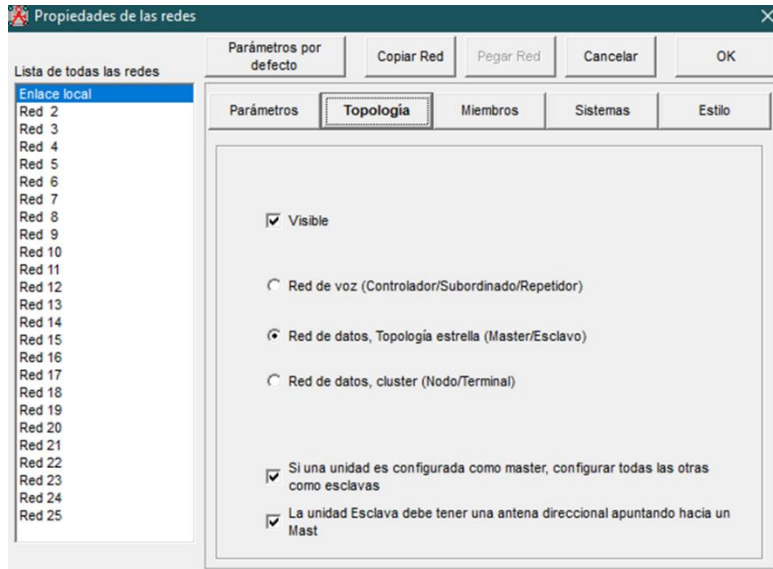
**Figura 2.10** Configuración de parámetros de la red de radio en el software Radio Mobile

La Figura 2.11 muestra un ejemplo de la topología en estrella a configurar en el simulador Radio Mobile.



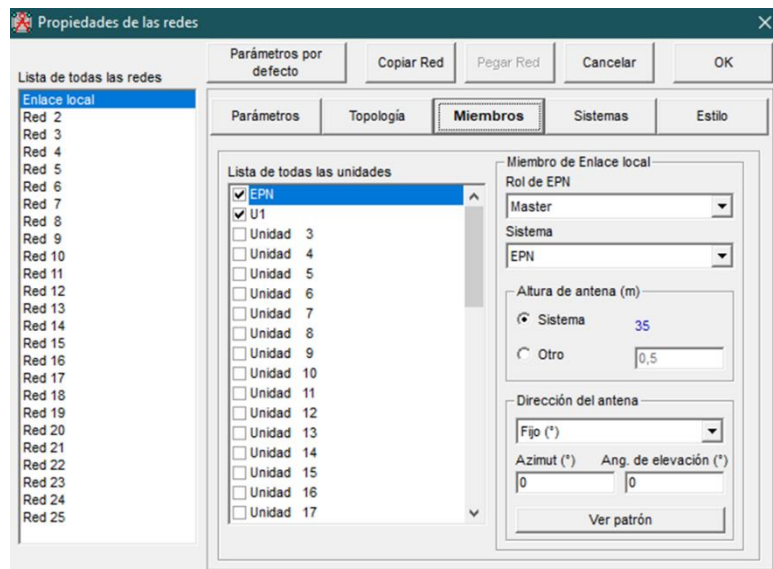
**Figura 2.11** Topología estrella (MAESTRO-ESCLAVO) del Sistema Nacional Interconectado de radioaficionados

En la Figura 2.12 se observa la configuración para establecer el tipo de topología a implementar, en este caso, es del tipo estrella ya que existirá un dispositivo que cumple con las funciones de Maestro y otro como Esclavo.



**Figura 2.12** Configuración de topología MAESTRO-ESCLAVO del radioenlace en el software Radio Mobile

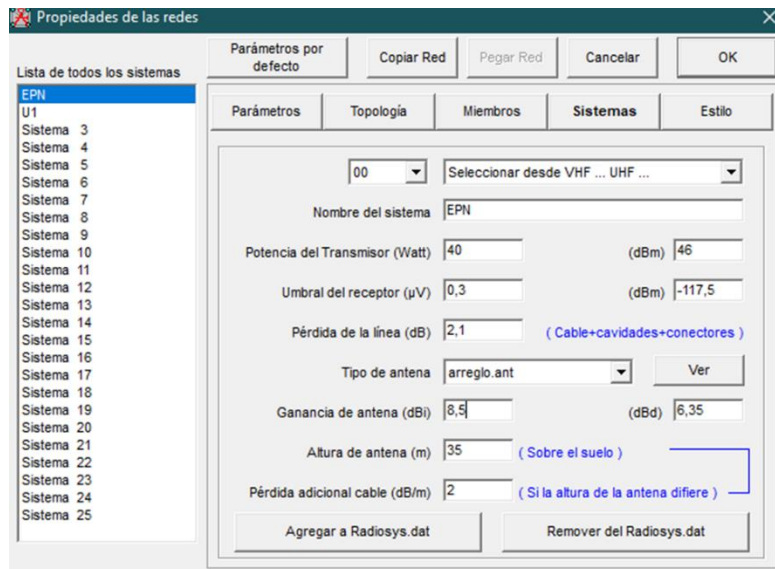
En la Figura 2.13 se muestra la configuración de los dispositivos. Se asigna la función que los elementos van a desempeñar. Para la estación repetidora (EPN), la antena cumplirá su función como Maestro y un dispositivo de comunicaciones (U1) cualquiera será el esclavo en la topología.



**Figura 2.13** Configuración de funciones de los dispositivos en el radioenlace en el software Radio Mobile

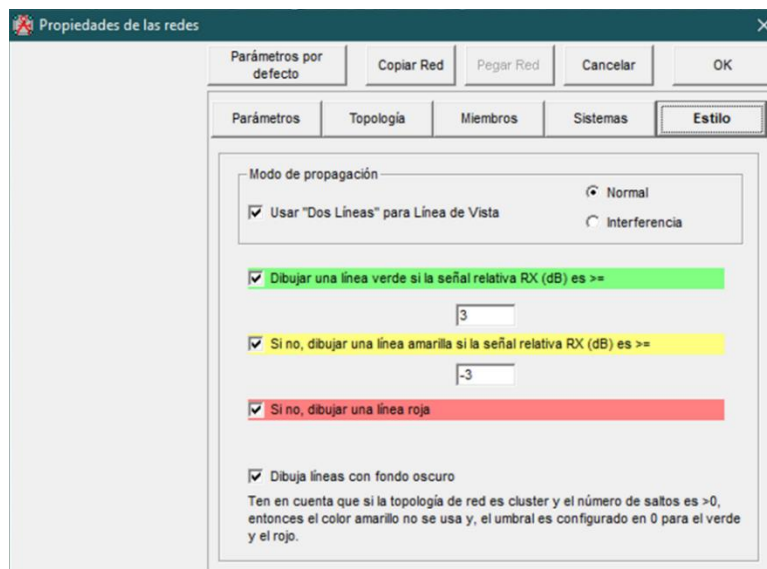
En la Figura 2.14 se muestra la configuración de los parámetros de operación de la estación entre los cuales constan la potencia de transmisión, el umbral de recepción, pérdidas en la línea, ganancia de la antena y otras características estructurales y mecánicas de la antena

de arreglo de 4 dipolos. Los parámetros mencionados fueron tomados de la información proporcionada por el QUITO RADIO CLUB debido a que son los valores que ellos utilizan en su red.



**Figura 2.14** Configuración de parámetros de operación del arreglo de 4 dipolos doblados en el software Radio Mobile

En la Figura 2.15 se presenta la configuración del estilo con el cual se apreciará, en base a colores, los resultados de la simulación del enlace local. Adicionalmente, en la ventana se muestra la opción de selección del modo de propagación.

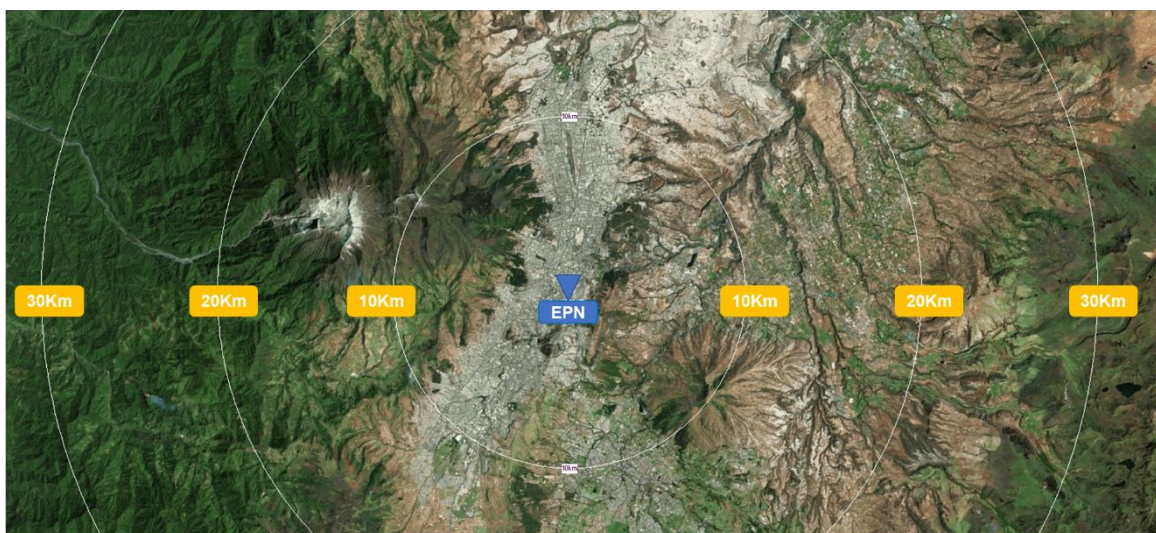


**Figura 2.15** Configuración del modo de propagación en el software Radio Mobile



### Simulación de cobertura

En la Figura 2.16 se presenta el resultado de la simulación realizada en la herramienta Radio Mobile en la cual se observa la distribución de los anillos de cobertura dentro de los cuales está en operación la antena de arreglo de 4 dipolos.



**Figura 2.16** Nodo fijo “EPN” - Anillos de cobertura (Radio Mobile)

Para este tipo de simulaciones se toma en cuenta parámetros variables como son la polarización de la antena, frecuencia máxima y mínima de operación, entre otros. En la Tabla 2.4 se muestran los parámetros generales y del modo estadístico que pueden configurarse en el software Radio Mobile.

El software Radio Mobile utiliza el modelo de propagación Longley-Rice el cual permite seleccionar entre un modo de propagación normal que no toma en cuenta las interferencias generadas por otros sistemas operativos de radio y un modo de interferencias que sí lo hace. Al seleccionar el modo de propagación normal no se toman en cuenta factores que afectan el enlace, por ello los parámetros de variabilidad de tiempo, ubicaciones y situaciones se establecen en mayor porcentaje para equiparar la ausencia de dichos factores.



**Tabla 2.4** Parámetros de configuración modelo Longley-Rice en el software Radio Mobile

| <b>Parámetros Generales</b>            |   |
|--|---|
| <b>Parámetro</b>                       | <b>Descripción</b>  |
| Frecuencia de operación                | Rango de frecuencias de operación del radioenlace   |
| Clima                                  | Selección del tipo de clima para la implementación del radio enlace   |
| Polarización                           | Especificación del tipo de polarización de la antena  |
| Refractividad de la superficie         | Cuantifica la cantidad de refracción a la que se someten las ondas de radio   |
| Conductividad del suelo                | Dependiendo del tipo de suelo en el cual se realiza la simulación varía el valor de este parámetro  |
| Permitividad relativa del suelo        | Determina el valor de la constante dieléctrica relativa del medio   |
| <b>Parámetros del modo estadístico</b> |   |
| <b>Parámetro</b>                       | <b>Descripción</b>  |
| % de tiempo                            | Permite especificar el porcentaje de tiempo de operación de la estación y la influencia de los cambios climáticos mientras esté activo el radioenlace           |
| % de ubicaciones                       | Permite especificar el porcentaje de variabilidad entre 2 trayectos distintos causada por diferencias en los perfiles del terreno o factores ambientales        |
| % de situaciones                       | Permite determinar el porcentaje de afectación que generan enlaces de radio presentes en el área de interés. Un ejemplo es la interferencia presente en el aire |

Los parámetros del modo estadístico, con algunas variaciones en sus configuraciones, permiten identificar las mejores y peores condiciones de operación.

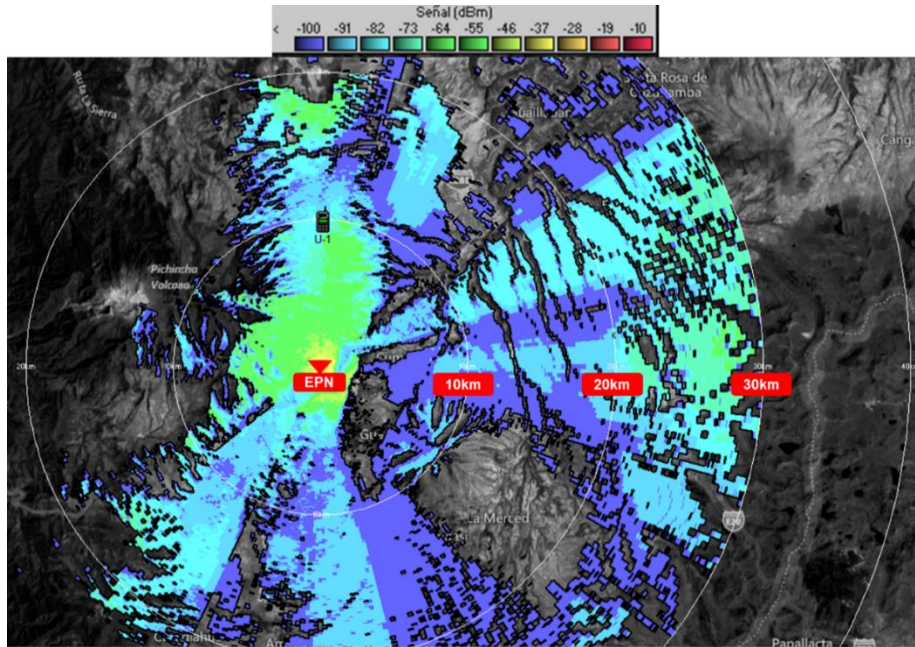
La Tabla 2.5 muestra las diferentes opciones de configuración para la simulación en el software Radio Mobile con potencia de transmisión, modelo de propagación y variaciones de los parámetros del modo estadístico.

**Tabla 2.5** Opciones de configuración para determinar el comportamiento del radioenlace en el software Radio Mobile

| Opción          | Parámetro               | Valor          |
|-----------------|-------------------------|----------------|
| <b>Opción 1</b> | Potencia de transmisión | 40 W           |
|                 | % de tiempo             | 90%            |
|                 | % de ubicaciones        | 80%            |
|                 | % de situaciones        | 80%            |
|                 | Modo de propagación     | Normal         |
| <b>Opción 2</b> | Potencia de transmisión | 40 W           |
|                 | % de tiempo             | 90%            |
|                 | % de ubicaciones        | 50%            |
|                 | % de situaciones        | 50%            |
|                 | Modo de propagación     | Interferencias |
| <b>Opción 3</b> | Potencia de transmisión | 5 W            |
|                 | % de tiempo             | 90%            |
|                 | % de ubicaciones        | 80%            |
|                 | % de situaciones        | 80%            |
|                 | Modo de propagación     | Normal         |
| <b>Opción 4</b> | Potencia de transmisión | 5 W            |
|                 | % de tiempo             | 90%            |
|                 | % de ubicaciones        | 50%            |
|                 | % de situaciones        | 50%            |
|                 | Modo de propagación     | Interferencias |

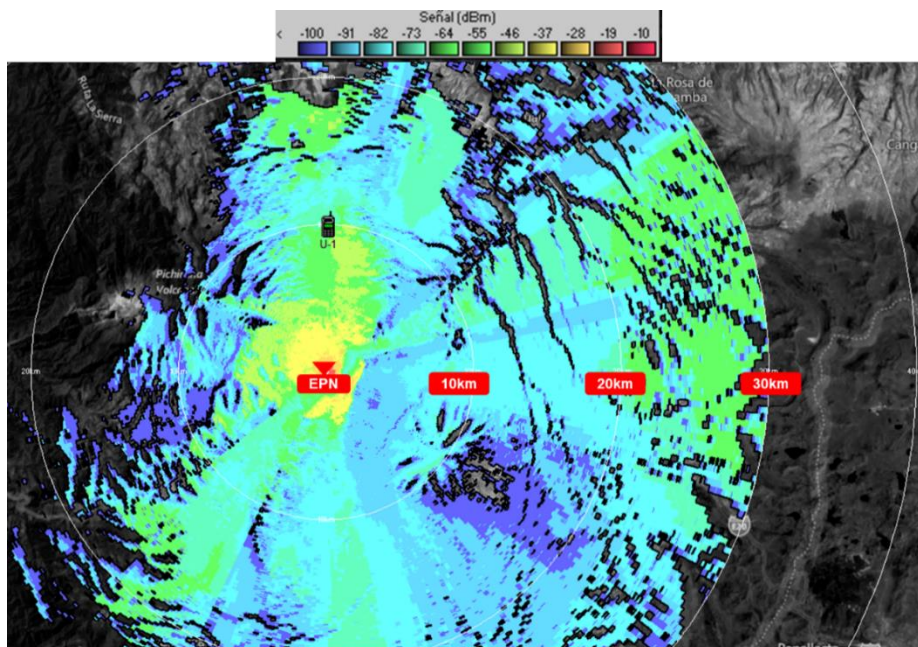
En la Tabla 2.5, los datos de potencia de transmisión empleados representan los valores comunes utilizados por los equipos de las estaciones repetidoras. En la práctica, el servicio de radioafición en Ecuador, adoptó el valor de 5 W como potencia mínima de transmisión y 40 W como la potencia máxima de operación del sistema [12].

En la Figura 2.17 se presenta los resultados de la simulación de cobertura obtenida en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 1.



**Figura 2.17** Simulación de la cobertura local de la antena arreglo de 4 dipolos de la estación “EPN” en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 1

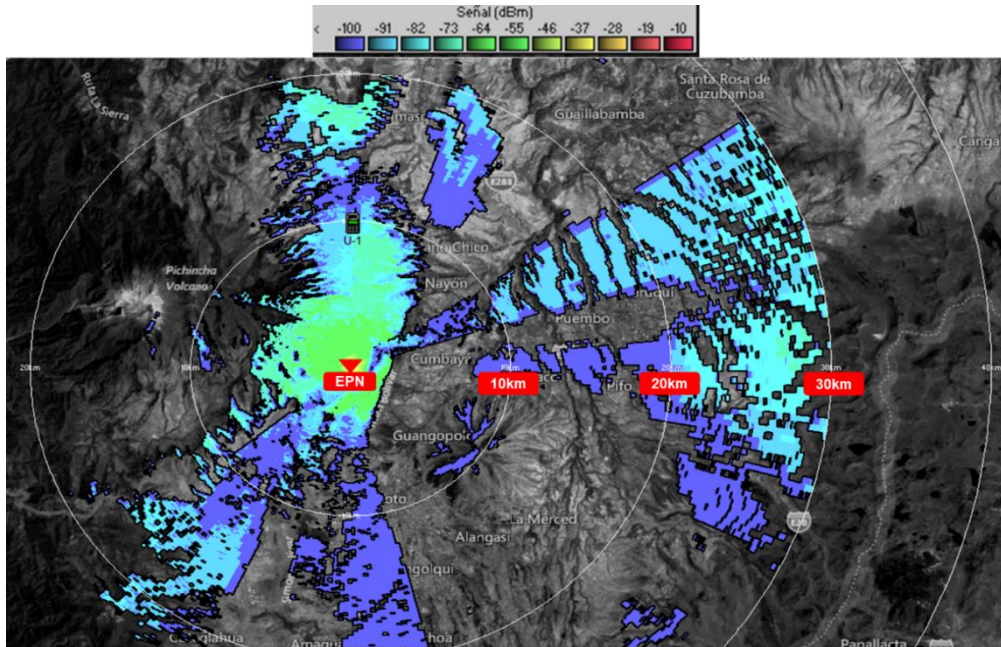
La Figura 2.18 muestra los resultados de la simulación de cobertura obtenida en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2.



**Figura 2.18** Simulación de la cobertura local de la antena arreglo de 4 dipolos de la estación “EPN” en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2

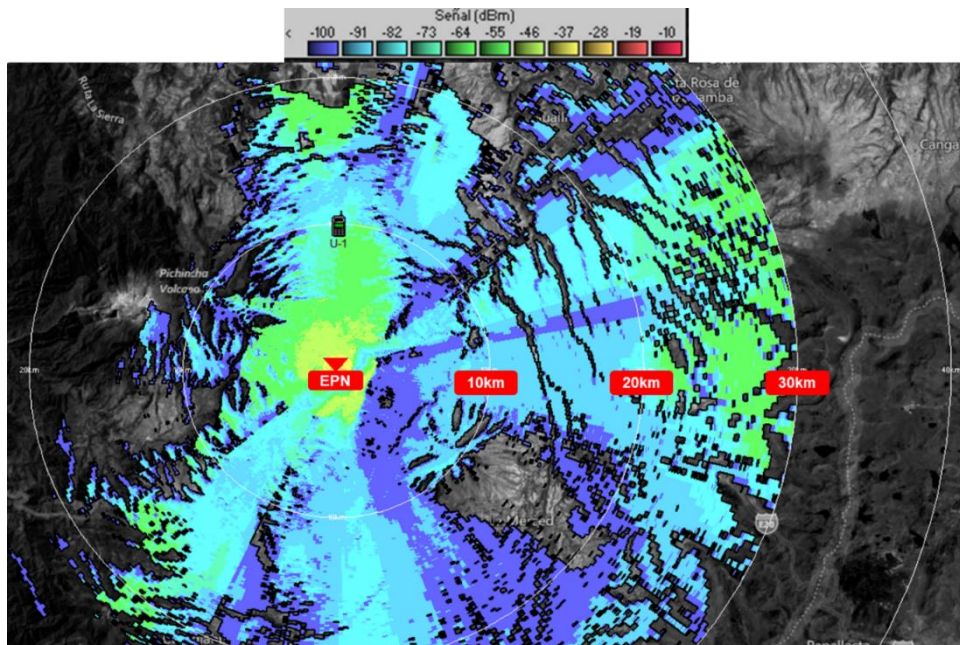
En la Figura 2.19 se presentan los resultados de la simulación de cobertura obtenida en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3.





**Figura 2.19** Simulación de la cobertura local de la antenna arreglo de 4 dipolos de la estación “EPN” en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3

La Figura 2.20 muestra los resultados de la simulación de cobertura obtenida en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 4.



**Figura 2.20** Simulación de la cobertura local de la antenna arreglo de 4 dipolos de la estación “EPN” en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 4

Con los resultados obtenidos en las opciones de cobertura presentadas, al simular las configuraciones de la Tabla 2.5 se concluye que el nivel de cobertura que cumple con las expectativas de operación local esperadas es la Opción 2 mostrada en la Figura 2.18.

Esta configuración presenta valores de potencia de recepción entre  $-46$  dBm y  $-64$  dBm cuando el equipo receptor está ubicado a 10 km de la estación “EPN” y un nivel de potencia de recepción entre  $-73$  dBm y  $-91$  dBm cuando el equipo receptor está ubicado a 20 km de la estación “EPN”.

Los valores de potencia en recepción obtenidos representan un valor aceptable de operación, ya que por la experiencia en campo del Quito Radio Club manejan un valor mínimo de recepción de  $-120$  dBm.

En las peores condiciones de operación (Opción 3) se obtienen valores entre  $-73$  dBm a  $-91$  dBm cuando el receptor se ubica a 10 km de la estación “EPN”, zona de cobertura donde no se cubre completamente el radio de 10 km.

### 2.2.3 ANTENA YAGI-UDA

La conexión con el Sistema Nacional Interconectado se realiza por medio de una antena Yagi-Uda. La estación repetidora “EPN” establece un radioenlace punto a punto con el nodo central ubicado en el Cerro “San Francisco”.

Para determinar la ganancia de la antena Yagi-Uda se utiliza la ecuación (2.3) conocida como la ecuación de transmisión de Friis [15].

$$P_{Rx} = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (2.3)$$

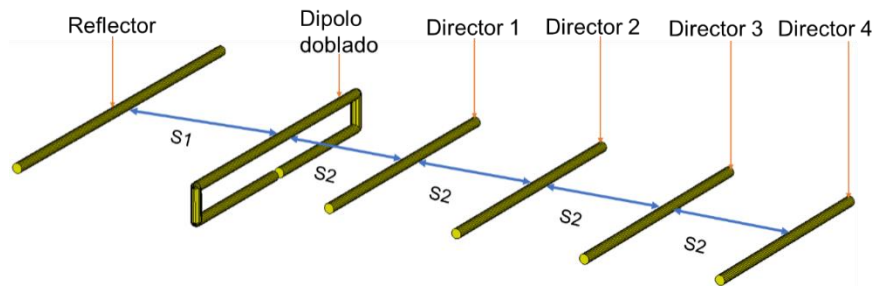
La Tabla 2.6 muestra los valores que el QUITO RADIO CLUB utiliza para el diseño de las antenas que se emplean en los radioenlaces punto a punto con el nodo central del Cerro “San Francisco”. La distancia que existe entre el Cerro “San Francisco” y la estación “EPN” es de 24 km.

**Tabla 2.6** Valores definidos por el QUITO RADIO CLUB para el diseño de las antenas del radioenlace punto a punto con el “CEREBRO” - “San Francisco”

| Parámetro                            | Valor   |
|--------------------------------------|---------|
| Potencia del transmisor (W)          | 10      |
| Umbral del receptor (mV)             | 0,5 - 1 |
| Ganancia de antena de Recepción (dB) | 7       |
| Frecuencia de operación (MHz)        | 220     |

El diseño de la antena del radioenlace punto a punto se realiza en base al valor referencial de ganancia de una antena Yagi-Uda de 6 elementos que es 12 dB [15]. Además, la antena Yagi-Uda a implementar cumple con las condiciones de ser liviana y de fácil instalación para evitar que el peso de la antena produzca un torque entre el mástil de la antena y el soporte principal de anclaje.

La estructura de la antena cuenta con un reflector, un dipolo doblado como elemento activo y 4 directores, como se observa en la Figura 2.21.



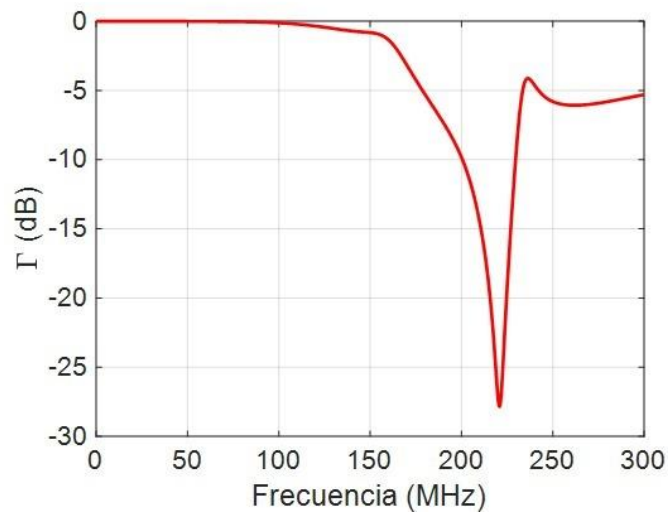
**Figura 2.21** Estructura de la antena Yagi-Uda

En la Tabla 2.7 se muestran las dimensiones de la antena Yagi-Uda a implementar.

**Tabla 2.7** Dimensiones de la antena Yagi-Uda

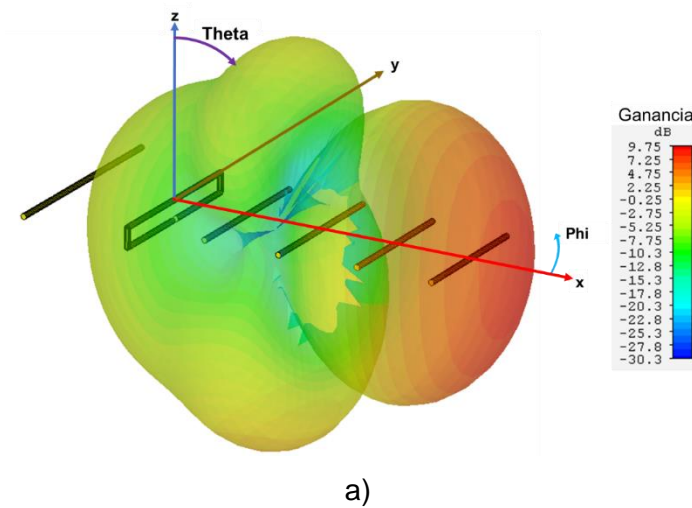
| Elemento       | Longitud      |
|----------------|---------------|
| Reflector      | $0,55\lambda$ |
| S1             | $0,25\lambda$ |
| S2             | $0,20\lambda$ |
| Dipolo doblado | $0,43\lambda$ |
| Director 1     | $0,40\lambda$ |
| Director 2     | $0,40\lambda$ |
| Director 3     | $0,36\lambda$ |
| Director 4     | $0,36\lambda$ |

La Figura 2.22 muestra el coeficiente de reflexión obtenido al simular la antena Yagi-Uda en CST Studio Suite utilizando el método de elementos finitos. Se observa que a una frecuencia de 220 MHz el coeficiente de reflexión es de  $-27$  dB con un ancho de banda a  $-10$  dB de 42,48 MHz ( $\approx 19\%$ ).

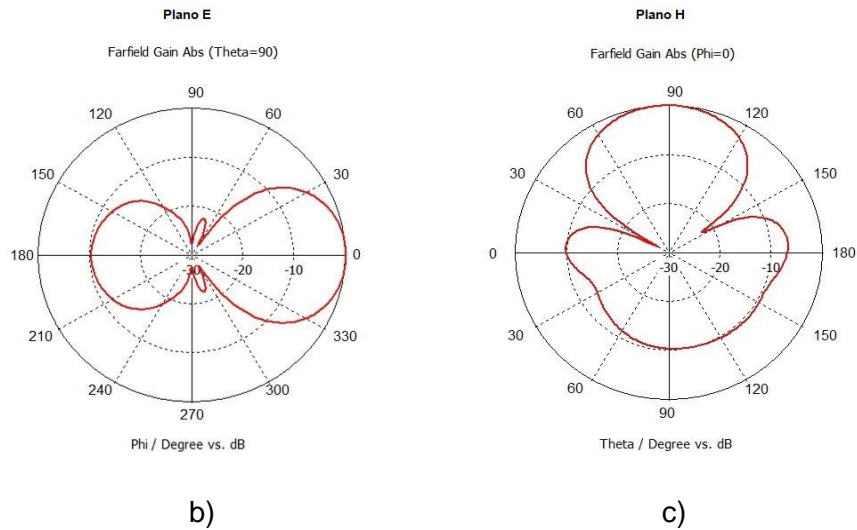


**Figura 2.22** Coeficiente de reflexión simulado de la antena Yagi-Uda diseñada

La Figura 2.23 muestra el patrón de radiación de la antena Yagi-Uda. La ganancia máxima simulada es de 9,75 dB,  $HPBW_E = 51,2^\circ$ ,  $FBR_E = 10,4$  dB,  $SLL_E = 23$  dB,  $HPBW_H = 63,8^\circ$ ,  $FBR_H = 6,8$  dB.



a)



**Figura 2.23** Patrón de radiación normalizado de la antena Yagi-Uda simulado en CST Studio Suite. (a) Representación tridimensional; (b) Plano E; (c) Plano H

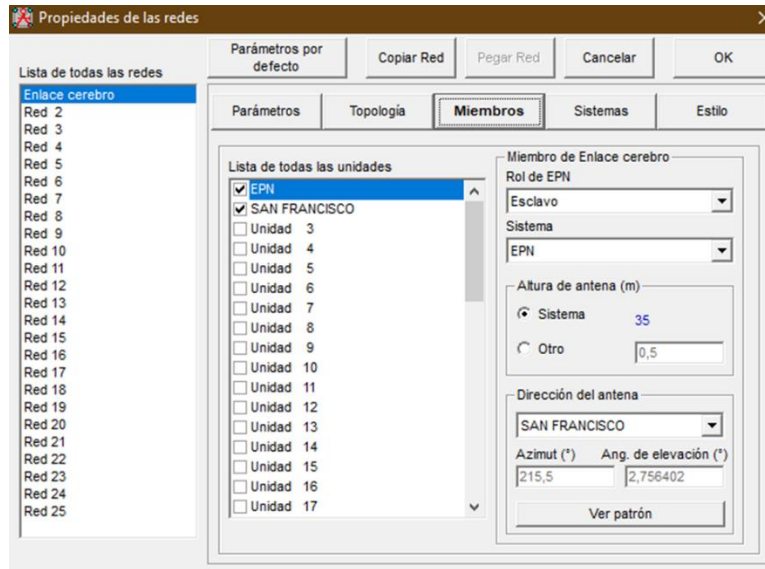
#### *Parámetros de configuración del software Radio Mobile*

Se configura la simulación en Radio Mobile similar a lo mostrado en la Figura 2.10 con los parámetros: Frecuencia máxima de operación = 225 MHz y frecuencia mínima de operación = 220 MHz.

La topología del sistema es la misma empleada en la Figura 2.12.

En la Figura 2.24 se muestra la configuración de los dispositivos asignando la función de cada nodo. En el caso de la estación “EPN”, la antena opera como Esclavo mientras que el Nodo “CEREBRO” - “San Francisco” será el Maestro en la topología correspondiente.





**Figura 2.24** Configuración de funciones de los dispositivos en el radioenlace entre la estación repetidora “EPN” como esclavo y Nodo “San Francisco” como maestro en el software Radio Mobile

Se configura la simulación en Radio Mobile similar a lo mostrado en la Figura 2.14 con los parámetros descritos en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8** Parámetros de los dispositivos en el radioenlace entre la estación repetidora “EPN” y Nodo “San Francisco” en el software Radio Mobile [12].

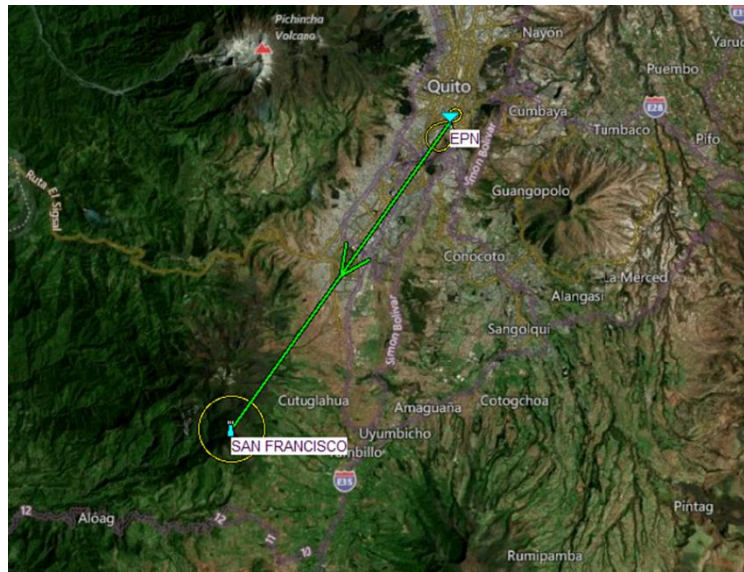
| Parámetro                      | EPN      | San Francisco   |
|--------------------------------|----------|-----------------|
| Potencia del transmisor (W)    | 40       | 20              |
| Umbral del receptor ( $\mu$ V) | 0,3      | 0,3             |
| Pérdida de la línea (dB)       | 2,1      | 2,1             |
| Tipo de antena                 | Yagi-Uda | Omnidireccional |
| Ganancia de antena (dB)        | 9,8      | 7               |
| Altura de la antena (m)        | 35       | 40              |
| Pérdidas adicionales (dB/m)    | 2        | 2               |

Se configura la simulación en Radio Mobile similar a lo mostrado en la Figura 2.15 con el modo de propagación correspondiente.

*Simulación del radioenlace Nodo “EPN” hacia Nodo “San Francisco”*

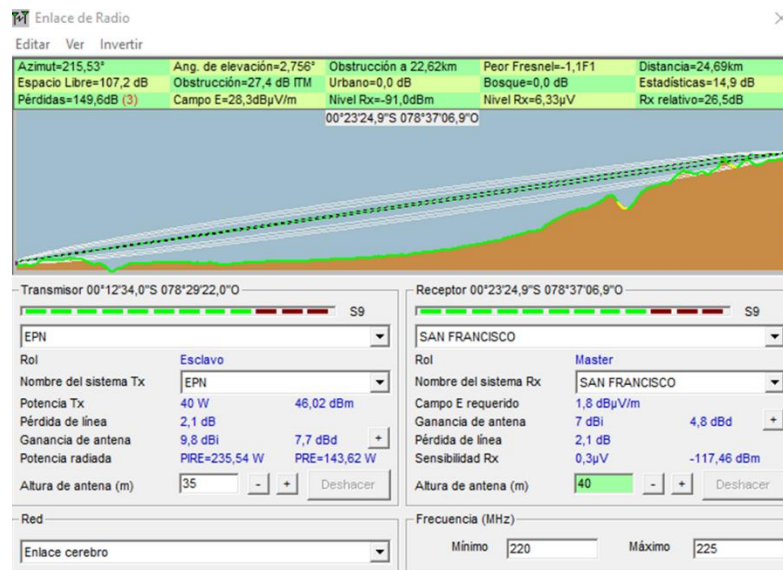
En la Figura 2.25 se presenta el escenario geográfico en el cual se simula el radioenlace entre la estación repetidora ubicada en el Nodo “EPN” y el Nodo “CEREBRO”

“San Francisco” separados a una distancia aproximada de 24 km, este último se encuentra a una altura de 4000 msnm.



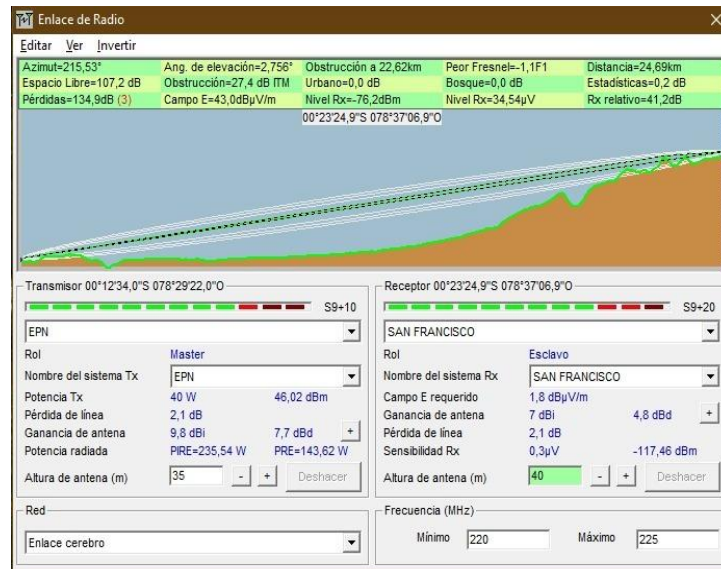
**Figura 2.25** Escenario geográfico del radioenlace entre Nodo "EPN" hacia Nodo "San Francisco"

En la Figura 2.26 se presentan los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 1.



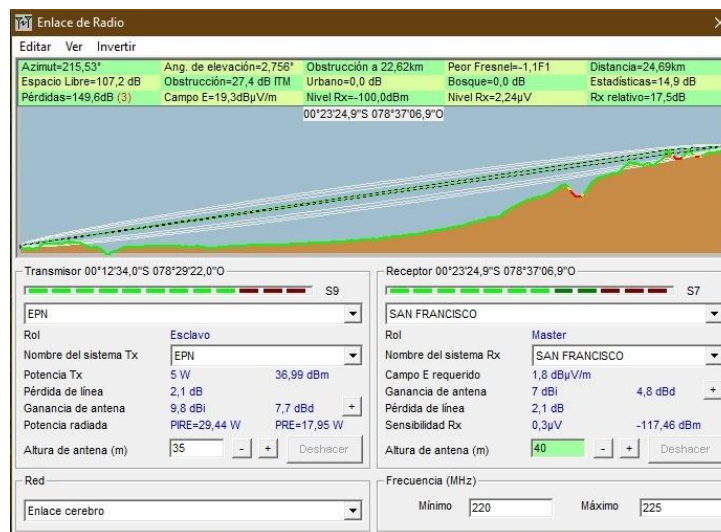
**Figura 2.26** Simulación del enlace punto a punto con la antena Yagi-Uda entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 1

La Figura 2.27 presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2.



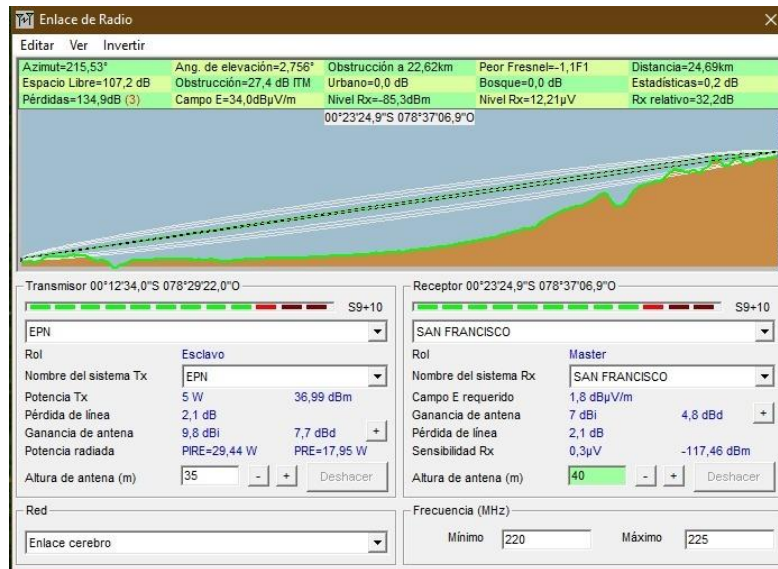
**Figura 2.27** Simulación del enlace punto a punto con la antena Yagi-Uda entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2

En la Figura 2.28 se presentan los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3.



**Figura 2.28** Simulación del enlace punto a punto con la antena Yagi-Uda entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3

La Figura 2.29 presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 4.



**Figura 2.29** Simulación del enlace punto a punto con la antena Yagi-Uda entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 4

Con los resultados obtenidos en las opciones del radioenlace punto a punto propuesto, al simular las configuraciones de la Tabla 2.5 se concluye que el nivel de potencia que cumple con las expectativas de operación esperada es la Opción 2 mostrada en la Figura 2.27.

Este radioenlace presenta un nivel de potencia de recepción de  $-76,2$  dBm, pérdidas por propagación total de  $134,9$  dB, la frecuencia promedio de  $222,5$  MHz y el modo de propagación es por difracción con una obstrucción a  $22,6$  km de la estación “EPN”.

El nivel de potencia en recepción representa un valor aceptable de operación, puesto que, por la experiencia en campo, el Quito Radio Club maneja un valor mínimo de recepción de  $-120$  dBm y un valor máximo de  $-40$  dBm. Para considerar un enlace confiable la ARCOTEL sugiere un nivel de recepción superior a los  $-40$  dBm [12].

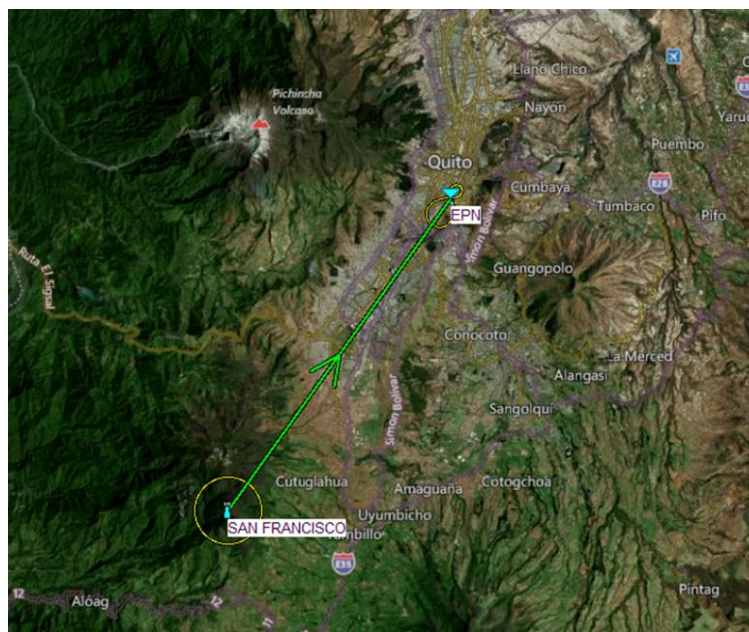
En la peor condición de operación (Opción 3) se obtiene un nivel de potencia de recepción de  $-100$  dBm, pérdidas por propagación total de  $149,6$  dB, la frecuencia promedio de  $222,5$  MHz y el modo de propagación es por difracción con una obstrucción a  $22,6$  km de la estación “EPN”.



### *Simulación de Radioenlace Nodo "San Francisco" hacia Nodo "EPN"*

La simulación del radioenlace punto a punto en el sentido Nodo "San Francisco" a Nodo "EPN" se realiza para determinar las características de funcionamiento de las antenas, operando el primero nodo como transmisor y la estación "EPN" como receptor.

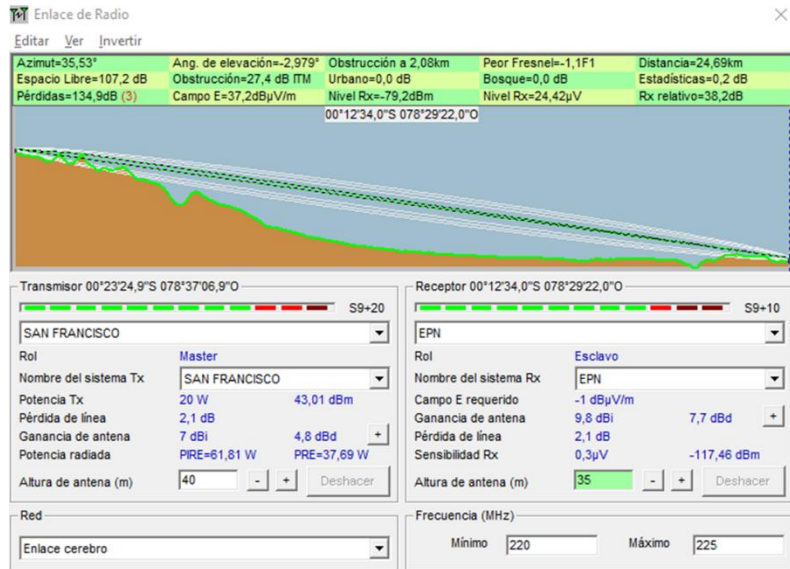
En la Figura 2.30, se presenta el escenario geográfico en el cual se simula el radioenlace entre la estación ubicada en el Nodo "San Francisco" y el Nodo "EPN".



**Figura 2.30** Escenario geográfico del radioenlace entre Nodo "San Francisco" hacia Nodo "EPN"

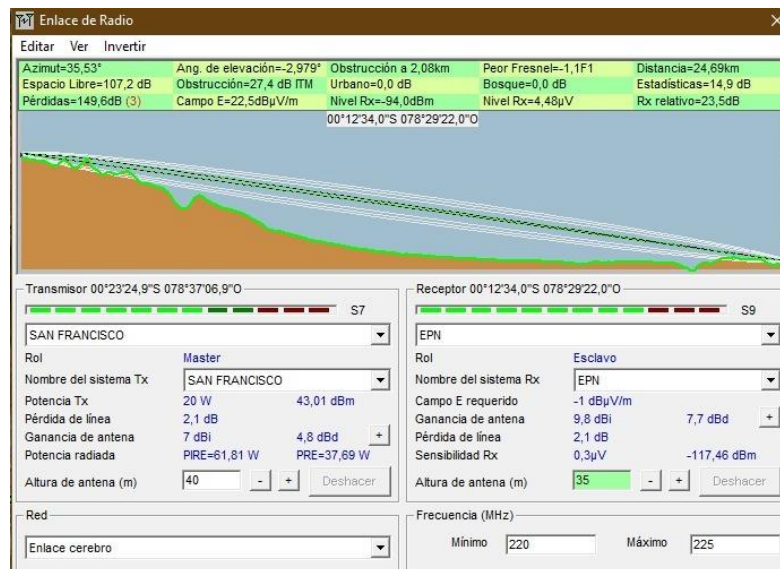
Debido a que en la simulación de Radioenlace Nodo "EPN" hacia Nodo "San Francisco" se determina que la mejor condición de recepción se obtiene con los datos de la Opción 2 y la peor condición con los datos de la Opción 3 se procede a simular estas mismas opciones con el cambio de rol entre ambas estaciones.

La Figura 2.31 presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo "San Francisco" como transmisor y el Nodo "EPN" como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2.



**Figura 2.31** Simulación del enlace punto a punto con la antena omnidireccional entre el Nodo “San Francisco” como transmisor y el Nodo “EPN” como receptor con antena Yagi-Uda en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2

En la Figura 2.32 se presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “San Francisco” como transmisor y el Nodo “EPN” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3.



**Figura 2.32** Simulación del enlace punto a punto con la antena omnidireccional entre el Nodo “San Francisco” como transmisor y el Nodo “EPN” como receptor con antena Yagi-Uda en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3

El radioenlace (Opción 2) presenta un nivel de potencia de recepción de  $-79,2$  dBm, pérdidas por propagación total de  $134,9$  dB, la frecuencia promedio de  $222,5$  MHz y el modo de propagación es por difracción con una obstrucción a  $2,1$  km de la estación “San Francisco”.

En la peor condición de operación se alcanza un nivel de potencia de recepción de  $-94$  dBm, pérdidas por propagación total de  $149,6$  dB, la frecuencia promedio de  $222,5$  MHz y el modo de propagación es por difracción con una obstrucción a  $2,1$  km de la estación “San Francisco”.

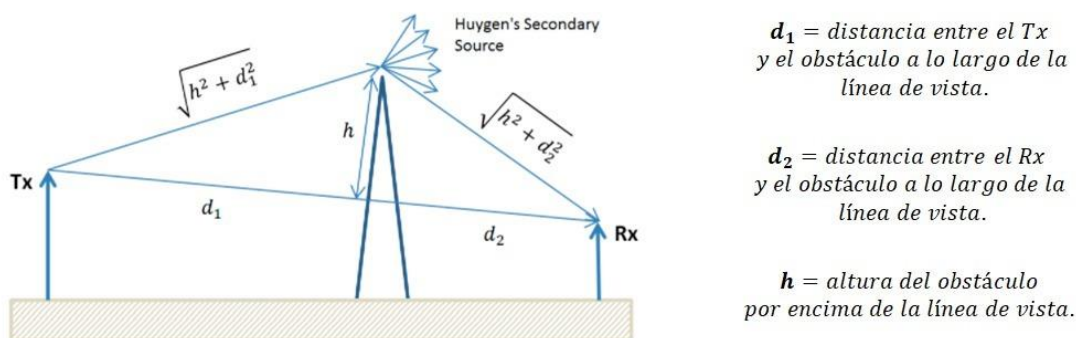
Al comparar los resultados obtenidos entre la Figura 2.27 y Figura 2.31 se concluye que el nivel de potencia de recepción se incrementa en  $3$  dB cuando el radioenlace está en el sentido Nodo “EPN” hacia Nodo “San Francisco”. De la misma forma, al comparar los resultados entre la Figura 2.28 y Figura 2.32, el nivel de potencia de recepción se incrementa en  $6$  dB cuando el radioenlace está en el sentido Nodo “San Francisco” hacia Nodo “EPN”.

*Modelo de propagación “FILO DE CUCHILLO” [16]*

El radioenlace entre el Nodo “EPN” y el Nodo “CEREBRO”, según las simulaciones obtenidas, presenta pérdidas por obstrucción en una zona montañosa. La obstrucción descrita está ubicada a  $2,1$  km del Nodo “CEREBRO”.

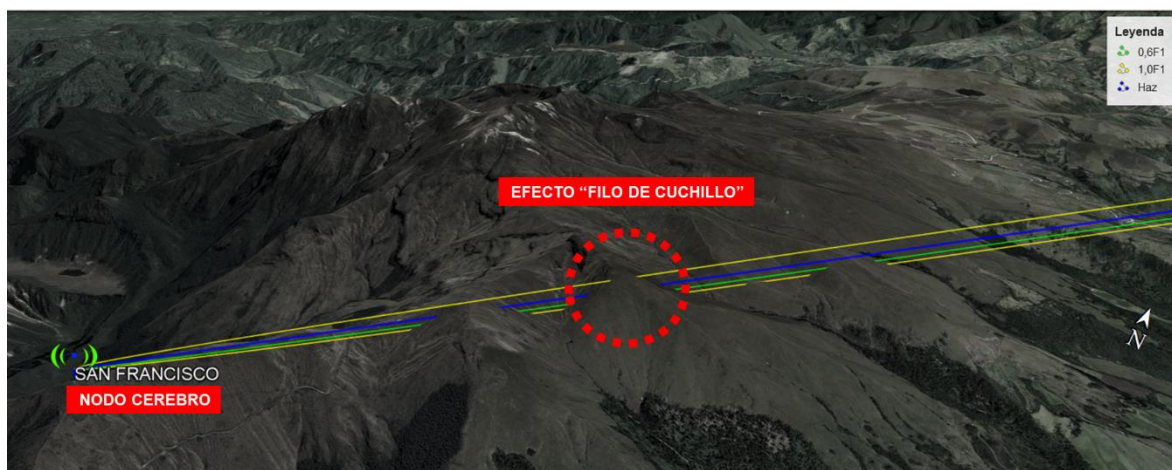
Como el software Radio Mobile opera en función del modelo de propagación de Longley- Rice, al encontrar un obstáculo al paso de la onda se aplica el modelo “Filo de cuchillo” el cual basa en el principio de Huygens-Fresnel para predecir la difracción de una onda plana sobre un plano absorbente. El plano absorbente causa la creación de un nuevo frente de onda el mismo que se propaga con la forma del obstáculo [4], [17], [18].

La Figura 2.33 muestra el modelo de difracción de “filo de cuchillo”



**Figura 2.33** Modelo "Filo de cuchillo" [18]

La Figura 2.34 muestra la ubicación geográfica en la cual se aplica el efecto de “Filo de cuchillo” en el radioenlace entre el Nodo “EPN” y el Nodo “CEREBRO”.



**Figura 2.34** Ubicación geográfica del efecto "FILO DE CUCHILLO" en el radioenlace  
Nodo “EPN” hacia Nodo “CEREBRO”

## 2.3 DISEÑO DE LA ESTACIÓN REPETIDORA MÓVIL

En esta sección se describe el proceso de diseño, análisis de las antenas de transmisión, recepción para la estación repetidora móvil.

### 2.3.1 ANTENA DIPOLO

En la zona de cobertura local, la antena móvil que cumplirá con estas funciones será una antena de un solo dipolo, cuyo diseño se presentó en la sección 2.2.1.

En este caso, para la comunicación móvil, se toma en cuenta que esta antena sea portable, liviana, accesible y con facilidades de transportación para el objetivo para el cual es diseñada.

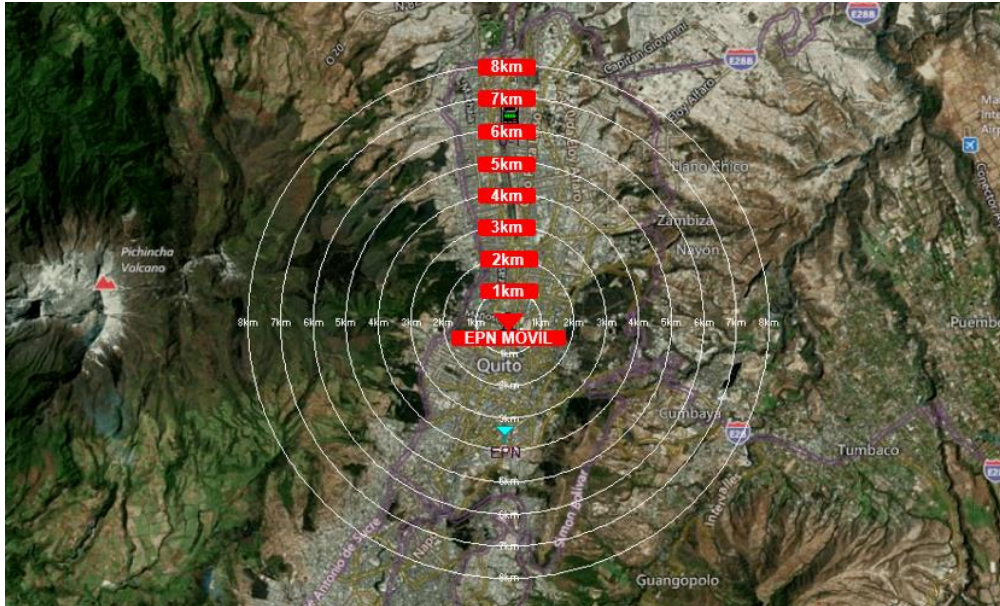
#### *Parámetros de configuración del software Radio Mobile*

Para el caso de la simulación de cobertura con la ayuda del software de Radio Mobile, se realizan configuraciones descritas en la Figura 2.10, Figura 2.12, Figura 2.13 y Figura 2.15. En el caso de la configuración descrita en la Figura 2.14, los parámetros que cambian son los siguientes: Tipo de antena dipolo doblado y ganancia de antena de 2,15 dB.

#### *Simulación de cobertura*

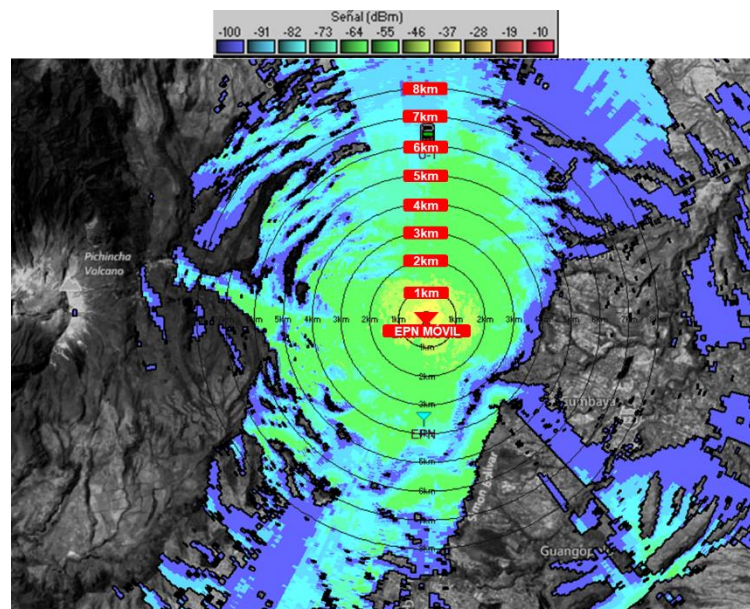
En la Figura 2.35 se presenta el resultado de la simulación realizada en la herramienta de simulación Radio Mobile en la cual se observa la distribución de los anillos de cobertura dentro de los cuales está en operación la antena dipolo doblado.





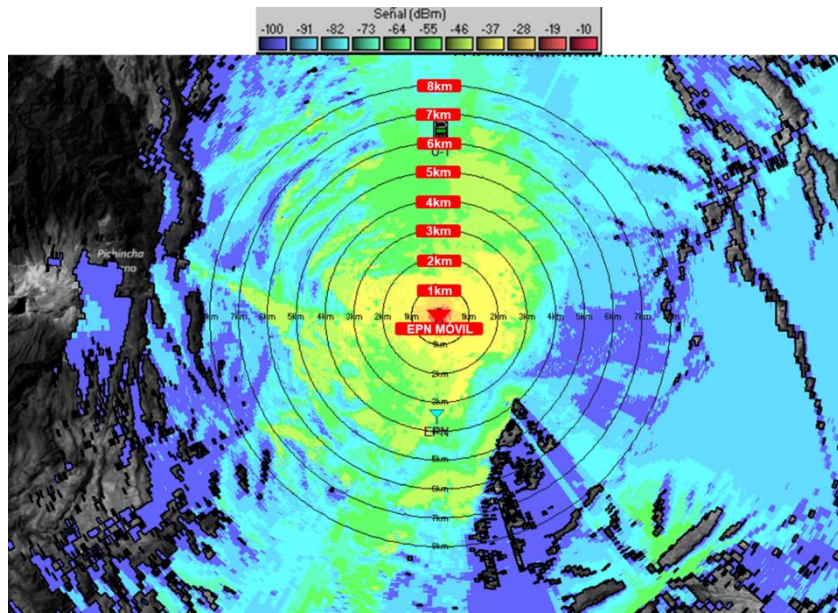
**Figura 2.35** Nodo “EPN” móvil - Anillos de Cobertura (Radio Mobile)

En la Figura 2.36 se presentan los resultados de la simulación de cobertura obtenida en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 1.



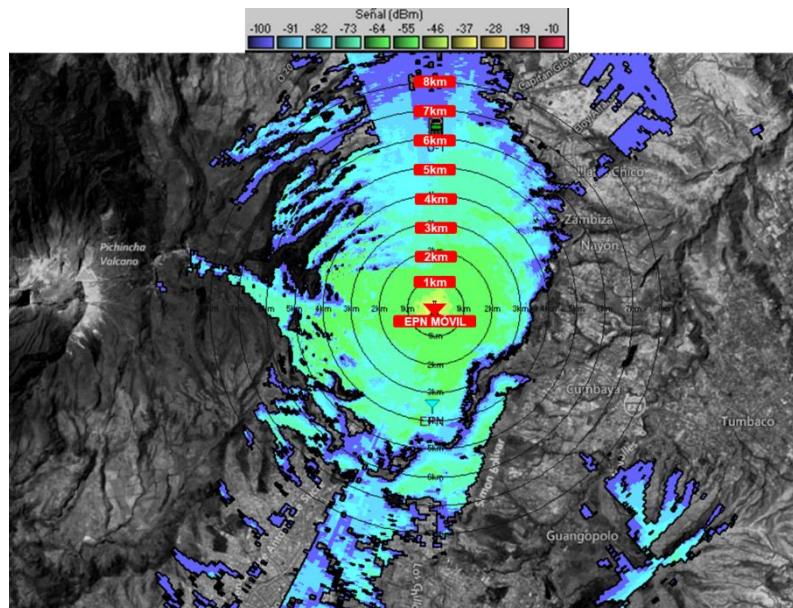
**Figura 2.36** Simulación de la cobertura local de la antena dipolo doblado de la estación móvil “EPN” en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 1

La Figura 2.37 muestra los resultados de la simulación de cobertura obtenida en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2.



**Figura 2.37** Simulación de la cobertura local de la antena dipolo doblado de la estación móvil "EPN" en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2

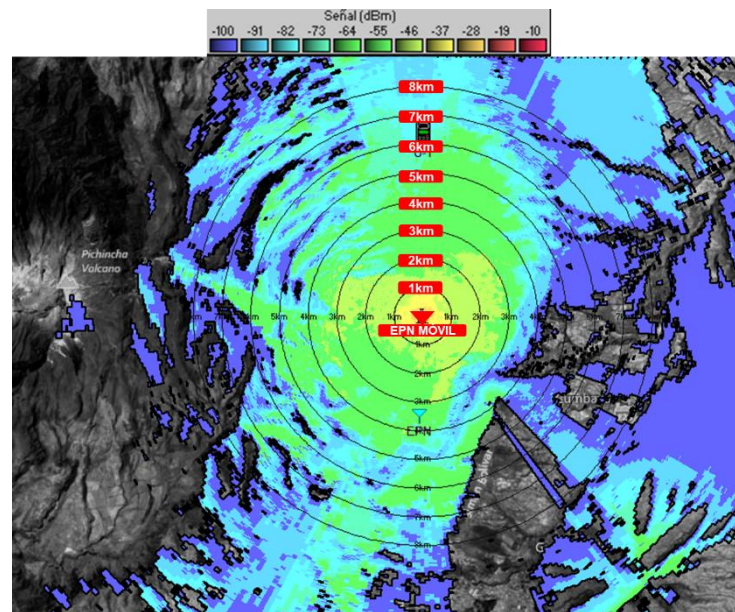
En la Figura 2.38 se presentan los resultados de la simulación de cobertura obtenida en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3.



**Figura 2.38** Simulación de la cobertura local de la antena dipolo doblado de la estación móvil "EPN" en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3



La Figura 2.39 muestra los resultados de la simulación de cobertura obtenida en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 4.



**Figura 2.39** Simulación de la cobertura local de la antena dipolo doblado de la estación móvil “EPN” en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 4

Con los resultados obtenidos en las opciones de cobertura presentadas, al simular las configuraciones de la Tabla 2.5 se concluye que el nivel de cobertura que cumple con las expectativas de operación local de la estación móvil es la Opción 2 que se muestra en la Figura 2.37.

Esta configuración presenta valores de potencia de recepción entre  $-37$  dBm y  $-55$  dBm cuando el equipo receptor está ubicado a 3 km de la estación móvil “EPN” y un nivel de potencia de recepción entre  $-64$  dBm y  $-82$  dBm cuando el equipo receptor está ubicado a 6 km de la estación “EPN”.

En las peores condiciones de operación se obtienen valores entre  $-64$  dBm a  $-73$  dBm cuando el receptor se ubica a 3 km de la estación móvil “EPN” y un nivel de potencia de recepción entre  $-82$  dBm a  $-100$  dBm cuando el equipo receptor se ubica a 6 km de la estación móvil “EPN”.

Los valores obtenidos de potencia en recepción, se toman en cuenta para un radio máximo de 6 km, debido a que, por la experiencia en campo del Quito Radio Club al utilizar una antena de un solo dipolo, se llega a cubrir la distancia antes mencionada.

### 2.3.2 ANTENA LANDSTORFER

La antena Landstorfer presenta las siguientes características:

- Elementos de la antena de forma curvilínea.
- Reducción en el número de elementos.
- Reemplaza a la antena Yagi-Uda estándar de 6 a 10 elementos.
- Buena directividad.
- Reducción de lóbulos secundarios en el patrón de radiación.
- Nivel de complejidad alto en construcción de la antena.

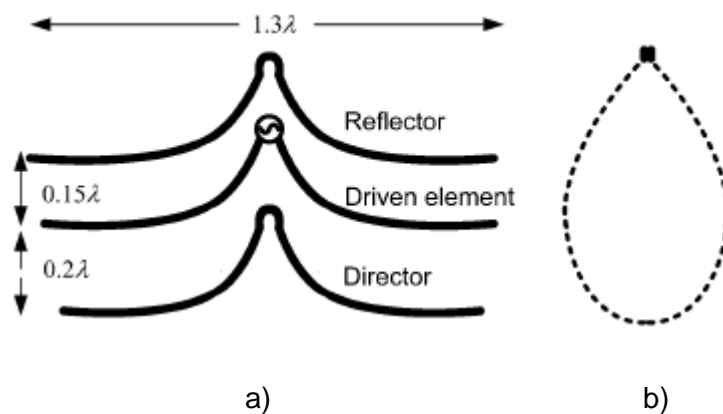
Los primeros indicios de la antena Landstorfer, se dieron en el año 1976 en un documento titulado "A NEW TYPE OF DIRECTIONAL ANTENNA" en el cual se describen características, estructura, parámetros de operación de la antena, valores aproximados de directividad y ganancia [19].

#### *Estructura de la antena Landstorfer*

Una modificación de la antena Yagi-Uda, es la antena Landstorfer la cual se caracteriza por tener un valor de ganancia mayor al de una antena Yagi-Uda de 3 elementos [19].

En la Figura 2.40 (a), se observa cómo es la distribución de los elementos que componen una antena Landstorfer la cual está constituida por 3 elementos: 1 reflector, 1 dipolo y 1 director.

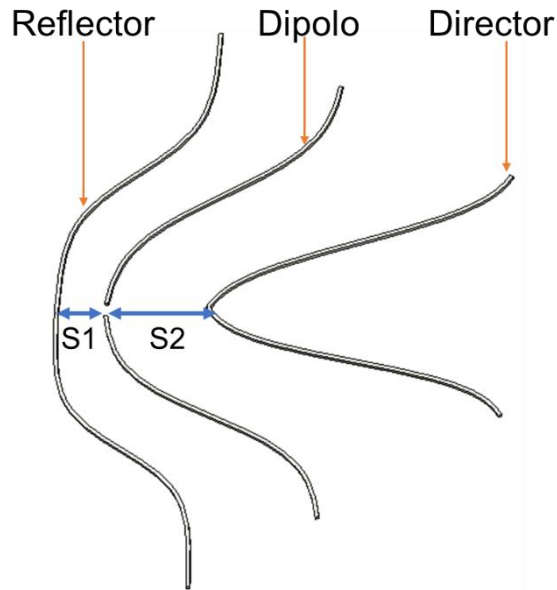
Los elementos antes mencionados son conformados y curvados para obtener un patrón de radiación más directivo. La corriente sinusoidal se distribuye en el dipolo generando el patrón de radiación que se presenta en la Figura 2.40 (b).



**Figura 2.40** Antena Landstorfer. a) Estructura completa; b) Patrón de radiación [20]

### Caracterización estructural de la antena Landstorfer

En la Figura 2.41 se presenta la estructura modelada en el software CST Studio Suite.



**Figura 2.41** Antena Landstorfer modelada en CST

Para realizar el diseño estructural de esta antena y encontrar las ecuaciones que representan a cada uno de sus elementos, se utiliza la caracterización matemática denominada “*Smoothly Parameterized Easy Curve*”. Esta caracterización permite, a través de una función ya definida, modelar diferentes curvas suaves que se asemejan a la forma de los elementos de la antena [21].

#### *Modelado Matemático:*

La caracterización matemática denominada “*Smoothly Parameterized Easy Curve*” busca por medio de series, converger en una función que se asemeje a la función escalón de Heaviside. Para obtener una aproximación suave a la función paso se utiliza la ecuación (2.4).

$$f(t) = \frac{1}{1 + e^{-2kt}} \quad (2.4)$$

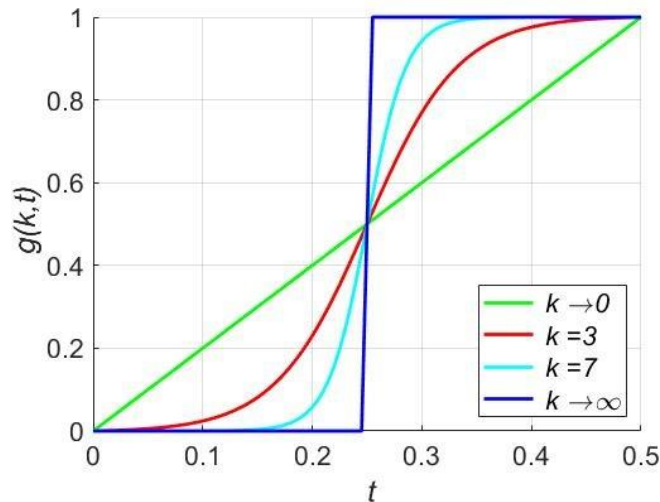
Esta función se puede adaptar al dominio de unidad cuadrada y aplicar la interpolación para cualquier  $k$ , el cual va a estar definido por la ecuación (2.5).

$$k: g(t) = \left(f(2t - 1) - \frac{1}{2}\right) + \frac{\left(f(1) - \frac{1}{2}\right)}{2} + \frac{1}{2} \quad (2.5)$$

Evaluando  $f(t)$  en los puntos establecidos, se obtiene la ecuación (2.6).

$$g(t) = \left( \frac{1}{1 + e^{-2k(2t-1)}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{\frac{1}{1 + e^{-2k}} - \frac{1}{2}}{2} + \frac{1}{2} \quad (2.6)$$

La Figura 2.42 muestra como varía  $g(t)$  a medida que  $k$  varía.



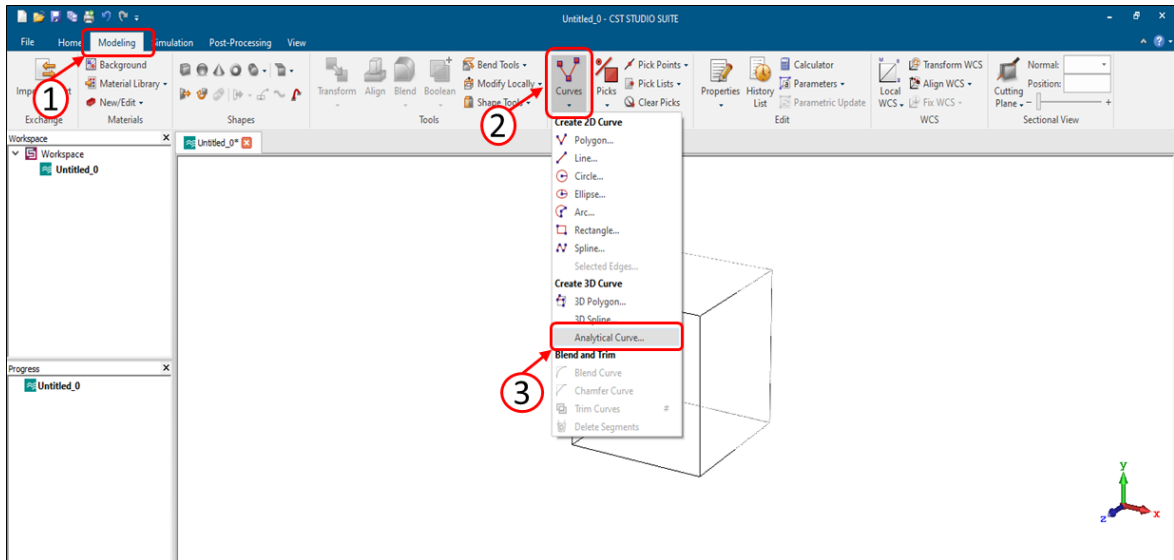
**Figura 2.42** Simulación de la ecuación (2.6) para cuatro valores de  $k$

### Modelamiento y simulación

Para crear y simular cada uno de los elementos que conforman la antena Landstorfer, se utiliza la opción *Analytical curve* de CST para lo cual, se detalla el proceso a realizar:

1. En la pantalla principal de CST se selecciona la pestaña *Modeling*
2. Elegir la opción *Curves*.
3. Seleccionar la opción *Analytical Curve*.

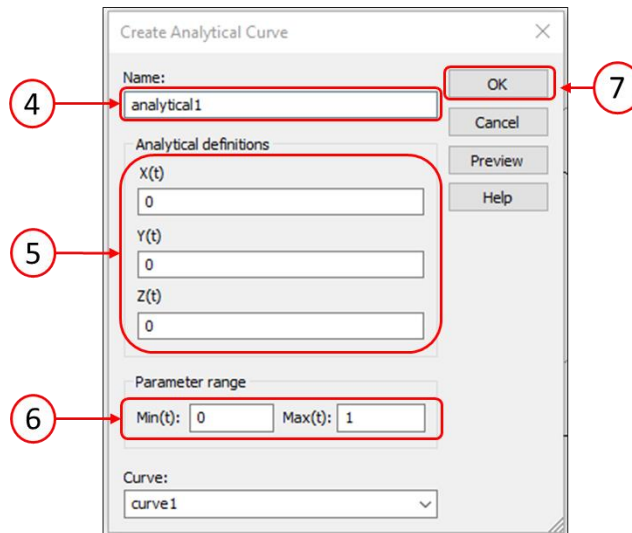
En la Figura 2.43, se detallan los pasos descritos anteriormente para la configuración de la interfaz del CST Studio Suite.



**Figura 2.43** Creación curva analítica en CST – Configuración en la interfaz

4. Se despliega una nueva pantalla en la cual se debe ingresar el nombre que llevará la curva.
5. Para la definición de la curva en los campos  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  se debe especificar una función paramétrica en función del parámetro  $t$ , de esta manera, las coordenadas de la curva analítica se expresan en coordenadas globales. Se debe tener en cuenta que estas entradas solo aparecen cuando el sistema de coordenadas global está actualmente activo.
6. Dentro de los campos  $Min(t)$  y  $Max(t)$  se debe especificar un rango válido para el parámetro  $t$ . Para finalizar la creación de la curva se selecciona la opción *Ok*.

En la Figura 2.44, se detallan los pasos descritos para la configuración de los parámetros de la curva en CST Studio Suite.



**Figura 2.44** Creación de curva analítica en CST – Parámetros de la curva

Dado que la máxima amplitud de la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es la unidad, se agrega el parámetro “A”, el mismo que permitirá escalar la función, y permitirá modificarla hasta que se obtenga la excursión máxima deseada de cada uno de los elementos de la antena. Adicionalmente, se agrega el parámetro “B” el cual permitirá la variación de la longitud de los elementos.

En la Tabla 2.9, se presentan los parámetros  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  de la función utilizada para la creación de la curva.

**Tabla 2.9** Parámetros  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  de la curva de los elementos de la antena Landstorfer

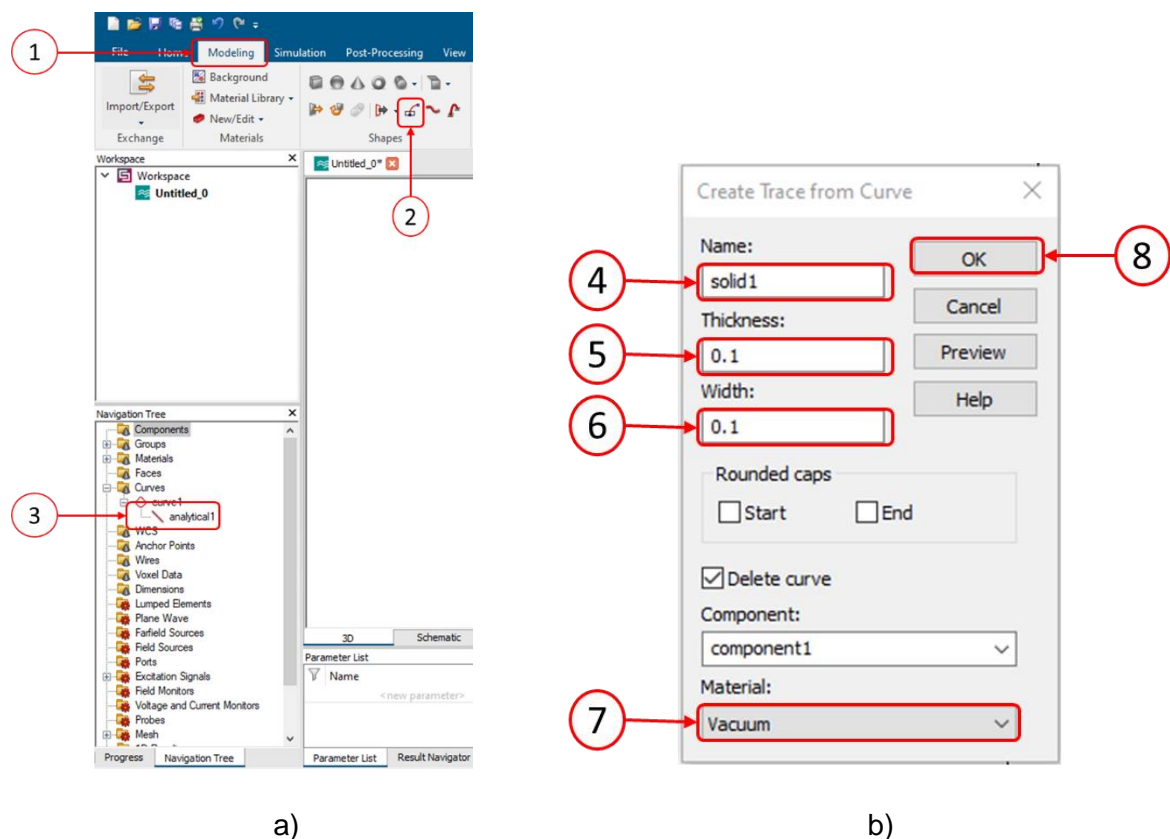
| Parámetro | Valor  |
|-----------|--|
| $X(t)$    | $B \times t$   |
| $Y(t)$    | $A \times \left[ \left( \frac{1}{1+e^{-2k(2t-1)}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{\frac{1}{1+e^{-2k}} - \frac{1}{2}}{2} + \frac{1}{2} \right]$ |
| $Z(t)$    | 0  |

Con la curva ya establecida, se la debe representar como un sólido que permita ubicar un puerto discreto en la cara o superficie que se desee, para lo cual se debe seguir el siguiente proceso:



1. Seleccionar la pestaña *Modeling*.
2. Seleccionar la opción *Trace From Curve*.
3. Seleccionar la curva creada y clic en *Enter*.
4. En la casilla *Name*, se configura el nombre del sólido.
5. Ingresar el valor para el grosor del sólido, este parámetro está a lo largo del eje z en el sistema de coordenadas global y a lo largo del eje w en el sistema de coordenadas local.
6. Ingresar el valor del ancho del sólido.
7. Seleccionar el tipo de material del cual estará formado el sólido.
8. Para finalizar la creación del sólido dar clic en *OK*.

En la Figura 2.45, se presenta la configuración de la interfaz del CST Studio Suite y de los parámetros del sólido, tomando en cuenta los pasos mencionados anteriormente.



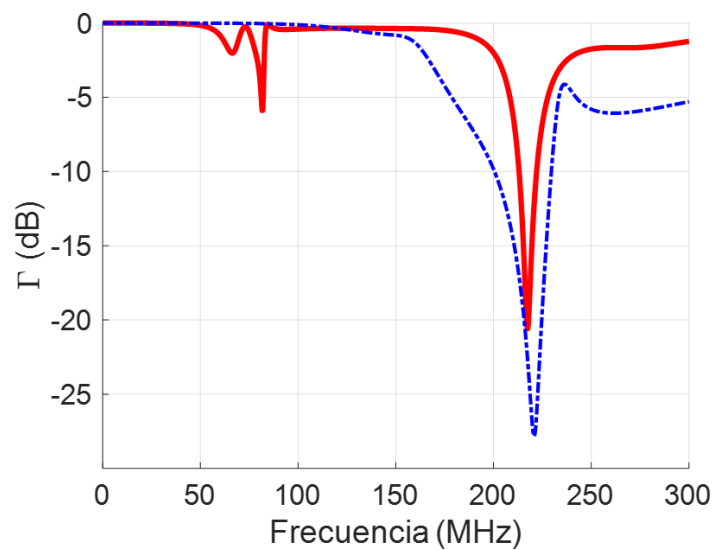
**Figura 2.45** Creación de sólido a partir de curva plana. a) Configuración en la interfaz; b) Parámetros del sólido

En la Tabla 2.10, se detalla cada uno de los elementos de la antena Landstorfer, los mismos cuentan con un parámetro identificativo y un valor determinado.

**Tabla 2.10** Elementos y parámetros de la antena Landstorfer

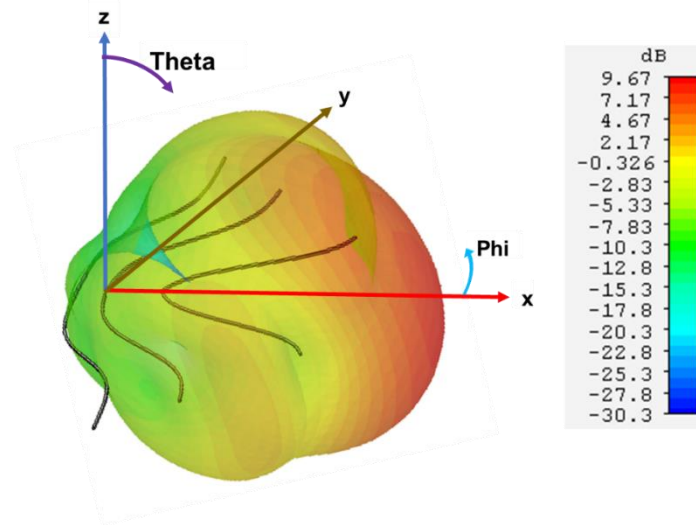
| Elemento         | Parámetro | Valor         |
|------------------|-----------|---------------|
| Reflector        | $A$       | $0,65\lambda$ |
|                  | $B$       | 40            |
|                  | $k$       | 3             |
| Dipolo           | $A$       | $0,49\lambda$ |
|                  | $B$       | 60            |
|                  | $k$       | 2             |
| Director         | $A$       | $0,28\lambda$ |
|                  | $B$       | 80            |
|                  | $k$       | 1,6           |
| Reflector-Dipolo | $S1$      | $0,10\lambda$ |
| Dipolo-Director  | $S2$      | $0,20\lambda$ |

En la Figura 2.46, se presenta el resultado del coeficiente de reflexión obtenido en CST Studio Suite. Se observa que la frecuencia de resonancia se desplaza hacia los 217 MHz con su coeficiente de reflexión igual a  $-18,18$  dB y a la frecuencia de 220 MHz,  $-13,98$  dB con un ancho de banda a  $-10$  dB de 9,05 MHz ( $\approx 4\%$ ).

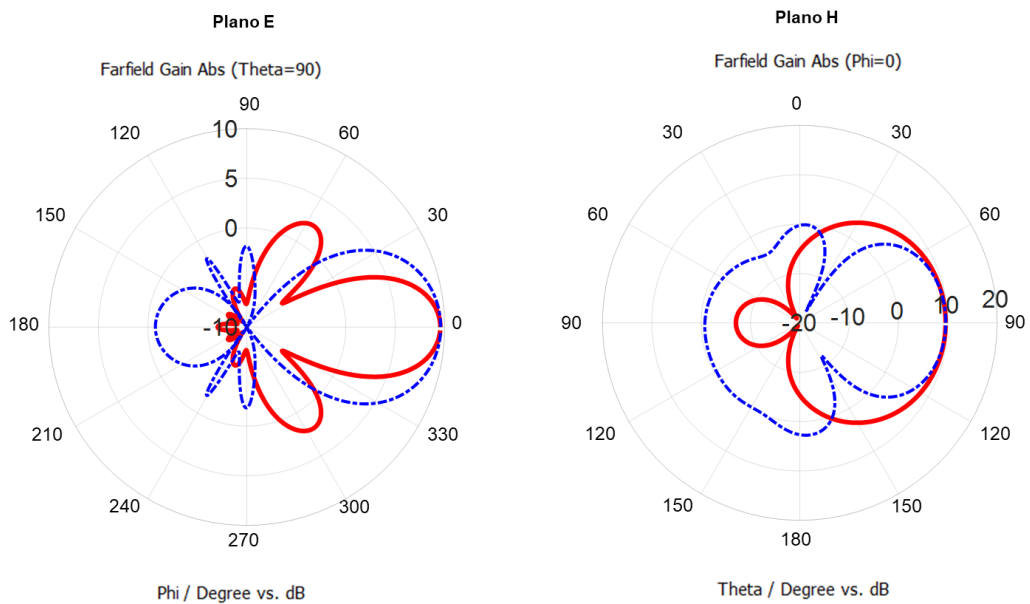


**Figura 2.46** Coeficiente de reflexión – (rojo continua) antena Landstorfer, (azul entrecortada) antena Yagi-Uda

La Figura 2.47 muestra el patrón de radiación de la antena Landstorfer. La ganancia máxima simulada es de 9,67 dB,  $HPBW_E = 31,8^\circ$ ,  $FBR_E = 17$  dB,  $SLL_E = 7,3$  dB,  $HPBW_H = 7,8^\circ$ ,  $FBR_H = 16,6$  dB.



a)



b)

c)

**Figura 2.47** Patrón de radiación de la antena Landstorfer simulado en CST Studio Suite. (a) Representación tridimensional; (b) Plano E – (rojo continua) antena Landstorfer, (azul entrecortada) antena Yagi-Uda; (c) Plano H – (rojo continua) antena Landstorfer, (azul entrecortada) antena Yagi-Uda

De la Figura 2.47 se observa que la antena Landstorfer posee un menor número de lóbulos secundarios tanto en el plano E como en el plano H. Dado que el FBR del plano E y H de la antena Landstorfer es menor al FBR del plano E y H de la antena Yagi-Uda se observa que la antena Landstorfer posee una mejor radiación hacia la dirección de apuntamiento.

#### *Parámetros de configuración del software Radio Mobile*

Se configura la simulación en Radio Mobile similar a lo mostrado en la Figura 2.10 con los parámetros: Frecuencia máxima de operación = 225 MHz y frecuencia mínima de operación = 220 MHz.

La topología del sistema es la misma empleada en la Figura 2.12.

La configuración de los dispositivos con la respectiva función a desempeñar es la misma empleada en la Figura 2.24.

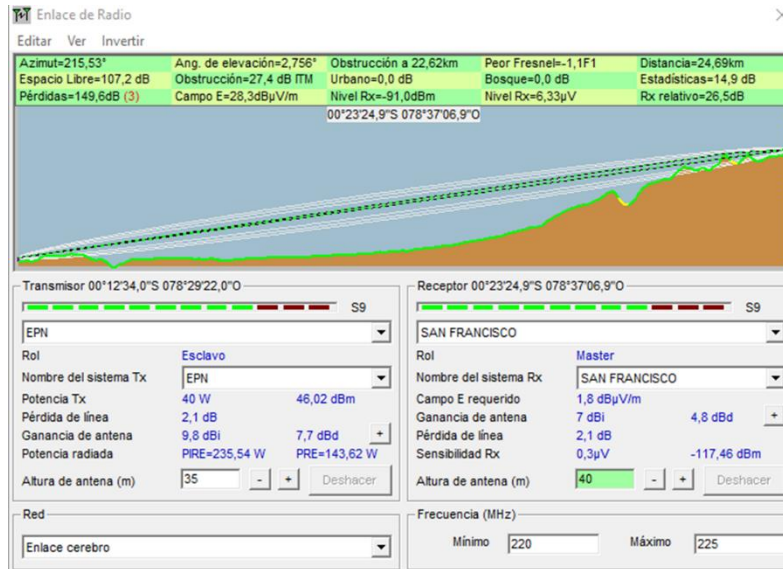
Se configura la simulación en Radio Mobile similar a lo mostrado en la Figura 2.14 con los parámetros descritos en la Tabla 2.8 con el cambio de la antena Yagi-Uda por la antena Landstorfer.

Se configura la simulación en Radio Mobile similar a lo mostrado en la Figura 2.15 con el modo de propagación correspondiente.

#### *Simulación de cobertura Radioenlace Nodo “EPN” hacia Nodo “San Francisco”*

El escenario de simulación del radioenlace es similar a la Figura 2.25.

En la Figura 2.48 se presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 1.



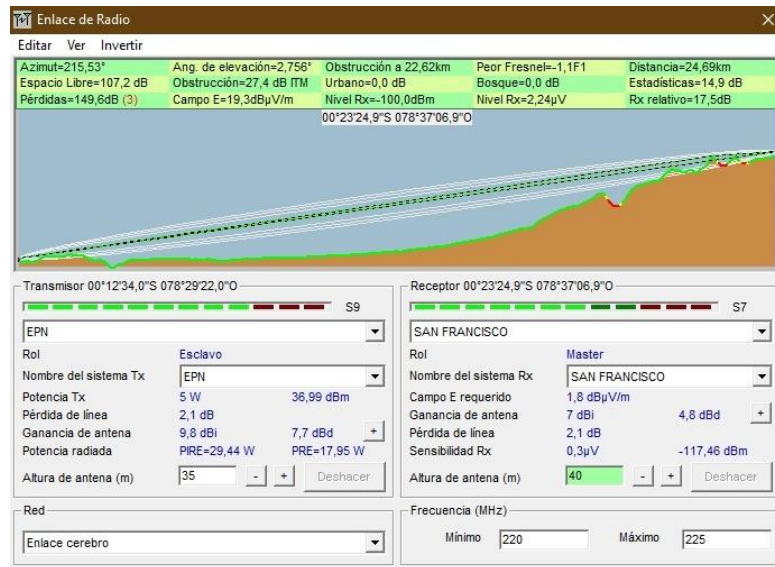
**Figura 2.48** Simulación del enlace punto a punto con la antena Landstorfer entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 1

La Figura 2.49 presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2.



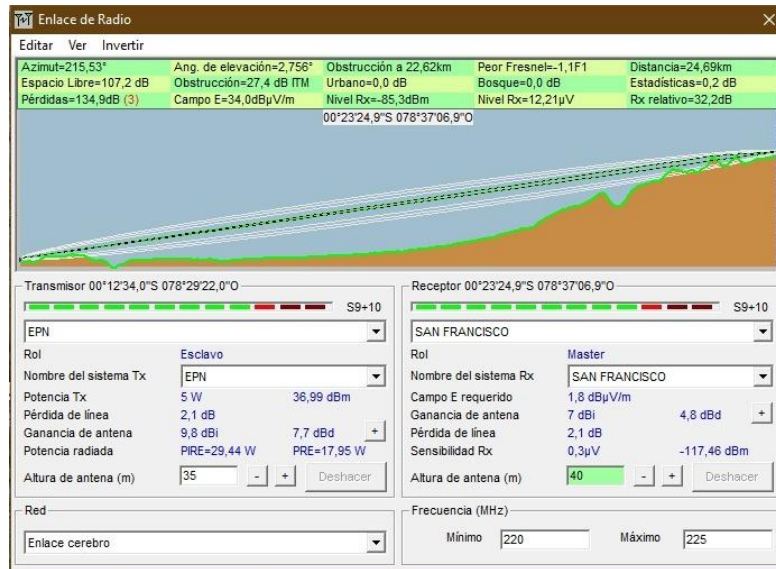
**Figura 2.49** Simulación del enlace punto a punto con la antena Landstorfer entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2

En la Figura 2.50 se presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3.



**Figura 2.50** Simulación del enlace punto a punto con la antena Landstorfer entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3

La Figura 2.51 presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 4.



**Figura 2.51** Simulación del enlace punto a punto con la antena Landstorfer entre el Nodo “EPN” como transmisor y el Nodo “San Francisco” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 4

El radioenlace (Opción 2) presenta un nivel de potencia de recepción de  $-76,2$  dBm, pérdidas por propagación total de  $134,9$  dB, la frecuencia promedio de  $222,5$  MHz y el modo de propagación es por difracción con una obstrucción a  $22,6$  km de la estación “EPN”.

En la peor condición de operación (Opción 3) se obtiene un nivel de potencia de recepción de  $-100$  dBm, pérdidas por propagación total de  $149,6$  dB, la frecuencia promedio de  $222,5$  MHz y el modo de propagación es por difracción con una obstrucción a  $22,6$  km de la estación “EPN”.

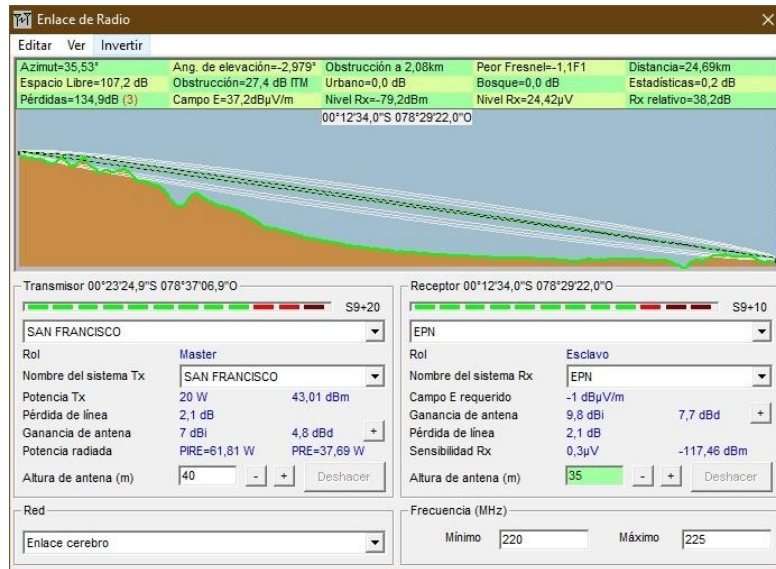
#### *Simulación de cobertura Radioenlace Nodo “San Francisco” hacia Nodo “EPN”*

El escenario de simulación del radioenlace es similar a la Figura 2.30.

Debido a que en la simulación de Radioenlace Nodo “EPN” hacia Nodo “San Francisco” se determina que la mejor condición de recepción se obtiene con los datos de la Opción 2 y la peor condición con los datos de la Opción 3 se simulan estas mismas opciones con el cambio de rol entre ambas estaciones.

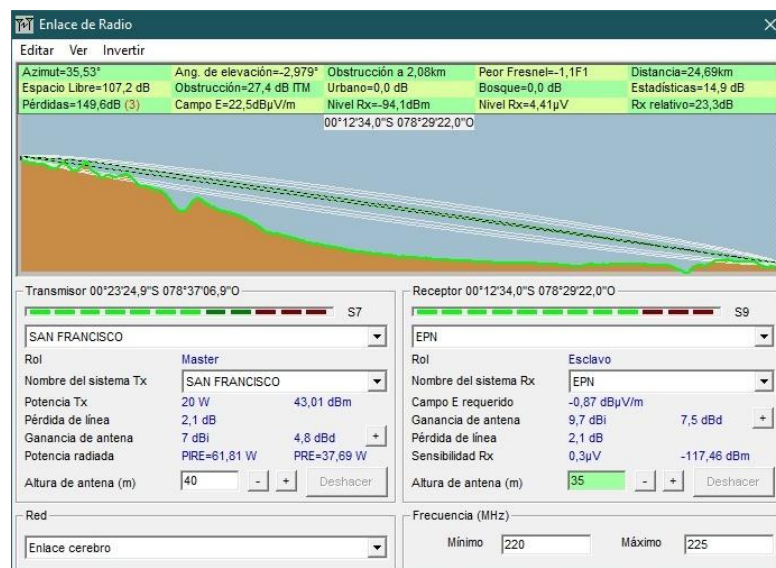
La Figura 2.52 presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “San Francisco” y el Nodo “EPN” en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2.





**Figura 2.52** Simulación del enlace punto a punto con la antena omnidireccional entre el Nodo “San Francisco” como transmisor y el Nodo “EPN” como receptor con antena Landstorfer en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 2

En la Figura 2.53 se presenta los resultados de la simulación del radioenlace punto a punto entre el Nodo “San Francisco” como transmisor y el Nodo “EPN” como receptor en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3.



**Figura 2.53** Simulación del enlace punto a punto con la antena omnidireccional entre el Nodo “San Francisco” como transmisor y el Nodo “EPN” como receptor con antena Landstorfer en base a los datos de la Tabla 2.5 – Opción 3



El radioenlace (Opción 2) presenta un nivel de potencia de recepción de  $-79,2$  dBm, pérdidas por propagación total de  $134,9$  dB, la frecuencia promedio de  $222,5$  MHz y el modo de propagación es por difracción con una obstrucción a  $2,1$  km de la estación "San Francisco".

En la peor condición de operación se obtiene un nivel de potencia de recepción de  $-94$  dBm, pérdidas por propagación total de  $149,6$  dB, la frecuencia promedio de  $222,5$  MHz y el modo de propagación es por difracción con una obstrucción a  $2,1$  km de la estación "San Francisco".

Al comparar los resultados obtenidos entre la Figura 2.49 y Figura 2.52 se concluye que el nivel de potencia de recepción se incrementa en  $3$  dB cuando el radioenlace está en el sentido Nodo "EPN" hacia Nodo "San Francisco". De la misma forma, al comparar los resultados entre la Figura 2.50 y Figura 2.53, el nivel de potencia de recepción se incrementa en  $6$  dB cuando el radioenlace está en el sentido Nodo "San Francisco" hacia Nodo "EPN".

### **3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presenta, como resultado, la implementación de las antenas para la estación repetidora fija y móvil. Durante el desarrollo se detalla brevemente los espacios estructurales, materiales utilizados en la construcción de las antenas y las comparaciones entre las mediciones obtenidas en las simulaciones y en la parte práctica.

Los parámetros considerados están basados en características de radiofrecuencia, mecánicas y geográficas. Dentro de las características de radiofrecuencia se encuentran la frecuencia de operación, ganancia, potencia, nivel de sensibilidad, entre otras. Para las del tipo mecánicas incide las características del material utilizado para la implementación de las antenas como son el diámetro, espesor, nivel de fragilidad, peso, medidas y tiempo de vida entre las más importantes. Por último, para las características geográficas, se toma en cuenta la altura, posición, obstáculos naturales o artificiales que influyen en el establecimiento del enlace.

#### **3.1 IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS EN LA ESTACIÓN FIJA “EPN”**

Para la implementación de las antenas en la estación repetidora “EPN”, el espacio estructural designado es el Laboratorio de Antenas del Edificio 17 Química-Eléctrica, específicamente en la cubierta o terraza del área mencionada. La estación fija cuenta con una antena Yagi-Uda que se conecta con el Nodo “CEREBRO” mediante un radioenlace y la antena de arreglo de 4 dipolos para dar la cobertura a nivel local.

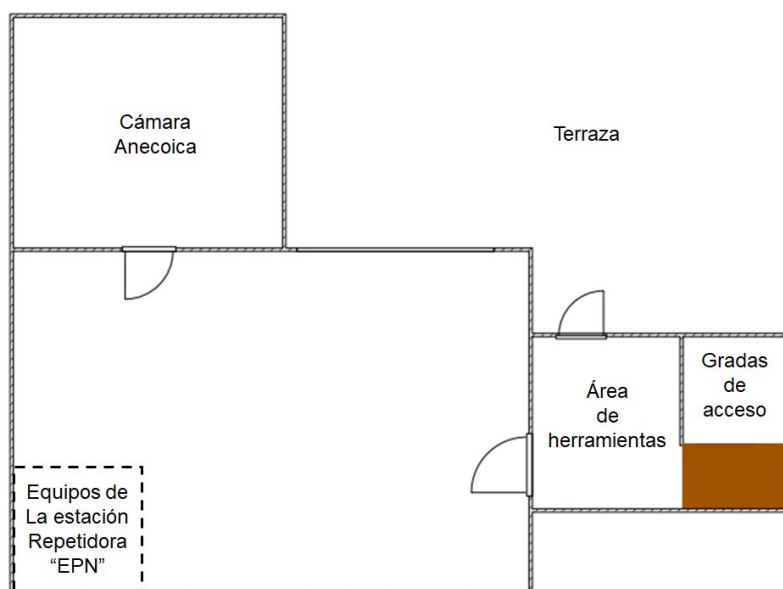
##### **3.1.1 GENERALIDADES**

En la Figura 3.1 se observa una vista aérea del espacio estructural destinado para la instalación de las antenas de la estación repetidora fija “EPN”.



**Figura 3.1** Espacio estructural destinado para la instalación de las antenas de la estación repetidora "EPN"

La Figura 3.2 muestra el espacio estructural que se sugiere se reserve para la ubicación de los equipos de la estación repetidora fija "EPN".

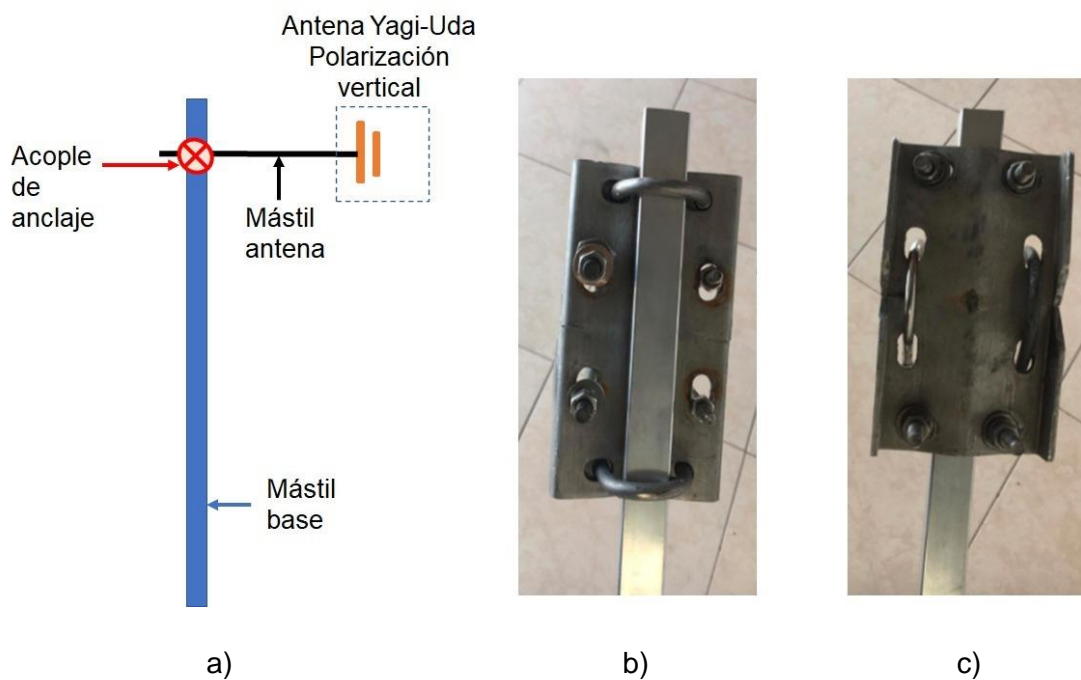


**Figura 3.2** Espacio destinado para la instalación de los equipos de la estación repetidora "EPN" – 8vo. piso del edificio 17 Q/E

Con el objetivo de tener una correcta operación de las antenas y minimizar el efecto de tierra que ocasiona el techo de la terraza, se propone la instalación de un mástil de aproximadamente 4 metros para fijar el arreglo de dipolos a esta estructura y otro soporte

similar de 2 metros para fijar la antena Yagi-Uda, con la finalidad de prevenir que el arreglo de dipolos esté propenso a alguna caída por la fuerza del viento. Además, se debe considerar la colocación de para rayos y posiblemente luces de baliza (en este trabajo de titulación no se considera la instalación de dichos elementos).

Para el anclaje de las estructuras se propone utilizar tensores instalados desde el mástil de anclaje general hacia el suelo de la terraza para fijar la antena a dicha superficie. De igual manera para el anclaje de la antena Yagi-Uda al mástil es sugerente utilizar un acople adicional como se muestra en la Figura 3.3.



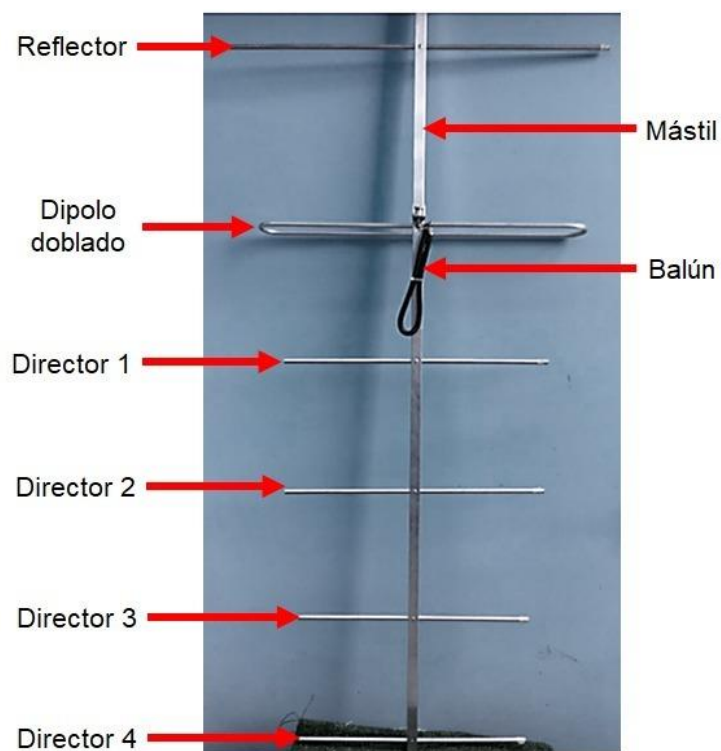
**Figura 3.3** Acople de anclaje de la antena Yagi-Uda al mástil base. (a) Diagrama de conexión; (b) Vista anterior; (c) Vista posterior

### 3.1.2 ANTENA YAGI-UDA

La estructura y los elementos de la antena están contruidos de aluminio ya que este material se caracteriza por ser ligero, de larga duración y resistente a la corrosión.

#### *Construcción de antena Yagi-Uda*

La Figura 3.4 muestra la antena Yagi-Uda implementada con cada uno de los elementos que la componen.



**Figura 3.4** Antena Yagi-Uda implementada para la estación fija “EPN”

Para la construcción de la antena Yagi-Uda se utilizan los materiales que se describen en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1** Materiales utilizados para la construcción de la antena Yagi-Uda

| Ítem                   | Material | Descripción  |
|------------------------|----------|--|
| Tubo redondo           | Aluminio | Diámetro: 10 mm, Espesor: 1mm                          |
| Tubo cuadrado          | Aluminio | Longitud: 22,2 mm, Espesor: 2 mm                       |
| Conector N para chasis | -        | -  |
| Cable coaxial          | Cobre    | Amphenol/U-JIN RG8/U/M 4kV 50 Ω<br>70C 2,17 10,1 10/17 |

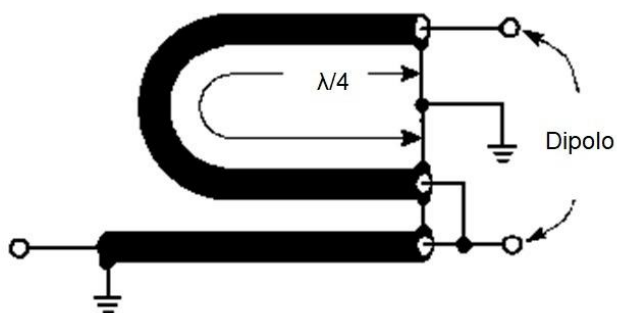
La Tabla 3.2 muestra las medidas de cada uno de los elementos que componen la antena Yagi-Uda. Para el montaje de cada elemento de la antena se utiliza un mástil de aluminio de 1,75 m, la unión del reflector, dipolo doblado y directores se realiza por medio de remaches acorde a las medidas de separación especificadas en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Dimensiones de los elementos de la antena Yagi-Uda

| Descripción  | Valor    |
|--|----------|
| Reflector  | 74,8 cm  |
| Dipolo   | 90,4 cm  |
| Director 1   | 54,4 cm  |
| Director 2   | 54,4 cm  |
| Director 3   | 48,96 cm |
| Director 4   | 48,96 cm |
| Distancia de separación entre el reflector y dipolo  | 34 cm    |
| Distancia de separación entre el dipolo y director 1 | 27,2 cm  |
| Distancia de separación entre directores             | 27,2 cm  |

En el aspecto mecánico, para la construcción del dipolo doblado, se utiliza un tubo redondo de aluminio de 10 mm. El proceso de implementación es propenso a ciertas dificultades ya que el material no puede ser sometido a mucho grado de doblez.

En la Figura 3.5 se muestra el balun de longitud  $\lambda/4$ , que cumple con la función de acople entre el dipolo doblado y la línea de transmisión, implementado con el cable coaxial RG – 8 descrito en la Tabla 3.1



a)

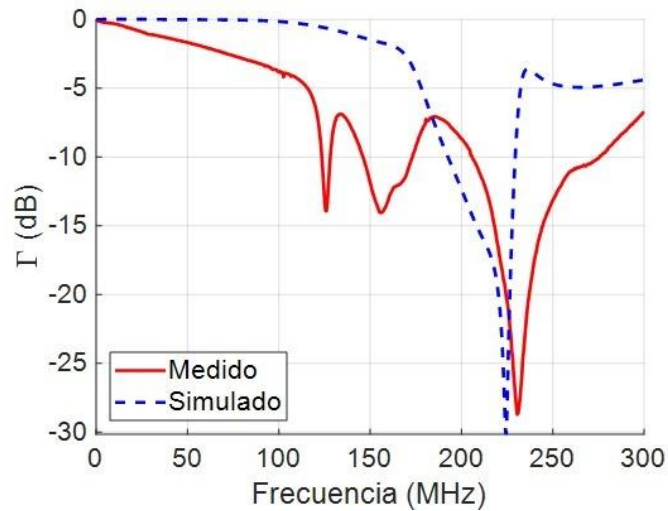


b)

**Figura 3.5** Balun para el acoplamiento entre el dipolo doblado y la línea de transmisión de la antena Yagi-Uda. (a) Esquema de conexión entre el dipolo doblado, balun y conector tipo N; (b) Implementación del balun de la antena Yagi-Uda

### Mediciones de antena

La Figura 3.6 muestra la comparación entre los valores simulados y los resultados obtenidos con el analizador vectorial de redes al medir el coeficiente de reflexión de la antena Yagi-Uda.



**Figura 3.6** Comparación del coeficiente de reflexión entre la antena Yagi-Uda simulada y la antena Yagi-Uda construida

Con los resultados obtenidos en la Figura 3.6 se observa que la frecuencia de resonancia de la antena implementada se encuentra en 230 MHz por lo cual existe un desplazamiento de 6 MHz respecto a la frecuencia de resonancia simulada.

El desplazamiento de frecuencia representa un error relativo de 2,68%, valor considerado aceptable. Este error se produce por efectos mecánicos causados por el proceso de doblez del dipolo y errores sistemáticos en los cuales no se considera la presencia del mástil y balun en la simulación.

El balun, al construirse con un cable coaxial de  $50 \Omega$ , genera una pequeña reflexión que ocasiona un desplazamiento de frecuencia y que aparezcan picos en el coeficiente de reflexión. Por lo tanto, este error no afecta en el ancho de banda de la antena.

### 3.1.3 ANTENA ARREGLO CUATRO DIPOLOS

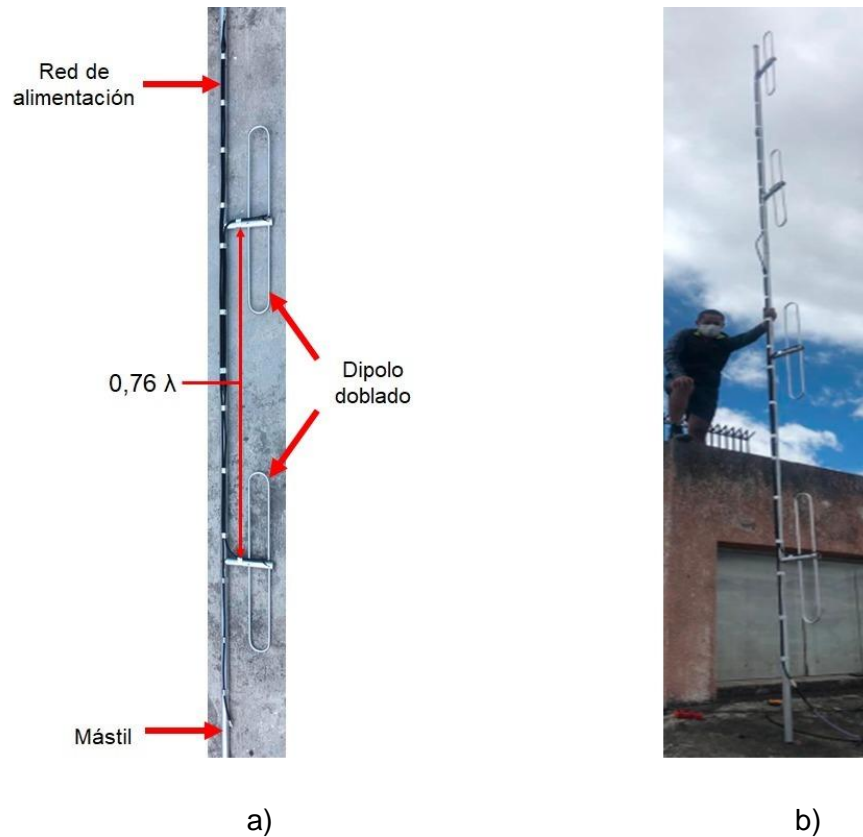
Para la construcción de la antena de arreglo de 4 dipolos, se toma como referencia los cálculos obtenidos en la sección 2.3.1. El material utilizado para el mástil y los dipolos doblados es aluminio tomando en cuenta las características previamente descritas.



Debido a la frecuencia de operación de la antena, los elementos del arreglo se encuentran separados una distancia de 1,56 m según el diseño de la sección 2.2.2, haciendo que la misma tenga una altura de 6 m. Se recomienda que para la instalación del arreglo se considere una estructura adicional metálica a la que se pueda anclar la antena.

#### *Construcción de antena arreglo 4 dipolos*

La Figura 3.7 muestra la antena arreglo cuatro dipolos implementada.



**Figura 3.7** Antena arreglo cuatro dipolos implementada para cobertura local de la estación fija “EPN”. (a) Descripción de las partes del arreglo; (b) Antena arreglo de 4 dipolos implementada

Los materiales utilizados para la implementación de la antena arreglo cuatro dipolos se detallan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Materiales antena arreglo cuatro dipolos

| Ítem                  | Material | Descripción   |
|-----------------------|----------|---|
| Tubo redondo          | Aluminio | Diámetro: 1,4 cm Espesor: 2 mm                                      |
| Tubo redondo          | Aluminio | Diámetro: 3,8 cm, Espesor: 2 mm                                     |
| Cable coaxial         | Cobre    | Amphenol/U-JIN RG8/U/M 4kV 50 $\Omega$<br>70C 2,17 10,1 10/17       |
| Cable coaxial         | Cobre    | Amphenol/U-JIN RG11/M 4kV 75 $\Omega$<br>70C 1,21 10,3 10/17        |
| Conector tipo N macho | -        | Conector N-Macho Amphenol, Clamp, Tipo N, 50 $\Omega$ , Cable: RG-8 |
| Conectores PL 259     | -        | -   |
| Conector PL 258       | -        | UHF Adapter, Jack-Jack 11850  |

Para la construcción de cada dipolo doblado se utiliza un tubo redondo de aluminio de 1,4 cm de diámetro. El mástil que soporta a todo el arreglo se construye con un tubo de aluminio de 3,8 cm de diámetro.

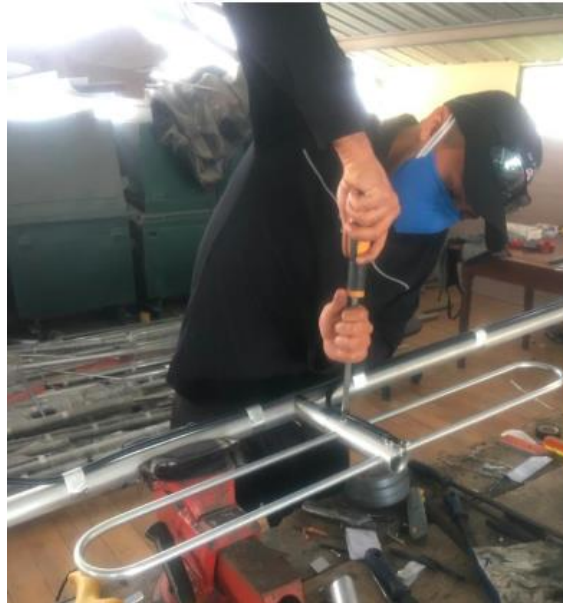
A nivel comercial, las medidas estándar del tubo de aluminio se encuentran entre los 3 m y 4 m. de longitud, por esta razón, para la estructura del arreglo, se considera la unión de 2 secciones de este tubo donde en cada una se montan 2 dipolos doblados.

En la Figura 3.8 se muestra el proceso de doblado del dipolo con una dobladora manual de tubo de cobre.



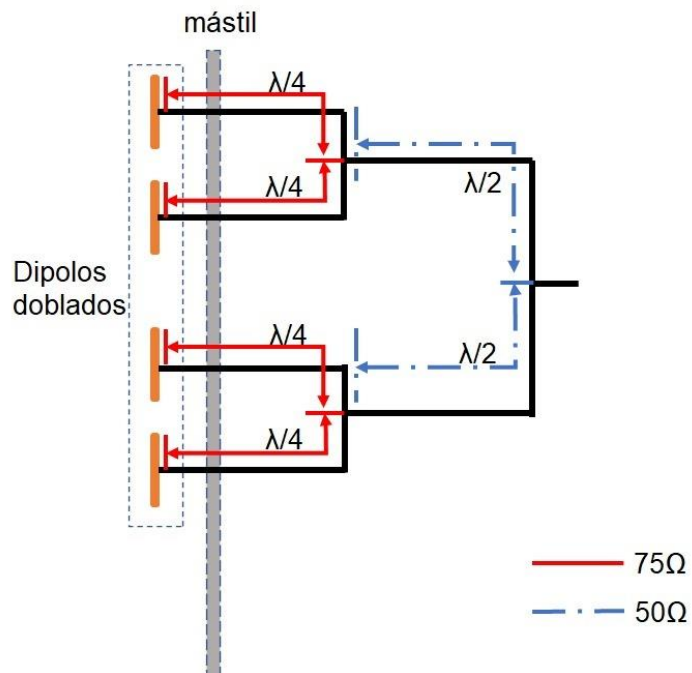
**Figura 3.8** Doble del dipolo doblado a utilizar en la antena arreglo 4 dipolos para la estación fija y móvil "EPN"

La Figura 3.9 muestra la unión del dipolo al mástil con ayuda del soporte de aluminio.



**Figura 3.9** Unión del dipolo doblado al mástil

La interconexión de cada dipolo se implementa mediante un esquema simétrico de enfasamiento en forma de ramificación el cual realiza el acople entre dipolos y a la vez cumple funciones como divisor de potencia. En la Figura 3.10 se muestra el esquema de enfasamiento a implementar para la antena arreglo cuatro dipolos.



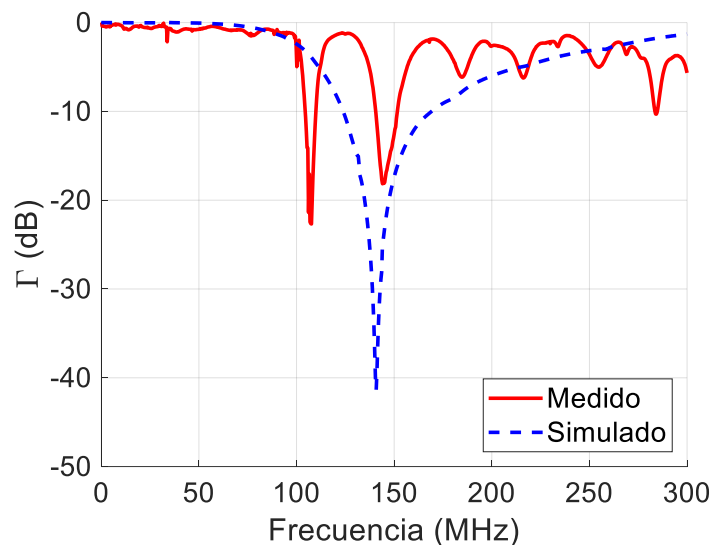
**Figura 3.10** Enfasamiento de la antena arreglo cuatro dipolos

En la sección correspondiente a la longitud  $\lambda/4$  se utiliza un cable coaxial del tipo RG – 11 de 75  $\Omega$ . Para la sección de longitud  $\lambda/2$  se implementa un cable del tipo RG – 8 de 50  $\Omega$ .

Debido a que los dipolos se encuentran montados en dos mástiles diferentes se utiliza conectores tipo PL 259 en una sección de la línea de transmisión y un adaptador PL 258 que interconecta las líneas de transmisión sin afectar la ramificación al momento de unir los dos mástiles. Al final de la línea de transmisión se instala un conector tipo N macho el cual realiza la conexión con el equipo transmisor.

#### *Mediciones de antena*

La Figura 3.11 muestra la comparación entre los valores simulados y los resultados obtenidos con el analizador vectorial de redes al medir el coeficiente de reflexión de la antena arreglo cuatro dipolos.



**Figura 3.11** Comparación del coeficiente de reflexión entre la antena arreglo cuatro dipolos simulada y la antena arreglo cuatro dipolos de la estación fija “EPN”

Con los resultados obtenidos en la Figura 3.11 se observa que la frecuencia de resonancia de la antena implementada se encuentra en 145 MHz por lo cual existe un desplazamiento de 5 MHz de la frecuencia de resonancia simulada.

El desplazamiento de frecuencia representa un error relativo de 3,42%, valor considerado aceptable. Dicho error provoca que el ancho de banda a  $-10$  dB se reduzca a 12 MHz ( $\approx 8,33\%$ ), si bien existe una reducción en el ancho de banda a  $-10$  dB este ancho de banda aún se considera aceptable ya que por la experiencia en campo del QUITO RADIO CLUB se utiliza un ancho de banda de 5 MHz debido a que no se transmiten datos

sino únicamente voz. Este error se produce por efectos mecánicos causados por el proceso de doblez del dipolo y errores sistemáticos en los cuales no se considera la presencia del arnés de enfasamiento en la simulación.

En la Figura 3.11 se observan resonancias antes y después de los 150 MHz. Estos picos de señal se producen por las reflexiones ocasionadas por la red de alimentación en cada una de uniones de los cables que forman el arnés de enfasamiento constituido por cable coaxial de 75  $\Omega$  y 50  $\Omega$ .

Mediante una técnica empírica, al interrumpir el campo de radiación de la antena, solo se afecta la frecuencia de resonancia en 146 MHz. De esta manera se concluye que los otros picos de señal no son radiantes y son generados por ondas reflejadas. Estas ondas producen una disminución en el ancho de banda de la antena.

## **3.2 IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS EN LA ESTACIÓN MÓVIL**

Para implementar las antenas en la estación repetidora móvil “EPN”, no existe un espacio definido debido a que el sistema debe ser transportado a diferentes lugares en los cuales no se cuente con cobertura celular o de telefonía tradicional y se desee tener un medio de comunicación.

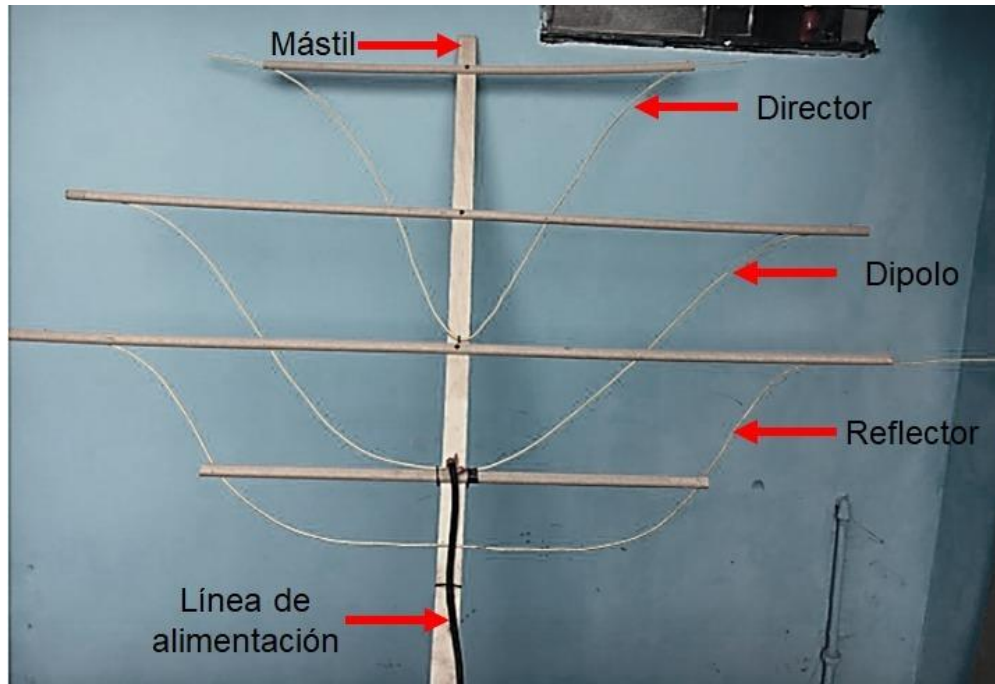
### **3.2.1 GENERALIDADES**

La estación repetidora móvil “EPN” cuenta con una antena Landstorfer que se conecta con el Nodo “CEREBRO” mediante un radioenlace y la antena dipolo doblado para dar la cobertura a nivel local.

Para el establecimiento de la comunicación con la estación repetidora móvil “EPN”, además de las antenas antes mencionadas se propone incorporar un mástil de 2 m junto con un acople con el objetivo de que ambas antenas se instalen a una altura apropiada de tal manera que los obstáculos existentes en la zona no afecten a la cobertura.

### **3.2.2 ANTENA LANDSTORFER**

La Figura 3.12 muestra la antena Landstorfer implementada. La estructura de soporte de la antena es construida con madera y los elementos de la antena fueron construidos en base a un material de fácil adquisición como es el cable de cobre.



**Figura 3.12** Antena Landstorfer implementada para el radioenlace entre el nodo “San Francisco” y la estación móvil “EPN”

#### *Construcción de antena*

La construcción de esta antena no evidencia un modelo o proceso definido de fabricación. Una de las desventajas que caracteriza a esta antena es su geometría compleja ya que se debe seleccionar el material idóneo. Estos materiales deberán soportar fuerzas, presiones, dobleces que pueden afectar su estructura interna y como consecuencia pierdan sus propiedades de fábrica.

Tomando en cuenta la caracterización estructural y modelamiento para la antena Landstorfer, explicados en las secciones 2.5.2 y 2.5.3. respectivamente, se obtiene como resultado una forma curvilínea para los elementos de la antena.

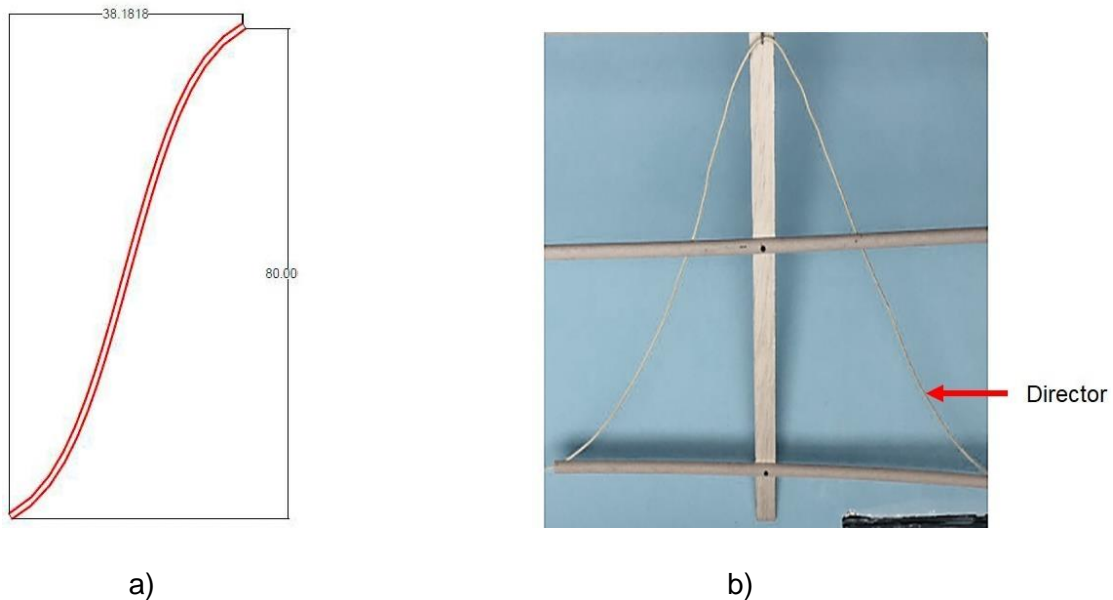
Los materiales utilizados para la construcción de la antena Landstorfer se detallan en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Materiales utilizados para la construcción de la antena Landstorfer

| Ítem                  | Material | Descripción  |
|-----------------------|----------|--|
| Cable coaxial         | Cobre    | Cable eléctrico flexible N°10  |
| Cable coaxial         | Cobre    | Amphenol/U-JIN RG8/U/M 4kV 50 $\Omega$ 70 $\Omega$ C 2,17 10,1 10/17 |
| Conector tipo N macho | -        | Conector N-Macho Amphenol, Clamp, Tipo N, 50 $\Omega$ , Cable: RG-8  |

Debido a que cada uno de los diferentes elementos de la antena tiene su propio parámetro descrito en la Tabla 3.4, para su implementación se exporta el perfil de cada uno de los elementos para su impresión.

Una vez disponibles las estructuras impresas y el cable de cobre, se procede a doblar este último de tal manera que adopte la forma de cada uno de los elementos como se observa en la Figura 3.13.



**Figura 3.13** Director de la antena Landstorfer diseñado. (a) Perfil impreso; (b) Perfil implementado con alambre de cobre.

Para evitar posibles cortocircuitos que puedan ocurrir al momento de sujetar cada elemento al mástil, se utiliza un mástil de madera de 3 m. De igual manera para mantener la forma curva de cada elemento y que no se deformen al momento de transportarse se utilizan



grapas metálicas que fijen el cable a los sujetadores de madera. Cada elemento es ubicado acorde a las separaciones especificadas en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Separación entre elementos antenna Landstorfer

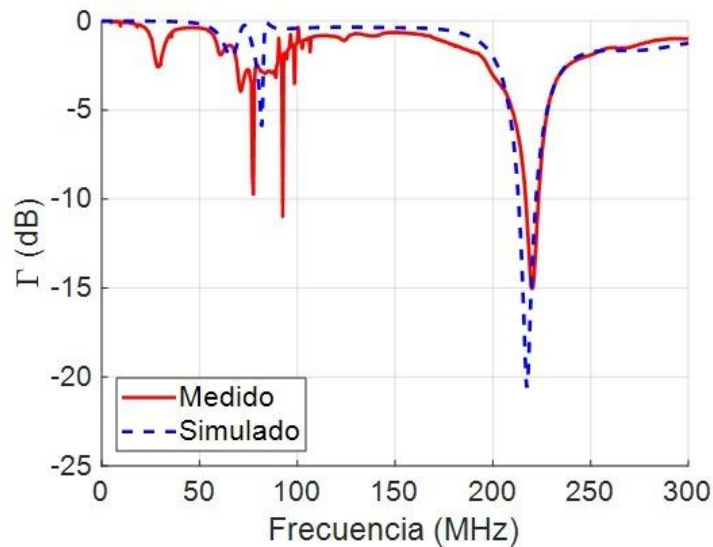
| Descripción                           | Valor   |
|---------------------------------------|---------|
| Distancia entre el reflector y dipolo | 13,6 cm |
| Distancia entre el dipolo y director  | 27,2 cm |

La línea de transmisión que se utiliza es un cable Amphenol de 50  $\Omega$  con un conector tipo N macho que permita la conexión con los equipos de radio.

En los Anexos A, B y C se detallan, respectivamente, el esquema estructural del reflector, dipolo y director de la antenna Landstorfer implementada.

*Mediciones de antena*

La Figura 3.14 muestra la comparación entre los valores simulados y los resultados obtenidos con el analizador vectorial de redes al medir el coeficiente de reflexión de la antenna Landstorfer.



**Figura 3.14** Comparación del coeficiente de reflexión entre la antenna Landstorfer simulada y la antenna Landstorfer de la estación móvil “EPN”

Con los resultados obtenidos en la Figura 3.14 se observa que la frecuencia de resonancia de la antenna implementada se encuentra en 219 MHz por cual existe un desplazamiento de 1 MHz de la frecuencia de resonancia simulada.

Se presenta un error relativo de 0,45% considerado como aceptable. Este error se produce por pequeñas reflexiones entre la línea de transmisión y la antena, por lo cual se genera resonancias entre 50 y 100 MHz sin ser éstas radiantes.

Debido a que el error obtenido no es considerable se observa que el ancho de banda de la antena no se ve afectado. Al no tener un mástil metálico la radiación no se ve afectada ni desplazada.

### 3.2.3 ANTENA DIPOLO DOBLADO

Para la construcción de la antena dipolo doblado, se toma como referencia los cálculos obtenidos en la sección 2.3.1. El material utilizado para el mástil y el dipolo doblado es aluminio tomando en cuenta las características previamente descritas.

#### *Construcción de antena*

La Figura 3.15 muestra la antena dipolo implementada.



**Figura 3.15** Antena dipolo doblado implementada para cobertura local de la estación móvil “EPN”

La antena dipolo al pertenecer a la estación móvil, su construcción debe garantizar propiedades de movilidad, portabilidad, accesibilidad y seguridad debido a que la misma tendrá que ser trasladada a diferentes puntos para su operación.

Para la parte de radiofrecuencia, se utilizan conectores tipo N hembra de chasis en el cual se hace la conexión con un extremo del cable coaxial que viene desde el equipo transmisor o receptor.

Los materiales utilizados para la antena dipolo doblado se detallan en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6** Materiales utilizados para la construcción de la antena dipolo doblado

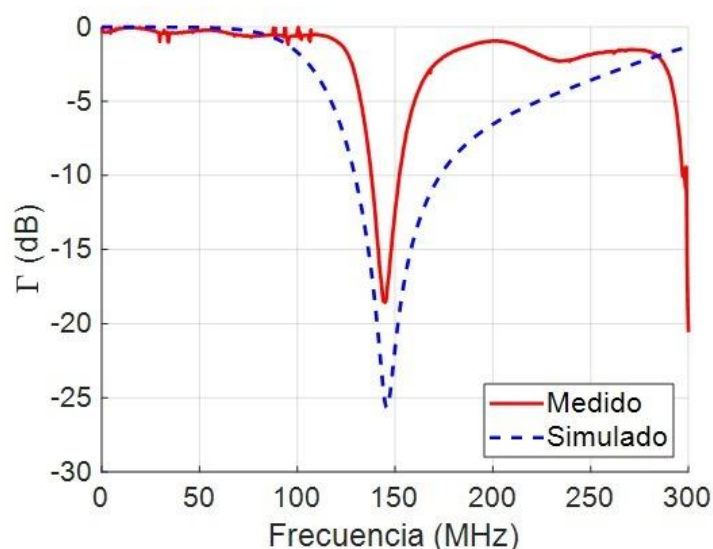
| Ítem                  | Material | Descripción   |
|-----------------------|----------|---|
| Tubo redondo          | Aluminio | Diámetro: 1,4 cm, Espesor: 2 mm                                     |
| Tubo redondo          | Aluminio | Diámetro: 3,8 cm, Espesor: 2 mm                                     |
| Cable coaxial         | Cobre    | Amphenol/U-JIN RG8/U/M 4kV 50 $\Omega$<br>70C 2,17 10,1 10/17       |
| Conector tipo N macho | -        | Conector N-Macho Amphenol, Clamp, Tipo N, 50 $\Omega$ , Cable: RG-8 |

Para la construcción del dipolo doblado se utiliza un tubo redondo de aluminio de 1,4 cm de diámetro. El mástil de la antena se construye con un tubo de aluminio de 3,8 cm de diámetro.

La línea de transmisión está formada por un cable Amphenol de 50  $\Omega$  y un conector tipo N macho el cual permite realizar la conexión con el equipo de radio.

#### *Mediciones de antena*

La Figura 3.16 muestra la comparación entre los valores simulados y los resultados obtenidos con el analizador vectorial de redes al medir el coeficiente de reflexión de la antena dipolo doblado.



**Figura 3.16** Comparación del coeficiente de reflexión entre la antena dipolo doblado simulada y la antena dipolo doblado de la estación móvil “EPN”

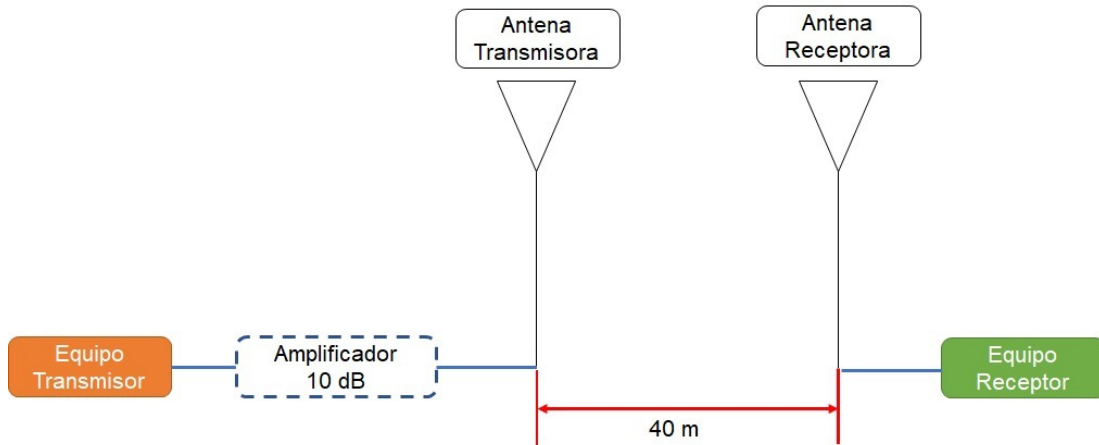
Con los resultados obtenidos en la Figura 3.16 se observa que la frecuencia de resonancia de la antena implementada se encuentra en 144 MHz por lo cual existe un desplazamiento de 2 MHz de la frecuencia de resonancia simulada.

Se presenta un error relativo de 1,37% lo cual provoca que el ancho de banda a  $-10$  dB se reduzca a 14 MHz ( $\approx 9,58\%$ ), si bien existe una reducción en el ancho de banda a  $-10$  dB este ancho de banda aún se considera aceptable ya que por la experiencia en campo del QUITO RADIO CLUB se utiliza un ancho de banda de 5 MHz debido a que no se transmiten datos sino únicamente voz. Este error se produce por errores mecánicos debido al doblado del dipolo y al no tomar en cuenta en la simulación la interacción entre el mástil y el dipolo doblado.

### 3.3 MEDICIONES DE COBERTURA LOCAL

Con el asesoramiento del Quito Radio Club, se realiza la recopilación de resultados en base a las mediciones realizadas con las antenas de cobertura local.

La Figura 3.17 muestra el escenario en el cual se realizaron las mediciones.



**Figura 3.17** Escenario de medición del nivel de cobertura local

En la Figura 3.18 se muestra el equipo que se utiliza como transmisor para las mediciones de cobertura.



**Figura 3.18** Equipo transmisor utilizado para las mediciones de nivel de cobertura

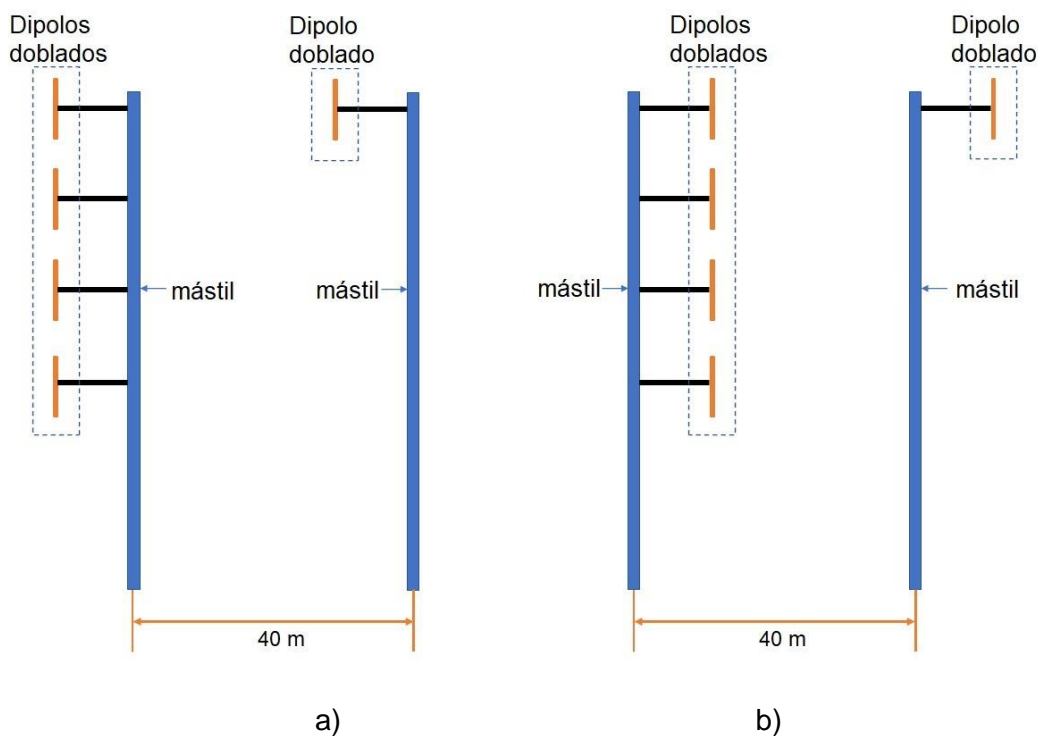
La Tabla 3.7 presenta las especificaciones eléctricas y mecánicas del equipo transmisor a utilizar para las mediciones del nivel de cobertura.

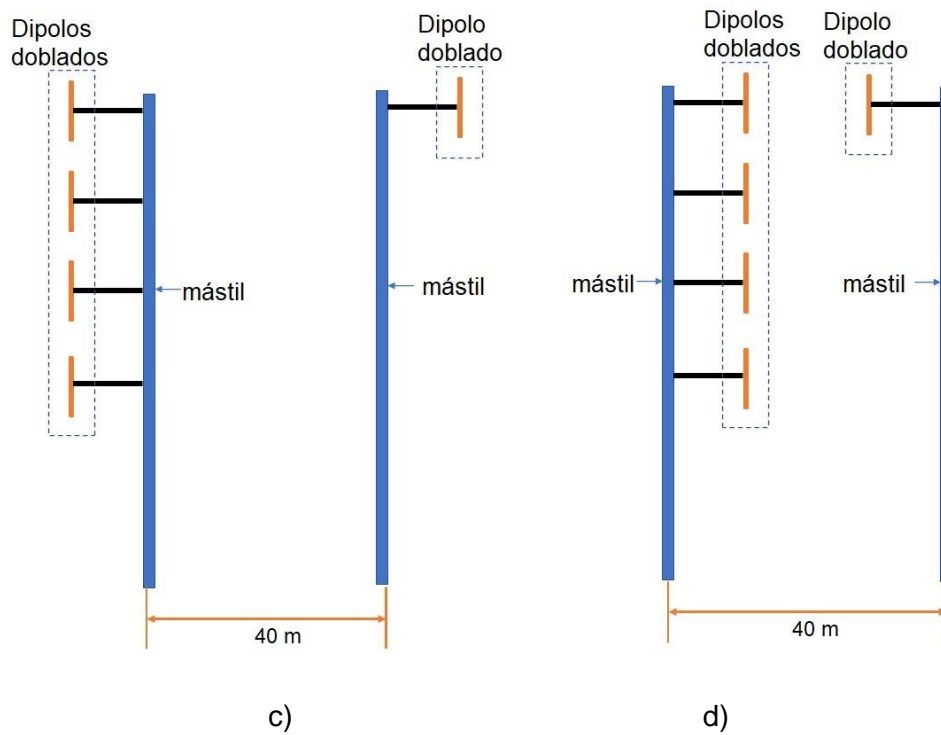
**Tabla 3.7** Especificaciones eléctricas y mecánicas del equipo transmisor [22]

| Especificaciones eléctricas |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| Marca                       | IFR AM/FM 500A      |
| Control de atenuador RF     | 150 kHz – 999,9 MHz |
| Recepción de señal          | AM – FM – SSB       |
| Conector amplificador       | -                   |
| Especificaciones mecánicas  |                     |
| Ancho                       | 30,48 cm            |
| Largo                       | 33 cm               |
| Alto                        | 17 cm               |
| Peso                        | 12 kg               |
| Temperatura                 | -40 a +60°C         |

Para las mediciones de cobertura local se especifican 4 diferentes esquemas de posicionamiento de las antenas con una distancia referencial de 40 m.

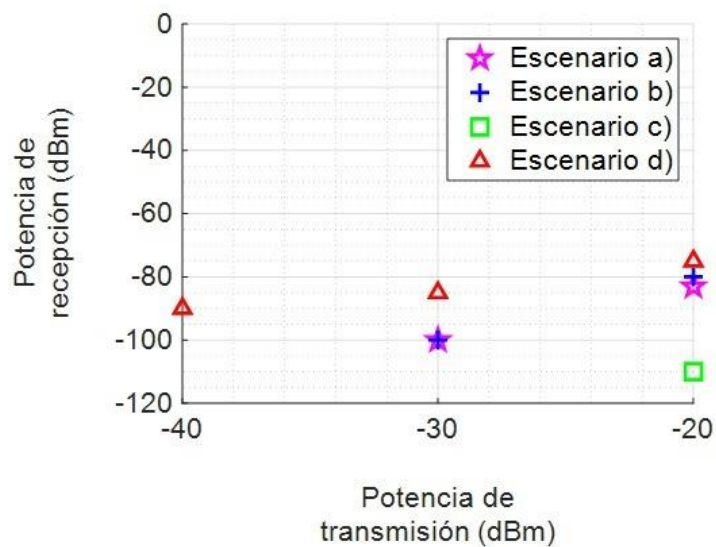
En la Figura 3.19 se muestran los diferentes esquemas de posicionamiento en los cuales se colocan la antena arreglo 4 dipolos como transmisor y la antena dipolo como receptor.





**Figura 3.19** Esquemas de posicionamiento para mediciones de potencia de recepción de la antena arreglo 4 dipolos como transmisor y antena dipolo doblado como receptor

La Figura 3.20 muestra los valores de potencia que se obtiene para cada esquema de posicionamiento de la Figura 3.19. No se utiliza amplificadores entre la salida del transmisor y la antena arreglo de 4 dipolos.



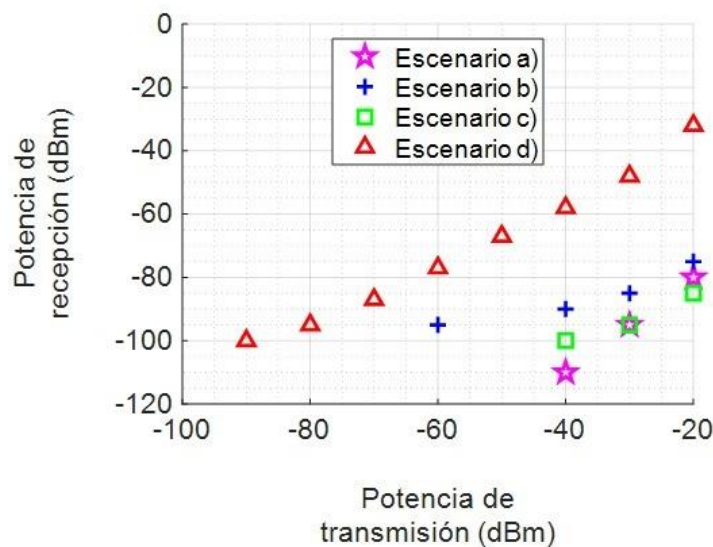
**Figura 3.20** Mediciones de nivel de potencia recibida para los esquemas de posicionamiento descritos en la Figura 3.19 sin el uso de amplificador entre el equipo transmisor y la antena arreglo 4 dipolos



Con los resultados obtenidos de la Figura 3.20 se observa que el escenario que presenta altos niveles de potencia de recepción es el escenario (d). En este mismo escenario se observa que sin utilizar el amplificador de 10 dB la potencia mínima que se utiliza en el transmisor es de  $-40$  dBm con el cual se obtiene un nivel de recepción de  $-90$  dBm en el receptor.

En los escenarios restantes donde los dipolos no se apuntan directamente existe un bajo nivel de potencia en recepción. El escenario (c) presenta el nivel más bajo de potencia de recepción debido a que el apuntamiento de las antenas es en direcciones opuestas.

La Figura 3.21 muestra los valores de potencia de recepción al insertar un amplificador de 10 dB entre la salida del transmisor y la antena arreglo 4 dipolos.



**Figura 3.21** Mediciones de nivel de cobertura para los esquemas de posicionamiento descritos en la Figura 3.19 con un amplificador de 10 dB entre el equipo transmisor y la antena arreglo 4 dipolos

Con los resultados obtenidos de la Figura 3.21 se observa que el escenario que presenta altos niveles de potencia de recepción es el escenario (d). Tomando en cuenta este mismo escenario, se determina que, al aumentar la potencia de transmisión, los niveles de potencia en recepción aumentan de forma cuasi lineal.

Al incorporar el amplificador al sistema se observa que a una potencia mínima de transmisión de  $-90$  dBm se obtiene en recepción una medida de  $-100$  dBm en el receptor. Por el contrario, al utilizar la potencia máxima de  $-20$  dBm se obtiene un nivel de potencia de  $-30$  dBm en el receptor.

En los escenarios restantes en los cuales los dipolos no se apuntan directamente, el nivel de recepción más alto obtenido es de  $-75$  dBm a una potencia de transmisión de  $-20$  dBm como se observa en el escenario (b).

### 3.4 MEDICIONES CON ANTENAS PARA RADIOENLACE

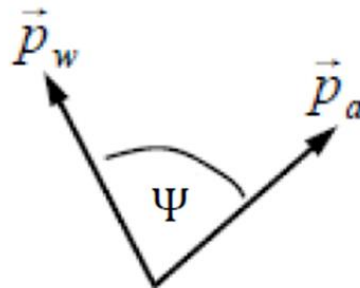
El esquema de configuración en el cual se va a realizar las mediciones de las antenas es el mostrado en la Figura 3.17.

Además, con estas mediciones se busca corroborar la ecuación del factor de pérdidas de polarización [15]. La ecuación (3.1) permite determinar el factor de pérdidas de polarización.

$$PLF = |\vec{P}_w^T \cdot \vec{P}_a|^2 = |\cos \Psi|^2 \quad (3.1)$$

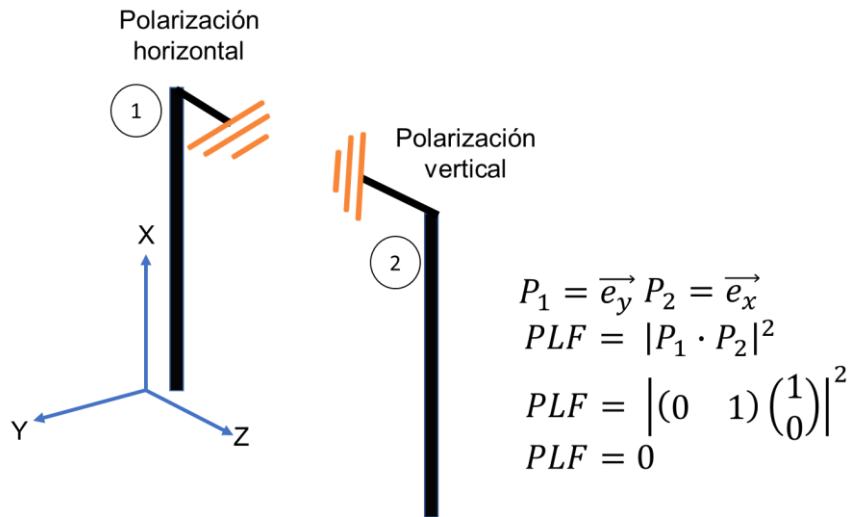
$\vec{P}_w$  se refiere a la onda incidente y  $\vec{P}_a$  se refiere a la polarización de la antena.

La Figura 3.22 muestra el ángulo  $\Psi$  formado por los vectores  $\vec{P}_w$  y  $\vec{P}_a$ .



**Figura 3.22** Ángulo  $\Psi$  formado por los vectores  $\vec{P}_w$  y  $\vec{P}_a$  para determinar el factor de pérdidas de polarización [15].

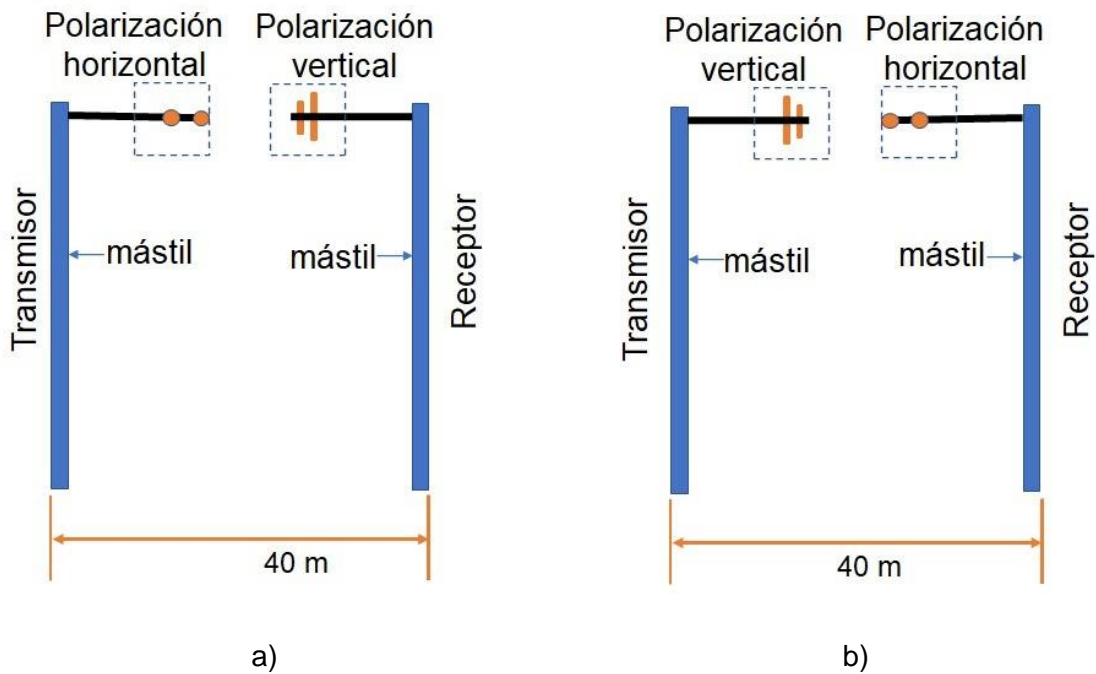
La Figura 3.23 muestra un ejemplo de cálculo del factor de pérdidas de polarización.

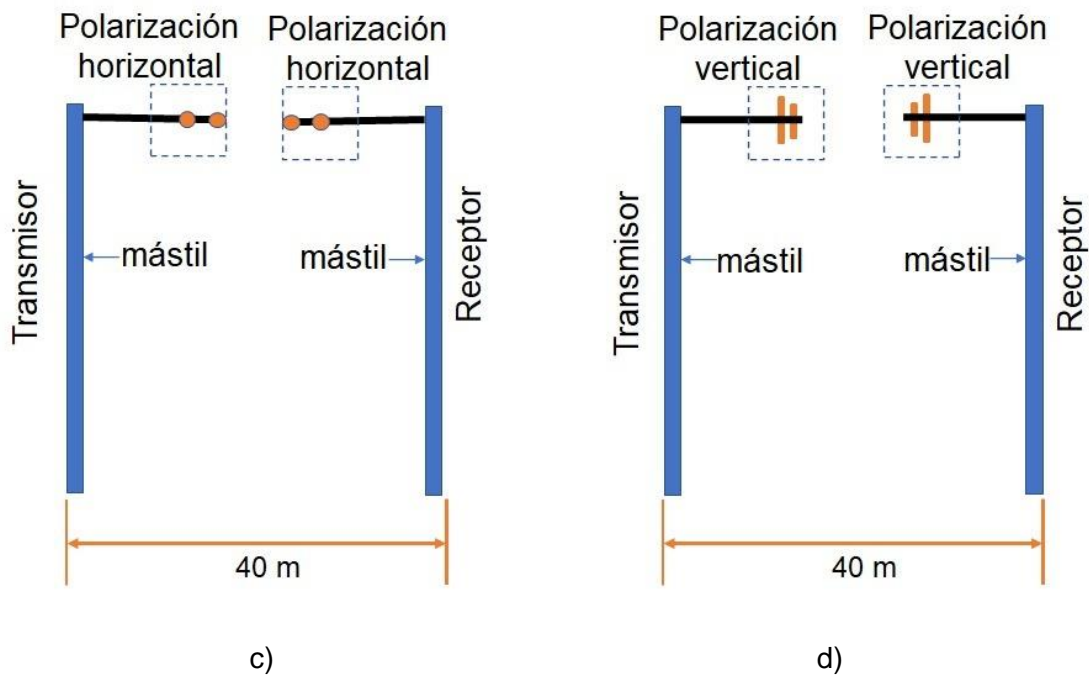


**Figura 3.23** Ejemplo del cálculo del factor de pérdidas de polarización

Para las mediciones de las antenas que establecen el radioenlace se determina 4 diferentes esquemas de posicionamiento con una distancia referencial de 40 m.

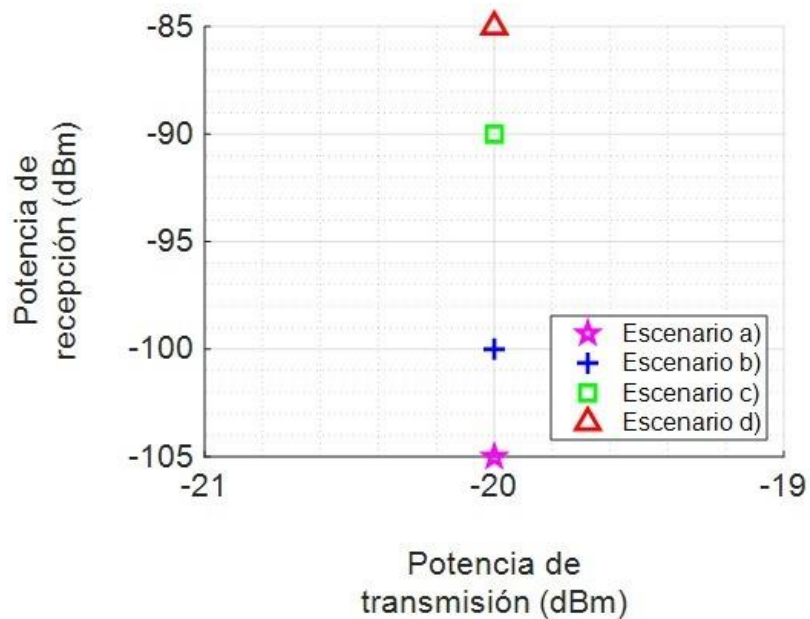
En la Figura 3.24 se muestran los diferentes esquemas de posicionamiento en los cuales se coloca la antena Landstorfer como transmisor y la Yagi-Uda como receptor.





**Figura 3.24** Esquemas de posicionamiento para mediciones de potencia de recepción de la antena Landstorfer como transmisor y antena Yagi-Uda como receptor

La Figura 3.25 muestra las medidas de cobertura para cada esquema de posicionamiento de la Figura 3.24 cuando no se utiliza amplificadores entre la salida del equipo transmisor y la antena Landstorfer.

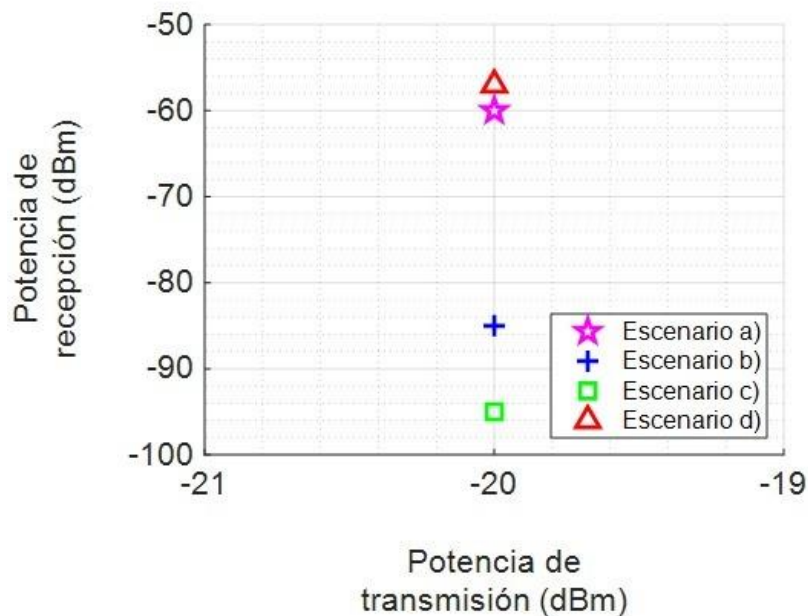


**Figura 3.25** Mediciones de potencia de recepción para los esquemas de posicionamiento descritos en la Figura 3.24 sin el uso de amplificador entre el equipo transmisor y la antena Landstorfer

Con los resultados obtenidos de la Figura 3.25 se observa que los escenarios de copolarización (c) y (d) presentan altos niveles de potencia de recepción. Por el contrario, en los escenarios (a) y (b) de polarización cruzada se obtienen bajos niveles de potencia.

Entre el escenario (c) y (d) existe una diferencia aproximada de  $-5$  dB lo que determina que la antena transmisora y receptora deben operar en copolarización vertical para obtener un óptimo rendimiento.

La Figura 3.26 muestra las medidas de potencia de recepción para cada esquema de posicionamiento de la Figura 3.24 cuando se inserta un amplificador de 10 dB entre la salida del transmisor y la antena Landstorfer.



**Figura 3.26** Mediciones de potencia de recepción para los esquemas de posicionamiento descritos en la Figura 3.24 con un amplificador de 10 dB entre el equipo transmisor y la antena Landstorfer

Con los resultados obtenidos de la Figura 3.26 se observa que al insertar el amplificador de 10 dB en el escenario (d) se obtiene un nivel de potencia de  $-57$  dBm en el receptor.

En el escenario (a) el nivel de potencia es aceptable, esto se debe a que el amplificador contrarresta el efecto de polarización cruzada. En el caso del escenario (b) se observa un bajo nivel de potencia en recepción debido a que la antena receptora se encuentra en polarización horizontal.

El escenario (c) entrega una medida de potencia de  $-95$  dBm, esto se debe a que las antenas se encuentran en copolarización horizontal.

### 3.5 MEDICIONES DE CAMPO

Para las mediciones de campo se utiliza la antena arreglo 4 dipolos como transmisora y la antena dipolo doblado como receptora.

La Tabla 3.8 muestra la distancia y ubicación de la antena transmisora y los puntos de interés donde se realiza las medidas de potencia de recepción con la antena receptora.

**Tabla 3.8** Ubicación geográfica y distancia de la antena arreglo 4 dipolos (transmisora) y la antena dipolo doblado (receptora)

|                              | Latitud         | Longitud         | Distancia desde el transmisor [km] |
|------------------------------|-----------------|------------------|------------------------------------|
| <b>SEDE QUITO RADIO CLUB</b> | 0° 10' 15,05" S | 78° 28' 20,85" O | -                                  |
| <b>UBICACIÓN 1</b>           | 0° 9' 57,33" S  | 78° 28' 41,66" O | 0,84                               |
| <b>UBICACIÓN 2</b>           | 0° 10' 44,40" S | 78° 29' 16,09" O | 1,93                               |

La Figura 3.27 muestra el escenario geográfico para las mediciones de campo en base a los datos de la Tabla 3.8.



**Figura 3.27** Escenario geográfico de los puntos de recopilación de mediciones de potencia



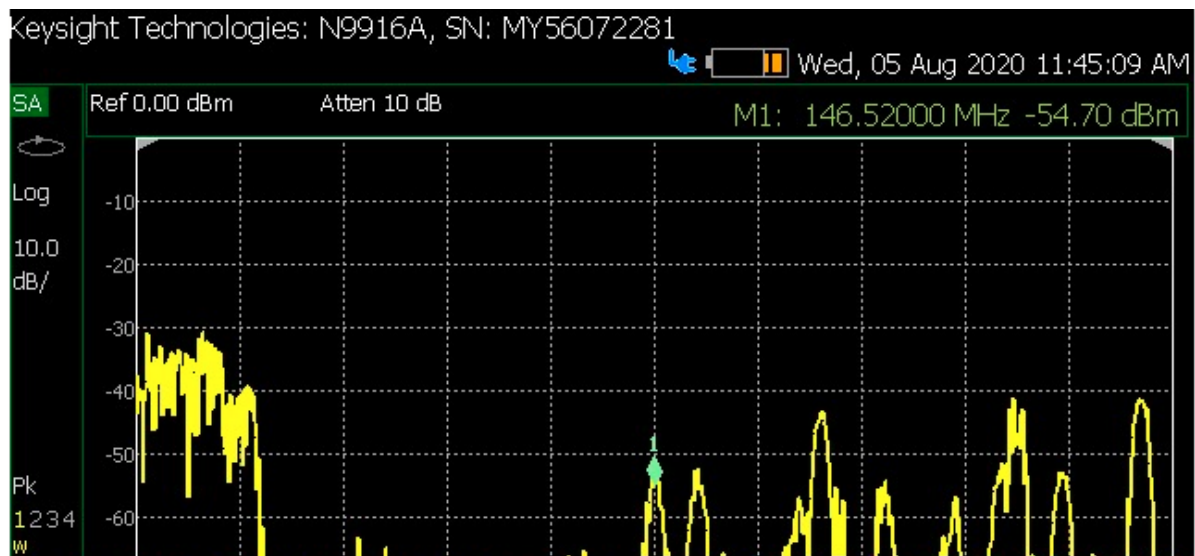
La antena transmisora se ubica en la sede del Quito Radio Club mientras que la antena receptora se transporta por diferentes puntos de la ciudad para la medición de los niveles de potencia.

La Tabla 3.9 muestra los niveles de potencia que se obtienen para cada una de las ubicaciones establecidas en la Figura 3.27.

**Tabla 3.9** Medidas de potencia en ubicaciones establecidas en la Figura 3.27

| Ubicaciones        | Potencia de Transmisión |       | Potencia de recepción |        |
|--------------------|-------------------------|-------|-----------------------|--------|
|                    | [mW]                    | [dBm] | [nW]                  | [dBm]  |
| <b>UBICACIÓN 1</b> | 9400                    | 39,73 | 3,388                 | -54,70 |
| <b>UBICACIÓN 2</b> | 800                     | 29,03 | 0,0481                | -73,18 |
|                    | 4000                    | 36,02 | 0,631                 | -62    |
|                    | 9400                    | 39,73 | 1                     | -60    |

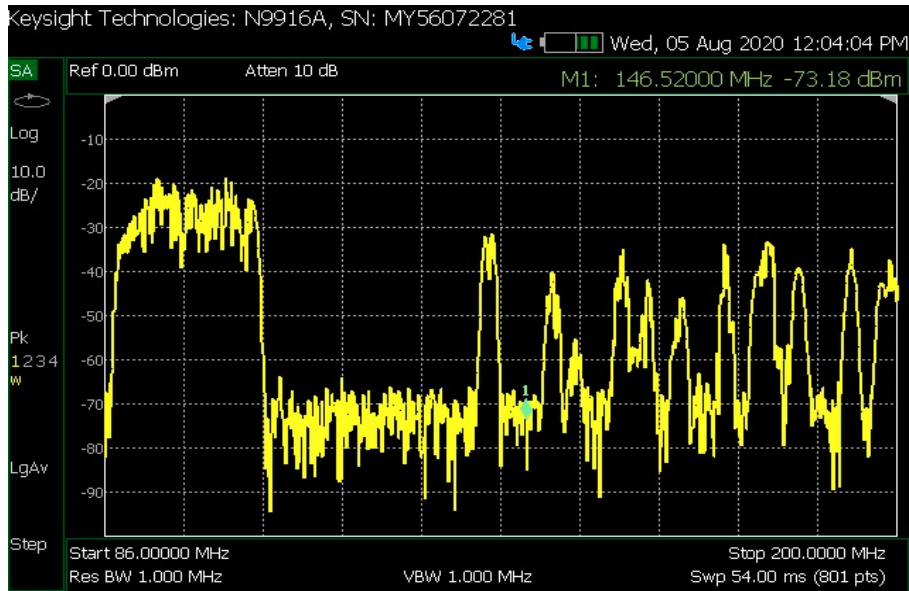
La Figura 3.28 presenta las medidas de potencia que se obtiene en la ubicación 1 con una potencia de 9400 mW en el equipo transmisor.



**Figura 3.28** Nivel de potencia recibido en la Ubicación 1

En la Figura 3.29 se muestra el nivel de potencia en la ubicación 2 con una potencia de 800 mW en el equipo transmisor.





**Figura 3.29** Medición de nivel de potencia recibido con 800 mW en el equipo transmisor -  
Ubicación 2

Con los resultados obtenidos en la Figura 3.28 y Figura 3.29 se observa que en la ubicación 1 se genera un nivel de potencia de recepción de  $-54,7$  dBm. En esta locación, la medición se realiza sin la presencia de obstáculos estructurales. De esta forma se tiene un libre apuntamiento hacia la ubicación del transmisor en el Quito Radio Club.

Para el caso de la ubicación 2, al estar rodeada por un considerable número de obstáculos estructurales y la presencia de otras señales del espectro que operan cerca de la banda de 146 MHz es necesario aumentar el nivel de potencia de transmisión. El nivel más alto de potencia en recepción generada es  $-60$  dBm al transmitir con potencia de  $-39,7$  dBm.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo de titulación consta de un breve estudio de la radioafición en el Ecuador. Actualmente el Sistema Nacional Interconectado está formado por 22 repetidoras distribuidas en las tres regiones del país distribuidas en 3 anillos (Norte, Sur y Oriente) los mismos que se interconectan mediante dos nodos "CEREBRO" ubicados en el cerro San Francisco y Carshao.

Por medio del Quito Radio Club, se realizó el proceso de gestión y asignación de frecuencias de operación de la estación repetidora "EPN". Las frecuencias asignadas para la estación repetidora son 146,790 MHz en transmisión y 146,190 MHz en recepción. En el caso de la comunicación con el Nodo "CEREBRO" se establecieron frecuencias de 220,325 MHz en transmisión y 222,000 MHz en recepción.

La estación repetidora "EPN" está conformada por una antena arreglo cuatro dipolos y una antena Yagi-Uda las mismas que operan a las frecuencias de 146 MHz y 220 MHz respectivamente.

La implementación de la antena arreglo cuatro dipolos se realizó en base al dipolo doblado simple. Se tomó en cuenta características como la frecuencia de operación de 146 MHz, cantidad con la cual se obtuvo una longitud de dipolo de  $0,425\lambda$ . En base a este resultado se implementaron los dipolos del arreglo.

La separación entre los dipolos que conforman el arreglo se realizó en base a la ecuación del factor de arreglo. De esta forma se eligió una distancia de  $0,76\lambda$  debido a que presenta un diagrama de radiación con un lóbulo principal más estrecho y con un menor número de lóbulos secundarios.

La simulación de la antena arreglo cuatro dipolos generó una frecuencia de 140 MHz, mientras que en la medición práctica se obtuvo una frecuencia de 145 MHz. Esta diferencia representa un error del 3,42% considerado aceptable. Este error se genera por efectos mecánicos y errores sistemáticos.

La simulación del nivel de cobertura del arreglo cuatro dipolos presenta valores entre  $-46$  dBm y  $-64$  dBm cuando el equipo receptor está ubicado a 10 km de la estación "EPN" y un nivel de potencia de recepción entre  $-73$  dBm y  $-91$  dBm cuando el equipo receptor

está ubicado a 20 km de la estación “EPN”. Los valores obtenidos son aceptables ya que están sobre un valor mínimo de  $-120$  dBm.

La antena Yagi-Uda se encuentra conformada por 6 elementos. El número de elementos se justifica por un valor referencial de ganancia de 12 dB de una antena estándar. Bajo esta premisa se implementa esta antena y se cumple con las características de portabilidad y liviandad.

La simulación de la antena Yagi-Uda generó una frecuencia de 224 MHz, mientras que en la medición práctica se obtuvo una frecuencia de 230 MHz. Esta diferencia representa un error del 2,68% considerado aceptable. Este error se genera por efectos mecánicos y la falta del balun y mástil.

La simulación del nivel de cobertura de la antena Yagi-Uda presenta un valor de  $-76,2$  dBm en el sentido Nodo “EPN” hacia Nodo “CEREBRO” y un valor de  $-79,2$  dBm en el sentido Nodo “CEREBRO” hacia Nodo “EPN”. Ambos resultados son aceptables ya que, por la experiencia en campo del Quito Radio Club, se opera en un rango entre  $-40$  dBm y  $-120$  dBm.

A una distancia de 2,1 km del Nodo “CEREBRO” se presenta un obstáculo natural en el cual se produce un efecto de difracción en la propagación de la onda. Esta pérdida causa que la onda tome la forma del obstáculo para continuar su trayecto hacia el receptor. A esta alteración se la denomina modelo “Filo de cuchillo”.

La estación repetidora “EPN” móvil está conformada por una antena dipolo doblado y una antena Landstorfer las mismas que operan a las frecuencias de 146 MHz y 220 MHz respectivamente.

La antena dipolo está conformada por un dipolo doblado simple. Esta antena fue implementada con el objetivo de garantizar portabilidad y movilización debido a que la misma se transporta a diferentes lugares para su operación. La antena opera en un área de cobertura de aproximadamente 6 km.

La simulación de la antena dipolo doblado simple generó una frecuencia de 146 MHz, mientras que en la medición práctica se obtuvo una frecuencia de 144 MHz. Esta diferencia representa un error del 1,37% considerado aceptable. Este error se genera por efectos mecánicos.

La simulación del nivel de cobertura de la antena dipolo simple presenta valores entre  $-37$  dBm y  $-55$  dBm cuando el equipo receptor está ubicado a 3 km de la estación móvil “EPN” y un nivel de potencia de recepción entre  $-64$  dBm y  $-82$  dBm cuando el equipo

receptor está ubicado a 6 km de la estación “EPN”. Los valores obtenidos son aceptables ya que están sobre un valor mínimo de  $-120$  dBm.

Con el objetivo de reducir el número de elementos de la antena Yagi-Uda utilizada para el radioenlace, se optó por implementar la antena Landstorfer. Esta antena se caracteriza por tener 3 elementos y mayor directividad.

La antena Landstorfer está conformada por elementos curvilíneos. Por esta razón, para el diseño estructural de esta antena se utilizó la caracterización matemática “*Smoothly Parameterized Easy Curve*”. Esta caracterización permite a través de una función ya definida modelar diferentes curvas suaves que se asemejan a la forma de los elementos de la antena.

Con las formas curvilíneas resultantes por la caracterización se generaron las respectivas simulaciones. Con esta información se exportó el perfil de cada uno de los elementos para su impresión y su futura construcción con el alambre de cobre. Se debe tomar en cuenta que para este trabajo de titulación se utiliza este material por las facilidades de doblez que presenta, al someterlo a ligeras variaciones en el perfil esto afecta a la frecuencia de resonancia de la antena. Si se desea evitar dichas variaciones se sugiere utilizar maquinaria especializada y un material más robusto.

La simulación de la antena Landstorfer generó una frecuencia de 220 MHz, mientras que en la medición práctica se obtuvo una frecuencia de 219 MHz. Esta diferencia representa un error del 0,45% considerado aceptable. Debido a que el error obtenido no es considerable, la radiación no se ve afectada ni desplazada.

La antena Landstorfer presenta grandes ventajas al compararla con una antena Yagi-Uda estándar ya que se reduce el número de elementos de la antena, la cantidad de lóbulos secundarios en el plano E y H, dado que la FBR del plano E y H de la antena Landstorfer es menor que la antena Yagi-Uda se concluye que la antena Landstorfer posee una mejor radiación hacia la dirección a la cual se apunta.

La simulación del nivel de cobertura de la antena Landstorfer presenta los mismos valores de potencia en recepción que la antena Yagi-Uda implementada en la estación repetidora fija “EPN”.

Para evidenciar el funcionamiento de las antenas se realizaron varias mediciones de campo en las cuales se comprobó que el nivel de potencia en el receptor aumenta cuando las antenas de cobertura local apuntan hacia el transmisor al no hacerlo el nivel de potencia en la recepción disminuye.

Las antenas al encontrarse en copolarización, el nivel de potencia en el receptor aumenta. Sin embargo, lo recomendable es que las antenas estén en copolarización vertical para obtener un mejor rendimiento. Al contrario, si las antenas se configuran en copolarización horizontal el nivel de potencia que se obtiene es menor en comparación a antenas en polarización cruzada.

La implementación de las diferentes antenas ha sido validada por medio de mediciones en campo, obteniéndose una buena coincidencia entre parámetros medidos y simulados. Uno de los principales aportes de este proyecto de titulación es la caracterización estructural de la antena Landstorfer, cuya implementación resulta atractiva en estaciones repetidoras para radioaficionados debido a la ganancia y patrón de radiación directivo que presenta.

Todos los elementos radiantes implementados son adecuados en un ambiente real que requiera cobertura omnidireccional, así como enlaces punto a punto.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

La radioafición permite entender los conocimientos sobre la forma en la que se realiza la comunicación, por lo cual se propone un futuro trabajo de titulación en el cual se realice la comunicación con los equipos activos para que los estudiantes experimenten la práctica de la radioafición y se conforme una educación más holística.

Para obtener mejores resultados con las antenas diseñadas e implementadas se recomienda utilizar material de aluminio de mejor aleación. El aluminio que se comercializa en el país es de baja aleación y su utilidad principal es para la construcción de ventanas o cubiertas.

Para el establecimiento de una estación de radioaficionado se debe destinar un aporte financiero considerable para las antenas, conectores, líneas de transmisión ya que estos componentes son un aspecto importante a considerar para ejercer el servicio de radioafición y comunicación.

Para reducir los errores porcentuales obtenidos se recomienda utilizar herramientas, equipo de laboratorio y materiales apropiados para la construcción de antenas.

Se recomienda diseñar una antena que permita realizar la cobertura local con la estación móvil con un radio de cobertura mayor a 6 km tomando en cuenta la frecuencia en la que se opera.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comtelca, “Desde hoy nuevo sistema permitirá la comunicación en casos de emergencias en los que las redes tradicionales dejan de funcionar,” <http://comtelca.org/desde-hoy-nuevo-sistema-permitira-la-comunicacion-en-casos-de-emergencias-en-los-que-las-redes-tradicionales-dejan-de-funcionar/>, 2019/11/15.
- [2] P. Rinaldo, Guía internacional del radioaficionado, Marcombo, 1995.
- [3] J. Arguello, “Radioaficionados: la primera red social”, [https://elpais.com/elpais/2016/05/12/eps/1463004015\\_146300.html](https://elpais.com/elpais/2016/05/12/eps/1463004015_146300.html), 2019/11/15.
- [4] G. Robles, “Una solución bottom-up de conectividad inalámbrica”, Curso de doctorado Temas Avanzados de Redes de Ordenadores”, Departamento de Ingeniería Telemática, Universidad Politécnica de Madrid, 2002.
- [5] M.A. González, “Los radioaficionados, un nexo entre damnificados, rescatistas y sus familias”, <https://www.elcomercio.com/actualidad/radioaficionados-damnificados-rescatistas-familias-terremoto.html>, 2019/11/15.
- [6] ARCOTEL, “Resolución 04-03-ARCOTEL-2016”.
- [7] ARCOTEL, “Plan Nacional de Frecuencias”.
- [8] B. M. Reljić, “A Novel Printed Full-Wave Yagi-Uda Antenna”, Microwave Review, pp 10-12, 2008.
- [9] I. R. Mancheno, “Historia de la radiodifusión radio el prado”, <https://es.slideshare.net/IgnacioRamosMancheno/historia-de-la-radiodifusin-radio-el-prado>, 2019/11/20.
- [10] Quito Radio Club, “Historia”, <http://www.quotradioclub.com/acerca-de/historia/>, 2019/11/20.
- [11] CONATEL, “Reglamento para radioaficionados”.
- [12] R.A. Baldeón Checa, “Estudio y análisis técnico del sistema nacional interconectado de comunicaciones en la banda de dos metros, asignada a radioaficionados, como red alterna de comunicaciones en eventos de emergencia,” Proyecto de grado, Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador, 2016. Disponible en <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11841>

- [13] ARCOTEL, “RESOLUCIÓN ARCOTEL-2015-0841,”
- [14] CONATEL, “RESOLUCIÓN TEL-597-26-CONATEL - 2013,”
- [15] J. D. Kraus and J. Marhefka, Antennas For All Applications. Tata McGraw-Hill, 1997.
- [16] R.V. Sánchez, “CAPÍTULO 2: MODELOS DE ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA”,  
[http://www.geocities.ws/rosa\\_virgen\\_sm/Comunicaciones/Tel\\_celular/6\\_capitulo\\_2.pdf](http://www.geocities.ws/rosa_virgen_sm/Comunicaciones/Tel_celular/6_capitulo_2.pdf), 2020/02/15.
- [17] M.J. Cano, “Red de sensores inalámbricos para el Canal del Bajo Guadalquivir: Planificación y Pruebas de Viabilidad,” Proyecto de grado, Departamento de Ingeniería en Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2012. Disponible en <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12046>
- [18] RAYmaps, “Knife Edge Diffraction Model”,  
<http://www.raymaps.com/index.php/knife-edge-diffraction-model/>,2020/10/13
- [19] F. Landstorfer, “A new type of directional antenna,” in 1976 Antennas and Propagation Society International Symposium, 1976, vol. 14, pp. 169–172.
- [20] A. C. Mak, C. R. Rowell, and R. D. Murch, “Low cost reconfigurable landstorfer planar antenna array,” IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 57, no. 10, pp. 3051–3061, 2009.
- [21] A. Jacobson, “Smoothly parameterized ease curve,”  
<http://www.alecjacobson.com/weblog/?p=3255>, 2013.
- [22] OPWEB.DE, “IFR FM/AM-500A” Communications Service Monitor”,  
<https://www.opweb.de/espanol/empresa/IFR/FM-AM-500A>, 2020/07/04.

## **ANEXOS**

ANEXO A. Perfil del reflector de la antena Landstorfer

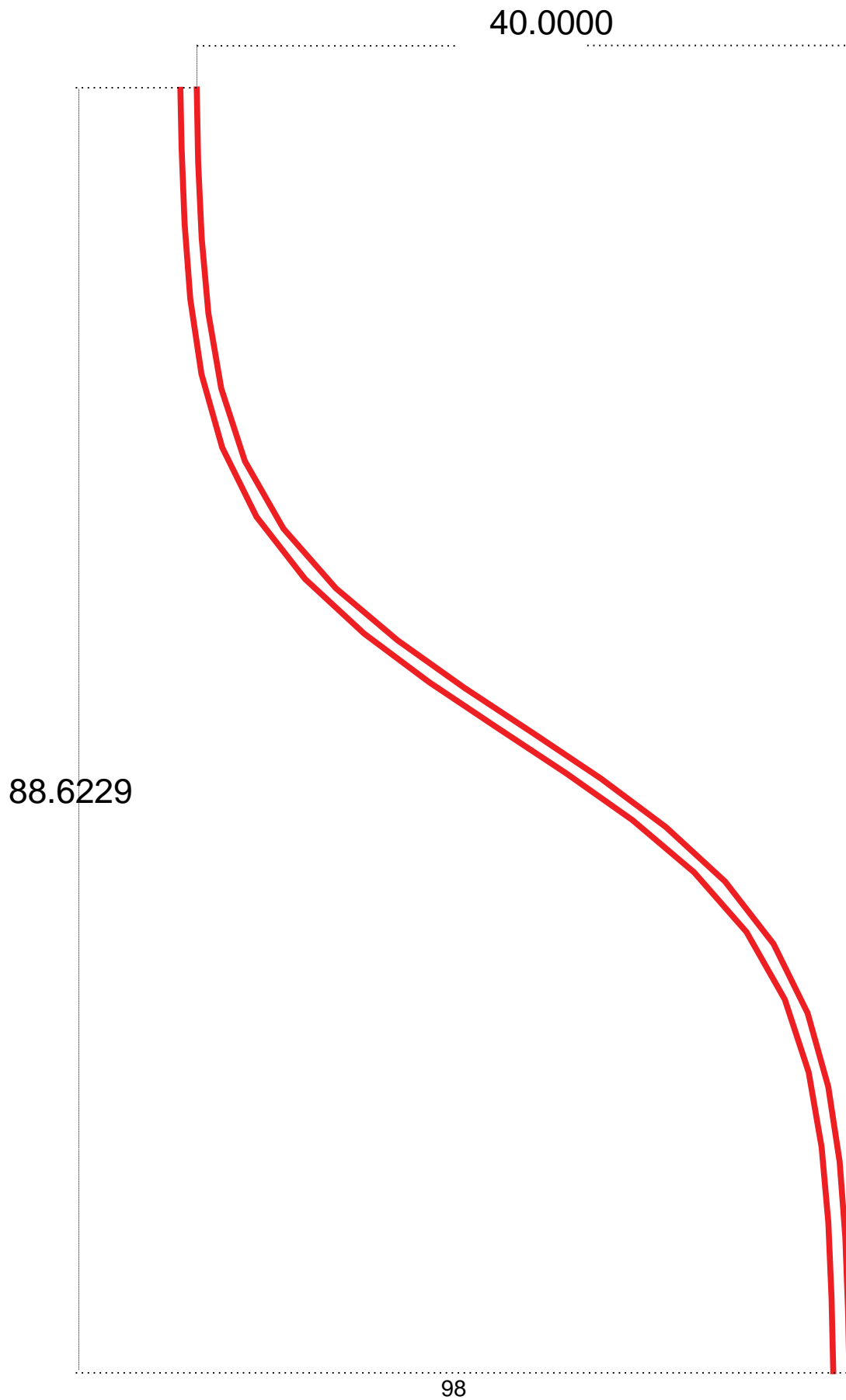
ANEXO B. Perfil del dipolo de la antena Landstorfer

ANEXO C. Perfil del director de la antena Landstorfer

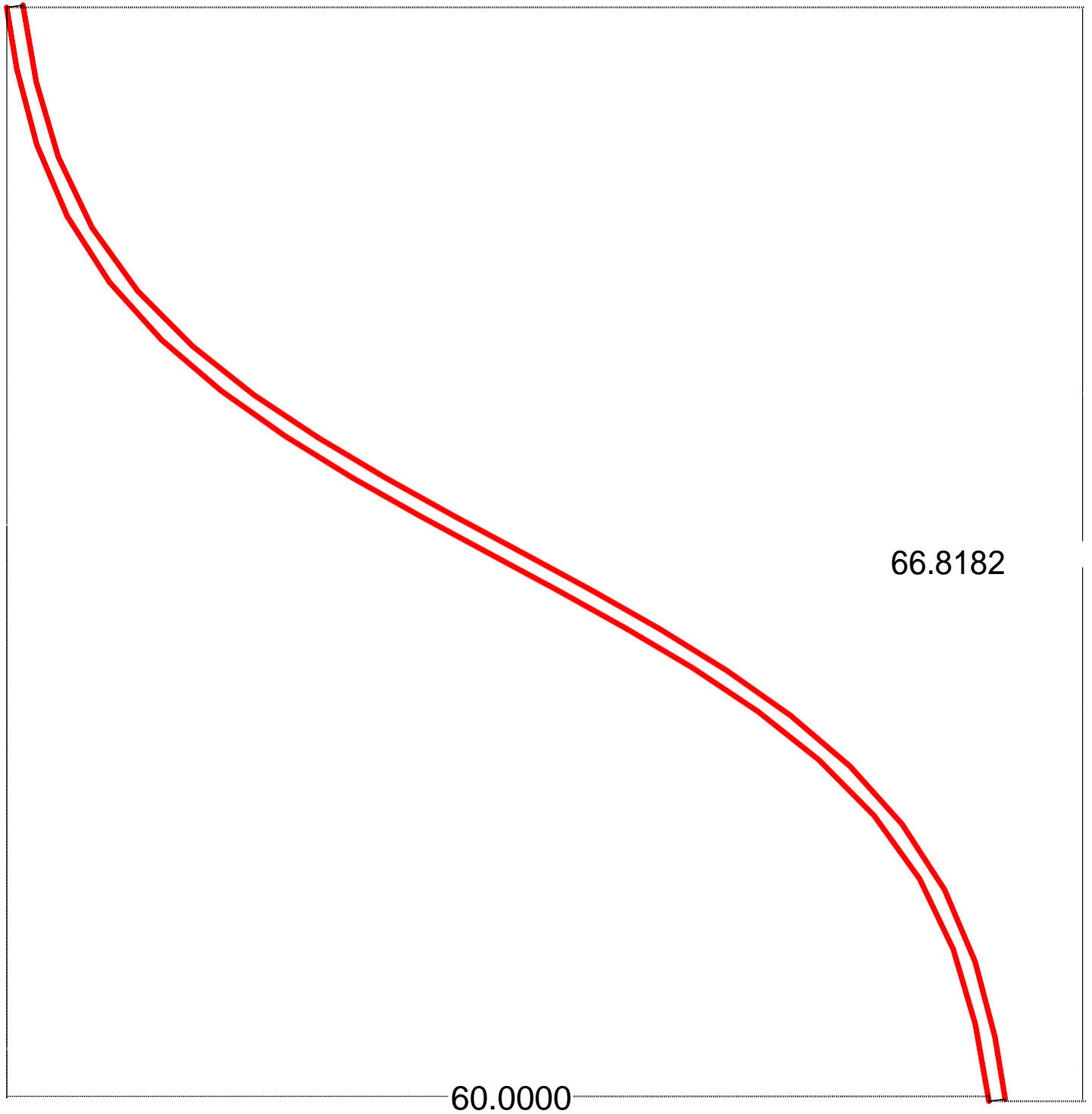
ANEXO D. Material Multimedia y evidencias fotográficas



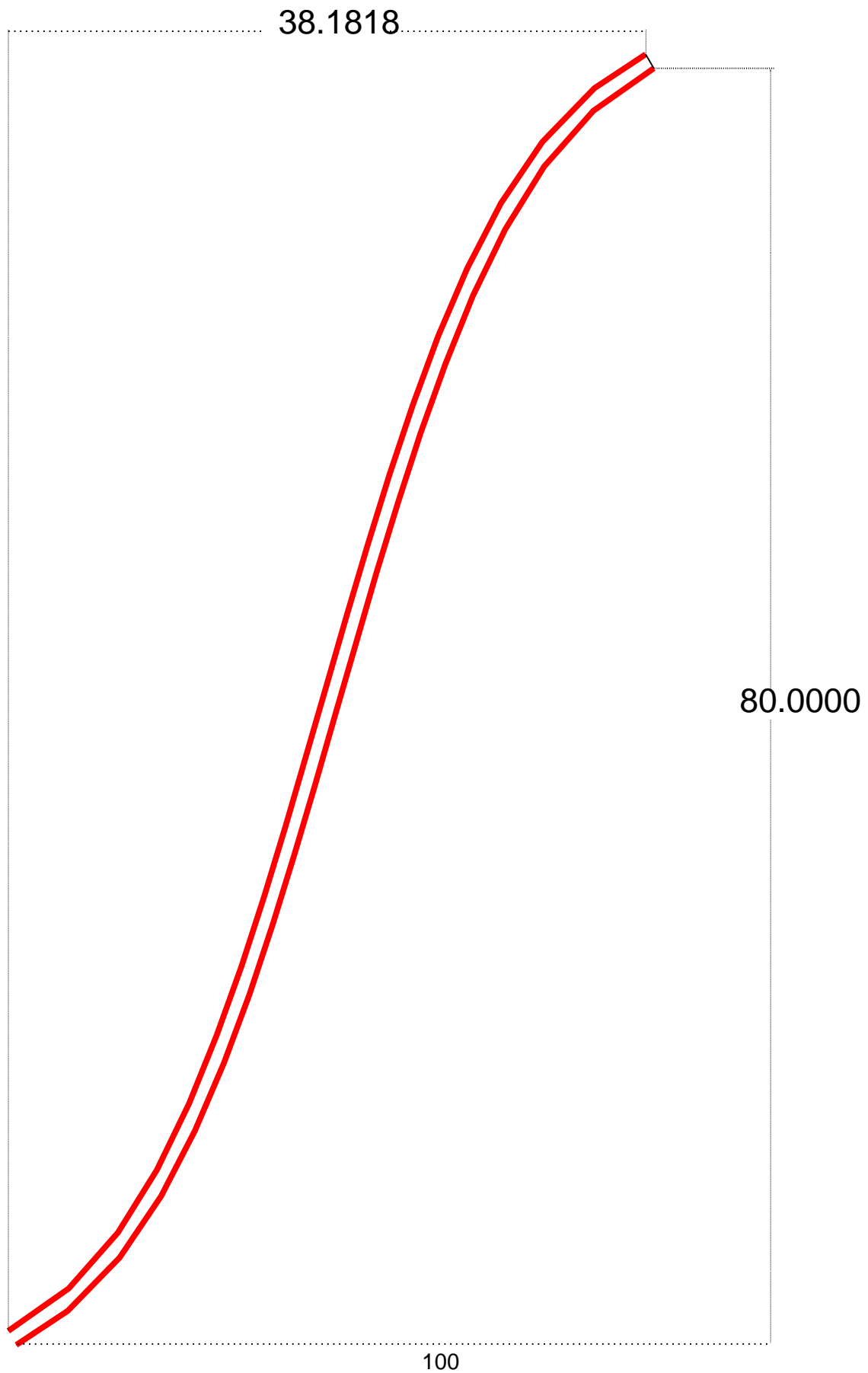
ANEXO A.  
PERFIL REFLECTOR ANTENA LANDSTORFER



ANEXO B.  
PERFIL DIPOLO ANTENA LANDSTORFER



ANEXO C.  
PERFIL DIRECTOR ANTENA LANDSTORFER



## **ANEXO D.**

### **MATERIAL MULTIMEDIA Y EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS**

El material multimedia y evidencias fotográficas de la construcción de las antenas se adjuntan en formato digital.

## **ORDEN DE EMPASTADO**