

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica



**Diseño del sistema de comunicación de datos entre el complejo de
abastecimiento de agua y el Centro de Producción Río Macho**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Instituto Costarricense de Electricidad
Centro de Producción Río Macho

David Antonio Meza Brenes

Cartago, Junio 2008

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA

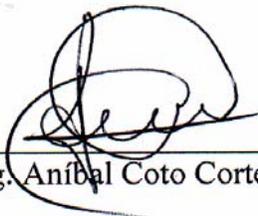
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

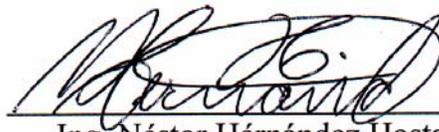
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



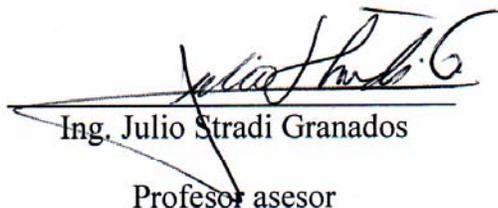
Ing. Aníbal Coto Cortés

Profesor lector



Ing. Néstor Hernández Hostaller

Profesor lector



Ing. Julio Stradi Granados

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 12 de Junio, 2008

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Junio 2008

David Meza Brenes.

David Antonio Meza Brenes
Céd: 3-0381-0318

Resumen

Las comunicaciones eléctricas a nivel de red están evolucionando de la propagación a través de guías de onda a la propagación vía aire, esto hace posible abarcar grandes distancias con una inversión económica mucho menor.

En una empresa en donde se requiere una comunicación constante entre distintas áreas involucradas en el proceso productivo es importante contar con una carretera de información que soporte las exigencias tecnológicas. El sistema de comunicación que se utiliza actualmente en el centro de producción Río Macho es obsoleto, lo cual impide poder satisfacer estas necesidades tecnológicas. Sin embargo, para resolver esto es necesario establecer una solución que, además de cumplir con los requerimientos de comunicación de la planta, sea sostenible económicamente.

En este documento se presenta el diseño del sistema de comunicación inalámbrico entre el centro de producción de electricidad Río Macho y el sistema de abastecimiento de agua, considerando las pérdidas de la señal debido a las condiciones ambientales, efectos del terreno y propagación en espacio libre.

A partir de las características de los equipos de comunicación inalámbrica disponibles en el mercado se determinan la potencia de transmisión, la sensibilidad de recepción y el tipo de antenas que satisfagan las necesidades del enlace. Con esto se busca definir la estructura de red y protocolos de comunicación para garantizar la factibilidad de una futura implementación del sistema.

La comprobación del diseño se hace utilizando el simulador de enlaces Radio Mobile, con el cual, al modelar las características de terreno, topología y equipo, se obtiene el comportamiento esperado para el enlace en caso de que este sea implementado.

Palabras claves: Propagación, pérdidas de espacio libre, sistema inalámbrico, simulador de enlaces.

Abstract

The electric communications network are evolving spreading across waveguides to a spread air, making it possible to cover large distances with a much smaller economic investment.

In a company where there is a need for constant communication between different areas that are involved in the production process it is important to have a highway of information that supports the demands. The current channel of communication in Río Macho Production Center is outdated; therefore it is unable to match the technological needs. However, in order to solve this issue it is necessary to establish a solution that meets the communication requirements and the economical possibilities in the company.

This document presents the design of wireless system between the Río Macho Electricity Production Center and the water supply system, considering the signal losses due to environmental conditions, terrain effects and loss in free space.

The power transmission, the sensitivity receiving and antennas that meet the needs of the link are determined based on the characteristics of wireless communication equipment available in the market. That seeks for define the structure of network and communication protocols that guarantee the system could be implemented.

The design verification is made using the links simulator Radio Mobile, with it, modeling the characteristics of land, topology and equipment, is obtained the behavior expected for the link in case it was implemented.

Keywords: Propagation, loss in free space, wireless system, link simulator.

Dedicatoria

*Este proyecto es dedicado especialmente a mis padres
por apoyarme incondicionalmente a través*

de toda mi carrera.

A Mariana, por estar siempre a mi lado.

*Y a todas las personas que siempre
me han estado apoyando.*

Agradecimiento

Al Ing. Edward Astúa por todo el apoyo brindado.

*Al Ingeniero Julio Stradi por orientarme en el
desarrollo del proyecto.*

*A los Ingenieros Aníbal Coto y
Néstor Hernández.*

*En general a todos los funcionarios
del Centro de Producción
Río Macho.*

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Definición del Problema	1
1.1.1 Generalidades del problema.....	1
1.1.2 Descripción sintética del problema	2
1.2 Enfoque de la solución.....	3
Capítulo 2: Meta y Objetivos	4
2.1 Meta.....	4
2.2 Objetivo general.....	4
2.3 Objetivos específicos	4
Capítulo 3. Marco teórico	5
3.1 Estándares de comunicación inalámbricos	5
3.2 Propagación de la señal electromagnética	6
3.2.1 Ecuación de Fresnel	6
3.2.2 Curvatura de la tierra	8
3.2.3 Despeje de Clearance	10
3.2.4 Visibilidad radioeléctrica	11
3.2.5 Modelo de propagación de las señales.....	12
3.2.6 Campo eléctrico recibido	14
3.3 Características de enlace.....	17
3.3.1 Características de las antenas.....	17
3.3.2 Pérdidas del enlace	19
3.3.3 Ganancia del sistema	21
3.4 Conceptos de redes.....	22
3.4.1 Topología de Red	22
3.4.2 Direccionamiento	22
3.4.2.1 Dirección IP	22
3.4.2.2 Dirección MAC.....	24
3.4.3 Protocolo IP	24
3.4.4 Elementos de red.....	25
3.4.4.1 Estación base	25
3.4.4.2 Switch	25
Capítulo 4: Procedimiento Metodológico.....	27
4.1 Definición de la solución	27
4.2 Descripción de las etapas definidas para el proyecto.	27
4.2.1 Análisis de la línea vista del sistema de tomas de agua y el centro de producción.....	27
4.2.2 Diseño del enlace a nivel de propagación de la señal.	27
4.2.3 Diseño del enlace a nivel de estructura de red.	28
4.2.4 Diseño de manual de hardware y software.....	28
4.3 Implementación de la solución.....	28
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	29
5.1 Estudio de factibilidad	29
5.1.1 Selección del estándar inalámbrico	29
5.1.2 Análisis de línea vista del área de estudio	30
5.1.3 Selección del prototipo de enlace	33
5.2 Diseño de las características de enlace del prototipo	36

5.2.1	Diseño del enlace entre el CP-CG	36
5.2.1.1	Influencia del terreno sobre la propagación de la señal.....	37
5.2.1.2	Pérdidas del enlace	40
5.2.1.3	Potencia de transmisión, recepción y ganancia.....	43
5.2.2	Diseño del enlace entre CG y PSF	45
5.2.3	Diseño del enlace entre el PSF y TRM	47
5.3	Diseño a nivel de red	49
5.3.1	Infraestructura de red.....	49
5.3.2	Creación de subredes.....	51
5.3.3	Protocolo de ruteo.....	53
5.3.4	Configuración de la tabla estática de ruteo IP	54
5.3.5	Seguridad	55
5.3.6	Alimentación	56
5.3.7	Protecciones	57
5.3.8	Aplicaciones.....	57
Capítulo 6:	Análisis y resultados de simulación.....	60
6.1	Resultados de la simulación a nivel de propagación.....	60
6.1.1	Resultados del enlace CP-CG	60
6.1.2	Resultados del enlace CG-PSF	66
6.1.3	Análisis y resultados del enlace PSF y TRM	69
6.2	Análisis y resultados a nivel de transferencia de datos.....	72
6.2.1	Verificación del protocolo de ruteo.....	72
6.2.2	Verificación de puntos de acceso y transferencia de datos.	74
Capítulo 7:	Conclusiones y recomendaciones.....	80
7.1	Conclusiones	80
7.2	Recomendaciones	81
Bibliografía	83
Apéndices.....	86
Apéndice A.1	Cálculos.....	86
A.1.1	Cálculo del despeje de Clearance y radio de la zona de Fresnel.....	86
A.1.2	Cálculos para visibilidad radioeléctrica.....	91
A.1.3	Cálculo influencia del terreno en la propagación de la señal	91
A.1.4	Cálculo de las pérdidas del enlace	93
A.1.5	Cálculo de las características de las antenas.....	94
Apéndice A.2	Glosario y abreviaturas.....	95
Apéndice A.3	Lista de entregables.	98
Apéndice A.4	Manual de instalación de hardware	100
A.4.1	Instalación del pararrayos.....	100
A.4.2	Montaje del equipo de red	101
A.5	Manual configuración de software	105
Anexos	114
Anexo B.1	Configuración del Simulador Radio Mobile.	114
Anexo B.2	Plan de atribución de bandas de frecuencias.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Zona de Fresnel alrededor de la línea vista [3]	6
Figura 3.2 Principio de Huygens [5].	7
Figura 3.3 Propagación del rayo en la atmósfera estratificada [3].....	8
Figura 3.4 Representación geométrica del factor de flecha [3].	9
Figura 3.5 Despeje sobre obstáculos de Clearance.....	10
Figura 3.6 Representación del horizonte radioeléctrico [6].	11
Figura 3.7 Modelo de tierra curva [6].....	12
Figura 3.8 Patrón de radiación típico de una antena parabólica [10]	17
Figura 3.9 Variación del ángulo de elevación y azimut [10]	18
Figura 5.1 Ubicación de los puntos de estudio.....	30
Figura 5.2 Perfil del terreno para el enlace entre el CP y TRM	31
Figura 5.3 Perfil del terreno para el Emb, TOsc y TT.....	32
Figura 5.4 Diagrama esquemático del enlace inalámbrico.....	36
Figura 5.5 Línea vista entre el CP y CG.....	37
Figura 5.6 Perfil del terreno para el enlace entre el CP y CG.....	37
Figura 5.7 Punto y ángulo de reflexión con respecto al rayo directo, entre CG-CP	39
Figura 5.8 Atenuación por gases atmosféricos [11].	41
Figura 5.9 Línea vista entre el CG y PSF	45
Figura 5.10 Perfil del terreno e influencia del RR en el enlace CG-PSF	46
Figura 5.11 Línea vista entre el PSF y la TRM.....	47
Figura 5.12 Perfil del terreno para el enlace entre el PSF y TRM.	47
Figura 5.13 Infraestructura de la red entre el CP y las tomas de agua	51
Figura 6.1 Enlace entre el CP y CG	61
Figura 6.2 Enlace microonda entre el CP- CG	62
Figura 6.3 Perfil de enlace entre el CP y CG.....	65
Figura 6.4 Enlace entre el CG y PSF	66
Figura 6.5 Simulación del enlace PSF-CG.....	67
Figura 6.6 Perfil de enlace entre el CG y PSF.....	68
Figura 6.7 Enlace entre el PSF y TRM.....	69
Figura 6.8 Simulación del enlace PSF-TRM.....	69
Figura 6.9 Simulación del enlace PSF-TRM con una PTx de 20dBm y una ganancia de 22.3dBi	71
Figura 6.10 Perfil de enlace entre el PSF y TRM	71
Figura 6.11 Envío de paquetes de actualización del protocolo RIP.....	73
Figura 6.12 Eventos desencadenados del protocolo RIP.....	74
Figura 6.13 Simulación de transferencia de datos entre los nodos 2, 3, 10 y 11	75
Figura 6.14 Transferencia de paquetes a nivel ethernet en la red	76
Figura 6.15 Transferencia de paquetes a nivel de link inalámbrico.....	76
Figura 6.16 Diagrama de flujo de transferencia de datos entre el CP y TRM	78
Figura 6.17 Retransmisiones durante la transferencia de información.....	79
Figura A.1 Instalación del pararrayos.....	100
Figura A.2 Protección del conector RJ45	101
Figura A.3 Conexión entre BSU y switch, sin alimentador POE externo.....	102
Figura A.4 Conexión entre BSU y switch con inyector POE externo.....	102
Figura A.5 Convertidor RJ11 a DB9	103

Figura A.6 Cable crossover serial, para la programación del switch	103
Figura A.7 Conexión de la BSU a las antenas,	104
Figura A.8 Conexión de una antena a la BSU, sin protector de descargas.....	104
Figura A.9 Pantalla de acceso a BSU	105
Figura A.10 Modificación de la dirección IP y máscara de subred para ambas interfaces de la BSU	107
Figura A.11 Configuración de los parámetros del protocolo RIP	108
Figura A.12 Configuración de los parámetros de ethernet.	109
Figura A.13 Modo de operación de la BSU	110
Figura A.14 Sensibilidad y frecuencia de operación.....	111
Figura A.15 Cambio de clave de seguridad y nombre de usuario de la BSU.....	112
Figura A.16 Filtrado de direcciones MAC	113
Figura A.17 Configuración WPA.....	113
Figura B.1 Configuración de los parámetros de la red	114
Figura B.2 Configuración de la topología del sistema	115
Figura B.3 Configuración de las características del equipo.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Comparación a nivel general de los estándares 802.11a/b.....	5
Tabla 3.2 Valores típicos de permitividad relativa y la conductividad.....	16
Tabla 3.3 Principales formas de direccionamiento IP [14].....	23
Tabla 5.1 Altura y ubicación de las tomas de agua y el centro de producción	30
Tabla 5.2 Resumen de Clearance, zona Fresnel y u' para el Emb, TOsc y TT.....	33
Tabla 5.3 Datos geográficos del CG,PSF,L TT	34
Tabla 5.4 Características geográficas del CP y CG	36
Tabla 5.5 Atenuación de los cables comúnmente utilizados en redes.	42
Tabla 5.6 Características geográficas del PSF y CG	45
Tabla 5.7 Pérdidas del enlace CG-PSF	46
Tabla 5.8 Características geográficas del PSF y TRM.....	47
Tabla 5.9 Resumen de las pérdidas del enlace PSF-TRM.....	48
Tabla 5.10 Direcciones y máscara de subred para cada uno de los puntos	52
Tabla 5.11 Parámetros de configuración del protocolo RIP v2.....	53
Tabla 5.12 Tabla de ruteo de la BSU en el CP.....	54
Tabla 5.13 Puertos habilitar para las aplicaciones	58
Tabla 6.1 Diferencia de altitud-distancia entre el GPS y el simulador Radio Mobile. 60	
Tabla 6.2 Ganancia del sistema CP-CG	61
Tabla 6.3 Pérdidas de propagación estimadas para el enlace CP-CG	62
Tabla 6.4 Margen de desvanecimiento de la señal	63
Tabla 6.5 Resultados obtenidos mediante simulación para diferentes valores de potencia de transmisión.	64
Tabla 6.6 Pérdidas de propagación estimadas para el enlace PSF-CG.	67
Tabla 6.7 Margen de desvanecimiento de la señal	67
Tabla 6.8 Pérdidas de propagación estimadas para el enlace PSF y TRM	70
Tabla 6.9 Margen de desvanecimiento de la señal	70
Tabla 6.10 Nodo ID por dispositivo de red	72
Tabla A.1 Distancia y altura de la primera obstrucción para el enlace TRM-CP	86
Tabla A.2 Distancia y altura de la segunda obstrucción para el enlace TRM-CP.....	86
Tabla A.3 Distancia y altura de la primera obstrucción para el enlace Emb-CP.....	87
Tabla A.4 Distancia y altura de la segunda obstrucción para el enlace Emb-CP	87
Tabla A.5 Distancia y altura de la primera obstrucción para el enlace TOsc-CP	88
Tabla A.6 Distancia y altura de la segunda obstrucción para el enlace TOsc-CP.....	88
Tabla A.7 Distancia y altura de la primera obstrucción para el enlace TT-CP	89
Tabla A.8 Distancia y altura de la segunda obstrucción para el enlace TT-CP	89
Tabla A.9 Distancia y altura de la tercera obstrucción para el enlace TT-CP	90
Tabla A.10 Distancia y altura de la obstrucción para el enlace CG-CP.....	90

Capítulo 1: Introducción

El Centro de Producción Río Macho, ubicado en el distrito de Orosi en Paraíso de Cartago, es una planta hidroeléctrica que genera actualmente 120MVA. Los principales puntos de toma de agua son la presa Tapantí con una capacidad de $37\text{m}^3/\text{s}$, la toma Río Macho con $8.5\text{m}^3/\text{s}$ y el embalse el Llano con un volumen de 380000m^3 de agua en un área de 60000m^2 .

Esta planta fue creada en la década de los años 70, la mayoría del equipo como generadores, turbinas, controles son originales, esto la convierte en la segunda planta más veja de la red de distribución de electricidad del ICE.

1.1 Definición del Problema

1.1.1 Generalidades del problema

Para mantener el correcto funcionamiento de la planta se realiza el monitoreo en tiempo real de las variables físicas presentes en las tomas de agua y el embalse. Entre las mediciones más importantes se encuentran las de nivel, caudal, presión y temperatura. La mayoría de los sensores utilizados son analógicos y datan de los años 70, las mediciones son tomadas directamente del instrumento y recopiladas en registros manuales, estos datos son dictados al centro de producción vía telefónica cada 30 minutos.

El control de las compuertas de las tomas de agua y el embalse se hace desde estaciones remotas ubicadas en los mismos. Para efectuar alguna maniobra de apertura o cierre el centro de control tiene que contactar a la respectiva estación.

El sistema alternativo de comunicación entre el complejo de abastecimiento de agua y el centro de producción es un sistema de radio de cinco canales (pentacanal). Este sistema de comunicación se encuentra obsoleto, ya que en el mercado no se encuentran repuestos ni actualizaciones para la radio base.

Con el fin de realizar el monitoreo de las variables y control de compuertas desde el centro de producción se pretende instalar sensores digitales, automatizar el control de las compuertas de las tomas y el embalse, así como crear un sistema de vigilancia

mediante el empleo de cámaras de video y accionamiento automático de portones de seguridad.

Para ofrecer estos servicios se requiere primero crear una infraestructura de comunicaciones que soporte la transmisión de paquetes de datos y video. Esta debe de cumplir, entre otros, con los siguientes requisitos:

- Conexión estable en todo momento.
- Fácil adaptación a cambios en la infraestructura de control y de red.
- Ancho de banda que soporte transmisión de video y datos.
- En general toda aplicación que soporte el protocolo IP.

Dado que la implementación de un sistema de comunicación entre las tomas de agua y el centro de producción es de gran a escala, en el cual se requiere una gran inversión económica en infraestructura, compra de equipo y personal, es necesario primero determinar la factibilidad del proyecto.

El proyecto desarrollado en este documento presenta el diseño del sistema de comunicación de datos, tomando como referencia las características de los equipos que actualmente se encuentran en el mercado, estableciendo el área geográfica en la cual se puede implementar el sistema inalámbrico y determinando la forma en la cual se deben instalar y configurar los equipos.

1.1.2 Descripción sintética del problema

La mayor dificultad para la instalación de un sistema inalámbrico de comunicaciones es que el centro de producción no tiene línea vista hacia el complejo de abastecimiento, lo cual evita que el enlace se haga en forma directa; por lo tanto, se deben buscar zonas intermedias de repetición que tengan línea vista tanto con el complejo de tomas de agua como al centro de producción.

Para esto se busca determinar el área geográfica, en la cual se pueda establecer un enlace inalámbrico, y a partir de esto seleccionar un prototipo de enlace al cual se le definirán las características de enlace y equipo que satisfagan las necesidades de la empresa, y que justifique adecuadamente la inversión económica de su implementación.

1.2 Enfoque de la solución

Mediante el análisis práctico de las condiciones geográficas en las cuales se encuentra inmerso el centro de producción y el sistema de abastecimiento de agua se estableció un área en la cual es factible realizar un enlace inalámbrico con línea de vista, definiendo con esto un prototipo de enlace del sistema de comunicación a diseñar.

Se diseñó el prototipo de enlace considerando el perfil de enlace e identificando a partir de este los efectos que el terreno pueda traer sobre la propagación de la señal (reflexión y difracción). Se analizaron las pérdidas de propagación de espacio libre y las atenuaciones por condiciones atmosféricas como lluvia, vapor de agua y oxígeno.

Basado en las características de potencia de transmisión y sensibilidad de recepción de los equipos que actualmente se encuentran en el mercado, se diseñaron las dimensiones de las antenas del enlace así como también sus protecciones, estableciendo con esto un punto de partida para la selección de la antena que mejor se adapte al sistema.

Se definió la estructura de red, protocolos de ruteo, directriz de seguridad (WEP, filtrado de dirección MAC, etc.) y otros, utilizando para esto las características de los equipos que se encuentran disponibles en el mercado. Basado en que todos los dispositivos están fabricados bajo un mismo estándar (802.11a/b/g, 802.3, etc.) se desarrolló un manual genérico de instalación a nivel de hardware que especifica las características técnicas del equipo y como se debe de conectar.

A nivel de software, se estableció como se debe configurar el equipo para seguridad, protocolos, potencia, sensibilidad, canal de comunicación.

Finalizado el diseño del enlace, se simuló los resultados empleando software especializado, con el fin de verificar que el diseño planteado es factible de implementar.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Demostrar que el enlace entre el Centro de Producción Río Macho y el sistema de abastecimiento de agua es factible de realizar.

2.2 Objetivo general

Diseñar un sistema de comunicaciones inalámbrico que sea capaz de transmitir audio, video y datos en un prototipo de enlace.

2.3 Objetivos específicos

2.3.1. Análisis de factibilidad de selección del prototipo de enlace a realizar.

2.3.2. Diseñar el enlace a nivel de propagación de la señal.

2.3.3. Diseñar el enlace a nivel de transferencia de datos.

2.3.4. Desarrollar un manual de instalación a nivel de hardware y software del equipo a emplear en las estaciones de comunicación.

Capítulo 3. Marco teórico

En este capítulo se desarrollan los conceptos teóricos de estándares de comunicación inalámbricos, propagación de señales electromagnéticas, protocolos de comunicación y teoría de redes que se utilizaron para la elaboración del proyecto.

3.1 Estándares de comunicación inalámbricos

Las redes inalámbricas de área local o WLAN se centran en los dos niveles inferiores del modelo de la OSI, por lo que es posible correr por encima cualquier protocolo de red o aplicación. Esto permite que los usuarios puedan seguir utilizando sus aplicaciones habituales, sin importar el medio físico que se este empleando.

En la tabla 3.1 se presenta una comparación entre los estándares 802.11a/b, desarrollados por la IEEE para las comunicaciones inalámbricas, a nivel de modulación, ancho de banda, velocidad e interferencias [2].

Tabla 3.1 Comparación a nivel general de los estándares 802.11a/b

Estándar	802.11b	802.11a
Descripción general	Es el estándar comercialmente más difundido, derivado del estándar 802.11, ratificado en 1999.	Actualización del estándar 802.11, utiliza el mismo juego de protocolos que este, publicada a finales de 1999.
Modulación	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, ingles Direct-Sequence Spread Spectrum). El espectro varía en la banda ISM de 2.412 a 2.484GHz.	Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing (OFDM). El espectro varía en la banda de U-NII de 5.15 - 5.875 GHz y utiliza 52 subportadoras por canal.
BW	Dividido en 11 canales de 22 MHz, entrelazados, con 3 canales independientes (canal 1, 6 y 11).	20Mhz en 12 canales no entrelazados, 8 para red inalámbrica y 4 para conexiones punto a punto.
Velocidad	1 Mbps, 2 Mbps, 5.5 Mbps y 11 Mbps dependiendo de la calidad de señal, y nivel de potencia.	54 - 48 Mbit/s con modulación 64-QAM, 36- 24 16-QAM, 18 – 12 QPSK y 9 – 6 Mbps BPSK.
Interferencias	<ul style="list-style-type: none"> La mayoría de los dispositivos como teléfonos, teclados y mouse inalámbricos, hornos de microondas, etc., emplean la banda de frecuencia de los 2.4GHz. Entrelazamiento de los canales ya que cada uno requiere como mínimo 22Mhz de BW, lo cual si no se trabaja con cuidado puede producir interferencias 	<ul style="list-style-type: none"> Al ser una banda de frecuencia poco usada, se disminuyen interferencias y posibles caídas del sistema debido al equipo que puede estar presente en el área.
Seguridad	WEP, SSH, LEAP	WEP, SSH, LEAP

3.2 Propagación de la señal electromagnética

En un sistema de comunicación en frecuencias microondas es necesario tener línea vista(LOS) entre el emisor y el receptor. Es indispensable analizar la influencia de los obstáculos que tiene la superficie terrestre sobre la propagación de la señal electromagnética para determinar las pérdidas de la señal que estos puedan generar.

3.2.1 Ecuación de Fresnel

En un sistema de propagación de línea vista la señal se propaga formando elipses concéntricas alrededor de la línea de visión que une el transmisor y el receptor, éstos elipses son definidas como zonas de Fresnel. En la figura 3.1 se observa como geoméricamente se define el elipsoide de Fresnel sobre una trayectoria TR y como al desplazarse sobre esta trayectoria se forman círculos concéntricos.

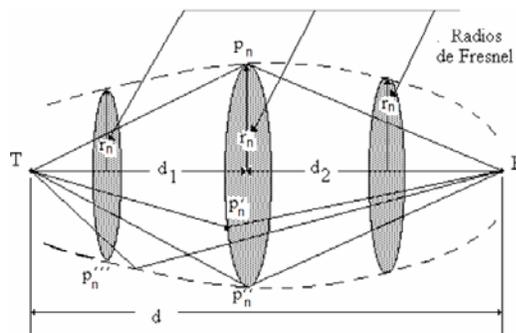


Figura 3.1 Zona de Fresnel alrededor de la línea vista [3]

Sea el centro del eje mayor del elipsoide de Fresnel $TR + \frac{n * \lambda}{2}$, y $TP'R = TP''R = TP'''R$ y definiendo un punto P_n sobre una zona cualquiera se obtiene [3]:

$$TP_n + P_n R - (d_1 + d_2) = \frac{n * \lambda}{2} \quad (3.1a)$$

Aplicando el teorema de Pitágoras en la figura 3.1 y considerando $\frac{r_n}{d_1}, \frac{r_n}{d_2} \ll 1$ se deduce que [3]:

$$TP_n = d_1 * \sqrt{1 + \left(\frac{r_n}{d_1}\right)^2} \cong d_1 + \frac{r_n}{2 * d_1} \quad (3.1b)$$

$$y \quad P_n R = d_2 * \sqrt{1 + \left(\frac{r_n}{d_2}\right)^2} \cong d_2 + \frac{r_n}{2 * d_2} \quad (3.1c)$$

Sustituyendo (3.1b) y (3.1c) en (3.1a) se obtiene la ecuación ya simplificada para calcular la n -ésima zona de Fresnel [3]:

$$r_n(m) = \sqrt{\frac{n * d_1 * d_2 * \lambda}{d}} \quad (3.2)$$

Expresando $\lambda = c/f$ se puede obtener la ecuación del n -ésimo radio de fresnel en función de la frecuencia (MHz) y la distancia (km) del enlace [8]:

$$r_n(m) = 547.723 \sqrt{\frac{n * d_1 * d_2}{f * d}} \quad (3.3)$$

Según el principio de Huygens que dice “un frente de onda puede considerarse como un constituido sin número de fuentes secundarios de radiación” [5], como se muestra en la figura 3.2.

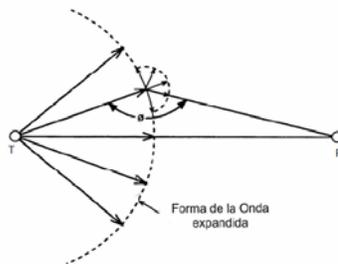


Figura 3.2 Principio de Huygens [5].

El campo eléctrico en las inmediaciones del receptor debido a las zonas de Fresnel se obtiene integrando las contribuciones de los frentes equivalentes de Huygens en el receptor [3].

$$E_n = (-1)^n * k_n * \frac{E_o}{d} e^{j(\omega t - \beta * d)} \quad (3.4)$$

En (3.4) se muestra que las contribuciones de los campos eléctricos de las zonas de Fresnel se encuentran desfasadas 180° mientras que la magnitud se encuentra en función de las constantes campo eléctrico en espacio libre (E_o) y la distancia (d). La variable k_n depende de la frecuencia (f) y de la inclinación con respecto al punto de recepción [3].

Como la magnitud disminuye uniformemente y los campos se encuentran desfasados siempre 180° se puede decir que las fuentes situadas en las zonas 2 y 3 tienden a cancelarse mutuamente, lo mismo que las de las zonas 4 y 5, 6 y 7, etc. [4]. De ahí, que el campo eléctrico en las inmediaciones del receptor se expresa como [3]:

$$E_r(mV / m) = \frac{E_1}{2} \quad (3.5)$$

Dado que el radio de la primera zona de Fresnel concentra la energía que será entregada al receptor, permitirá definir la condición de visibilidad entre antenas.

3.2.2 Curvatura de la tierra

La señal radioeléctrica al propagarse en la atmósfera se ve afectada por las variaciones del índice de refracción haciendo que el rayo no siga una trayectoria recta sino más bien quebrada como la que se muestra en la figura 3.3 [3].

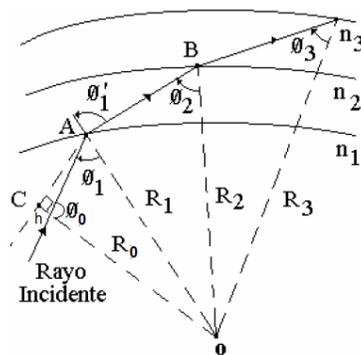


Figura 3.3 Propagación del rayo en la atmósfera estratificada [3].

Según se describe en [4], la onda electromagnética sufre una curvatura debida a la influencia de la atmósfera y la curvatura de la tierra. Por lo que la curva que el rayo experimenta se expresa como [4]:

$$\sigma_{rt} = \frac{dn}{dh} + \frac{1}{R_o} \quad (3.6)$$

Donde $\frac{dn}{dh}$ es la variación que sufre el índice de refracción con respecto a la altura y R_o es el radio real de la tierra de aproximadamente 6370m. Esto implica que el

rayo sigue una trayectoria no rectilínea como la mostrada en la figura 3.3. Ahora, si se considera la sustitución del radio de la tierra por un radio ficticio expresado como [4]:

$$R_f = KR_o(Km) \quad (3.7)$$

En donde la constante K representa la variación de las condiciones atmosféricas de cada zona, lo que implica que en una misma región la variación del índice de refracción respecto a la altura es constante, se puede decir entonces que, la variación del rayo respecto a la altura es lineal. Para determinar la constante K se igualan (3.6) y (3.7) con lo que se obtiene que [4]:

$$K = \frac{1}{1 + R_o \frac{dn}{dh}} \quad (3.8)$$

Con los supuestos anteriores se debe determinar la curvatura de la tierra o factor flecha ($f(d)$) el cual debe ser sumado a cualquier obstáculo que se encuentre en la trayectoria del enlace. En la figura 3.4 se muestra como se representa geoméricamente este parámetro [3].

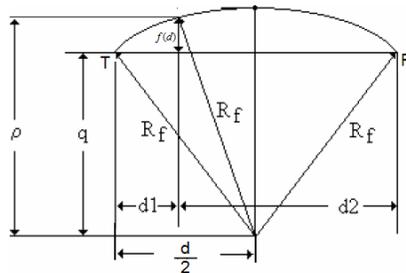


Figura 3.4 Representación geométrica del factor de flecha [3].

Considerando que $d_1, d_2 \ll R_f$ se puede obtener $f(d)$ a partir de la relación [3]:

$$f_{(m)} = p - q \quad (3.9)$$

Para obtener p y q se aplica el teorema de Pitágoras a la figura 3.4, como se establece en [3], por lo tanto, p y q se expresan de la siguiente manera:

$$q_{(m)} = R_f - \frac{d^2}{8 * R_f} \quad (3.10a)$$

$$p_{(m)} = \left(R_f - \frac{1}{2} \frac{(d_2 - d/2)^2}{R_f} \right) \quad (3.10b)$$

Al sustituir las (3.10a) y (3.10b) en (3.9), se obtiene que la curvatura de la tierra se expresa como [3]:

$$f_{(m)} = \frac{d_1 d_2}{2kR_o} \quad (3.11)$$

3.2.3 Despeje de Clearance

Para garantizar que las pérdidas por difracción sean mínimas debido a la pérdida de visibilidad entre el transmisor y el receptor es necesario que la primera zona de Fresnel se encuentre despejada.

Un parámetro que ayuda a determinar cuan obstruida o despejada está la primera zona Fresnel en un punto dado es la relación que existe entre el despeje de Clearance o libertad de paso de la señal y el radio de Fresnel (r_1) expresada como [3]:

$$u' = \frac{c}{r_1} \quad (3.12)$$

Para el caso de la figura 3.5a el valor de u' es negativo ya que obstruye totalmente la línea de propagación directa y la zona de Fresnel. Cuando el valor de c tiende a cero, como se puede ver en la figura 3.5b, el parámetro se encuentra entre los límites $0 \leq u' \leq 1$, esto implica que la primera zona de Fresnel se encuentra parcialmente obstruida. Mientras que, cuando la obstrucción no interfiere con la línea principal de propagación y la zona de Fresnel esta totalmente libre, se considera $u' > 0$.

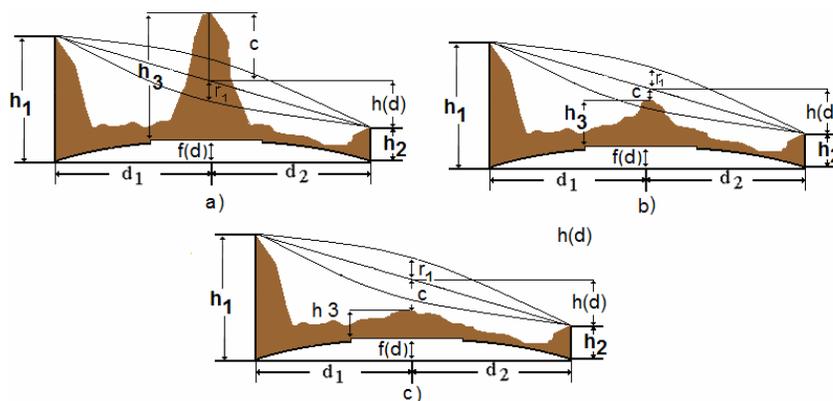


Figura 3.5 Despeje sobre obstáculos de Clearance.

A partir de la figura 3.5 (a, b o c) se puede obtener la ecuación de Clearance. Considerando que d_1 es la distancia del punto más alto al obstáculo y d_2 la distancia del punto más bajo al mismo, la expresión del despeje de Clearance en términos de d_2 se obtiene como [4]:

$$c_{(m)} = h_{(m)} + h_2 - (h_3 + f_{(m)}) \quad (3.13)$$

Donde al aplicar el teorema de triángulos semejantes de Thales se obtiene que [3]:

$$h_{(m)} = \frac{h_1 - h_2}{d} d_2 \quad (3.14)$$

Finalmente al sustituir (3.11) y (3.14) en (3.13) se obtiene que [3]:

$$c_{(m)} = h_2 + \frac{h_1 - h_2}{d} d_2 - \left(\frac{d_1 d_2}{2kR_o} + h_3 \right) \quad (3.15)$$

3.2.4 Visibilidad radioeléctrica

Se define visibilidad radioeléctrica a la suma de las distancias del horizonte radioeléctrico entre la antena transmisora (d_1) y receptora (d_2), esto se puede observar en la figura 3.6.

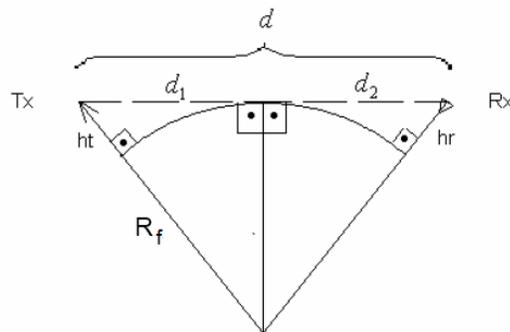


Figura 3.6 Representación del horizonte radioeléctrico [6].

El horizonte radioeléctrico es “el lugar geométrico de los puntos en que los rayos directos procedentes de una fuente puntual de ondas radioeléctricas son tangentes a la superficie de la tierra” [6]. Matemáticamente la visibilidad radioeléctrica se expresa como [6]:

$$d = d_1 + d_2 \quad (3.16)$$

Aplicando el teorema de Pitágoras a la figura 3.6 y considerando que $d_1, d_2 \ll R_f$, h_t y h_r las alturas de las antenas transmisora y receptora, se obtiene que [6]:

$$d_1^2 = 2 * h_t * R_f \quad (3.17a)$$

y

$$d_2^2 = 2 * h_r * R_f \quad (3.17b)$$

Sustituyendo (3.17a) y (3.17b) en (3.16) se aproxima que la visibilidad radioeléctrica se expresa como [6]:

$$d_{(Km)} = 6.370 * k * (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (3.18)$$

3.2.5 Modelo de propagación de las señales

Cuando la línea vista entre el transmisor y el receptor está libre de obstáculos se debe considerar la presencia de un rayo reflejado, el cual actúa sobre el campo eléctrico recibido en las inmediaciones del receptor [7].

Existen dos modelos de propagación de la señal electromagnética, el primero establece que la tierra es plana y no se considera la influencia de la curvatura de la tierra, este modelo se denomina "Tierra Plana" [6].

En la figura 3.7 se presenta el modelo de propagación de dos rayos sobre tierra curva de radio ficticio, en donde d_{RD} es la distancia recorrida por el rayo directo, d_{RR} por el rayo reflejado; h_t y h_r son las alturas reales de las antenas, mientras que h_t' y h_r' las alturas efectivas; ψ el ángulo de incidencia [6].

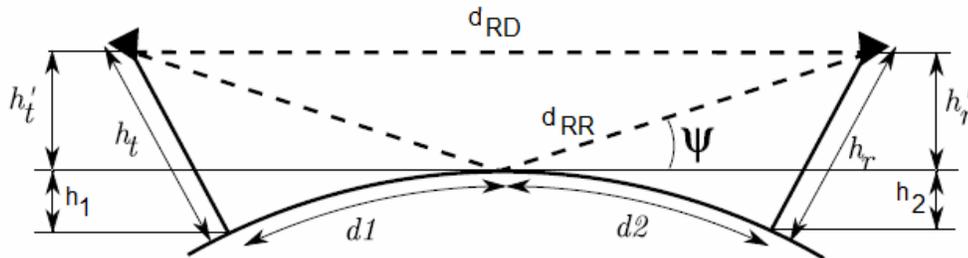


Figura 3.7 Modelo de tierra curva [6]

La altura efectiva de las antenas se determina con las expresiones [6]:

$$h'_t = h_t - h_1 \quad (3.19)$$

$$h'_r = h_r - h_2 \quad (3.20)$$

Aplicando el teorema de Pitágoras al triángulo de la figura 3.7, según se plantea en [6], se determina el valor de h_1 y h_2 en función de las distancias d_1 y d_2 [6]:

$$h_1 = \frac{d^2_{1(Km)}}{2R_{o(Km)}} \quad (3.21a)$$

$$h_2 = \frac{d^2_{2(Km)}}{2R_{o(Km)}} \quad (3.21b)$$

Sustituyendo (3.21a) y (3.21b) en (3.18) y (3.19) se obtiene la altura efectiva de las antenas en función de la distancia al punto de reflexión y la altura real es [6]:

$$h'_t = h_t - \frac{d^2_{1(Km)}}{2R_{o(Km)}} \quad (3.22)$$

$$h'_r = h_r - \frac{d^2_{2(Km)}}{2R_{o(Km)}} \quad (3.23)$$

La distancia al posible punto de reflexión de la señal desde el punto de transmisión, según se determina en [6], es:

$$d_1 = \frac{d}{2} + p \cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right) \quad (3.24)$$

Donde las constantes p y ϕ se obtienen con las siguientes expresiones [6]:

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} [6.37 * k * (h_t + h_r) + \left(\frac{d}{2}\right)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

$$\phi = \arccos\left[\frac{12.74 * k * (h_t - h_r) * d}{p^3}\right] \quad (3.26)$$

La distancia al posible punto de reflexión de la señal desde el punto de recepción se obtiene con la relación [6]:

$$d_2 = d - d_1 \quad (3.27)$$

Una vez que se determinan las alturas efectivas de la tierra el ángulo de incidencia se obtiene como [7]:

$$\Psi_{(milirad)} = \frac{h'_t + h'_r}{d} \quad (3.28)$$

3.2.6 Campo eléctrico recibido

El modelo de propagación de dos rayos establece que el campo eléctrico presente en la antena receptora puede calcularse como suma de las contribuciones del rayo directo (RD) y del rayo reflejado (RR). Si se considera que el rayo directo tiene una fase de 0° en el origen y el rayo reflejado un desfase de ϕ_d con respecto al RD, se puede expresar el campo eléctrico como [6]:

$$E_{tr} = E_{RD} + E_{RR} \quad (3.29)$$

La magnitud del campo eléctrico se obtiene a partir de igualar el vector de Poynting expresado en función del campo eléctrico recibido y de la potencia de radiación [8]:

$$P = \frac{E_o^2}{120\pi} \quad (3.30a)$$

$$P = \frac{P_t * G_t}{4\pi d^2} \quad (3.30b)$$

Igualando ambas expresiones y simplificando para expresar la EIRP en kW se obtiene que la magnitud del campo eléctrico se expresa como [8]:

$$E_{0(mV/m)} = 173 * \frac{\sqrt{EIRP_{(KW)}}}{d} \quad (3.31)$$

Sustituyendo (3.31) en (3.29) se obtiene el campo eléctrico en mV/m:

$$E_{tr} = 173 * \frac{\sqrt{EIRP_{(KW)}}}{d_{RD}} + 173 * \frac{\sqrt{EIRP_{(KW)}}}{d_{RR}} * D * \Gamma e^{-j(\theta_r + \phi_d)} \quad (3.32)$$

De aquí que la distancia recorrida por el rayo directo y reflejado se expresan como [6]:

$$d_{RD(Km)} = \sqrt{d^2 + (h'_t - h'_r)^2} \quad (3.33)$$

$$d_{RR(Km)} = \sqrt{d^2 + (h_t' + h_r')^2} \quad (3.34)$$

El término ϕ_d es el desfase entre RD y RR que se aproxima, según se determina en [6], a:

$$\phi_{d(rad)} = \frac{4 * \pi * h_t * h_r}{\lambda * d} \quad (3.35)$$

El término de D_v es la divergencia o atenuación que presenta el rayo reflejado al incidir en la superficie de la tierra, se expresa según la ecuación [6]:

$$D_v = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2 * d_1 * d_2}{k * R_0 * (h_t + h_r)}}} \quad (3.36)$$

El coeficiente de reflexión (Γ) en propagación de ondas electromagnéticas toma como referencia la superficie del terreno sobre el cual se refleja la onda, por lo que se tiene que considerar la polarización de la antena, y la permitividad compleja (ε). Por lo tanto, para una polarización vertical se tiene que [6]:

$$\Gamma_v = \frac{\varepsilon * \text{sen}(\psi) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\psi)}}{\varepsilon * \text{sen}(\psi) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\psi)}} \quad (3.37)$$

Y para la polarización horizontal [6]:

$$\Gamma_H = \frac{\text{sen}(\psi) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\psi)}}{\text{sen}(\psi) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\psi)}} \quad (3.38)$$

Cuando el ángulo de incidencia se aproxima a cero grados y la magnitud del coeficiente es aproximadamente 1, el valor del coeficiente vertical y horizontal es $e^{-\pi}$ [6].

En donde la permitividad compleja se expresa en términos de la permitividad relativa ε_r , la conductividad del terreno (σ) y la frecuencia angular (ω) [6]:

$$\varepsilon = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (3.39)$$

En la tabla 3.2 se presentan algunos de los valores típicos de permitividad relativa y conductividad para diferentes tipos de terrenos [6].

Tabla 3.2 Valores típicos de permitividad relativa y la conductividad

Tipo de terreno	Conductividad σ (mS/m)	Permitividad relativa (ϵ_r)
Mar	400	80
Agua dulce	5	80
Tierra húmeda	5	15
	20	15
	5	30
	20	30
Tierra rocosa	1	7
	5	7
Tierra seca	1	4
	10	4

La influencia del rayo reflejado al campo eléctrico en las inmediaciones del receptor puede reforzar la señal debido a una contribución en fase o causar una disminución del campo debido a un desfase, por lo que, es necesario agregar a las pérdidas de espacio libre una atenuación en exceso que se expresa de la siguiente manera [6]:

$$A_e = -20 \log(|1 + D_V * \Gamma e^{-j(\phi + \theta_r)}|) \quad (3.40)$$

Para la ecuación anterior se considera que la distancia recorrida por el RD y RR son las mismas y que la ganancia de la antena en dirección del RR es igual a la del RD, por lo que las magnitudes del campo eléctrico son iguales [6]. Esto se demuestra en el capítulo 5.

3.3 Características de enlace

3.3.1 Características de las antenas

Para un enlace microonda la antena debe ser altamente direccional ya que concentra la energía en un haz angosto que se puede dirigir hacia la antena receptora. Esta es una de las características que presentan las antenas parabólicas, además que tiene una alta ganancia, indispensable para realizar enlaces en el exterior, el patrón de radiación típico se presenta en la figura 3.8.

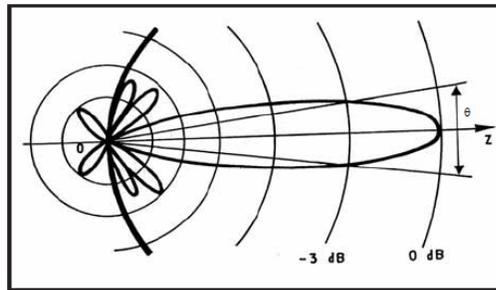


Figura 3.8 Patrón de radiación típico de una antena parabólica [10]

La ganancia de la antena transmisora se expresa como [1]:

$$G_T = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (3.41)$$

Típicamente la eficiencia (η) de una antena parabólica se encuentra entre el 50 y 70% de la energía emitida, esto se presenta debido a las imperfecciones de construcción del plato. En el peor de los casos se espera una $\eta=0.5$, lo que reduce (3.42) a [1]:

$$G_T = 4.93 \left(\frac{D * f}{c} \right)^2 \quad (3.42)$$

Expresada en dB:

$$G_T (dB) = 10 \log \left(4.93 \left(\frac{D * f}{c} \right)^2 \right) \Rightarrow 20 \log(D_{(m)}) + 20 \log(f_{(MHz)}) - 42.61 \quad (3.43)$$

La relación de onda estacionaria de voltaje (*Voltage Standing Wave Relationship*, VSWR) representa la razón de cambio entre la onda reflejada y la onda incidente y

determina el grado de desacople de la línea de transmisión y la carga, esta se expresa como [9]:

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma_T}{1 - \Gamma_T} \quad (3.44)$$

La pérdida de desacople que se presenta entre el transmisor y la antenna se expresa en dB como [9]:

$$ML(dB) = -10 \log(1 - \Gamma_T^2) \quad (3.45)$$

Se define el ángulo Azimut (β) como la variación sobre el plano horizontal medido desde el norte geográfico en sentido de las agujas del reloj. Cuando se apunta al hemisferio sur, matemáticamente se expresa como [10]:

$$\beta(^{\circ}) = 180^{\circ} + \arctan\left(\frac{\text{sen}((Lg_{-a_R} - Lg_{-a_T}))}{\cos(Lt_{-a_T}) \tan(Lt_{-a_R}) - \text{sen}(Lt_{-a_T}) \cos(Lg_{-a_R} - Lg_{-a_T})}\right) \quad (3.46)$$

Si se quiere apuntar al hemisferio norte se utiliza la fórmula [10]:

$$\beta(^{\circ}) = 360^{\circ} + \arctan\left(\frac{\text{sen}((Lg_{-a_R} - Lg_{-a_T}))}{\cos(Lt_{-a_T}) \tan(Lt_{-a_R}) - \text{sen}(Lt_{-a_T}) \cos(Lg_{-a_R} - Lg_{-a_T})}\right) \quad (3.47)$$

El ángulo de elevación (α) se define como la inclinación que le debemos dar a la antenna con respecto al plano vertical, matemáticamente se expresa como [10]:

$$\alpha(rad) = \frac{h_t - h_r}{d * 1000} - \frac{d}{2 * k * 6370} \quad (3.48)$$

En la figura 3.9 se muestra como físicamente se representa el ángulo de elevación y el azimut.

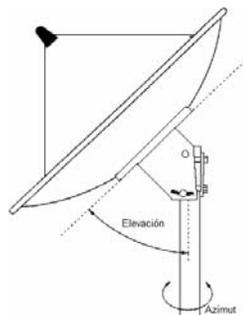


Figura 3.9 Variación del ángulo de elevación y azimut [10]

3.3.2 Pérdidas del enlace

Las principales pérdidas o atenuaciones que se presentan en un enlace en donde el medio de propagación es el aire son las pérdidas en el espacio libre (L_p), definidas como “la atenuación de una onda electromagnética conforme se propaga en una línea recta a través de un vacío sin ninguna absorción o reflexión de energía de los objetos cercanos” [1]. Matemáticamente se expresa como [1]:

$$L_p \text{ (dB)} = 20 \log d_{\text{(Km)}} + 20 \log f_{\text{(MHz)}} + 32.46 \quad (3.49)$$

Al ser la atmósfera el medio principal de propagación las pérdidas por condiciones atmosféricas se deben tomar en cuenta a la hora de planificar el enlace. Las atenuaciones por gases atmosféricos (L_{OH}), se determinan siguiendo las recomendaciones de la UIT-R P.676 para atenuación por gases atmosféricos, expresada como [10]:

$$L_{OH} = L_o + L_H \quad (3.50)$$

donde L_o es la atenuación debida al oxígeno presente en la atmósfera, y L_H la debida a la presencia de vapor de agua.

La atenuación por condiciones hidrométricas considera la atenuación por nieve, granizo, y lluvia. En el área de estudio las dos primeras se descartan siendo la más importante la atenuación por lluvia que se expresa como [11]:

$$A(R) = \gamma(R) * L_{ef} \quad (3.51)$$

En donde $\gamma(R)$ es la intensidad específica de lluvia en dB/km y L_{ef} la longitud efectiva del trayecto.

Otras pérdidas a considerar importantes son las pérdidas en las guías de onda (L_f), entre la red de distribución y la antena, estas pérdidas se expresan como [1]:

$$L_f = L_t + L_r \quad (3.52)$$

Donde L_t son las pérdidas de guías de onda en el transmisor y L_r las pérdidas de guías de onda en el receptor.

En un enlace es importante considerar las características no ideales y menos predecibles de la propagación de ondas de radio, como la propagación de múltiples trayectorias, sensibilidad a superficies rocosas y objetivos de confiabilidad del sistema. Para esto, se determina el margen de desvanecimiento de propagación (F_m) que se expresa como [1]:

$$F_m(dB) = 30\log D + 10\log(6ABf) - 10\log(1 - R) - 70 \quad (3.53)$$

Donde:

$30\log D$:	Efectos de múltiples trayectos.
$10\log(6ABf)$:	Sensibilidad a superficies rocosas.
$10\log(1 - R)$:	Objetivos de confiabilidad.
D: Distancia en km	1-R: objetivo de confiabilidad para una trayectoria de 400Km en un solo sentido o dirección
f: frecuencia en GHz	A: factor de rugosidad (4 sobre agua o en un terreno muy parejo; 1 sobre terreno normal; 0.25 sobre terreno montañoso muy disparejo)
R: confiabilidad expresada en decimales(99.99% = 0.9999 de confiabilidad)	B: factor para convertir una probabilidad del peor mes a una probabilidad anual (1 para convertir una disponibilidad anual a una base para el peor mes; 0.5 para áreas calientes y húmedas; 0.25 para áreas normales tierra adentro; 0.125 para áreas montañosas o muy secas)

Para determinar la rugosidad (A) del suelo se utiliza [7]:

$$A = \sqrt{\frac{1 + (\frac{g^2}{2})}{1 + 2.35(\frac{g^2}{2}) + 2\pi(\frac{g^2}{2})}} \quad (3.54)$$

Donde [7]:

$$g = \frac{40f_{(GHz)}\sigma_h \text{sen}(\Psi)}{3} \quad (3.55)$$

Y la altura promedio del terreno se expresa como [7]:

$$\sigma_h = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (c_i - \bar{c})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.56)$$

3.3.3 Ganancia del sistema

La ganancia del sistema se define como la “*diferencia entre la potencia nominal de salida de un transmisor y la potencia de entrada requerida por un receptor [1]*”. Matemáticamente se expresa como:

$$G_s = P_t - C_{\min} \text{ (dB)} \quad (3.57)$$

Donde P_t es la potencia de salida del transmisor (dBm) y C_{\min} es la potencia mínima de entrada del receptor para un objetivo de calidad determinado (dBm). Para que el enlace se dé se debe cumplir que [1]:

$$P_t - C_{\min} \text{ (dB)} > \text{Perdidas} - \text{Ganancias} \quad (3.58)$$

Como ganancias se tienen G_t (ganancia de la antena TX) y G_r (ganancia de la antena receptora). Las pérdidas a considerar en el enlace son L_p (pérdidas en el espacio libre), L_f (pérdidas en las guías de onda), margen de desvanecimiento (F_m), atenuaciones por condiciones ambientales como agua, oxígeno, niebla y lluvia (L_A).

3.4 Conceptos de redes

3.4.1 Topología de Red

La topología de red o forma lógica de red se define como “*la cadena de comunicación que los nodos que conforman una red usan para comunicarse*” [16].

En una topología tipo infraestructura se utilizan estaciones base que controlan el flujo de información de los dispositivos inalámbricos pertenecientes a la red. Esta topología se puede configurar de 5 formas, punto-punto, punto-multipunto (bus común), estrella, anillo (*Token Ring*) y malla (*mesh*) [16].

La configuración punto-punto es en la que dos nodos se comunican directamente ya sea por un único enlace físico que soporta varias conexiones virtuales o por varios enlaces físicos con distintas conexiones virtuales y lógicas [17].

Las redes pueden ser de tipo públicas o privadas. Las redes privadas son a pequeña escala y pueden utilizar protocolos propios no estandarizados, mientras que las redes de dominio público son aquellas que cubren grandes distancias y utilizan protocolos estandarizados [17].

3.4.2 Direccionamiento

3.4.2.1 Dirección IP

Una dirección IP es un número que identifica de manera lógica y jerárquica a una interfaz de un dispositivo dentro de una red que utiliza el protocolo de enrutamiento de Internet (IP).

Hay 5 clases de direcciones IP, clasificadas según el tamaño de la red, generalmente la clase A se emplea para grandes redes, usada en los gobiernos de todo el mundo; las direcciones de clase B que son de mediano tamaño y las direcciones de clase C para todos los demás solicitantes a pequeña escala. La clase D se utiliza para direccionamiento multidifusión. Finalmente las direcciones clase E se reservan para

finés de investigación [15]. En la tabla 3.3 se presenta un resumen de las cuatro principales direcciones de IP.

Tabla 3.3 Principales formas de direccionamiento IP [14].

Clase	Dirección IP (R=Red-H=Host)	Rango	Nº de Redes	Nº de Host	Máscara de Red
A	0RRRR.HHHHH.HHHHH.HHHHH	1.0.0.0 - 127.255.255.255	126	16.777.214	255.0.0.0
B	10RRRR.RRRRR.HHHHH.HHHH	128.0.0.0 - 191.255.255.255	16.384	65.534	255.255.0.0
C	110RRR.RRRRR.RRRRR.HHHH	192.0.0.0 - 223.255.255.255	2.097	254	255.255.255.0
D	0RRRRR.HHHHH.HHHHH.HHHH	1.0.0.0 - 127.255.255.255	126	16.777.214	255.0.0.0

Es importante considerar que la dirección con los bits del host en cero se refiere a la dirección de la misma red, mientras que en uno se indica la dirección de difusión, por lo que estas no se pueden asignar a dispositivos, mientras que la dirección con los cuatro octetos en cero (0.0.0.0) es la dirección de arranque de los dispositivos de red [23].

Una técnica para aprovechar una única dirección IP, es dividirla en subredes. Para hacer esta división en el octeto perteneciente al host se toman n bits que van a ser los que definirán la cantidad de redes. Este número de subredes se obtiene al aplicar la fórmula siguiente [23]:

$$Subred = 2^n - 2 \quad (3.59)$$

La cantidad de host soportada por la subred se obtiene a partir de la ecuación:

$$host = 2^{8-n} - 2 \quad (3.60)$$

Es importante definir la máscara de subred ya que con esta es con la que los router dirigen los paquetes dentro de la red. Para definir la máscara se establecen todos los bits de red en 1 incluyendo los utilizados para la subred y en cero los bits restantes del host [23].

3.4.2.2 Dirección MAC

La dirección MAC está formada por 48 bits de los cuales los 24 primeros identifican al fabricante, y los 24 siguientes son el número de serie/referencia que el fabricante le ha asignado a la NIC. Por ello se supone que no existen dos NIC con la misma MAC, o no deben de existir, aunque en el mercado existen tarjetas de red a las cuales se le pueden cambiar la MAC, esto hay que tenerlo en cuenta para no considerar inexpugnable un filtrado por MAC como medida de seguridad. La forma de representar la dirección MAC es en hexadecimal XX-XX-XX-XX-XX-XX [16].

3.4.3 Protocolo IP

El Protocolo de Internet (IP) es un protocolo no orientado a conexión y no confiable (técnica del mejor esfuerzo) usado tanto por el origen como por el destino para la comunicación de datos a través de una red de paquetes conmutados [22].

El protocolo IP cubre tres aspectos importantes [22]:

- Define la unidad básica para la transferencia de datos en una red, especificando el formato exacto de un datagrama IP.
- Realiza las funciones de enrutamiento.
- Define las reglas para que los host y routers procesen paquetes, los descarten o generen mensajes de error.

El tamaño para un datagrama debe ser tal que permita la encapsulación, esto es, enviar un datagrama completo en una trama física. A la capacidad máxima de transferencia de datos de una red física se le llama MTU. Cuando un datagrama pasa de una red a otra con un MTU menor a su tamaño es necesaria la fragmentación. La reconstrucción del datagrama a partir de sus fragmentos se le llama reensamblado de fragmentos [22]. El plazo de reensamblado es un *time out* que el host destino establece como máximo para esperar por todos los fragmentos de un datagrama. Si se vence y aún no llegan todos los fragmentos, entonces se descartan los que ya han llegado y se solicita el reenvío del datagrama completo [22].

3.4.4 Elementos de red

3.4.4.1 Estación base

Una estación base (BS) es un transmisor/receptor de radio que sirve como nexo de la red de área local inalámbrica y ethernet. Entre sus principales funciones se encuentra la de realizar el ruteo de información empleando protocolos como el RIP, OSPF entre otros. Cuenta también con niveles de seguridad basados en WEP, WPA.

Comercialmente las estaciones bases tiene interfaz tanto con tecnología basada en el estándar 802.11a como con 802.11b/g. Muchas de estas BSU hacen el enlace punto a punto en la banda de frecuencia de 5GHz e implementan un AP que trabaja en 2.4GHz dentro de la misma unidad, con esto se aseguran el empleo de ambos estándares al mismo tiempo.

3.4.4.2 Switch

El switch que más se implementa en una red es el switch de capa 2, diseñado para resolver problemas de rendimiento debido a anchos de banda pequeños y embotellamientos. El switch puede agregar mayor ancho de banda, acelerar la salida de paquetes, reducir tiempo de espera, bajar el costo por puerto y mejorar la seguridad. Además, segmenta económicamente la red dentro de pequeños dominios de colisiones, obteniendo un alto porcentaje de ancho de banda para cada estación final [27].

La industria desarrolló el switching IP de nivel 3 que es el equivalente al enrutado TCP/IP que efectúa un router. Tiene todos los niveles de control y seguridad del router y además cuenta con las características de un switch de capa 2 [27].

El switch de capa 3 funciona de dos formas, primero cuando se realiza la comunicación entre dos estaciones pertenecientes a la misma subred IP actúa como un switch de nivel 2 mientras que el direccionamiento realizado en diferentes subredes IP es efectuado por la función router [27]. Existen dos tipos de switches capa 3 *Packet-by-packet* (PPL3) y *Cut-trough* (CTL3).

Las principales funciones de un switch de capa 3 son [27]:

- Procesamiento de rutas: esto incluye construcción y mantenimiento de la tabla de enrutamiento usando RIP y OSPF.
- Envío de paquetes: una vez que el camino es determinado, los paquetes son enviados a su dirección destino. El TTL (Time-To-Live) es decrementado, las direcciones MAC son resueltas y el checksum IP es calculado.
- Servicios especiales: traslación de paquetes, asignación de prioridades, autenticación, filtros, etc.

En cuanto a la seguridad, se puede prevenir que un usuario indeseado se conecte a la red, incluso a nivel físico. Pueden filtrar información, para prevenir ataques a servidores, bases de datos, o proteger aplicaciones con ciertos niveles de seguridad [27].

Entre las ventajas que presenta un switch de capa 3 sobre uno de capa 2 se encuentran [27]:

- La asignación de prioridades para los paquetes ofrece el rendimiento óptimo para aplicaciones de tiempo real, como datos, voz y video.
- Tiene capacidad para distinguir cuando los puertos donde se conectan los servidores están ocupados, saturados o caídos, de tal manera que puede reenviar eficientemente el tráfico hacia aquellos puertos que puedan responder.
- Fácil despliegue y mantenimiento debido a su enrutamiento dinámico, que actualiza automáticamente la red capa 3 sin intervención manual.
- Soporta hasta 2,000 rutas externas, permitiendo su escalamiento a medida que crece la red.

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

4.1 Definición de la solución

El proyecto se desarrolló en cuatro etapas

- Determinación de los puntos de línea vista del sistema de tomas de agua y el centro de producción.
- Diseño del enlace a nivel de propagación de la señal.
- Diseño de la estructura de red.
- Desarrollo del manual de hardware y software.

4.2 Descripción de las etapas definidas para el proyecto.

Se describe los procedimientos que se siguieron para el desarrollo del proyecto.

4.2.1 Análisis de la línea vista del sistema de tomas de agua y el centro de producción.

Se obtuvieron las coordenadas geográficas de los puntos de interés a partir de las cuales se trazó un perfil del terreno para analizar las zonas de Fresnel y las condiciones de despeje de Clearance. Con esto se puede determinar cuan factible es realizar el enlace entre el CP y las tomas de agua directamente o si es necesario buscar zonas de repetición que simplifiquen en términos de infraestructura y acceso el enlace.

4.2.2 Diseño del enlace a nivel de propagación de la señal.

Ya determinada el área en donde es factible realizar un enlace inalámbrico de línea vista se establecieron las características de propagación de la señal como lo son las pérdidas en espacio libre y atenuaciones por condiciones ambientales. Además, usando los valores típicos de atenuación de las guías de onda existentes en el mercado se determinaron las posibles pérdidas que estas puedan traer.

Considerando las características de los equipos de transmisión y recepción que actualmente existen en el mercado se determinó la potencia de transmisión y umbral de

recepción necesarios para realizar el enlace en el área seleccionada. A partir de esto se estableció la ganancia de las antenas.

4.2.3 Diseño del enlace a nivel de estructura de red.

Con los parámetros de transmisión y recepción del enlace se definió la infraestructura de red que más se acopla al proyecto. Se establecieron las características básicas que los equipos deben tener para satisfacer los requerimientos del proyecto

4.2.4 Diseño de manual de hardware y software

Al considerar que los equipos están fabricados bajo un mismo estándar ya sea 802.11a\b\g, 802.3 y otros, se estableció como se deben conectar dichos dispositivos para que funcionen adecuadamente.

Tomando en cuenta lo anterior se redactó un manual genérico de software que muestra las principales características que se han de considerar en la programación del equipo.

4.3 Implementación de la solución

El diseño se implementó en el simulador de enlaces inalámbricos Radio Mobile v9.18. Con este se modelaron las características del terreno, propagación de la señal y el equipo que constituye el sistema de comunicación.

Para la arquitectura de red se empleó el simulador Qualnet 4.5 en donde se establecieron las principales características de la red.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Estudio de factibilidad

5.1.1 Selección del estándar inalámbrico

Considerando las características de los estándares se opta por seleccionar el estándar 802.11a dado que:

- Es menos sensible a la interferencia ocasionada por equipos inalámbricos ya que trabaja en una banda de frecuencia poco utilizada.
- Tiene mayor ancho de banda que la tecnología basada en el estándar 802.11b.
- No tiene entrelazamiento de canales, por lo que se puede seleccionar cualquiera de ellos para trabajar.
- Al ser una tecnología poco utilizada se disminuye el riesgo de ataques de seguridad a la red.

La frecuencia central a utilizar en el proyecto es de 5.8GHz, la selección de esta frecuencia se basó en los siguientes criterios:

- Según el plan de atribución de bandas de frecuencias, el rango de frecuencias de 5725MHz a 5825MHZ se encuentra a disposición del público (ver anexo B.2).
- Los equipos como antenas, estaciones base y guías de onda se encuentran fabricados para operar a esta frecuencia.
- A esta frecuencia las atenuaciones por condiciones ambientales como lluvia, oxígeno y vapor de agua son despreciables, como se verá más adelante.

5.1.2 Análisis de línea vista del área de estudio

Para diseñar el enlace inalámbrico entre el CP y las tomas de agua primero se realizó una inspección de las zonas en donde se obtuvo la altura y las coordenadas geográficas en los puntos de interés con la ayuda de un GPS marca Garmin modelo GPSMAP 76S. En la tabla 5.1 se presentan los datos de altura, latitud y longitud obtenidos con el GPS.

Tabla 5.1 Altura y ubicación de las tomas de agua y el centro de producción

Puntos	Altura(m)	Latitud(N)	Longitud(O)
CP	1129,2	09°46'31.5	83°50'31.5
TRM	1595.2	09°45'05,4	83°51'39,3
Emb	1594.8	09°45'49.9	83°51'30.0
TT	1653	09°41'16.1	83°45'21.2
TOsc	1583	09°46'05.4	83°51'09.3

En la figura 5.1 se presenta la disposición geográfica del CP y el sistema de abastecimiento de agua según los datos suministrados en la tabla 5.1.

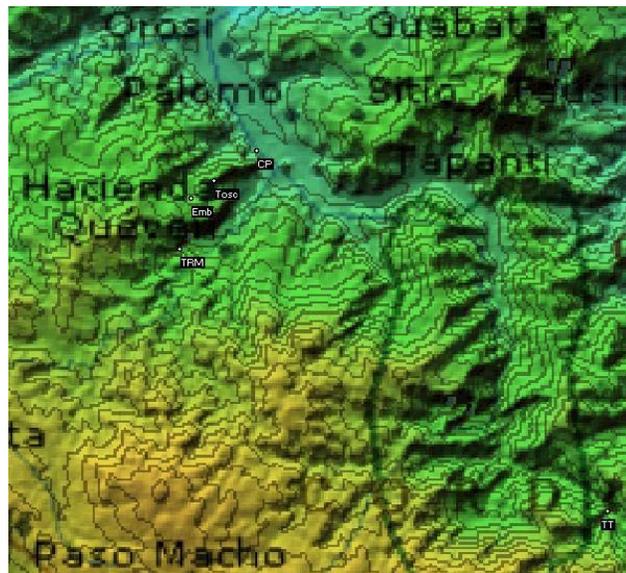


Figura 5.1 Ubicación de los puntos de estudio

A partir de esto se realizó un perfil del terreno entre CP-TRM, CP-Emb, CP-TT y CP-TOsc con el fin de verificar la existencia o no de visibilidad radioeléctrica. La distancia de los diferentes enlaces y alturas del terreno son basados en los datos obtenidos por el GPS.

Para esto se utilizó el modelo de tierra curva, en donde se supone que el radio de la tierra se ve modificado por una constante K que depende de las condiciones atmosféricas de la zona, haciendo posible con esto poder trazar en línea recta el enlace radioeléctrico entre dos puntos.

La constante K se obtiene a partir de estudios estadísticos del comportamiento del clima e ionizaciones presentes en la tropósfera durante un transcurso de tiempo definido. En este caso como no se cuenta con la instrumentación necesaria (medidores de gases, globos meteorológicos) ni el tiempo, ya que se ocupan periodos de más de 1 año de análisis, se utilizó el criterio definido por la UIT-R I.338 para las condiciones más desfavorables, el cual establece[15]:

- $k = \frac{4}{3}$, por lo que el radio de la primera zona de Fresnel debe estar despejado al 100%. Esto implica que $u' > 1$ en todo el trayecto.

En la figura 5.2 se muestra el perfil del terreno para el enlace entre CP y TRM. En esta zona se seleccionaron dos posibles puntos de repetición de la señal, esto ya que son las dos protuberancias que más sobresalen en el trayecto.

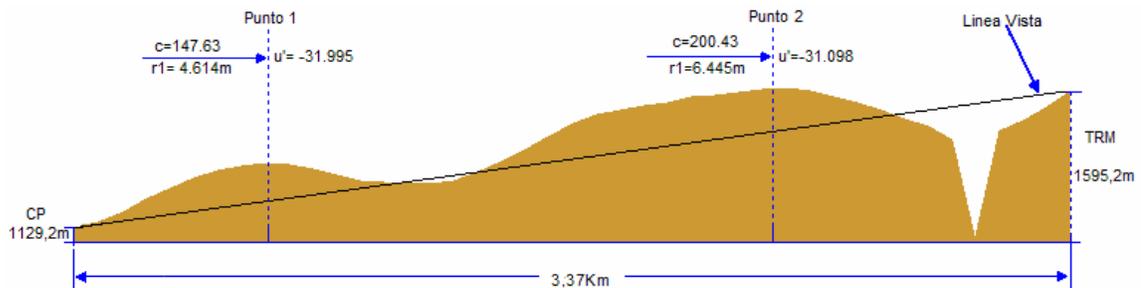


Figura 5.2 Perfil del terreno para el enlace entre el CP y TRM

Aplicando el criterio de despeje en estos dos puntos para verificar que porcentaje del radio de la primera zona de Fresnel se encuentra obstruido se encontró que para el punto 1, ubicado a 0.48Km del centro de producción y a 2.89Km de la TRM con una altura de 1343m, el despeje de Clearance es de 147.63m según la (3.15); utilizando (3.3) se obtiene un radio de Fresnel de 4.614m lo que implica que al sustituir estos valores en (3.12) se determina que $u' = -31.995$ (cálculos, apéndice A.1.1).

Para el punto 2, que tiene una altura de 1613m y se encuentra a una distancia de 2.05Km del CP y a 1.32Km de la TRM, se obtuvo que el despeje de Clearance es de 200.5m y el radio de la primera zona de Fresnel es de 6.445m lo que implica que $u' = -31.098$ (cálculos, ver Apéndice A.1.1).

De realizarse un enlace directo al CP es necesario que las torres tengan una altura superior a 4.614m en el primer punto y 6.445m en el segundo para garantizar que $u' > 1$ en todo el trayecto.

En la figura 5.3 se presenta el perfil de terreno para los enlaces entre el CP-Emb, CP-TOsc, CP-TT. Como se puede ver en ninguno de los casos hay línea vista directa, por lo que se seleccionan los puntos más sobresalientes del perfil para aplicar los criterios de despeje.

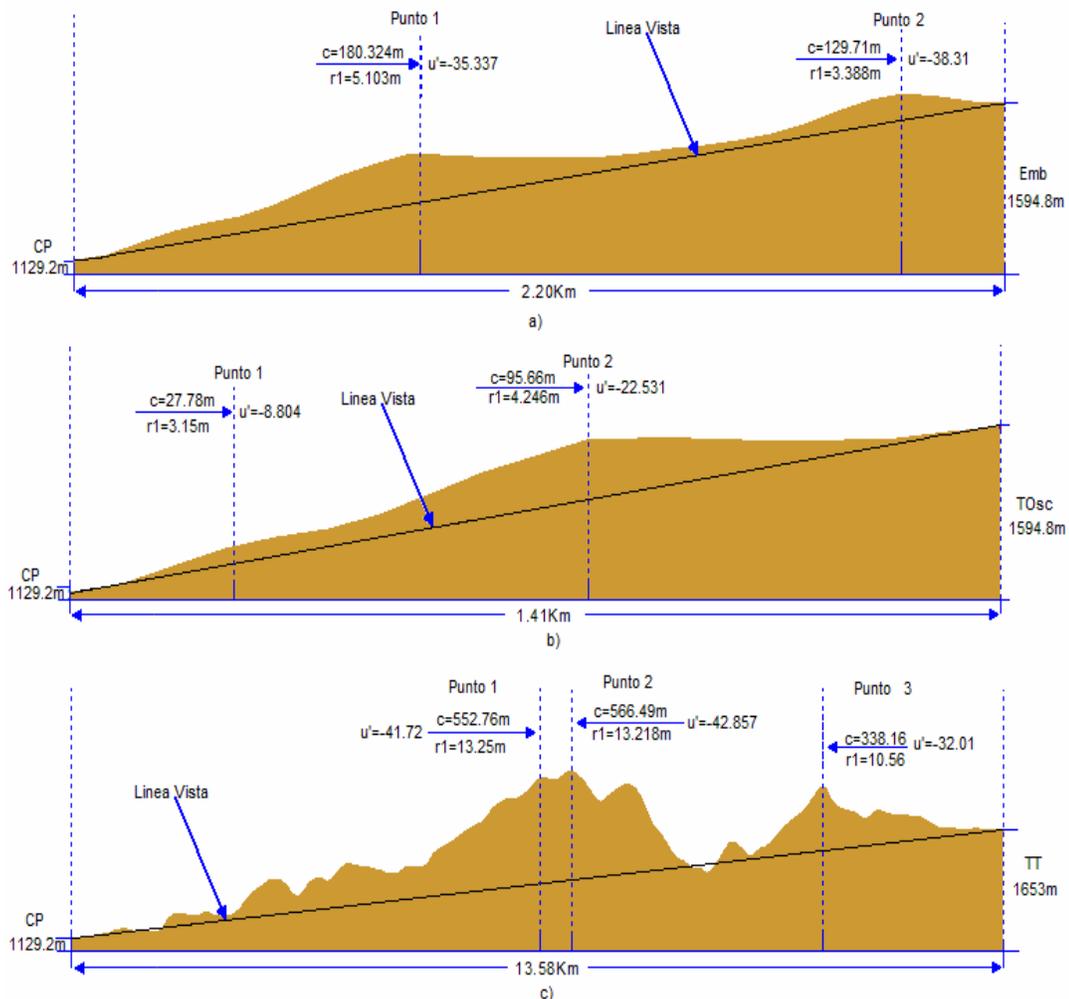


Figura 5.3 Perfil del terreno para el Emb, TOsc y TT.

En la tabla 5.2 se resumen los parámetros de despeje de Clearance, el radio de la primera zona Fresnel y la relación de despeje u' para el área de estudio (cálculos, ver Apéndice A.1.1).

Tabla 5.2 Resumen de Clearance, zona Fresnel y u' para el Emb, TOsc y TT

Enlace	Puntos de repetición	Despeje Clearance(c)	Radio primera zona Fresnel(r_1)	u'
CP-TRM	1	147.63m	4.61m	-31.99
	2	200.43m	6.44m	-31.10
CP-Emb	1	180.32m	5.10m	-35.34
	2	129.71m	3.39m	-38.31
CP-TOsc	1	27.78m	3.15m	-8.80
	2	95.66m	4.25m	-22.53
CP-TT	1	552.76m	13.25m	-41.72
	2	566.49m	13.22m	-42.86
	3	338.16m	10.56m	-32.01

En todos los casos mostrados en la tabla 5.2 $u' < 0$, por lo que es necesario establecer puntos de repetición que satisfagan la relación $u' > 1$.

5.1.3 Selección del prototipo de enlace

Hasta el momento se ha considerado hacer el enlace directo entre el centro de producción y el complejo de abastecimiento de agua, pero el principal problema es que al encontrarse el sistema de tomas de agua dentro del Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte, sería necesario abrir montaña para crear las instalaciones. Sin embargo, en el artículo 12 de la ley 6084, de protección de Parques Nacionales, se establece que *“No pueden otorgarse concesiones de tipo alguno para la explotación de productos de los parques nacionales, ni otorgarse permiso para establecer otras instalaciones que las del servicio”* [21].

Aún si se hiciera el enlace en esta área se debe considerar una serie de aspectos; entre los más importantes se encuentran:

A nivel administrativo sería necesario:

- Hacer los trámites con el MINAE para la explotación del área seleccionada.
- Contratación de personal especializado para la exploración de la montaña.

A nivel civil:

- Hacer una exploración en montaña virgen para encontrar los puntos de repetición seleccionados.
- Abrir el acceso para llegar a los puntos seleccionados.
- Creación de instalaciones para resguardar equipo y personal de soporte en caso de falla.

A nivel técnico:

- Se requiere al menos dos estaciones repetidoras en los enlaces entre el CP-TRM, CP-Emb, CP-TOsc y tres repetidoras entre CP-TT, que trae consigo la instalación de dos antenas por punto de repetición.

Considerando los puntos anteriores se optó por buscar un área fuera del parque nacional que disminuyera los costos a nivel administrativo, civil y técnico para realizar el enlace inalámbrico. Con esto se identificaron tres puntos de repetición que enlazan el CP con el sistema de abastecimiento de agua, en la tabla 5.3 se presentan los datos geográficos de estos.

Tabla 5.3 Datos geográficos del CG,PSF,I_TT

Puntos	Altura(m)	Latitud	Longitud
CG	3007.60	09°57'05.60	83°51'02.00
PSF	1493.10	09°45'21.50	83°50'30.80
I_TT	1682.00	09°41'39.70	83°46'42.91

El Cerro Gurdían (CG) presenta las siguientes características:

- Tiene línea vista al CP y el Emb.
- Se encuentran actualmente las instalaciones del enlace microonda entre el edificio central del ICE en la Sabana con el CP, por lo que no es necesario construir torres ya que se pueden utilizar estas.
- El acceso se hace a través de la carretera que comunica la ciudad de Cartago con el volcán Irazú, por lo cual no se deben construir caminos.
- Las instalaciones son vigiladas constantemente por funcionarios del ICE.

El segundo punto ubicado en la hacienda Querevic (PSF) presenta las siguientes características:

- Tiene línea vista con el CG, la TRM y TOsc.
- Es necesario crear las instalaciones, pero se cuenta con el permiso del propietario para tal fin.
- Se encuentra ubicado a 5km del CP, el acceso es por camino de grava, solo es necesario mantener el camino en buen estado.

Un tercer punto (I_TT) que comunica la TT tiene las siguientes características:

- Tiene línea vista con el CG.
- Se tienen que hacer las instalaciones, con la ventaja que el punto se encuentra ubicado sobre la carretera que es propiedad del ICE.
- Ubicado a 4.5km de la TT.

El inconveniente que se presenta para enlazar la toma Tapantí con el centro de producción es la necesidad de enlazar el punto de repetición con la toma utilizando una tecnología diferente a la inalámbrica, por lo que el análisis de este trayecto se sale de los alcances del proyecto.

Considerando los puntos de repetición encontrados, en la figura 5.4 se presenta un diagrama con la ubicación geográfica de los mismos. El enlace entre el CP-CG se muestra en azul y el enlace entre CG-PSF en rojo.

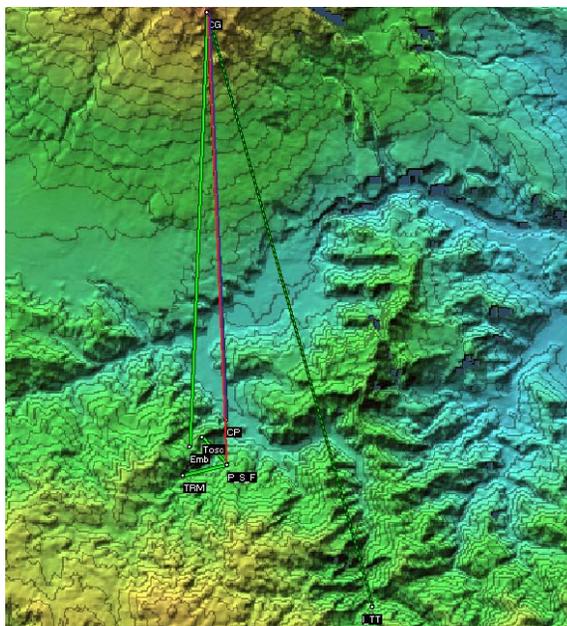


Figura 5.4 Diagrama esquemático del enlace inalámbrico

Para la selección del prototipo de enlace se consideró que los puntos más importantes son el Cerro Gurdían, el CP y el punto en la finca Querevic. Dado que el fin del proyecto es enlazar el CP a alguna toma de agua, se considera la TMR ya que para realizar el enlace es necesario pasar por los puntos CG y PSF.

5.2 Diseño de las características de enlace del prototipo

El prototipo de enlace se diseñó en tres partes. Primero se diseña el enlace entre el CP y el cerro Gurdían, para luego proyectar los criterios de diseño a los enlaces PSF-CG y PSF-TRM. Además se considera la transmisión del CP a la TRM.

5.2.1 Diseño del enlace entre el CP-CG

En la tabla 5.4 se presenta las coordenadas geográficas, altura y distancia del enlace entre el centro de producción y el cerro Gurdían.

Tabla 5.4 Características geográficas del CP y CG

Punto	Latitud(hd°mm'ss)	Longitud(hd°mm'ss)	Altura(m)
CP	09°46'31.5	83°50'31.5	1129,2
CG	09°57'05.6	83°51'02.0	3007.6
Distancia	19.5Km		
Frecuencia	5800MHz		

Con ayuda del simulador Radio Mobile v9.1.8 se puede ver en la figura 5.5 que efectivamente existe línea de vista entre el CP y el CG, además de un posible punto de obstrucción para la primera zona Fresnel.

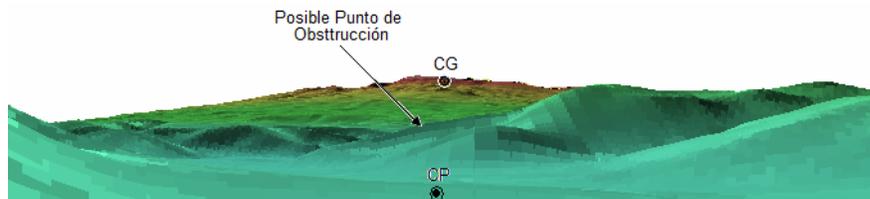


Figura 5.5 Línea vista entre el CP y CG.

5.2.1.1 Influencia del terreno sobre la propagación de la señal

En la figura 5.6 se presenta el perfil del terreno para el enlace entre el CP y CG. Como se ve la línea vista esta despejada en todo el trayecto, aun así existe un obstáculo que sobresale con una altura de 1220m, ubicado a una distancia de 2.66km del CP.

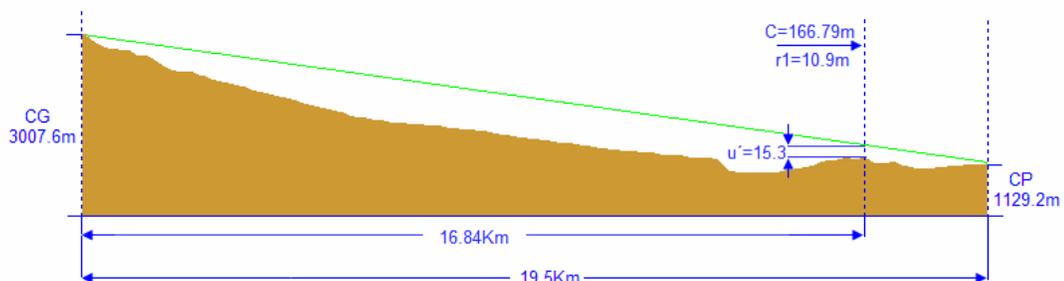


Figura 5.6 Perfil del terreno para el enlace entre el CP y CG.

Verificando el despeje en este punto, según el criterio mencionado en el apartado 5.1.3, se obtiene que al sustituir en (3.3) el radio de la primera zona de Fresnel es de 10.9m. Para el despeje de Clearance se emplea la (3.15), con lo que se obtiene 166.79m, por lo tanto $u'=15.3$, lo que satisface que $u' > 1$ (cálculos, ver Apéndice A.1.1).

Para definir la altura de las torres es necesario considerar que la visibilidad radioeléctrica sea mayor a la distancia del enlace $d_{vr} > d_{enlace}$; considerando que $k = \frac{4}{3}$ y partiendo de (3.18) de visibilidad radioeléctrica se obtiene que:

$$d_{vr(Km)} = 4,2(\sqrt{R_t} + \sqrt{R_r}) \quad (5.1)$$

Para obtener la altura mínima que debe tener la antena para que la curvatura de la tierra no represente un obstáculo se despeja R_t de (5.1):

$$\left(\frac{d_{(Km)}}{4,2_{(Km)}} - \sqrt{R_r}\right)^2 = R_t \quad (5.2)$$

Considerando que la altura de la torre en el cerro Gurdían es de 9m y que esta no se puede variar se obtiene que $R_t = 2.7m$. Un problema es que las torres de la subestación que se encuentran al frente del CP tienen una altura aproximada de 12m, optando por ubicar la antena sobre el edificio de la casa de máquinas que mide 10m y utilizando la torre del enlace pentacanal de 3m, más la altura que se obtuvo a partir de (5.2), se puede aproximar que la altura de la torre en el centro de producción mide 16m (cálculos, ver Apéndice A.1.2). Verificando la visibilidad radioeléctrica a partir de (5.1) se obtiene un alcance máximo para las antenas de 29.4km.

Según la teoría de propagación electromagnética, existe una influencia del rayo reflejado sobre el campo eléctrico en el receptor. Partiendo de esto es necesario determinar el posible punto de reflexión y con esto la atenuación en exceso que este pueda traer. Se debe considerar un punto de transmisión, en este caso el CP.

Partiendo de que la altura de la antena en el CP es de 16m y en CG de 9m, aplicando (3.25) se obtiene que $p = 20.245km$ y a partir de (3.26) se encuentra que $\phi = 1.296rad$. Sustituyendo estos valores en (3.24) se obtiene que la distancia del CP al punto de reflexión es de 11.6km, mientras que con (3.27) se obtiene que la distancia al CG es de 7.9km. (Cálculos, apéndice A.1.3).

Para determinar el ángulo de incidencia es necesario encontrar la altura efectiva de las torres, al utilizar (3.22) se obtiene que la altura efectiva en el CP es de 8.08m y con (3.23) se determina que en el CG es de 5.326m. Finalmente sustituyendo estos valores en (3.28) se encuentra que el ángulo de incidencia con respecto al plano tierra es de aproximadamente 0.04° (Cálculos, apéndice A.1.3). En la figura 5.7 se presenta el punto de reflexión y el ángulo de reflexión.

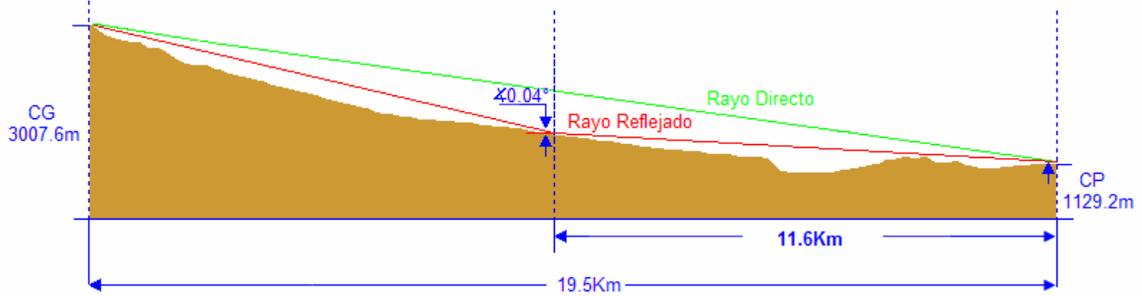


Figura 5.7 Punto y ángulo de reflexión con respecto al rayo directo, entre CG-CP

El desfase que existe entre el rayo reflejado y el rayo directo se calcula empleando (3.35), con lo que se obtiene 1.794rad. Para determinar el coeficiente de reflexión se consideran los valores suministrados en la tabla 3.2; para un área montañosa húmeda típicamente se utiliza $\sigma = 5mS/m$ y $\epsilon_r = 15$, al sustituir estos valores en (3.42) se encuentra que el valor de la permitividad compleja del suelo es de $15 - j0.0155$ (cálculos, apéndice A.1.3).

Sustituyendo el ángulo de incidencia y la permitividad compleja en (3.40) se encuentra que el coeficiente de reflexión vertical expresado en forma polar es de $0.9945e^{-j\pi}$, esto se puede aproximar a $e^{-j\pi}$, según el criterio establecido en el apartado 3.2.6 (cálculos, apéndice A.1.3).

El factor de divergencia debido a la curvatura de la tierra se obtiene mediante (3.39), sustituyendo las distancias al punto de reflexión y la altura de las torres efectivas se encuentra que la divergencia de la señal es 0.7326 (cálculos, apéndice A.1.3).

A partir de (3.33) y (3.34) la distancia recorrida por el rayo directo es de 19.6km y por el rayo reflejado es de 19.9km, con esto se tiene que las distancias recorridas por los rayos son prácticamente la misma por lo que (3.32) se reduce a:

$$E_{tr} = E_0(1 + D_v \Gamma e^{-j(\phi + \phi_r)}) \quad (5.3)$$

Por lo tanto, se puede utilizar (3.40) para obtener la atenuación por exceso debido a la influencia del rayo reflejado. En este caso, es de aproximadamente -2.68dB, esto implica que la señal se refuerza en 2.68dB (cálculos, apéndice A.1.3)

5.2.1.2 Pérdidas del enlace

Las pérdidas del enlace se consideran desde el transmisor hasta el receptor; como la trayectoria de propagación de un punto a otro es la misma, ya que ni la frecuencia, ni la distancia varían, solo es necesario calcular hacia una dirección.

Las principales pérdidas a considerar en un enlace inalámbrico son la pérdidas de espacio libre (L_p), las cuales se calculan a partir de (3.49), obteniéndose 133.53dB (cálculos, apéndice A.1.4).

Las pérdidas totales de propagación, considerando la atenuación en exceso debido al rayo reflejado, son de 130.85dB.

Típicamente los fabricantes de antenas parabólicas especifican un $VSWR_{ant}$ de 1.5. El coeficiente de reflexión de la antena se puede obtener al despejar (3.44):

$$\Gamma_{ant} = \frac{1 - VSWR_{ant}}{1 + VSWR_{ant}} \quad (5.4)$$

Sustituyendo el valor de $VSWR_{ant}$ en (5.2) se encuentra que $\Gamma_{ant} = 0.2$ (cálculo, apéndice A.1.4). Utilizando (3.45) se encuentra que las pérdidas de desacople entre el transmisor y la antena son de aproximadamente 0.177dB (cálculo, apéndice A.1.4).

Las atenuaciones por condiciones ambientales (L_A), vapor de agua, oxígeno y lluvia se determinan por separado. De la recomendación de la UIT-R.676, se extrae la gráfica que se presenta en la figura 5.7, que muestra la atenuación en dB/km versus la frecuencia del enlace para el vapor de agua y el oxígeno [11].

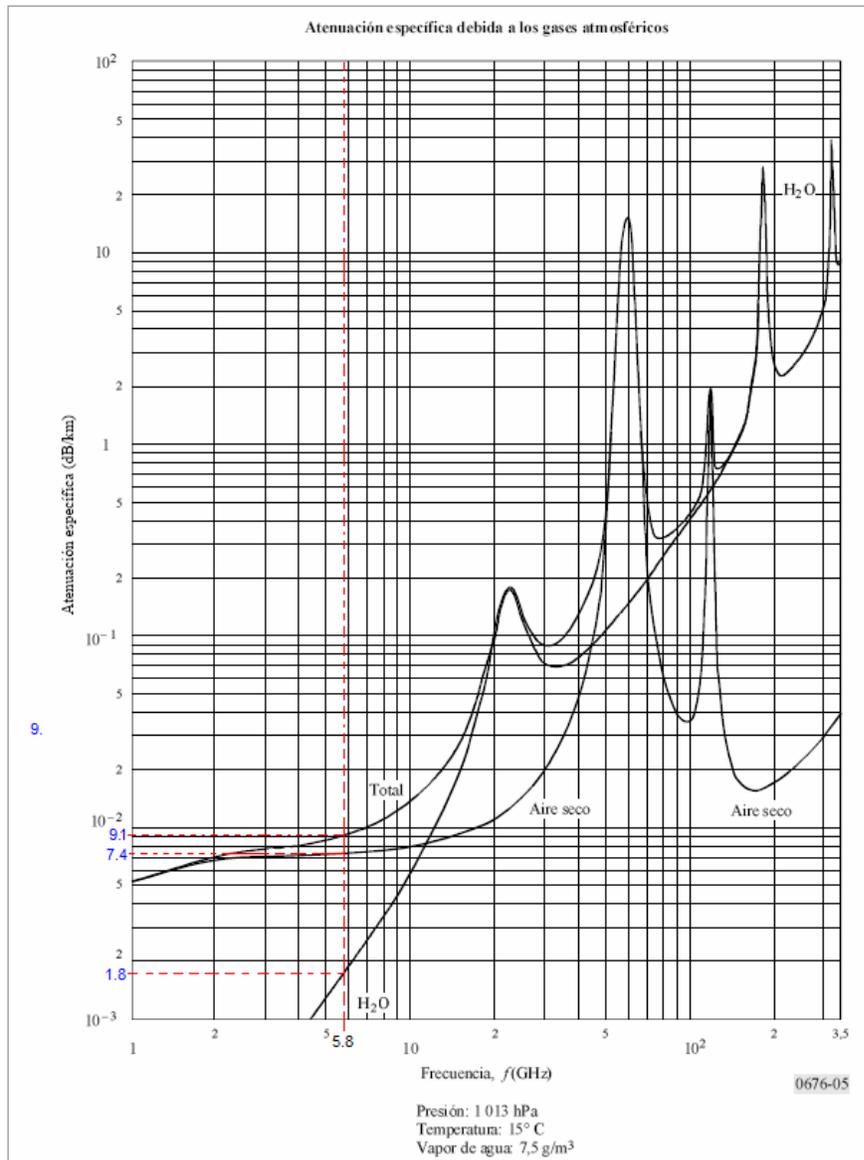


Figura 5.8 Atenuación por gases atmosféricos [11].

A una frecuencia de 5.8GHz, según como se muestra en la figura 5.8, se obtiene que las pérdidas por oxígeno (L_o) son de aproximadamente $7.4 \cdot 10^{-2} \text{ dB/Km}$ y la atenuación del vapor de agua (L_H) es de $1.8 \cdot 10^{-2} \text{ dB/Km}$, por lo que, según (3.50), la pérdidas por condiciones atmosféricas son de $9.1 \cdot 10^{-2} \text{ dB/Km}$. En una distancia de 19.5 km esto implica que se tiene una atenuación total de 1.77dB

Las pérdidas por lluvia se consideran en enlaces superiores a los 7GHz, esto debido a que el diámetro aproximado de las gotas de lluvia es de 2mm [19]. La longitud de onda de la frecuencia a utilizar es de 517.24mm, esto implica que es

aproximadamente 258.62 veces más grande que una gota de lluvia, por lo que su influencia es despreciable.

Las pérdidas en las guías de onda (L_f), se aproximan a partir de las características que los fabricantes proveen en sus hojas de datos. La atenuación por metro de algunas de las guías de ondas más utilizadas y la atenuación que presentarían en un enlace de 20m a una frecuencia de 5.8GHz se presentan en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Atenuación de los cables comúnmente utilizados en redes.

Tipo de Cable	RG-8	RG-58	RG-213	LMR-400	LM-600	Heliac
Atenuación dB/m	0.717	1.349	0.717	0.355	0.238	0.198
Atenuación (dB) en 20m	14.34	26.98	14.34	7.1	4.76	4

En el mercado se encuentran más comúnmente los cables RG-8/58/213 que fueron diseñados para trabajar en redes ethernet, radio enlaces HF/VHF y CB, pero no para funcionar a frecuencias de microondas [1]. Otra opción son los cables LMR 400/600/800 que funcionan a frecuencias de microondas con una pérdida considerablemente baja.

Lo más recomendado son los cable tipo Heliac especialmente diseñados para trabajar a frecuencias de microondas, entre sus aplicaciones se encuentran las redes inalámbricas [1].

Con base a lo anterior se estima que las pérdidas por guía de onda más las pérdidas que generan los conectores, filtros y otros son de 12dB.

Para el margen de desvanecimiento (F_m), se establece un objetivo de confiabilidad del 99.99%, esto implicaría que R va ser igual a 0.9999.

A partir de las características del terreno se puede obtener el factor de rugosidad(A). Utilizando (3.56) se obtiene que la variación de altura promedio (σ_h) es 808.675m (cálculos, ver apéndice A.1.4). Para obtener el parámetro g se emplea (3.55), con lo cual se obtiene 32.02, el cual es un parámetro adimensional (cálculos, ver

apéndice A.1.4). Sustituyendo los resultados en (3.54) se obtiene que la rigurosidad (A) es de 0.3406 (cálculos, ver apéndice A.1.4).

Considerando que el área es montañosa se toma un $B=0.125$. Por lo tanto, al sustituir los parámetros obtenidos en (3.4), se tiene un margen de desvanecimiento de 10.41dB, esto implica que la señal que se espera recibir en las inmediaciones del transmisor va ser 10.41dB mayor a la sensibilidad de recepción (cálculos, ver apéndice A.1.4).

Para garantizar lo anterior se considera el margen de desvanecimiento en las pérdidas totales estimadas para el enlace, en este caso son de 155.2dB.

5.2.1.3 Potencia de transmisión, recepción y ganancia.

Los fabricantes de equipos que trabajan bajo el estándar 802.11a, especifican que para una modulación 64-QAM se tiene una velocidad de transmisión teórica de 54Mbps con un ancho de banda por canal de 20MHz. Típicamente se tiene un umbral de recepción a partir de un BER de 10^{-6} de -68dBm con una variación de ± 2 dB. Así mismo, la potencia de transmisión de los dispositivos inalámbricos para exteriores se encuentra en un rango de 20 a 30dBm con una variación de ± 1 dB.

Para compensar estas variaciones se agregan a las pérdidas del sistema 3dB, por lo que se tiene que las pérdidas totales del sistema son de 158.2dB.

Para determinar la ganancia de las antenas se emplea (3.59), con la se obtiene que:

$$P_t \geq C_{\text{mínima}} \text{ (dB)} + L_{TS} - (G_T + G_R) \quad (5.5)$$

Si la ganancia de la antena transmisora es igual a la ganancia de la antena receptora:

$$G_T = G_R = 2G \quad (5.6)$$

Sustituyendo (5.6) en (5.5) se obtiene que la ganancia de la antena se puede expresar como:

$$G = \left(\frac{C_{\text{mínima}} (\text{dB}) + L_{TS} (\text{dB}) - P_t (\text{dBm})}{2} \right) \quad (5.7)$$

Como la potencia de transmisión máxima de los equipos es de 30dBm y el umbral de recepción es de -68dBm, se puede decir que a partir de (5.7) se obtiene la ganancia mínima de la antena bajo la cual se garantiza un margen de desvanecimiento de 10dB. Por lo tanto se tiene que la ganancia aproximada es de 30.1dBi (cálculos, ver apéndice A.1.5).

En la práctica para obtener la mejor recepción es necesario medir el campo eléctrico en las inmediaciones de la antena, ajustando con esto el ángulo de elevación y el azimut. Teóricamente para establecer un punto de referencia en el momento de la instalación se determinan estos ángulos.

Es necesario para esto tener un punto de referencia (R_x) para establecer la orientación en la antena transmisora.

Usando (3.48) y considerando el CG como transmisor y CP como receptor, se tiene que el ángulo de elevación para la antena en el CG es de -5.45° y el azimut, obtenido a partir de (3.47), es 177.115° (cálculos, ver apéndice A.1.5).

En el caso en el que el CP es el transmisor y el CG el receptor, el ángulo de elevación para la antena en el CP es de 5.585° y el azimut 357.117° (cálculos, ver apéndice A.1.5).

La potencia entregada a la antena se determina como la diferencia entre la potencia de transmisión y las pérdidas debidas a los filtros, conectores y guías de onda, se puede expresar como:

$$P_{t_{ant}} = P_t - L_f \quad (5.8)$$

Considerando que la potencia de transmisión es de 30dBm y que las pérdidas debido a filtros, conectores y guías de onda son de aproximadamente 6dB la potencia entregada a la antena es de 24dBm. Esto implica que la antena debe soportar potencias de más de 0.25W.

5.2.2 Diseño del enlace entre CG y PSF

En la tabla 5.6 se presenta la ubicación geográfica del PSF y el cerro Gurdían.

Tabla 5.6 Características geográficas del PSF y CG

Punto	Latitud(hd°mm'ss)	Longitud(hd°mm'ss)	Altura(m)
PSF	09°45'21.5	83°50'30.8	1493
CG	09°57'05.6	83°51'02.0	3007.6
Distancia	21.7Km		
Frecuencia	5800MHz		

Con ayuda del simulador Radio Mobile v9.1.8 se puede ver en la figura 5.9 que efectivamente existe línea de vista entre el PSF y el CG, además de un posible punto de obstrucción para la primera zona Fresnel.

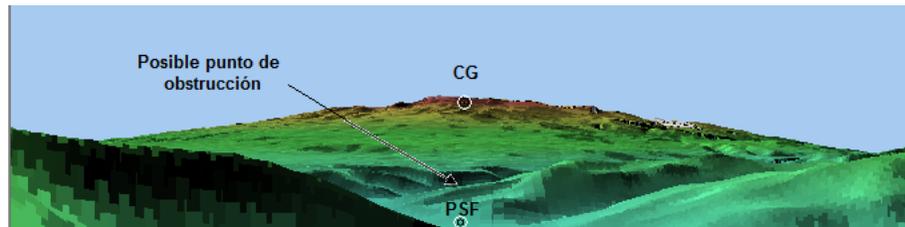


Figura 5.9 Línea vista entre el CG y PSF

La posible obstrucción se encuentra ubicada aproximadamente a 100m del PSF, con una altura de 1492m, el radio de la primera zona Fresnel es de 2.27m. El despeje de Clearance es 7.75m, con esto se obtiene que $u'=3.414$; por lo tanto, la primera zona de Fresnel se encuentra despejada.

Considerando la altura de la torre en el CG de 9m y aplicando (5.2) se obtiene que la altura mínima de la torre en el PSF es 4.7m. Utilizando una torre tipo A estándar de 4 secciones de 2m, se puede instalar en el PSF una torre de 8m, con esto se obtendría una visibilidad radioeléctrica de 24.5km.

Para determinar el punto de reflexión de la señal se hace el mismo procedimiento que en el apartado 5.2.1, por lo que la distancia del CG al punto de reflexión es de 11.28km, mientras que del PSF es de 10.42km. La altura efectiva de la antena en el CG es de 1.51m y en el PSF es 1.61m, por lo que el ángulo de incidencia es de 0.0082° , esto se puede ver en la figura 5.10.

El desfase entre el rayo reflejado y el directo es de 0.8061rad. La permitividad compleja del suelo es de $15 - j0.0155$. El coeficiente de reflexión expresado en forma polar es de $0.9988e^{-j\pi}$ (aproximadamente $e^{-j\pi}$). El factor de divergencia en este caso es de 0.6168. La distancia recorrida por el RD es de 21.7km y por el RR de 21.92km, por lo que la atenuación por exceso debido a la influencia del rayo reflejado es de aproximadamente 2.8dB.

El Perfil del terreno e influencia del rayo reflejado en la propagación de la señal se muestra en la figura 5.10.

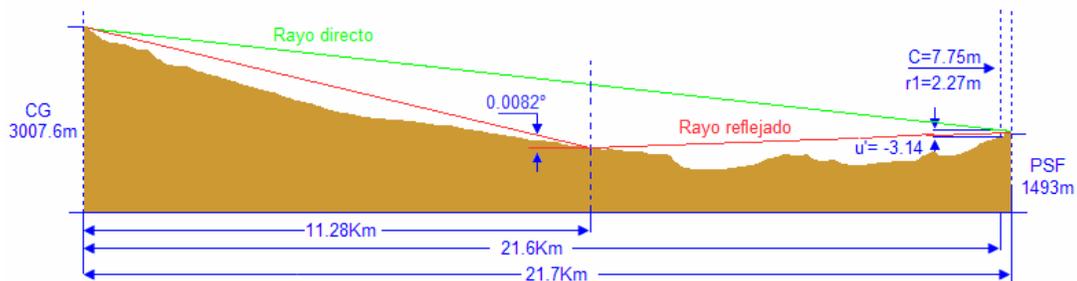


Figura 5.10 Perfil del terreno e influencia del RR en el enlace CG-PSF

Para el margen de desvanecimiento se espera una confiabilidad del 99.99%, el terreno presenta una altura efectiva promedio de 366.98m, por lo que la rigurosidad en el trayecto es de 0.374. Dado que el área es montañosa se usa un $B=0.125$, por lo se obtiene un margen de desvanecimiento de 12.2dB.

En la tabla 5.7 se presenta un resumen de las pérdidas del enlace CG- PSF.

Tabla 5.7 Pérdidas del enlace CG-PSF

Pérdidas	Valor
Pérdida espacio libre	134.46dB
Atenuación en exceso	2.8dB
Pérdidas por desacople	0.177dB
Pérdidas en las guías de onda	12dB
Pérdidas por condiciones ambientales	2dB
Margen de desvanecimiento	12.2dB
Variación de los equipos de Tx y RX	3dB
Pérdidas totales	167dB

El ángulo de elevación para la antena en el CG es de -3.93° y el azimut 177.4° . Para la antena en el PSF el ángulo de elevación es de 4.07° y el azimut 358.3° .

5.2.3 Diseño del enlace entre el PSF y TRM

En la tabla 5.8 se presenta la ubicación geográfica del PSF la TRM.

Tabla 5.8 Características geográficas del PSF y TRM

Punto	Latitud(hd°mm'ss)	Longitud(hd°mm'ss)	Altura(m)
PSF	09°45'21.5	83°50'30.8	1493
TRM	09°45'05.4	83°51'39.3	1595.2
Distancia	2.1Km		
Frecuencia	5800MHz		

Con ayuda del simulador Radio Mobile v9.1.8 se puede ver en la figura 5.11 que efectivamente existe línea de vista entre el PSF y la TRM, y que no existe ningún posible punto de obstrucción.



Figura 5.11 Línea vista entre el PSF y la TRM

Verificando lo anterior con el perfil del terreno que se muestra en la figura 5.12, es innecesario realizar los cálculos de radio Fresnel y despeje de Clearance.

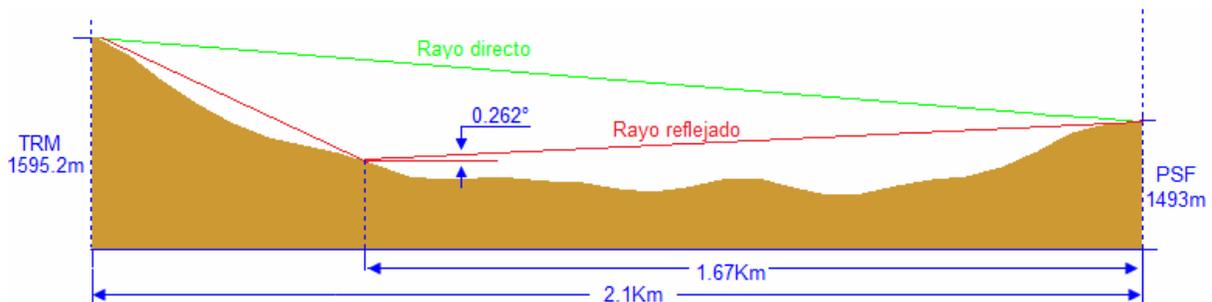


Figura 5.12 Perfil del terreno para el enlace entre el PSF y TRM.

Por la distancia tan corta del enlace de apenas 2.1Km, y como la torre en el PSF se estableció en 8m, la condición de visibilidad radioeléctrica, sin considerar la altura de la torre en la TRM, se cumple. Aplicando (5.1) se tiene $d_{vr} = 11.88Km$, la cual es 5,67 veces más grande que la distancia del enlace. Para la altura de la torre en este punto, tomando en cuenta que la toma de agua se encuentra en un área muy reducida, se puede utilizar el techo de la caseta de los operadores que es de aproximadamente 2m.

Para determinar el punto de reflexión de la señal se sigue el mismo procedimiento que en el apartado 5.2.1, por lo que la distancia del PSF al punto de reflexión es de 1.67km, mientras que de la TRM es de 0.43km. La altura efectiva de la antena en el PSF es de 7.84m y en la TRM de 1.99m, por lo que el ángulo de incidencia es de 0.262° , esto se muestra en la figura 5.12.

El desfase entre el rayo reflejado y el directo es de 1.803rad. La permitividad compleja del suelo es de $15 - j0.0155$. El coeficiente de reflexión expresado en forma polar es de $0.96394e^{-j\pi}$, en este caso no se puede realizar la aproximación efectuada en los apartados 5.2.1 y 5.2.2, por lo que se debe conservar la magnitud del coeficiente de reflexión. El factor de divergencia en este caso es de 0.9907, este factor se aproxima a 1 debido a que la distancia del enlace es de apenas 2.1Km. La atenuación en exceso en este caso es de -3.7dB, el rayo RR esta contribuyendo en fase al RD.

Para el margen de desvanecimiento se considera un margen de confiabilidad de 99.99%, con una altura promedio de 1467m, se tiene que el factor de rigurosidad es de 0.3525, con un $B=0.125$ el margen de desvanecimiento es de 18.5dB.

En la tabla 5.9 se presenta un resumen de las atenuaciones presentes en el enlace PSF y TRM, ya que el procedimiento es el mismo que se describe en el apartado 5.2.1.

Tabla 5.9 Resumen de las pérdidas del enlace PSF-TRM

Pérdidas	Valor
Pérdida espacio libre	114.31dB
Atenuación en exceso	-3.7dB
Pérdidas por desacople	0.177dB
Pérdidas en las guías de onda	12dB
Pérdidas por condiciones ambientales	0.2dB
Margen desvanecimiento	18.5dB
Variación de los equipos de Tx y RX	3dB
Pérdidas totales	144.5dB

El ángulo de elevación de la antena en el PSF es de 2.79° y el azimutal 256.55° . Para la antena en la TRM el ángulo de elevación es de 2.77° y el azimutal 76.55° .

5.3 Diseño a nivel de red

5.3.1 Infraestructura de red

Una vez establecidas las características de propagación del enlace se procede a diseñar la estructura de red. La arquitectura tipo infraestructura requiere que cada uno de los nodos cuente con estaciones base o subscriptores para establecer la comunicación.

La topología punto a punto comunica dos nodos por medio de un enlace físico, en este caso se utilizan dos puntos de repetición el CG y el PSF para realizar los enlaces. No se considera el CG ni el PSF como multipunto ya que la información va ser específica para un solo nodo y no se va a difundir en toda la red.

A nivel de hardware en el CP y las tomas de agua es necesario contar con una estación base con su respectiva antena y un switch. Las características de la BSU basadas en las especificaciones que brindan los fabricantes y considerando solamente aquellas que son indispensables y globales para realizar el enlace son:

- Frecuencia de operación entre 5 y 6GHz.
- Potencia de transmisión variable entre 0.1W y 1W.
- Selección de canal de transmisión manual.
- Soportar más de un canal de transmisión y recepción al mismo tiempo.
- Umbral de recepción menor a -68dBm.
- Contar con protocolo de ruteo RIP v1,2.
- Contar con interfaz para red ethernet.
- Filtrado por dirección MAC e IP.
- Soportar aplicaciones específicas como Telnet, SSH, HTTP.
- Seguridad a nivel de acceso con clave de seguridad y a nivel de transporte con WEP y WPA.

En cuanto al conector para la antena en el BSU el estándar utilizado por los fabricantes es el N-hembra, se debe tener cuidado al seleccionar la antena ya que en ocasiones estas utilizan el conector tipo macho.

Como se vio en el capítulo 3 existen dos tipos de switch. Los que trabajan en capa 2 que dividen los dominios de colisión, administran y aumentan el ancho de banda, también sirven como interfaz con dispositivos lentos en la red, haciendo que esta sea más eficiente. Los de capa 3, hacen las mismas funciones anteriores pero agregan el nivel de seguridad y ruteo de los routers.

La desventaja de los switch L3 sobre L2 (denominación comercial) es el precio, pero son los próximos sustitutos de estos y los routers, por lo que es recomendable utilizar el switch L3. Las características globales que deben de tener son:

- Filtrado por dirección MAC e IP.
- Contar con protocolo de ruteo RIP v1,2.
- Soportar aplicaciones específicas como Telnet, SSH, HTTP.
- Restringir el acceso por clave de seguridad a la configuración.
- 32MB de memoria RAM y 16MB de memoria flash.
- Capacidad de almacenar 4000 direcciones MAC.
- Soportar aplicaciones específicas como Telnet, SSH, HTTP.
- Al menos 10 puertos 10/100/1000BASE-T

En la figura 5.13 se presenta la infraestructura de red del sistema de comunicaciones, sin tomar en consideración la ubicación geográfica de las tomas de agua, puntos de repetición y CP.

En el CP y tomas de agua se requiere como mínimo un switch y una BSU, mientras que en el CG como en el PSF es necesario un switch y 2 BSU. Inicialmente como periféricos se considera una computadora y una cámara IP por punto.

Las antenas parabólicas tienen una alta ganancia y son muy directivas, es recomendable utilizar una antena por enlace y con un canal diferente para no tener problemas de interferencia.

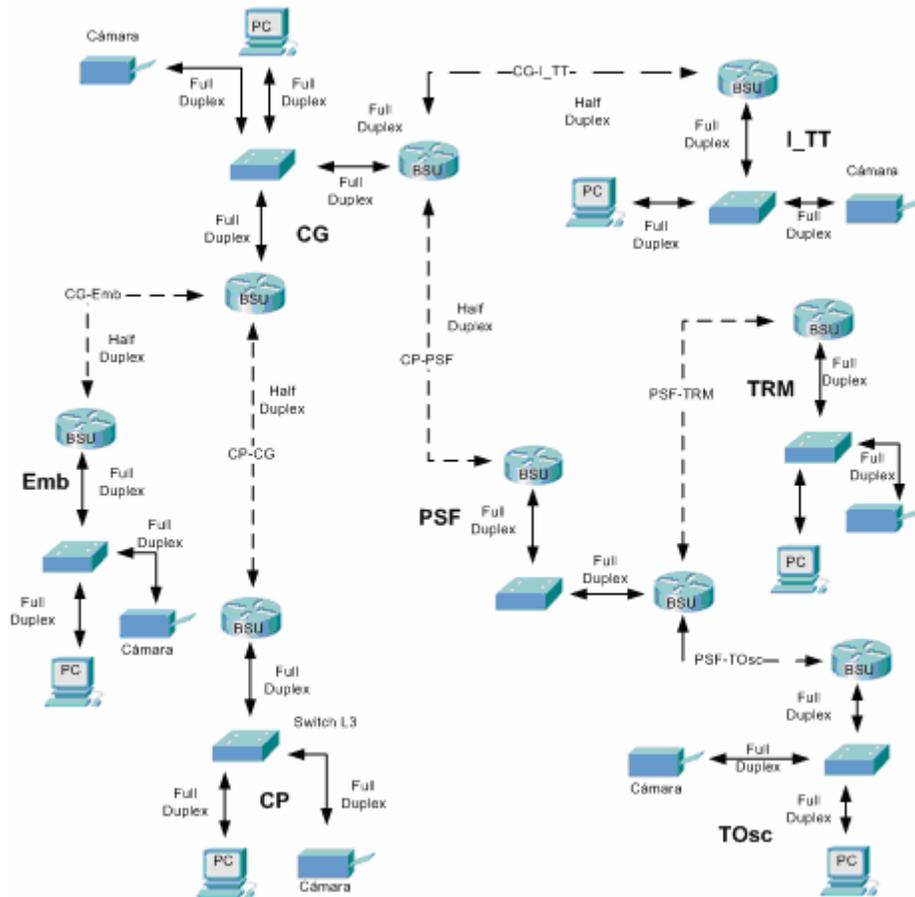


Figura 5.13 Infraestructura de la red entre el CP y las tomas de agua

5.3.2 Creación de subredes

Actualmente el CP se encuentra en red con el edificio central de la Sabana, en donde se utilizan las direcciones clase A, esto debido a que el ICE es una entidad gubernamental. Se utilizará una dirección IP padre que todavía no ha sido definida por el Ing. Edward Astúa, debido a que se partirá de una dirección IP clase C para establecer el diseño de la red. Para la conexión a Internet se utilizará la puerta de enlace actual que maneja el CP, esta será establecida en el equipo por el Ing. Edward Astúa.

Cabe aclarar que la red se puede implementar de la manera que se muestra en este apartado, aun así de utilizarse una dirección de red diferente el procedimiento a seguir es el mismo.

Para que la red sea más fácil de administrar el sistema se divide en subredes, cada una de estas subredes va a identificar las tomas, los puntos de repetición y el CP. Considerando cada uno de los puntos como una subred, es necesario dividir la dirección IP en al menos 7 subredes. Partiendo de la dirección de red 192.0.0.0 expresada en binario como 11000000.00000000.00000000.**00000000**.

Tomando cuatro bits del host (en negrita), el número de subredes a partir de (3.59) es de 14 y el número de host por subred, según (3.60), será de 14. Al variar los bits de 1 a 7 en binario se obtiene las direcciones de cada subred. Para la primera subred se tiene que:

11000000.00000000.00000000.**00010000**

11000000.00000000.00000000.**00011111**

Equivalente en decimal a 192.0.0.16 y 192.0.0.31. Donde la dirección de subred es 192.0.0.16 y la de difusión es 192.0.0.31. La máscara de subred a utilizar es la misma en toda la subred para simplificar la tabla de ruteo, según lo establecido en el capítulo 3 es:

11111111.11111111.11111111.11110000=255.255.255.240

En la tabla 5.10 se presenta la distribución de subred para cada uno de los puntos. El procedimiento es el mismo para obtener las direcciones de subred válidas y su respectiva máscara.

Tabla 5.10 Direcciones y máscara de subred para cada uno de los puntos

Punto	Dir. subred inicial	Dir. subred final	Mascara de subred
CP	192.0.0.16	192.0.0.31	255.255.255.240
CG	192.0.0.32	192.0.0.47	255.255.255.240
PSF	192.0.0.48	192.0.0.63	255.255.255.240
TRM	192.0.0.64	192.0.0.79	255.255.255.240
Emb	192.0.0.80	192.0.0.95	255.255.255.240
TOsc	192.0.0.96	192.0.0.111	255.255.255.240
I_TT	192.0.0.112	192.0.0.127	255.255.255.240

La asignación de direcciones IP es estática, por lo que no se utilizará el protocolo DHCP.

5.3.3 Protocolo de ruteo

En un sistema que se encuentra bajo un mismo dominio todos los elementos de este deben de tener el mismo enrutamiento. Los protocolos que se comunican dentro del mismo dominio son protocolo de compuerta interior (IGP).

Estos protocolos definen la ruta más corta en la red para dirigir los paquetes de información. Son utilizados en topologías punto a punto, ya que encaminan la información de un dispositivo a otro [14].

Los fabricantes utilizan el protocolo de ruteo RIP, como estándar, en sus dos versiones. Cualquier dispositivo a nivel de red que rutee información como mínimo cuenta con este protocolo. Con el fin de que el diseño del sistema de comunicaciones se acople a cualquier equipo, sin importar la casa fabricante, se sugiere el uso del protocolo RIP.

Los principales parámetros del protocolo RIP son el *router- update time*, *route timeout* y *hops*. Los equipos por defecto traen consigo configurados estas características, dejando al usuario solamente la posibilidad de habilitar o no el protocolo, seleccionar la versión y el horizonte dividido. En la tabla 5.11 se presenta los valores programados por defecto.

Tabla 5.11 Parámetros de configuración del protocolo RIP v2.

Parámetro	Valor
router- update time	30s
route timeout	3min
hops	15

La implementación de las dos versiones del protocolo RIP se debe a que la versión 1 es utilizada por equipos viejos en redes cableadas. Puesto que, actualmente se están haciendo extensiones de estas mediante equipo inalámbrico, es necesario manejar esta versión; lo que se implementa en este caso es la recepción de información con ambas versiones en la interfaz de ethernet.

En el caso del proyecto, la red ethernet se va a implementar nueva por lo que ambas interfases se configuran con la versión 2 del RIP. Si en un futuro se realiza la

conexión con la red existente en el CP se puede configurar la recepción de información para que acepte ambas versiones.

El horizonte dividido es la regla que marca en el protocolo la no publicación de la ruta utilizada con el fin de evitar caer en ciclos infinitos cuando un enlace falla. La versión simple no publica la ruta por lo que los routers vecinos no saben de la existencia de esta, mientras que, la poisoned reverse la publica pero la marca como inaccesible.

Para reducir el consumo de ancho de banda se recomienda utilizar el horizonte dividido simple ya que al no publicarse la ruta de entrega de información se consume menos recursos dado que la cantidad de paquetes de información que transitan en la red son menos.

5.3.4 Configuración de la tabla estática de ruteo IP

Se recomienda utilizar como adicional para mantener un control sobre las rutas de la red, además de que si un router utiliza un protocolo diferente al RIP esta tabla se emplea como interfaz.

En las BSU la interfaz inalámbrica como la ethernet requiere su propia dirección IP. Como cada una de las BSU se configurara en modo router la puerta de enlace para los dispositivos de la subred va hacer la dirección IP de su correspondiente BSU.

Para los enlaces punto-punto de las BSU se utiliza las direcciones IP de la 192.0.0.1 a 192.0.0.14 con el fin de diferenciar la subred inalámbrica de la ethernet. En la tabla 5.12 se presenta la tabla de ruteo de la BSU en el CP, donde se muestra la puerta de enlace que se debe utilizar para enviar la información a las diferentes subredes. La métrica corresponde al número de saltos necesarios para llegar al destino.

Tabla 5.12 Tabla de ruteo de la BSU en el CP

Red destino	Máscara de subred	Puerta de enlace	Métrica	Interfas
192.0.0.16	255.255.255.240	192.0.0.17	1	Ethernet
192.0.0.32	255.255.255.240	192.0.0.1	2	Wireless
192.0.0.48	255.255.255.240	192.0.0.1	5	Wireless
192.0.0.64	255.255.255.240	192.0.0.1	8	Wireless
192.0.0.80	255.255.255.240	192.0.0.1	3	Wireless
192.0.0.96	255.255.255.240	192.0.0.1	8	Wireless
192.0.0.112	255.255.255.240	192.0.0.1	5	Wireless

5.3.5 Seguridad

Desde el punto de vista de acceso, los equipos ofrecen filtrado por dirección MAC en donde se ingresan las direcciones de los equipos que están autorizados en la red, así, cualquier paquete que este dirigido a un dispositivo cuya dirección MAC no se encuentre en la lista es descartado.

También existe la posibilidad de un filtrado de direcciones IP, en donde se crea una serie de direcciones permitidas las cuales se asignan a los equipos que se conectan a la red. Este último tiene el inconveniente de que conociendo la dirección de subred o red y máscara se puede empezar a variar el número de host hasta encontrar una dirección IP válida.

Aunque estas medidas son tediosas, ya que es necesario ingresar la dirección MAC en todos los routers cada vez que se instala un dispositivo y además configurarle los parámetros de red, ayudan a mantener la red segura.

A nivel de aplicación los fabricantes implementan en las BSU y switch la opción de clave de seguridad y nombre de usuario con lo cual se restringe el acceso a su configuración, así mismo también las cámaras y computadoras.

A nivel de transferencia de información se utiliza la clave WEP de 128 bits, generada en forma random por los dispositivos inalámbricos, en este caso las BSU. Esta clave encripta la información y solo los dispositivos que cuentan con la misma pueden descifrarlos. El problema de esto es que existen aplicaciones como Aircrak, Netstumbler y otros que al paso del tiempo obtienen esta clave y descifran la información, con esto pueden conocer la direcciones IP, MAC y parámetros de red, haciendo que la persona pueda modificar su tarjeta wireless y acceder al sistema, en peores casos se puede hasta obtener las clave de seguridad y nombres de usuario que se utilizan.

La clave WPA-2 desarrollada exclusivamente para wireless, es prácticamente inmune ataques como se menciona en [25]. Frecuentemente se utiliza la clave compartida en modo infraestructura, esta clave de cifrado WPA-2 inicial se deriva del

proceso de autenticación, que comprueba que tanto el cliente inalámbrico como el punto de acceso inalámbrico están configurados con la misma clave previamente compartida, cada clave de cifrado WPA-2 inicial es exclusiva.

Cuanto más aleatoria sea la clave WPA o WPA-2 previamente compartida, más seguro será su uso. A diferencia de la clave WEP, la clave WPA-2 previamente compartida no está sujeta a la determinación mediante la recopilación de una gran cantidad de datos cifrados, por lo tanto no es necesario cambiar la clave WPA-2 previamente compartida con tanta frecuencia [31].

5.3.6 Alimentación

Actualmente los equipos como BSU, switch, hub, cámaras utilizan corriente sobre ethernet (POE), que permite la alimentación de los dispositivos de la red por medio de cable UTP categoría 5 o 3, con una alimentación de 48VDC. Esta tecnología esta regida bajo el estándar IEEE802.3af [14].

Los switch tienen capacidad de suministrar POE en diferentes puertos, se puede especificar manualmente la potencia de salida, considerando siempre la máxima potencia que se puede entregar que aproximadamente ronda los 15W. En la mayoría de switch se tiene una potencia máxima en todos sus puertos de 370W.

Estos dispositivos cuentan con la posibilidad de desconexión de puertos dependiendo de la prioridad asignada. Por ejemplo si una conexión POE excede el consumo de potencia asignada y tiene una prioridad alta puede desconectar un puerto con menos prioridad y mantener el equipo en funcionamiento. Así también cuando se excede el límite se desconecta automáticamente.

Lo ideal es utilizar este tipo de switches, pero su precio es mayor, no obstante existe la posibilidad de utilizar un adaptador POE, que realice la conversión y alimente los dispositivos de red eliminando los cables de alimentación. Se tiene que considerar también que muchas BSU solo se alimentan por POE.

5.3.7 Protecciones

Para proteger el equipo de descargas de la atmósfera se utilizan pararrayos, basados en una estructura de punta Franklin, sistemas de transferencia de carga (CTS) y en compensador de efecto corona (CEC).

Las estructuras tipo Franklin son estructuras metálicas de forma cónica que atraen el rayo en forma pasiva o activa abriendo camino libre hacia tierra. La forma pasiva atrae el rayo al dispositivo descargándolo abruptamente a tierra. La forma activa utiliza dispositivos electrónicos que se adelantan en el tiempo a la descarga creando ventanas de descarga para que esta se produzca paulatinamente [30].

Los dispositivos basados en sistemas CTS y CEC desionizan la atmósfera a su alrededor evitando que el rayo se forme. Con esto no se producen descargas sobre los equipos a proteger. Estos dispositivos están formados por dos electrodos de aluminio separados por un mástil metálico, en forma esférica (CTS) o semiesférica (CEC) [30].

Comercialmente es más común el empleo de puntas Franklin. Esta se puede utilizar en conjunto con un protector sobre la línea guía, para que en un eventual caso de avería del pararrayo la descarga se dé solo en la antena y no en todo el equipo. Este protector es de tres terminales y se conecta entre la antena, BSU, y tierra.

Este protector también actúa como un switch controlado por tensión, en el caso que se genere un sobre voltaje en la antena o BSU este se drenará a tierra salvando los dispositivos.

5.3.8 Aplicaciones

Para que la red soporte aplicaciones como Telnet, SSH, HTTP, HTTPS, FTP es necesario habilitar en las BSU y switch los puertos correspondientes. En la tabla 5.13 se muestra el puerto para cada una de las aplicaciones.

Tabla 5.13 Puertos habilitar para las aplicaciones

Aplicación	Puerto
Telnet	23
SSH	23
HTTP	80
HTTPS	80
FTP	21

En los equipos, además de habilitar el puerto, se establece el número de usuarios y tiempo para cada una de las sesiones. También se puede hacer un filtrado en el cual se establece que direcciones IP pueden hacer uso de estas aplicaciones.

El video IP consume ancho de banda en función del tamaño de la imagen, compresión y canal de comunicación, matemáticamente se expresa como [28]:

$$BW_{SVIP} = \text{Tamaño de la imagen} * \text{Cuadros por segundo} * \text{Canales} \quad (5.9)$$

En el rango de 20 a 30 cps el ojo humano no ve ninguna diferencia [1]. Reduciendo los cps, con una resolución de 352x240, que corresponde a una imagen de tamaño normal en el estándar NTSC [28] con un consumo de 8KB, según la (5.10) el ancho de banda es de 128Kbps, esto tendría una buena calidad de imagen.

También se recomienda implementar la detección de movimiento, aplicación que las cámaras de Internet traen consigo, con esto solo se transmite en ocasiones en las cuales se da algún evento en las cercanías de la cámara.

Una cámara IP se comporta como un nodo más de la red, incorpora el servidor y la cámara en un mismo paquete, con esto se cuenta con la posibilidad de tener acceso a ella por medio de un browser de Internet. Para condicionar el acceso se utiliza clave de seguridad y nombre de usuario tanto para modificar su configuración como acceder al video. Se tiene que considerar que no todas las cámaras IP traen consigo el servidor incorporado, por lo que se tiene que adquirir por separado.

Otra ventaja que tienen las cámaras con servidor web incorporado es que se puede correr aplicaciones como HTTP, FTP para realizar la transferencia de las imágenes desde la cámara.

Las características mínimas que se deben considerar en una cámara IP son:

- Servidor web incorporado.
- Soporte aplicaciones como HTTP y FTP.
- Frecuencia de imagen variable en un rango de al menos 20 a 30cps.
- Tamaño de imagen variable en resolución NTSC de:
 - 704X480
 - 352X240
 - 176X112
- De utilizarse en el estándar PAL, la resolución debe ser de al menos:
 - 704X576
 - 352X250
 - 176X144
- Contar con detección de movimiento para activar la cámara.

Capítulo 6: Análisis y resultados de simulación

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a nivel de propagación de la señal y red, ya que los correspondientes al estudio de factibilidad son utilizados para realizar el diseño del sistema de comunicaciones como se vio en el capítulo 5. Los manuales de hardware y software se presentan en los apéndices A.4 y A.5.

6.1 Resultados de la simulación a nivel de propagación

Según las características de conductividad, permitividad del terreno, transmisión y recepción del equipo y topología del sistema se lleva a cabo la simulación del enlace en el simulador Radio Mobile v9.1.18 (configuración del software, ver anexo B.1).

En este simulador el R_x relativo representa el margen de desvanecimiento, el campo eléctrico es determinado en las proximidades del receptor, el peor Fresnel se refiere a la relación u' establecida en el capítulo 3, el margen mínimo de señal es de 3dB Ya que menor a este el enlace no es confiable. En general, este programa está basado en los modelos de propagación teóricos para enlaces de radio, según se establece en [32].

6.1.1 Resultados del enlace CP-CG

En la tabla 6.1 se presenta la diferencia de altitud de los puntos del enlace entre los datos tomados a partir del GPS utilizados para diseñar el sistema de comunicaciones y los datos del simulador.

Tabla 6.1 Diferencia de altitud-distancia entre el GPS y el simulador Radio Mobile.

	GPS	Radio Mobile	Diferencia
CP	1129.2m	1136.3m	7.1m
CG	3007.6m	2979.5m	28.1m
Distancia	19.5Km	19.6Km	

Estas diferencias de altura y distancia influyen directamente sobre los cálculos del radio de Fresnel y el despeje de Clearance, ya que dependen directamente de los

mismos, de aquí que los resultados obtenidos por simulación y los calculados difieren como se verá más adelante.

En la figura 6.1 se presenta el perfil de enlace según el simulador Radio Mobile entre el CP y CG a partir de la orientación y altura de las torres establecidas en el capítulo 5. Según la terminología del programa Radio Mobile, la línea verde indica que el enlace de comunicación en esta región es factible ya que el margen de desvanecimiento es mayor a 3dB [20].

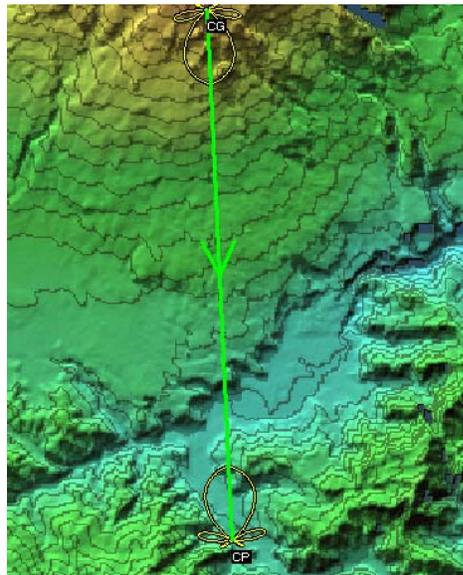


Figura 6.1 Enlace entre el CP y CG

Para determinar que el enlace es confiable de realizar se hace un balance de potencia. En la tabla 6.2 se presentan los valores de potencia de transmisión, ganancia de las antenas y pérdidas de las guías de onda, utilizados para determinar la ganancia del sistema de comunicación.

Tabla 6.2 Ganancia del sistema CP-CG

Parámetro	Valor
Potencia TX	30dBm
Ganancia de antenas TX	30.1dBi
Pérdidas de guías de onda	-6dB
Ganancia de antenas RX	30.1dBi
Pérdidas de guías de onda	-6dB
Ganancia total	78.2dB

En la figura 6.2 se presenta la simulación del enlace de microonda entre el CP y CG según el programa Radio Mobile v9.1.8. Para efectos del proyecto, la cobertura en el trayecto no interesa ya que el acceso solamente se da en las tomas de agua, centro de producción y puntos intermedios de repetición.

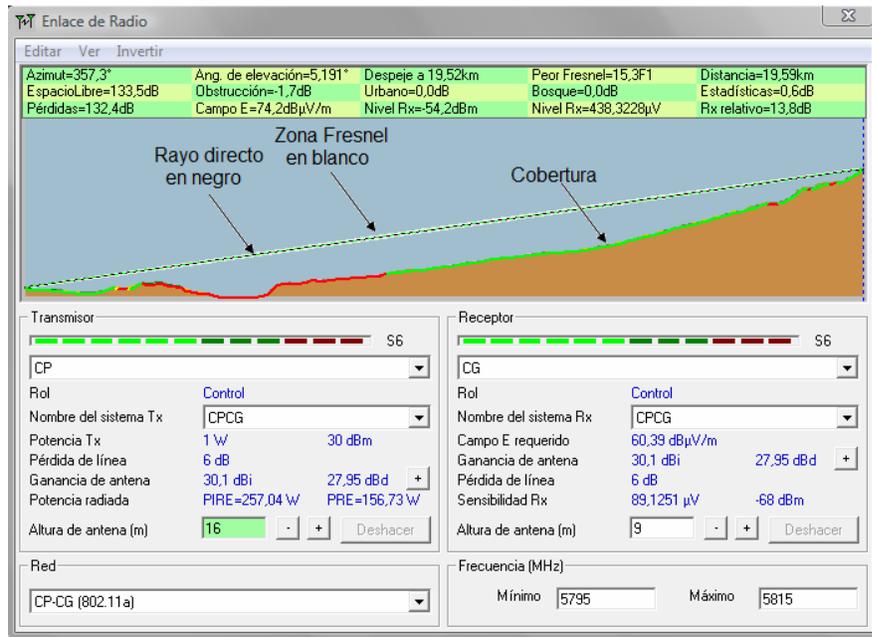


Figura 6.2 Enlace microonda entre el CP- CG

En la tabla 6.3 se presentan los valores de las atenuaciones obtenidos a partir de la simulación y las pérdidas calculadas en el capítulo 5. Las atenuaciones por condiciones ambientales, pérdidas de desacople y las consideradas por la variaciones típicas de la potencia de transmisión y sensibilidad de recepción se agrupan como otras pérdidas en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Pérdidas de propagación estimadas para el enlace CP-CG

Parámetro	Valor calculado	Simulación
Pérdida propagación espacio libre	133.53dB	133.5dB
Atenuación exceso	-2.68dB	-1.7dB
Otras pérdidas	4.95dB	0.6dB
Total de pérdidas	135.8dB	132.4dB

En la tabla 6.4 se presentan los resultados obtenidos para el margen de desvanecimiento de la señal después de realizar el balance de potencias.

Tabla 6.4 Margen de desvanecimiento de la señal

Parámetro	Valor calculado	Valor simulado
Nivel de recepción de la señal	57.6dBm	54.2dBm
Sensibilidad de recepción	-68dBm	-68dB
Margen de desvanecimiento	10.4dB	13.8dB

La diferencia entre los márgenes de desvanecimiento se debe a que en la simulación las pérdidas determinadas estadísticamente por el programa debido a las condiciones atmosféricas son de 0.6dB. Estas pérdidas, según [32], incluyen un 50% de situaciones, 50% de ubicaciones y un 50% de tiempo de que eventos inesperados en la propagación de la señal sucedan. Este porcentaje está fijado por defecto en el programa para una propagación normal.

Las pérdidas por condiciones atmosféricas, bosques y urbanas el programa las determina utilizando los datos obtenidos por el LAND COVER, programa desarrollado por la NASA, en donde se mantiene una base actualizada de la cobertura terrestre de todo el planeta, más información en [32]. Para este caso, se obtuvo una atenuación de 0dB.

Como se vio en el capítulo 5 para determinar las pérdidas por condiciones ambientales se utilizó la recomendación de la UIT-R.676, con la que se obtuvieron 1.77dB. Otra diferencia encontrada es la atenuación por exceso, mediante cálculo se encuentra que es de -2.68dB, mientras que, en el simulador es de -1.7dB. Esto apenas representa una diferencia de 1.67dB, el factor que más influye son las pérdidas de 3dB debido a las variaciones de los equipos.

En cualquiera de los casos el nivel de recepción de la señal es mayor a la sensibilidad del receptor, por lo que es factible que en la implementación del sistema el enlace se pueda realizar y que las señales recibidas tengan un margen de desvanecimiento aproximadamente de 10 dB.

Para obtener el campo eléctrico en las inmediaciones del receptor es necesario obtener la potencia isotrópica irradiada, la cual se expresa como [1]:

$$EIRP = G_t * P_{t_{ant}} \quad (6.1)$$

Según (6.1) la EIRP es de aproximadamente 54.1dBm, que equivale a 257.04W. De aquí que el campo recibido a partir de (5.3) es de $6.13 * e^{j0.5527} mV / m$, expresando la magnitud en dB μ V/m se tiene 75.75 dB μ V/m. En la simulación se obtiene un campo eléctrico de 74.2 dB μ V/m

De acuerdo al margen de desvanecimiento que se estableció para el sistema de 10.41dB, el campo eléctrico mínimo que se quiere para satisfacer esta condición es de 65.09 dB μ V/m; debido a que en la simulación el margen de desvanecimiento es mayor, el requerimiento de campo eléctrico es de 60.4 dB μ V/m.

Como es más sencillo variar la potencia de transmisión de los equipos a sustituir o utilizar antenas diferentes en los enlaces, se realizó la simulación del sistema para los valores típicos de potencia de transmisión 0.1W, 0.2W, 0.4W y 0.8W. En la tabla 6.5 se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación.

Tabla 6.5 Resultados obtenidos mediante simulación para diferentes valores de potencia de transmisión.

Parámetro	20dBm	23dBm	26dBm	29dBm
Nivel de recepción	-64.2dBm	-61.2dBm	-58.1dBm	-55.1dBm
Margen de desvanecimiento	3.8dB	6.8dB	9.9dB	12.9dB
Potencia irradiada isotrópica	44.1dBm	47.1dBm	50.1 dBm	53.1 dBm
Campo eléctrico en las inmediaciones del receptor	64.2 dB μ V/m	67.2 μ V/m	70.2 dB μ V/m	73.3 dB μ V/m

Con esto se encuentra que, utilizando una antena con una ganancia similar a la que se plantea en el proyecto se puede transmitir a diferentes potencias, dado el caso que en el equipo seleccionado la máxima potencia de transmisión sea menor a 30dBm.

Para cualquier valor de potencia de transmisión la zona Fresnel y el despeje de Clearance tienen el mismo valor, ya que estos parámetros dependen de la frecuencia y las características del terreno y no de la potencia de transmisión como se puede ver en (3.3) y (3.15).

El perfil de enlace entre el CP y el CG considerando la curvatura de la tierra, cobertura boscosa y el despeje se muestra en la figura 6.2. Se observa que, existe un

posible punto de obstrucción, en este caso la relación del despeje de Clearance y el radio de la primera zona Fresnel calculados es de 15.3 (capítulo 5), mientras que, verificando con el simulador se obtiene que $u'=16.1$, esto implica un porcentaje de error de 8.5% debido principalmente a las diferencias que existen en las alturas y distancias del enlace medidas con el GPS y los datos que el simulador obtiene a partir de la cartografía digital.

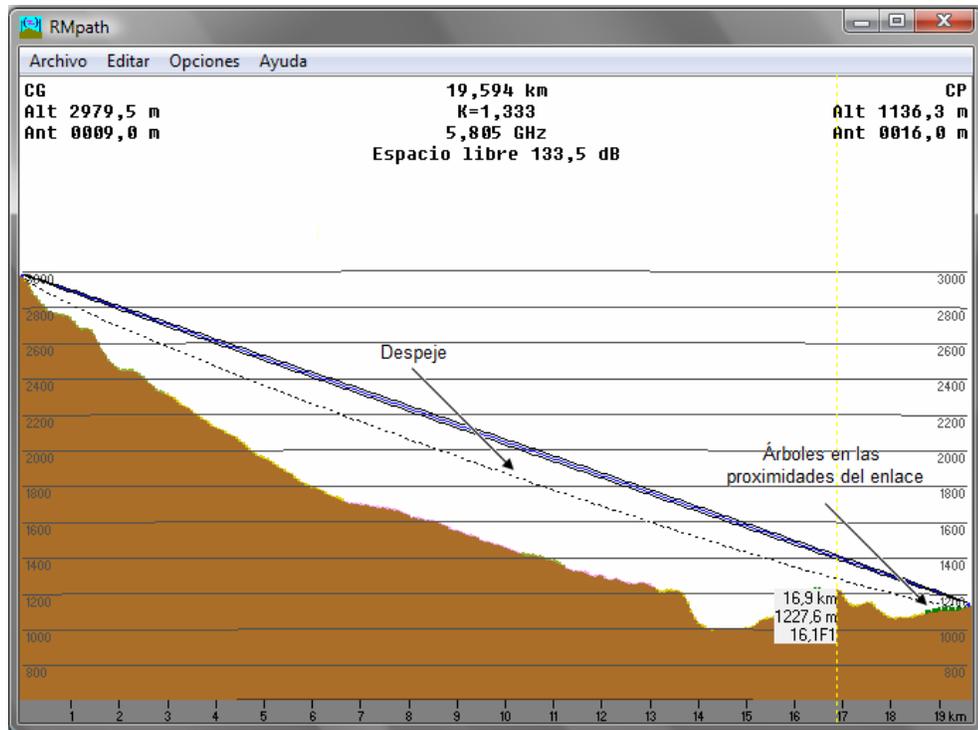


Figura 6.3 Perfil de enlace entre el CP y CG

La influencia de la curvatura de la tierra aumenta la altura del obstáculo en 2.64m, de no considerarse la relación u' sería de 15.54, esto implica una variación en el despeje de 0.65%, por lo que de omitirse no se estaría incurriendo en el error de considerar la primera zona de Fresnel libre. Esto se debe a que el terreno en esta área no tiene cerros cuya altitud se aproxime a la primera zona Fresnel, sino que es un terreno con poca ondulación. Otro factor que influye es que la frecuencia del sistema es de 5.8GHz por lo que el radio máximo es de 15.88m.

La obstrucción debida a árboles en el camino intermedio del enlace es despreciable, ya que sería necesario que los mismos tuvieran una altura mayor al despeje para representar una obstrucción de la primera zona de fresnel.

No obstante en las cercanías de las instalaciones es recomendable mantener vigilada la altura de los árboles como se muestra en la figura 6.3. Por ejemplo, a 100m del CP se tiene que el despeje es de 26.73m y el radio de la primera zona Fresnel es de 2.27m esto implica que un objeto de más de 20m de alto ya representa una posible obstrucción.

La altura de la torre en el CP es un punto de partida para realizar los cálculos de atenuación por reflexión, si se utiliza una torre de diferentes dimensiones es recomendable considerar la mínima altura de la torre para garantizar que el enlace radioeléctrico se dé entre los puntos en estudio. En caso de instalarse una torre de mayor altura se puede vender espacio para la instalación de antenas de telefonía celular y así generar una entrada extra al centro de producción.

6.1.2 Resultados del enlace CG-PSF

En la figura 6.4 se presenta el enlace radioeléctrico a partir de la orientación y altura de las torres, como se estableció en el capítulo 5, entre el CG y el PSF, según el simulador Radio Mobile v9.18.

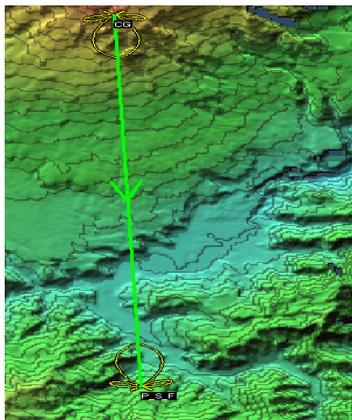


Figura 6.4 Enlace entre el CG y PSF

Para determinar que el enlace es factible, se realiza el balance de potencias, los resultados de la simulación se presentan en la figura 6.5.

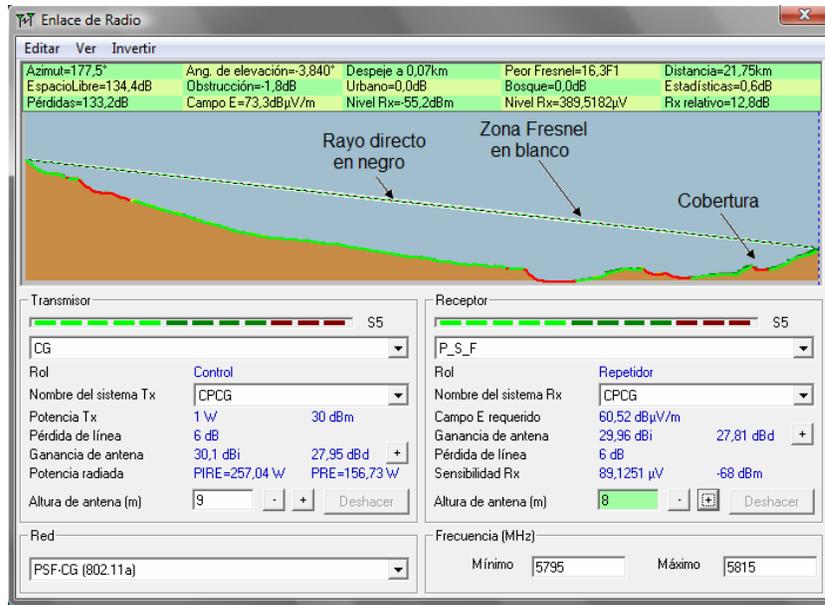


Figura 6.5 Simulación del enlace PSF-CG.

En la tabla 6.6 se muestran las pérdidas de propagación estimadas para el enlace PSF-CG.

Tabla 6.6 Pérdidas de propagación estimadas para el enlace PSF-CG.

Parámetro	Valor calculado	Simulación
Pérdida propagación espacio libre	134.46dB	134.4dB
Atenuación exceso	2.8dB	-1.8dB
Otras pérdidas	5.177dB	0.6dB
Total de pérdidas	142.44dB	133.2dB

Utilizando la misma potencia de transmisión, sensibilidad de recepción y ganancia de las antenas que se emplearon en el enlace CP-CG se encuentra que la ganancia es de 78.2dB. En la tabla 6.7 se presentan los resultados obtenidos del margen de desvanecimiento de la señal.

Tabla 6.7 Margen de desvanecimiento de la señal

Parámetro	Valor calculado	Valor simulado
Nivel de recepción de la señal	64.24dBm	55.2dBm
Sensibilidad de recepción	-68dB	-68dB
Margen de desvanecimiento	3.76dB	12.8dB

La diferencia que se presenta en los márgenes de desvanecimiento se debe, como se mencionó en el apartado 6.1.1, a los 3dB debidos a las variaciones en las

características del equipo. Además, en este caso el simulador obtiene -1.8dB por atenuación en exceso y 0.6dB por pérdidas estadísticas. Aún así el enlace es factible realizar.

La potencia irradiada isotrópica es de 54.1dBm, que equivale a 257.04W. Aplicando (5.3) se obtiene que el campo eléctrico en las inmediaciones del receptor es de $2.93e^{j0.6604} mV/m$, equivalente a $69.34 dB\mu V/m$. En la simulación se obtiene un campo eléctrico de $72.2 dB\mu V/m$

El perfil de enlace entre el CG y PSF considerando la curvatura de la tierra, cobertura boscosa y el despeje se presenta en la figura 6.6. Como se observa en esta figura, no existe ninguna posible obstrucción de la primera zona Fresnel, en el apartado 5.2.2 se analizó esto para efectos de verificación.

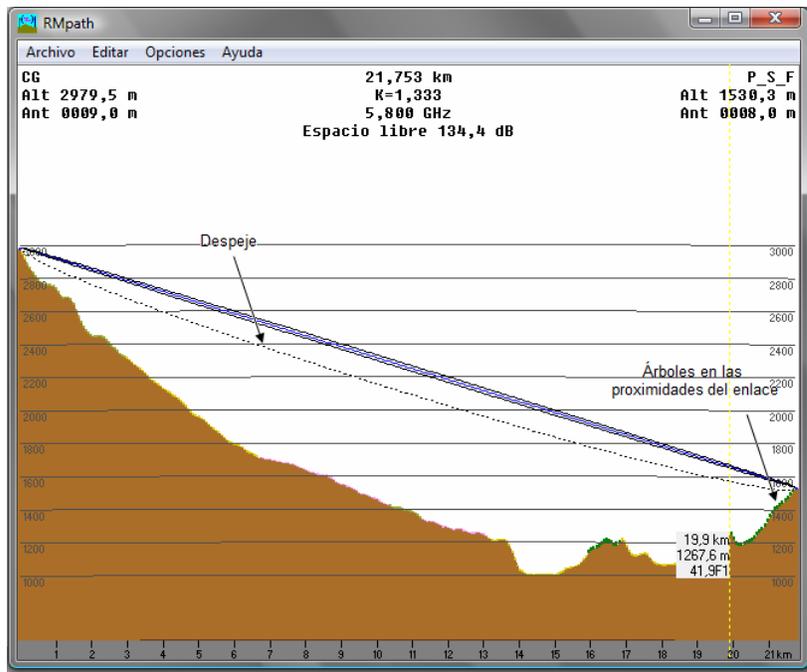


Figura 6.6 Perfil de enlace entre el CG y PSF

6.1.3 Análisis y resultados del enlace PSF y TRM

En la figura 6.7 se presenta el enlace radioeléctrico a partir de la orientación y altura de las torres, establecidas en el capítulo 5, entre el PSF y la TRM según el simulador Radio Mobile v9.18.



Figura 6.7 Enlace entre el PSF y TRM

Para determinar que el enlace es confiable, se realiza el balance de potencias, los resultados de la simulación se muestran en la figura 6.8.

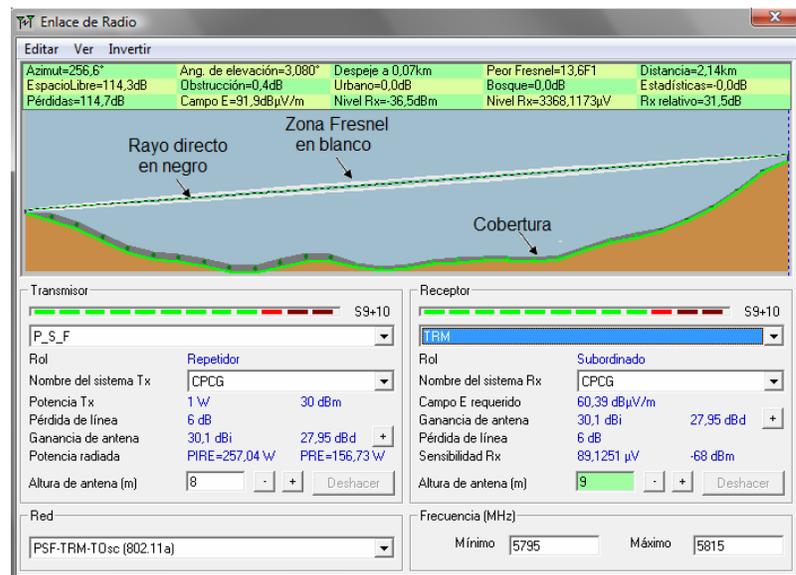


Figura 6.8 Simulación del enlace PSF-TRM

En la tabla 6.8 se muestran las pérdidas de propagación estimadas para el enlace PSF y TRM.

Tabla 6.8 Pérdidas de propagación estimadas para el enlace PSF y TRM

Parámetro	Valor calculado	Simulación
Pérdida propagación espacio libre	114.31 dB	114.3 dB
Atenuación exceso	-3.7dB	0.4dB
Otras pérdidas	0dB	0dB
Total de pérdidas	110.61dB	114.7 dB

Utilizando la misma potencia de transmisión, sensibilidad de recepción y ganancia de las antenas que en el enlace CP-CG se determina que la ganancia es de 78.7dB. En la tabla 6.9 se presenta los resultados obtenidos del margen de desvanecimiento de la señal.

Tabla 6.9 Margen de desvanecimiento de la señal

Parámetro	Valor calculado	Valor simulado
Nivel de recepción de la señal	-31.91dBm	-36.5dBm
Sensibilidad de recepción	-68dBm	-68dBm
Margen de desvanecimiento	36.09dBm	31.5dBm

El enlace en este punto es factible de realizar utilizando las mismas características de potencia de transmisión y ganancia de las antenas.

Aplicando (5.3) se obtiene que el campo eléctrico en las inmediaciones del receptor es de $64.32e^{j0.6547} mV/m$, equivalente a $96.17 dB\mu V/m$. El campo eléctrico obtenido mediante simulación es de $91.9 dB\mu V/m$.

Si se disminuye la potencia de transmisión a 20dBm y se establece un margen de desvanecimiento similar al de los enlaces anteriores, se puede determinar una ganancia para la antena que satisfaga que el F_m sea de 10dB.

Considerando este margen, las pérdidas son aproximadamente de 132.61dB. Utilizando (5.7) se obtiene que la ganancia de la antena es de 22.3dBi. En la figura 6.9 se presenta la simulación considerando las variaciones antes mencionadas.

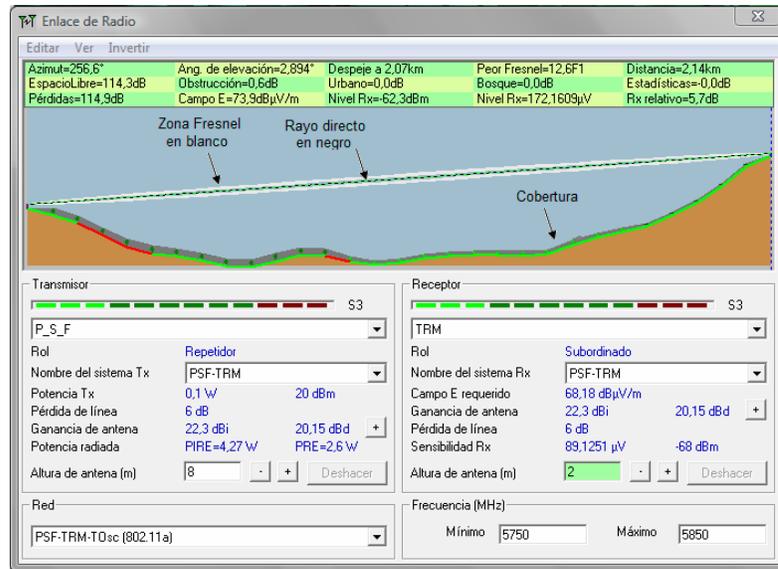


Figura 6.9 Simulación del enlace PSF-TRM con una PTx de 20dBm y una ganancia de 22.3dBi

Con estos parámetros se obtiene un margen de desvanecimiento de 5.7dB, con un nivel de recepción de 62.3dBm. El perfil de enlace entre el PSF y TRM, considerando la curvatura de la tierra, cobertura boscosa y el despeje se presenta en la figura 6.10.

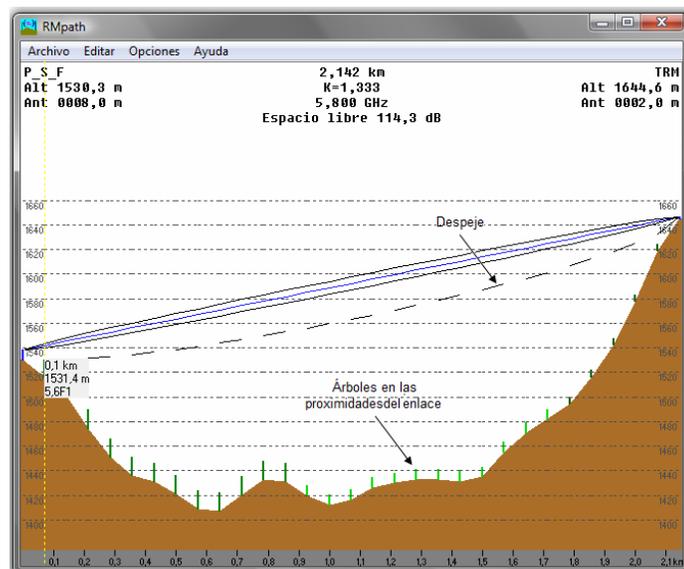


Figura 6.10 Perfil de enlace entre el PSF y TRM

6.2 Análisis y resultados a nivel de transferencia de datos

En la tabla 6.10 se presentan los dispositivos y el correspondiente identificador de nodo (Nodo ID) para efectos de comprender los resultados obtenidos por las simulaciones. Para evaluar el comportamiento de la red diseñada, se simula la transferencia de información solamente en el prototipo de enlace establecido (CP-CG-PSF-TRM) utilizando un tiempo de simulación de 24 minutos

Tabla 6.10 Nodo ID por dispositivo de red

Punto	Nodo ID	Número de interfaces conectadas al dispositivo
BSU – CP-CG	1	2
PC-CP	2	1
Cámara-CP	3	1
BSU-CG-CP-Emb	4	3
Cámara- CG	5	1
BSU-CG-PSF	6	3
BSU-PSF-CG	7	2
BSU-TRM-TOsc	8	3
BSU-TRM-PSF	9	2
PC-TRM	10	1
Cámara-TRM	11	1
BSU-TOsc-PSF	12	2
PC-TOsc	13	1
Cámara-TOsc	14	1
BSU-Emb-CG	15	2
PC-Emb	16	1
Cámara-Emb	17	1
BSU-ITT-CG	18	2
PC-ITT	19	1
Cámara-ITT	20	1

6.2.1 Verificación del protocolo de ruteo

El protocolo RIP es un protocolo dinámico que envía paquetes de actualización aproximadamente cada 30s entre los nodos de red, en donde incluye los cambios en la topología de la red; por lo tanto, por cada ruta conectada a la BSU o switch se envía un paquete de actualización. En la figura 6.11 se presenta los paquetes regulares de actualización enviados por las BSU.

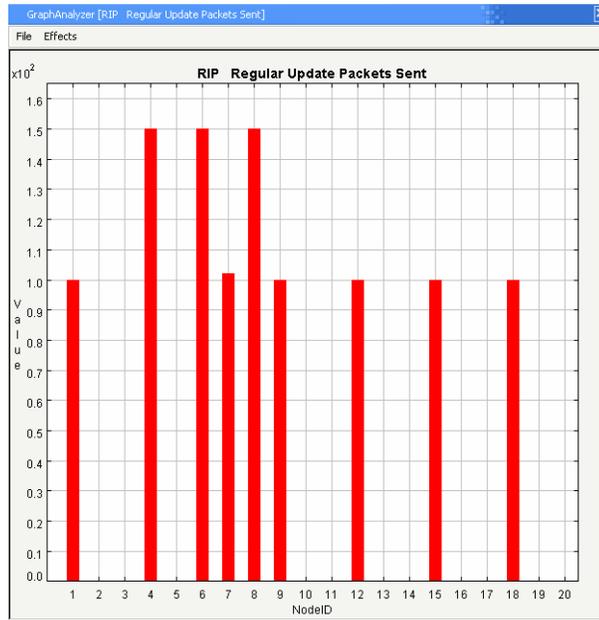


Figura 6.11 Envío de paquetes de actualización del protocolo RIP

Las BSU en $T=0$ envían los primeros paquetes de actualización por cada una de las interfases que tienen conectadas a ellas, en $T=30s$, $T=60s$, $T=90s$ y así sucesivamente hasta $T=$ infinito. Por ejemplo, en la BSU del CP se envían los primeros 2 paquetes en $T=0s$, los siguientes 2 en $T=30s$, para $T=120s$ se han enviado 10 paquetes, por lo que en un tiempo de 24 minutos se envían 100 paquetes, 50 paquetes por interfaz. En el caso de la BSU que comunica el CG con el CP y Emb se envían 150 paquetes, tres cada 30s por sus tres interfases, dos wireless y una ethernet.

En caso de que algún dispositivo no responda a la actualización se genera un evento de desencadenamiento (*triggered update packets*) solicitado por el router que detecta que el link no responde. Este evento se genera también cuando se detectan modificaciones en la infraestructura de la red.

Al inicio en $T=0s$, mientras que los paquetes de actualización se propagan por la red es muy común que se desencadenen eventos informando cambios en la topología de la red, ya que es el momento en el que todos los equipos entran en funcionamiento. Esto se puede observar en la figura 6.12a, en donde las BSU envían paquetes de desencadenamiento en el primer instante. En la figura 6.12b se observa que ninguna

ruta es eliminada de la tabla de ruteo, ya que para que esto suceda debe transcurrir un periodo de 3 minutos, después del cual la entrada es borrada.

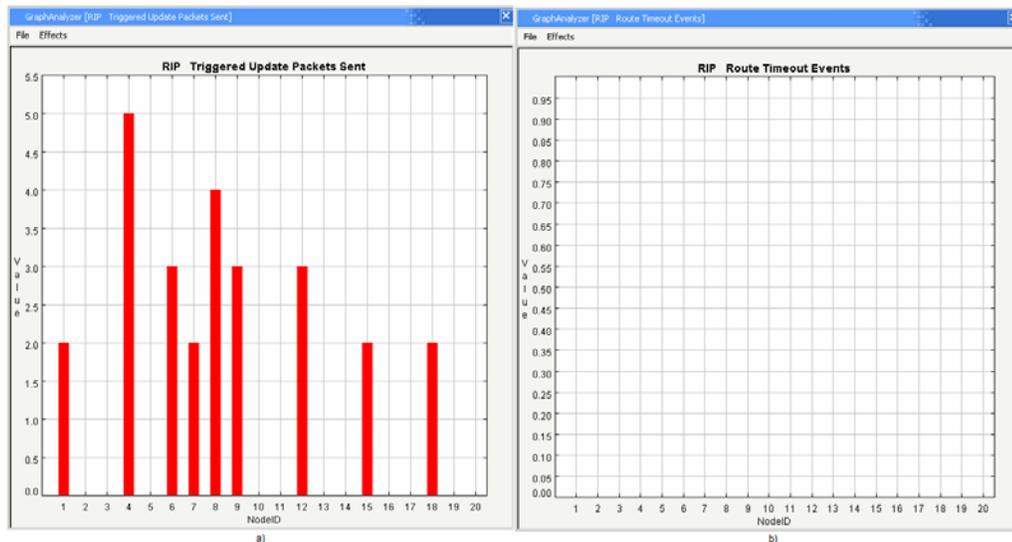


Figura 6.12 Eventos desencadenados del protocolo RIP.

Se recomienda esperar al menos 3 minutos mientras que la red se estabiliza en el momento en el que todos los dispositivos entran por primera vez en funcionamiento. Este lapso de espera se recomienda también cuando se modifica la infraestructura de red, para que todos los routers conozcan la nueva ruta, evitando pérdida de información.

6.2.2 Verificación de puntos de acceso y transferencia de datos.

Considerando que en la TRM y CP se instala una computadora y una cámara, se procede a simular una aplicación del tipo FTP entre los nodos 2 y 11, 3 y 10, 5 y 2, con el fin de verificar estos puntos de acceso del sistema de comunicaciones, además de, una aplicación secundaria entre los nodos 2 y 10 para generar un tráfico aleatorio en la red que cause retransmisiones y pérdidas de paquetes. También con esto se muestra como el sistema discrimina entre datos sin importancia en la red y la información que realmente interesa.

En la figura 6.13 se presenta los resultados obtenidos de la simulación de la aplicación FTP, la cual es muy común entre un PC y una cámara IP. En esta aplicación se transfiere un total de 2886 bytes en cada sesión que se inicia entre dos dispositivos.

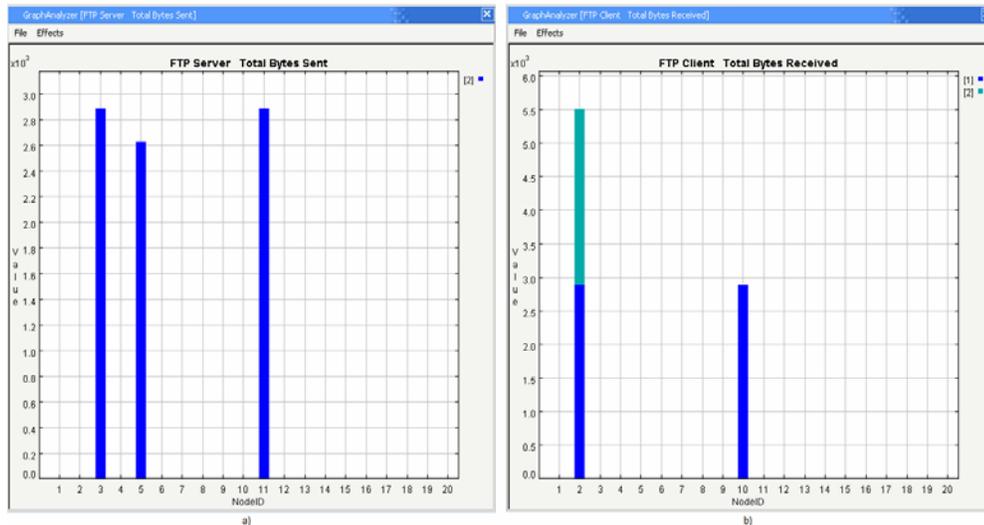


Figura 6.13 Simulación de transferencia de datos entre los nodos 2, 3, 10 y 11

En la figura 6.13b, el color azul en el nodo 2 representa la aplicación entre este nodo y el nodo 11, en este caso se transmiten 2886 bytes y se reciben 2886 bytes. En verde, se presenta la transmisión que se da entre el nodo 5 y nodo 2, en este caso se transmiten 2626 bytes y se reciben 2626 bytes, con una pérdida de 260 bytes en total; esto implica que la imagen se ve borrosa o que se “pegue”. Entre los nodos 3 y 10 se transfieren 2886 y se reciben 2886 bytes.

La aplicación FTP se corre entre nodos pertenecientes a diferentes subredes, como se puede ver, solo involucra a los dispositivos que solicitan el servicio. No ocurre una comunicación multipunto, sino punto a punto como la que se diseñó. Además, se observa que el protocolo de ruteo, la división en subredes y asignación de direcciones IP funciona como se esperaba ya que los datos se direccionan por la red, comunicando solamente a los nodos que solicitan un servicio.

La aplicación parte de nodos conectados en la interfaz ethernet. En la figura 6.14a se presentan los datos transmitidos por los nodos 2 (PC) y 3 (cámara) que envían sus paquetes al switch ethernet, el cual dirige estos hacia la BSU del CP (nodo 1).

El nodo 2 envía un total de 9695 paquetes mientras que el nodo 3 transmite 3991 paquetes, esta información la recibe la BSU en su interfaz ethernet. Como se muestra en la figura 6.14b, el nodo 1 recibe 13686 bytes.

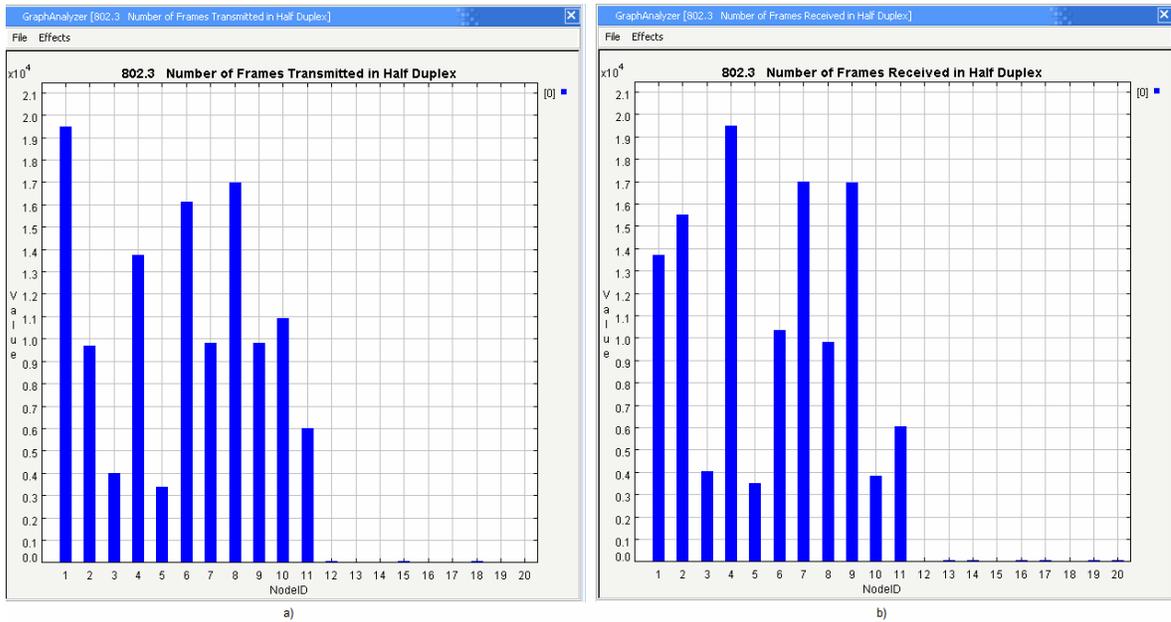


Figura 6.14 Transferencia de paquetes a nivel ethernet en la red

En la figura 6.15a se presentan los paquetes enviados por las BSU. El nodo 1 transmite aproximadamente 13735 paquetes al nodo 4, de los cuales 50 representan los paquetes de actualización del protocolo RIP. El nodo 4 recibe 13728 paquetes, esto implica que se perdieron 7 paquetes en la interfaz inalámbrica.

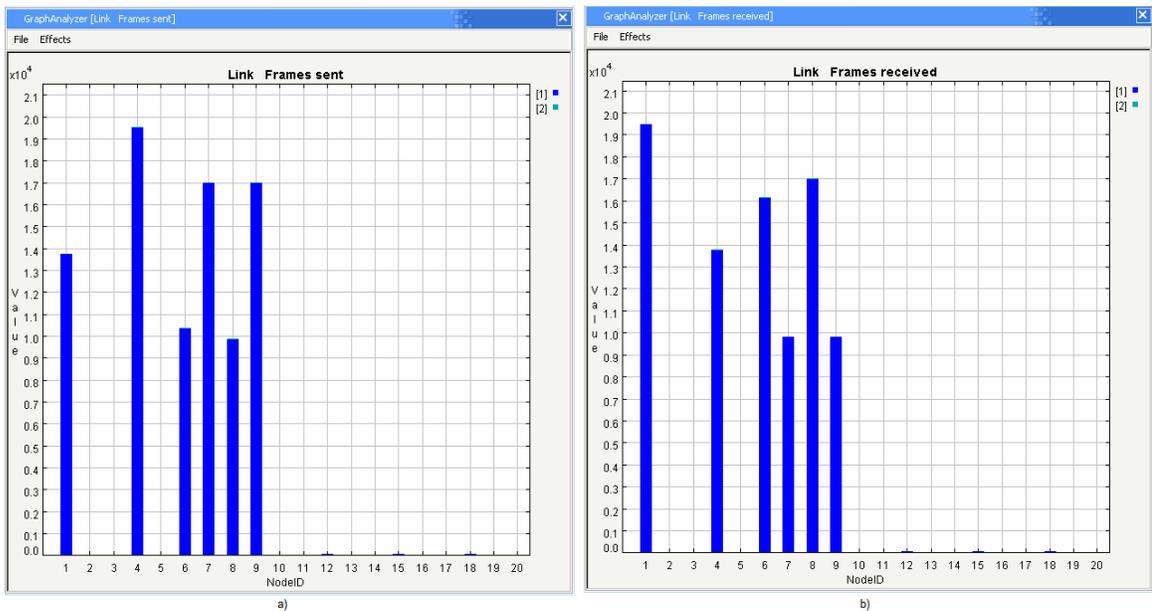


Figura 6.15 Transferencia de paquetes a nivel de link inalámbrico

De los paquetes recibidos por la BSU en el CG, este transmite a la interfaz ethernet, según la figura 6.14a, 13730 paquetes, de los cuales 10351 paquetes son enviados al nodo 6 y 3483 al nodo 5. De estos, 50 paquetes por nodo representan las actualizaciones regulares del protocolo RIP y 4 paquetes los eventos de desencadenamiento generados al inicio de la simulación, como se muestra en la figura 6.12.

El nodo 6 transmite estos paquetes por la interfaz inalámbrica, 100 de estos paquetes representan las actualizaciones del protocolo RIP que envía a los nodos 7 y 8. Según la figura 6.15b, el nodo 7 recibe 9823 paquetes, esto implica que se pierden en el enlace 427 paquetes.

El nodo 7 transmite en por su interfaz ethernet al nodo 8, 9827 paquetes, 4 de los cuales representan los eventos de desencadenamiento del protocolo RIP, esto se observa en la figura 6.14.

El nodo 8 transmite por la interfaz inalámbrica 9827 paquetes y el nodo 9 recibe los 9827 paquetes. Este nodo transmite por la interfaz ethernet 9829 paquetes, 2 de los cuales representa eventos de desencadenamiento del protocolo RIP. De estos 9829 paquetes, 3844 se envían al nodo 10 y 6940 al nodo 11.

En la figura 6.16 se muestra un diagrama de flujo que representa lo que se describió anteriormente.

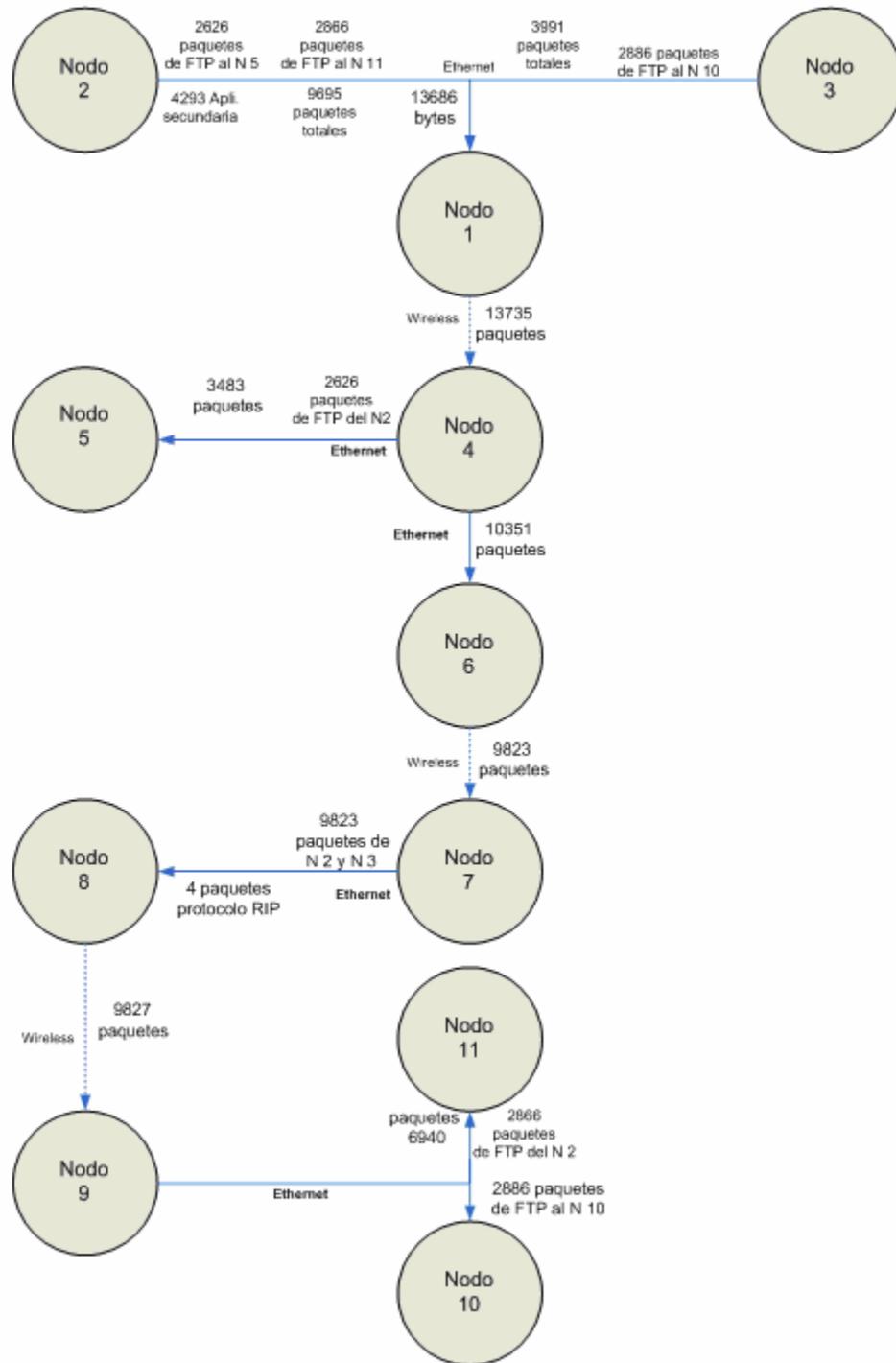


Figura 6.16 Diagrama de flujo de transferencia de datos entre el CP y TRM

Durante la transferencia de información existen pérdidas de datos, además de retransmisiones debidas a que el medio se encuentra ocupado por lo que no hay respuesta del dispositivo al cual se esta enviando información. En la figura 6.17 se muestran las retransmisiones ocurridas en los dispositivos.

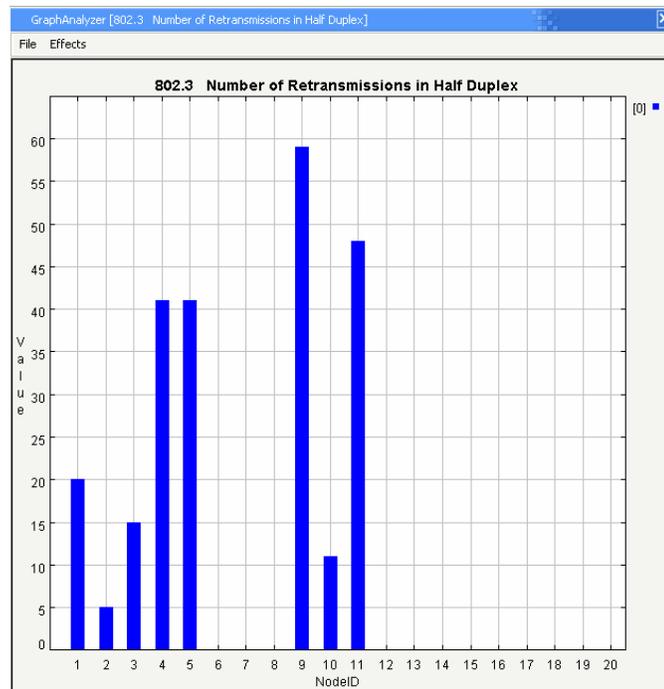


Figura 6.17 Retransmisiones durante la transferencia de información

Las BSU retransmiten la información cada vez que los nodos de la subred lo solicitan, por ejemplo el nodo 1 (BSU) realiza 20 retransmisiones, 5 a petición del nodo 2 y 15 del nodo 3.

Esta es una red pequeña, prácticamente son una BSU una PC y una cámara por punto, no se está implementando un centro de cómputo con decenas de computadoras, en donde las colisiones si representan un conflicto. Aun así se utiliza un switch el cual segmenta los dominios de colisión.

No se tiene acceso a Internet, comúnmente lo que va transitar por la red son señales de control que representan pequeños paquetes de datos, la mayor aplicación que se da es la transferencia de video, que se puede dar por hipertexto (HTTP) o transferencia de archivo (FTP) a solicitud de alguno de los puntos de la red.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Al utilizar el modelo de tierra curva se puede trazar una línea recta entre el transmisor y el receptor en el perfil del enlace.
- Se debe establecer un punto mínimo en las alturas de las antenas para satisfacer la condición de visibilidad radioeléctrica y garantizar que el enlace se pueda realizar.
- A una frecuencia de microonda de 5.8GHz en la que trabajan los equipos inalámbricos fabricados bajo el estándar 802.11a las atenuaciones por condiciones ambientales son despreciables.
- La ganancia de las antenas se debe determinar a partir de los parámetros de los equipos.
- El ángulo de elevación y azimutal calculados teóricamente son un punto de partida en la orientación de las antenas parabólicas.
- El enlace entre el CP-CG-PSF-TRM, es factible de realizar, siendo las pérdidas de espacio libre las más importantes a considerar.
- La transferencia de información es punto a punto debido a la ubicación geográfica del sistema de abastecimiento de agua y el centro de producción.

7.2 Recomendaciones

En cuanto a la instalación:

- Tomar como referencia de orientación de las antenas los ángulos de elevación y azimut calculados teóricamente.
- Instalar una torre en el CP de gran altura para vender servicios a terceros y generar una entrada económica extra.
- Instalar el switch próximo a la estación base para disminuir las pérdidas por cableado ethernet.

En cuanto a equipos:

Las antenas deben satisfacer al menos las siguientes características:

- Parabólica.
- Una ganancia de al menos 30dB para satisfacer las variaciones de potencia que pueda presentar los equipos.
- Fabricadas con materiales no oxidantes y resistentes al viento.

En cuanto a las protecciones sobre descargas de no utilizar el CTS o CEC se recomienda:

- El uso de protector de guía de onda entre la BSU y la antena.
- El uso de pararrayos Franklin.

Las estaciones base deben cumplir con al menos las siguientes características:

- Frecuencia de enlace variable en el rango de 5 a 6Ghz, con selección de canal automático.
- Potencia de transmisión variable en un rango de 20 a 30dBm, ajustable vía software.
- Umbral de recepción menor o igual a -68dBm.

- Manejar protocolos de ruteo como RIP v1,2, ICMP, ARP entre otros.

En cuanto a la guía de onda se recomienda el uso de heliax cuya principal aplicación es en sistemas inalámbricos, de no ser posible el anterior emplear alguno de las siguientes:

- LMR 100A/194/400/600/800
- PIT Telcom de ½”

Se recomienda el uso de un switch de capa 3, ya que se garantiza:

- Un nivel de seguridad igual al brindado por un router.
- Discriminación entre los paquetes de audio, vídeo y datos.
- Separación de los dominios de colisión.

Se recomienda el uso de cámaras IP con web server incorporado que garanticen:

- Modificación en el tamaño de imagen y cuadros por segundo para variar el ancho de banda evitando así que la red se sature.
- Contar con la opción de clave de seguridad para evitar que personas no autorizadas tengan acceso a la misma.
- Fabricadas para entornos exteriores.

En cuanto a seguridad de la red se recomienda:

- Filtrado por direcciones MAC.
- Direccionamiento IP estático.
- Uso de WPA-2 sobre WEP

De utilizar el protocolo RIP se recomienda:

- Utilizar la versión simple, para disminuir el consumo de ancho de banda que este genera.

Bibliografía

- [1] Tomasi , W. “Sistemas de Comunicaciones Eléctricas”. 2^{da} ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A, 1996.
- [2] Salazar, J. “Análisis de las tecnologías CDMA y OFDM para comunicaciones en banda ancha multiusuario”. [En línea]. Costa Rica: Universidad de Costa Rica. 2007. <<www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0724t.pdf >>[Consultado: 10 de Febrero, 2008].
- [3] Bianchi, A. “Ingeniería de las comunicaciones II”. [En línea]. Venezuela: Universidad de Carabobo. 1997. <<<http://www.geocities.com/abianchi04/textoradioenlaces>>>[Consultado: 12 de febrero, 2008].
- [4] Sin nombre. “Prácticas de radiocomunicaciones. Dimensionado de un radio enlace”. [En línea]. España: Universidad de Zaragoza. 2008. <<<http://eupt2.unizar.es/asignaturas/ittse/radiocomunicaciones/guion.pdf>>> [Consultado: 12 de febrero, 2008].
- [5] Sin nombre.“Comment 5. Propagación de las Microondas”. [En línea]. Peru: Universidad Nacional de Ingeniería. 2005 << <http://aniak.uni.edu.pe/sdemicro/Cap%205%20MW%202005-1.pdf>>>[Consultado: 15 de febrero, 2008].
- [6]Alpuente, J. “Sistemas de telecomunicación. Propagación de ondas”. [En línea]. España: Universidad de Alcalá. 2005 <<<http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/ittst/po/apuntes/>>>[Consultado: 25 de febrero, 2008]
- [7] Pidre, J. “Fundamentos de propagación troposférica”. [En línea]. España: Universidad de Vigo. 2007. <<<http://www.grp.tsc.uvigo.es/rtvs/docs/tema2.pdf> >> [Consultado: 5 de abril, 2008].
- [8] Murillo, J. “Radiación y radiocomunicación”. [En línea]. España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. 2006. << <http://www.personal.us.es/murillo/docente/radio/Radioprincipal.htm>>> [Consultado: 10 de marzo, 2008].
- [9] “Voltage standing wave ratio (vswr) / reflection coefficient return loss/mismatch loss”. [En línea]. Estados Unidos: Granite Islang Group. 2005 << <http://www.tscm.com/vswr.pdf> >>[Consultado: 12 de marzo, 2008].
- [10] “Orientación de parábolas”. [En línea]. España: Universidad de Andalucía 2008<< [http:// 80.24.233.45 / EquiposImagen/ Orientacion Parabolas.pdf](http://80.24.233.45/EquiposImagen/OrientacionParabolas.pdf) >> [Consultado: 18 de marzo, 2008].

[11] Recomendación UIT-R.676. "Modelo de la atenuación específica debida a la gases atmosféricos". [En línea]. <<[http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/ORIGINAL/P/R-REC-P UIT-R.676-200111-I!!PDF-S.pdf](http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/ORIGINAL/P/R-REC-P%20UIT-R.676-200111-I!!PDF-S.pdf)>> [Consultado: 18 de marzo, 2008].

[12] Recomendación UIT-R P.838-3. "Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción". [En línea]. << <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/ORIGINAL/P/R-REC-P.836-3-200111-I!!PDF-S.pdf>>> [Consultado: 18 de marzo, 2008].

[13] "Propagación y campo recibido". [En línea]. Argentina: Universidad Nacional de Rosario. 2005 << <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Antenas%20y%20propagacion/1513.pdf>>> [Consultado: 28 de marzo, 2008].

[14] Wikipedia. [En línea]. <<<http://es.wikipedia.org>>> [Consultado: 5 de abril, 2008].

[15] Mamografías "Direccionamiento IP". [En línea]. <<<http://www.monografias.com/trabajos29/direccionamiento-ip/direccionamiento-ip.shtml?monosearch>>> [Consultado: 10 de abril, 2008].

[16] Bartolomé, M. "Wireless". [En línea] << http://cossio.net/online/materiales_didacticos/arquitectura/wireless.pdf>> [Consultado: 11 de abril, 2008].

[17] "Introducción a las redes de telecomunicaciones". [En línea]. [Argentina: Universidad Nacional de Rosario.2005.<<www.eie.fceia.unr.edu.ar/~comunica/TBAApub/IntroTBAA.pdf>> [Consultado: 15 de abril, 2008].

[18] Cortés, V. "Switching a nivel 3" [En línea]. Francia: 2005 << <http://locortes.net/Vicenc/Telematica/Enginyeria%20de%20Xarxes/Switching%20a%20nivel%203.pdf>>> [Consultado: 15 de abril, 2008].

[19] Viñas, J. "Las gotas de lluvia". [En línea]. España: Tecnociencia. 2006. << www.tecnociencia.org/n/286/gotas-lluvia/>> [Consultado: 18 de marzo, 2008].

[20] Radio Mobile. "Ayuda para configuración y uso". USA: Roger Coudé, 2008

[21] Gobierno de Costa Rica. "LEY DE PARQUES NACIONALES N° 6084".[En línea] <<<http://www.tramites.go.cr/manual/English/legislacion/6084.PDF>>>[Consultado: 18 de marzo, 2008]

[22]Douglas, E. "Redes globales de información con Internet y TCP/IP". 3^{era} ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A, 1996.

[23] Días, A "Sub redes".[En línea].<< andresbodiaz.bitacorras.com/subredes.doc>> [Consultado: 30 de Abril, 2008].

- [24] Valle, L. "Coexistencia de redes WLAN y WPAN". [En línea]. México: Universidad de la Américas Puebla. 2005.<< http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/valle_i_lf/capitulo1>> .
- [25] Lehembre, G "Seguridad Wi-Fi". [En línea]. 2006 << http://www.hsc.fr/ressources/articles/hakin9_wifi/hakin9_wifi_ES.pdf >>
- [26] Gacitúa, Verónica. "Ruteamiento Multipunto en Redes de Computadoras". [En línea]. 2005.<< profesores.elo.utfsm.cl/~agv/ipd438/2s03/projects/Multicast/documento/info2_v3.pdf>> [Consultado: 15 de Abril, 2008].
- [27] Luna, D. Carrasco, V. López, M. "Switching a nivel 3". [En línea]. << locortes.net/Vicenc/Telematica/Enginyeria%20de%20Xarxes/Switching%20a%20nivel%203.pdf>> [Consultado: 15 de Abril, 2008].
- [28] "Cámaras remotas para vigilancia IP". [En línea]. Argentina: 2008. <<<http://www.voxdata.com.ar/voxcamip.html>>> [Consultado: 15 de Abril, 2008].
- [29] Daporta, G. "Diseño y mantenimiento". [En línea]. 2005.<< http://www.gratisweb.com/gulle79/network/rip/intro_rip.htm>> [Consultado: 30 de Abril, 2008].
- [30] Montes A. "Pararrayos CTS y CEC". [En línea]. 2005. << ecuador.indymedia.org/es/2005/01/7815.shtml>> [Consultado: 15 de mayo, 2008].
- [31] Microsoft. "Configuración de redes inalámbricas IEEE 802.11 para el hogar y la pequeña empresa". [En línea] <<<http://www.microsoft.com/spain/technet/recursos/articulos/wifisoho.msp>>> [Consultado: 15 de mayo, 2008].
- [32] Coudé, R "Programa Radio Mobile" <<http://www.g3tvu.co.uk/Radio_Mobile.htm>>. [En línea]

Apéndices

Apéndice A.1 Cálculos.

A.1.1 Cálculo del despeje de Clearance y radio de la zona de Fresnel.

Cálculo de despeje de Clearance, radio Fresnel y u' para el enlace TRM-CP:

Tabla A.1 Distancia y altura de la primera obstrucción para el enlace TRM-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde TRM (d_1)	2.89Km
Distancia obstrucción desde CP (d_2)	0.48Km
Altura de la obstrucción(h_3)	1343.2m
Distancia enlace(d)	3.37Km

A partir de (3.15) se obtiene que el despeje de Clearance es:

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1595.2 - 1129.2}{3.37}\right)0.48 - \left(1343.2 + \frac{2.89 * 0.48}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -147.626m$$

Aplicando (3.3) se obtiene:

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{2.89 * 0.48}{5800 * 3.37}} \Rightarrow r_1 = 4.614m$$

La relación c/r se obtiene a partir de (3.12):

$$u' = \frac{-147.626m}{4.614m} \Rightarrow u' = -31.995$$

Tabla A.2 Distancia y altura de la segunda obstrucción para el enlace TRM-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde TRM (d_1)	1.32Km
Distancia obstrucción desde CP (d_2)	2.05Km
Altura de la obstrucción(h_3)	1613.1m
Distancia enlace(d)	3.37Km

Aplicando (3.15):

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1595.2 - 1129.2}{3.37}\right)2.05 - \left(1613.1 + \frac{2.05 * 1.32}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -200.428m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{1.32 * 2.05}{5800 * 3.37}} \Rightarrow r_1 = 6.445m$$

Esto implica que:

$$u' = \frac{-200.43m}{6.445m} \Rightarrow u' = -31.098$$

Cálculo de despeje de Clearance, radio Fresnel y u' para el enlace Emb-CP:

Tabla A.3 Distancia y altura de la primera obstrucción para el enlace Emb-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde Emb (d_1)	1.42Km
Distancia obstrucción desde CP (d_2)	0.78Km
Altura de la obstrucción(h_3)	1474.6m
Distancia enlace(d)	2.2Km

Aplicando (3.15):

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1594.8 - 1129.2}{2.20}\right)0.78 - \left(1474.6 + \frac{1.42 * 0.78}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -180.324m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{1.42 * 0.78}{5800 * 2.2}} \Rightarrow r_1 = 5.103m$$

Esto implica que:

$$u' = \frac{-180.324m}{5.103m} \Rightarrow u' = -35.337$$

Tabla A.4 Distancia y altura de la segunda obstrucción para el enlace Emb-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde Emb (d_1)	0.25Km
Distancia obstrucción desde CP (d_2)	1.95Km
Altura de la obstrucción(h_3)	1671.4m
Distancia enlace(d)	2.2Km

Aplicando (3.15):

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1594.8 - 1129.2}{2.20}\right)1.95 - \left(1671.4 + \frac{1.95 * 0.25}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -129.709m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{0.25 * 1.95}{5800 * 2.2}} \Rightarrow r_1 = 3.385m$$

Esto implica que:

$$u' = \frac{-129.709m}{3.385m} \Rightarrow u' = -38.313$$

Cálculo de despeje de Clearance, radio Fresnel y u' para el enlace TOsc-CP:

Tabla A.5 Distancia y altura de la primera obstrucción para el enlace TOsc-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde TOsc (d ₁)	1.18Km
Distancia obstrucción desde CP (d ₂)	0.23Km
Altura de la obstrucción(h ₃)	12314m
Distancia enlace(d)	1.41Km

Aplicando (3.15):

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1583 - 1129.2}{1.41}\right)0.23 - \left(1231 + \frac{1.18 * 0.23}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -27.776m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{0.23 * 1.18}{5800 * 1.41}} \Rightarrow r_1 = 3.155m$$

Esto implica que:

$$u' = \frac{-27.776m}{3.155m} \Rightarrow u' = -8.804$$

Tabla A.6 Distancia y altura de la segunda obstrucción para el enlace TOsc-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde TOsc (d ₁)	0.78Km
Distancia obstrucción desde CP (d ₂)	0.63Km
Altura de la obstrucción(h ₃)	1476m
Distancia enlace(d)	1.41Km

Aplicando (3.15):

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1583 - 1129.2}{1.41}\right)0.63 - \left(1476 + \frac{0.78 * 0.63}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -95.66m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{0.78 * 0.63}{5800 * 1.41}} \Rightarrow r_1 = 4.243m$$

Esto implica que:

$$u' = \frac{-95.66m}{4.243m} \Rightarrow u' = -22.531$$

Cálculo de despeje de Clearance, radio Fresnel y u' para el enlace TT-CP:

Tabla A.7 Distancia y altura de la primera obstrucción para el enlace TT-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde TT (d ₁)	6.75Km
Distancia obstrucción desde CP (d ₂)	6.83Km
Altura de la obstrucción(h ₃)	1945.4m
Distancia enlace(d)	13.58Km

Aplicando (3.15):

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1653 - 1129.2}{13.58}\right)6.83 - \left(1945.4 + \frac{6.75 * 6.83}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -552.76m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{6.75 * 6.83}{5800 * 13.58}} \Rightarrow r_1 = 13.251m$$

Esto implica que:

$$u' = \frac{-552.76m}{13.251m} \Rightarrow u' = -41.715$$

Tabla A.8 Distancia y altura de la segunda obstrucción para el enlace TT-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde TT (d ₁)	6.31Km
Distancia obstrucción desde CP (d ₂)	7.27Km
Altura de la obstrucción(h ₃)	1976m
Distancia enlace(d)	13.58Km

Aplicando (3.15):

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1653 - 1129.2}{13.58}\right)7.27 - \left(1976.4 + \frac{6.31 * 7.27}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -566.488m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{6.31 * 7.27}{5800 * 13.58}} \Rightarrow r_1 = 13.218m$$

Esto implica que:

$$u' = \frac{-566.5m}{13.218m} \Rightarrow u' = -42.86$$

Tabla A.9 Distancia y altura de la tercera obstrucción para el enlace TT-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde TT (d_1)	2.69Km
Distancia obstrucción desde CP (d_2)	10.89Km
Altura de la obstrucción(h_3)	1887m
Distancia enlace(d)	13.58Km

Aplicando (3.15):

$$c = 1129.2 + \left(\frac{1653 - 1129.2}{13.58}\right)10.89 - \left(1887.4 + \frac{2.69 * 10.89}{2 * 1.33 * 6.37}\right) = -338.159m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{2.69 * 10.9}{5800 * 13.58}} \Rightarrow r_1 = 10.563m$$

Esto implica que:

$$u' = \frac{-338.16m}{10.563m} \Rightarrow u' = -32.013$$

Cálculo de despeje de Clearance, radio Fresnel y u' para el enlace CG-CP:

Tabla A.10 Distancia y altura de la obstrucción para el enlace CG-CP

Parámetro	Valor
Distancia obstrucción desde CG (d_1)	16.84Km
Distancia obstrucción desde CP (d_2)	2.66Km
Altura de la obstrucción(h_3)	1216m
Distancia enlace(d)	19.5Km

Aplicando (3.15):

$$C = (1129.2 + \frac{3007.6 - 1129.2}{19.5} 2.66) - (\frac{16.84 * 2.66}{2 * 1.33 * 6.370} + 1216) = 166.79m$$

A partir de (3.3):

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{16.84 * 2.66}{5800 * 19.5}} \Rightarrow r_1 = 10.9m$$

Parámetro de despeje:

$$u' = \frac{C}{r_1} \Rightarrow u' = \frac{166.79}{10.9} \Rightarrow u' = 15.3$$

A.1.2 Cálculos para visibilidad radioeléctrica

Altura de las antenas para que la redondez de la tierra no represente un obstáculo:

$$R_t = (\frac{19.5}{4.2_{(Km)}} - \sqrt{9})^2 \Rightarrow R_t = 2.7m$$

$$R_t = 2.7m + 3 + 10m \Rightarrow R_t \cong 16m$$

Verificando el horizonte radioeléctrico:

$$d_{(Km)} = 4,2(\sqrt{16} + \sqrt{9}) = 28.84Km$$

A.1.3 Cálculo influencia del terreno en la propagación de la señal

Distancia del punto más alto al punto de reflexión:

Donde al aplicar (3.25):

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{[6.37 * (4/3) * (16 + 9) + (\frac{19.5}{2})^2]} = 20.245Km, y$$

A partir de (3.26):

$$\phi = \arccos\left[\frac{12.74 * (4/3) * (16 - 9) * 19.5}{20.245^3}\right] = 1.29624 \text{ rad}$$

Sustituyendo en (3.24):

$$d_1 = \frac{d}{2} + p \cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right) = \frac{19.5}{2} + (20.245) \cos\left(\frac{\pi + 01.29624}{3}\right) = 11.6 \text{ Km}$$

Distancia del punto más bajo del enlace al punto de reflexión:

$$d_2 = 19.5 - 11.6 = 7.9 \text{ Km}.$$

La altura efectiva de las antenas en el CG y CP se obtiene al aplicar (3.22) y (3.23):

$$h'_t = 16 - \frac{11.6^2}{2 * \left(\frac{4}{3}\right) R_{o(Km)}} = 8.08 \text{ m}$$

$$h'_r = 9 - \frac{9.2^2}{2 R_{o(Km)}} = 5.326 \text{ m}$$

Por lo que el ángulo de incidencia es de:

$$\psi_{(milirad)} = \frac{9.15 + 4.02}{19.5} = 0.69 \text{ mrad}$$

Para determinar el coeficiente de permitividad compleja del suelo se utiliza $\sigma = 5 \text{ mS/m}$, $\epsilon_r = 15$ y $\epsilon_o = 8.854 * 10^{-12} \text{ F/m}$, al sustituir en (3.39) se obtiene:

$$\epsilon = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_o} \Rightarrow \epsilon = 15 - j0.0155$$

El coeficiente de reflexión vertical se obtiene con la ecuación 3.37:

$$\Gamma_V = \frac{(15 - j0.0155) * \text{sen}(0.687 \text{ mrad}) - \sqrt{15 - j0.0155 - \cos^2(0.687 \text{ mrad})}}{(15 - j0.0155) * \text{sen}(0.687 \text{ mrad}) + \sqrt{15 - j0.0155 - \cos^2(0.687 \text{ mrad})}}$$

$$\Gamma_V = 0.9945 e^{-\pi} \Rightarrow \Gamma_V = e^{-\pi}$$

A partir de (3.36) se obtiene la divergencia:

$$D_v = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2 * 11.6 * 7.9}{k * 6.37 * (9 + 16)}}} \Rightarrow D_v = 0.7326$$

El desfase entre el rayo directo y el rayo reflejado se obtiene a partir (3.35):

$$\phi = \frac{4 * \pi * 9 * 16 * 5.8 * 10^9}{c * 19500} \Rightarrow \phi = 1.794 \text{ rad} \Rightarrow \phi = 102.79^\circ$$

Para la atenuación en exceso se aplica (3.40):

$$A_e = -20 \log(|1 + 0.7326 * e^{-j(1.794 + \pi)}|) \Rightarrow A_e = -2.68 \text{ dB}$$

A.1.4 Cálculo de las pérdidas del enlace

Pérdidas de propagación de espacio libre a partir de (3.49):

$$L_p \text{ (dB)} = 20 \log(19.5) + 20 \log(5800) + 32.46 \Rightarrow L_p = 133.53 \text{ dB}$$

Coefficiente de reflexión en la antena, a partir de la ecuación 5.3:

$$\Gamma_{ant} = \frac{1 - 1.5}{1 + 1.5} \Rightarrow \Gamma_{ant} = 0.2$$

Pérdidas por desacoplo entre antena y transmisor, de (3.45):

$$ML \text{ (dB)} = -10 \log(1 - 0.2^2) \Rightarrow ML = 0.177 \text{ dB}$$

Para determinar el margen de desvanecimiento se obtiene la altura efectiva del terreno mediante (3.56):

$$\sigma_h = \left[\frac{1}{5 - 1} \left[((1168.4 - 1713.56)^2 + (1220.6 - 1713.56)^2 + (1001.5 - 1713.56)^2)^2 + (2452.6 - 1713.56)^2 + (2724.7 - 1713.56)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right] = 808.675$$

El parámetro g se obtiene con (3.55):

$$g = \frac{40 * 5.8 * 808.675 * \text{sen}(0.512 * 10^{-3})}{3} = 32.02$$

Por lo que la rugosidad del suelo se obtiene a partir de (3.54):

$$A = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{32.02^2}{2}\right)}{1 + 2.35\left(\frac{32.02^2}{2}\right) + 2\pi\left(\frac{32.02^2}{2}\right)}} \Rightarrow A = 0.3406$$

Con un $B=0.125$ se tiene un margen de desvanecimiento de:

$$F_m(dB) = 30\log 19.5 + 10\log(6 * 0.3406 * 0.125 * 5.8) - 10\log(1 - 0.99999) - 70 \\ \Rightarrow F_m = 10.41dB$$

A.1.5 Cálculo de las características de las antenas

Para la ganancia se utiliza la ecuación 5.6:

$$G = \left(\frac{-68 + 158.7 - 30}{2} \right) \Rightarrow G = 30.25dBi$$

Para el CG como transmisor y CP como receptor:

$$\alpha(^{\circ}) = -\left(\frac{3007.6 - 1129.2}{19.5 * 1000} - \frac{19.5}{2 * k * 6370} \right) * \left(\frac{180^{\circ}}{\pi} \right) \Rightarrow \alpha = -5.4534$$

Azimut:

$$\beta = 180^{\circ} + \arctan\left(\frac{\text{sen}((-83.842 + 83.851))}{\cos(9.951) \tan(9.775) - \text{sen}(9.951) \cos(-83.842 + 83.851)} \right) \Rightarrow \\ \beta = 177.115^{\circ}$$

Para el CP como transmisor y CG como receptor:

Ángulo de elevación:

$$\alpha(^{\circ}) = -\left(\frac{1129.2 - 3007.6}{19.5 * 1000} - \frac{19.5}{2 * k * 6370} \right) * \left(\frac{180^{\circ}}{\pi} \right) \Rightarrow \alpha = 5.5849^{\circ}$$

Azimut:

$$\beta = 360^{\circ} + \arctan\left(\frac{\text{sen}((-83.851 + 83.842))}{\cos(9.775) \tan(9.951) - \text{sen}(9.775) \cos(-83.851 + 83.842)} \right) \Rightarrow \\ \beta = 357.117^{\circ}$$

Apéndice A.2 Glosario y abreviaturas.

ACK: "Acknowledgement". Acuse de mensaje recibido.

Ad-Hoc: "Red temporal". Red inalámbrica que no utiliza puntos de acceso o routers

AP: "Access Point". Punto de acceso inalámbrico

ARP: "Address Resolution Protocol"

BSU: "Base Station Unit". Estación base para la comunicación en una red inalámbrica.

BSSID: "Basic Service Set Identifier". Identificador de servicio para una red equipo-equipos inalámbricos.

BW: "Band Wide". Ancho de banda de un canal.

CG: "Cerro Gurdían". Se refiere al punto de repetición en el Cerro Gurdían.

CP: "Centro Producción". Se refiere al centro de producción de electricidad Río Macho.

CSMA/CA: "Carrier Sense, Multiple Access, Collision Avoidance". Utilizado en redes inalámbricas para acceder al canal evitando colisiones.

CTS: "Clear to send". Mensaje de respuesta para iniciar transferencia de datos

DHCP: "Dynamic Host Configuration Protocol". Protocolo de red que permite a los hosts obtener automáticamente la configuración de red.

Emb: "Embalse". Se refiere al embalse el llano.

FTP: "File Transfer Protocol". Protocolo de transferencia de archivos entre dos computadoras.

HTTP: "Hyper Text Transfer Protocol". Protocolo de transferencia de hipertexto entre dos computadoras

I_{TT}: "Punto intermedio Tapantí". Se refiere al punto intermedio de comunicación entre la toma de agua Tapantí y el cerro Gurdían.

ICMP: "Internet Control Message Protocol". Protocolo de envío de mensajes de error a través de la red.

IGMP: "Internet Group Management Protocol". Protocolo similar al ICMP para la comunicación multicast.

IGRP: "Interior Gateway Routing Protocol". Protocolo de puerta interior.

IP: "Internet Protocol". Protocolo de comunicación de Internet.

L_F: "Pérdidas guía de onda". Pérdidas debidas a las guías de onda en el transmisor y el receptor.

L_H: "Pérdidas por agua". Pérdidas debidas al vapor de agua presente en la atmósfera

L_O: "Pérdidas por oxígeno". Pérdidas debidas al oxígeno presentes en la atmósfera.

L_{OH}: "Pérdidas hidrométricas". Suma de las pérdidas por agua y oxígeno.

L_r: "Pérdidas en el receptor". Pérdidas debidas a guías de onda en el receptor

L_t: "Pérdidas en el transmisor". Pérdidas debidas a guías de onda en el transmisor

MAC: "Media Access Control". Identificador de 48 bits de una tarjeta de red.

MACA: "Multiple Access with Collision Avoidance". Utiliza los paquetes RTS/CTS/ACK para acceder al canal.

MTU: "Maximum Transmission Unit". Tamaño máximo del datagrama IP antes de la fragmentación.

NAV: "Network Allocation Vector". Tiempo de espera para acceder al canal en el algoritmo MACA.

NIC: "Network Interface Card". Tarjeta de interfaz de red para conectarse a un sistema ethernet

OSI: "Open System Interconnection". Modelo de referencia para la conexión de sistemas de comunicación en red,

OSPF: "Open Shortest Path First". Protocolo de enrutamiento de compuerta interior.

PC: "Personal Computer". Computadora de uso personal de escritorio.

PSF: "Punto de repetición Querevic". Se refiere al punto de repetición que se encuentra en la hacienda Querevic.

RD: "Rayo Directo". En transmisión de línea vista, es el rayo que une al transmisor y el receptor.

RIP: "Routing Internet Protocol". Protocolo de ruteo interno entre sistemas autónomos.

RR: "Rayo Reflejado". En transmisión de línea de vista, es el rayo que sale del transmisor y se refleja en el terreno para llegar al receptor

RTS: "Request To Send". Mensaje de petición para acceder al canal.

SIFS: "Short Interframe Space". Tiempo de espera para enviar tramas al canal.

SSH: "Secure SHell". Protocolo y programa que sirve para acceder de forma segura a una computadora remota.

TCP: "Transmisión Control Protocol". Protocolo de nivel de transporte, que establece una comunicación para enviar datagramas.

TOsc: “Tanque de Oscilación”. Se refiere al tanque de oscilación del complejo de abastecimiento de agua.

TRM: “Toma Río Macho”. Se refiere a la toma de agua Río Macho.

TT: “Toma Tapantí”. Se refiere a la presa Tapantí.

UDP: “User Datagram Protocol”. Protocolo de nivel de transporte, que envía datagramas a través de la red sin establecer previamente una comunicación

VSWR: “Voltage Standing Wave Relationship”. Relación que existe entre la onda transmitida y la reflejada.

WEP: “Wired Equivalent Privacy”. Protocolo de seguridad inalámbrica equivalente a la red cableada.

WPA: “Wireless Protected Access”. Protocolo de encriptación inalámbrico para la protección de información.

WLAN: “Wireless Local Access Network”. Red de área local inalámbrica. Se refiere a las redes de acceso local que utiliza tecnología inalámbrica.

Apéndice A.3 Lista de entregables.

Objetivo número 1: Análisis de factibilidad de selección del prototipo de enlace a realizar.

Análisis de Línea vista de las tomas y el centro de producción:

- a. Coordenadas GPS de las tomas, centro de producción y posibles puntos intermedios, tomados en el área de estudio.
- b. Perfil de enlace en las tomas, centro de producción.
- c. Análisis de factibilidad de enlace, donde se considerara la primera zona de Fresnel como el principal parámetro de comparación a nivel de enlace, además se comparara cada sección desde punto de vista topográfico, acceso.

Objetivo numero 2: Diseñar el enlace a nivel de propagación de la señal

Análisis de propagación en el área seleccionada.

- a. Determinación de los parámetros de las antenas del enlace.
 - a. Recomendaciones de antenas comerciales que más se ajusten al diseño realizado.
- b. Determinación de los parámetros de TX/RX.
 - a. Pérdidas de propagación, Margen de despeje, etc.
 - b. Recomendación del hardware que más se ajuste al diseño.
- c. Simulación del Perfil de enlace.
 - a. Zona Fresnel.
 - b. Potencia de TX/RX.
 - c. Campo eléctrico requerido.
 - d. Pérdidas de propagación.
 - e. Ángulos de elevación de las antenas.

Objetivo número 3: Diseñar el enlace a nivel de datos de la señal.

- a. Simulación de Transferencia de datos por la red
 - a. Puntos de accesos.
 - b. Taza de transferencia de datos.
 - c. Pérdidas de datos (Paquetes).

Objetivo número 4: Diseñar un manual de instalación a nivel de hardware del equipo a emplear en las estaciones de comunicación.

- a. Manual de configuración del hardware del equipo.
 - a. Infraestructura de la red diseñada.
 - b. Configuración de software de la red.

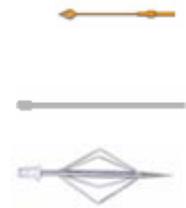
Apéndice A.4 Manual de instalación de hardware

A.4.1 Instalación del pararrayos.

El pararrayos se instala en la parte más alta de la infraestructura, en este caso en la punta de la torre.

Materiales requeridos para la instalación:

- Punta Franklin.
- Mástil pararrayos galvanizado.
- Varilla Copperweld
- Base para punta Franklin.
- Cable AGW 1/0.
- Grapas aislantes.



Instalación:

1. Coloque la punta Franklin en la base y sujétela al mástil galvanizado.
2. Sujete el mástil a la torre usando las grapas aisladoras.
3. Conecte el cable AWG 1/0 al mástil galvanizado y a la varilla copperweld.
4. La figura A.1 muestra como debe quedar la instalación.

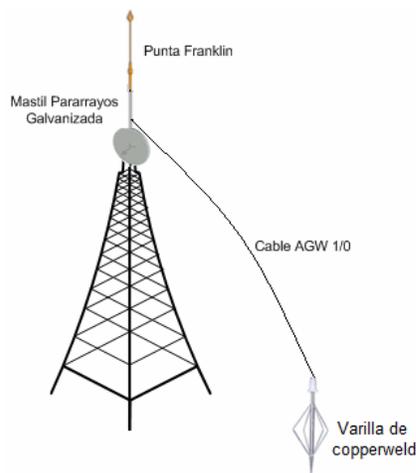


Figura A.1 Instalación del pararrayos

A.4.2 Montaje del equipo de red

Descripción de los Materiales necesarios para realizar la conexión de las antenas, la BSU y el switch.

- Protector de descargas de 0-6GHz, bidireccional, N-hembra.
- Divisor de señal de dos vías, bidireccional, N-hembra.
- Conector N-macho.
- Conector a prueba de agua RJ45.
- Conector RJ45.
- Barril N-macho.



Precauciones:

- ❖ Verificar que el equipo se encuentre apagado.
- ❖ Evitar el contacto de las partes metálicas del o los equipos con cables de alimentación con el fin de evitar descargas.

Conexión entre BSU y switch

1. Pase el cable UTP o FTP a través de los protectores y atornille, sin utilizar herramienta.

2. Con ayuda de un rack, monte el conector RJ 45 en ambos extremos del o los cables UTP o FTP.



Figura A.2 Protección del conector RJ45

3. Si utiliza un switch con alimentación POE incorporada conecte el cable anterior a la BSU y switch como se muestra en la figura A.3



Figura A.3 Conexión entre BSU y switch, sin alimentador POE externo

4. Si utiliza un inyector POE externo debe usar dos cables UTP o FTP con conector RJ 45, e instalar el equipo como se muestra en la figura A.4

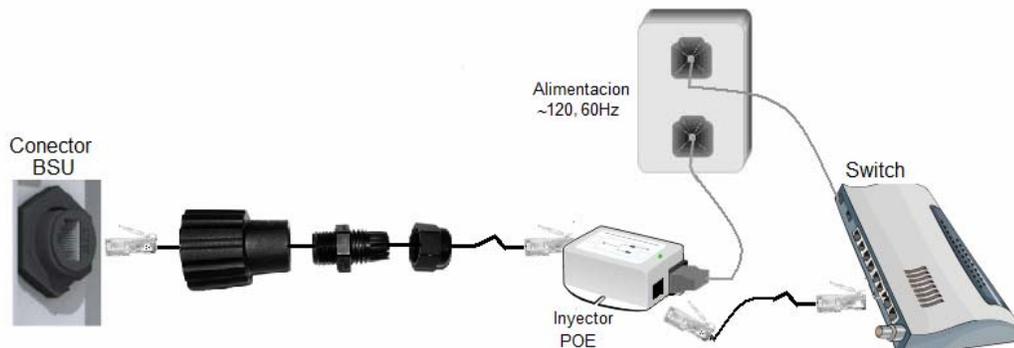


Figura A.4 Conexión entre BSU y switch con inyector POE externo

Para programar la BSU:

1. Si no utiliza un inyector POE externo debe conectar la computadora a través del switch utilizando un cable ethernet straight- through.

2. Si utiliza un inyector POE externo puede conectar la computadora por el switch con un cable ethernet straight- through o mediante el inyector usando un cable crossover entre la PC y el puerto "Data IN" del dispositivo POE.

3. Puede utilizar también un convertidor RJ11 a DB9 como el que se muestra en la figura A.5 para realizar la programación del equipo.



Figura A.5 Convertidor RJ11 a DB9

Para programar el Switch:

1. Conecte un cable serial crossover como el de la figura A.6 entre el puerto consola del switch y el puerto serial de la PC.



Figura A.6 Cable crossover serial, para la programación del switch

Recomendación:

- ❖ Antes de conectar físicamente todo el equipo, programe las BSU y el switch.

Conexión entre BSU y antena.

Para conectar dos antenas a la BSU:

1. Conectar el barril N-macho a un extremo de la BSU y la guía de onda seleccionada, como se ve en la figura A.7.
2. Conectar la guía de onda que viene del protector al común del divisor de frecuencia, como se muestra en la figura A.7.
3. Conectar las dos guías de onda de cada una de las antenas al divisor de frecuencia, según el diagrama de la figura A.7.

4. De no usar protector de descargas, se conecta la guía de onda entre la BSU y el divisor de frecuencias.

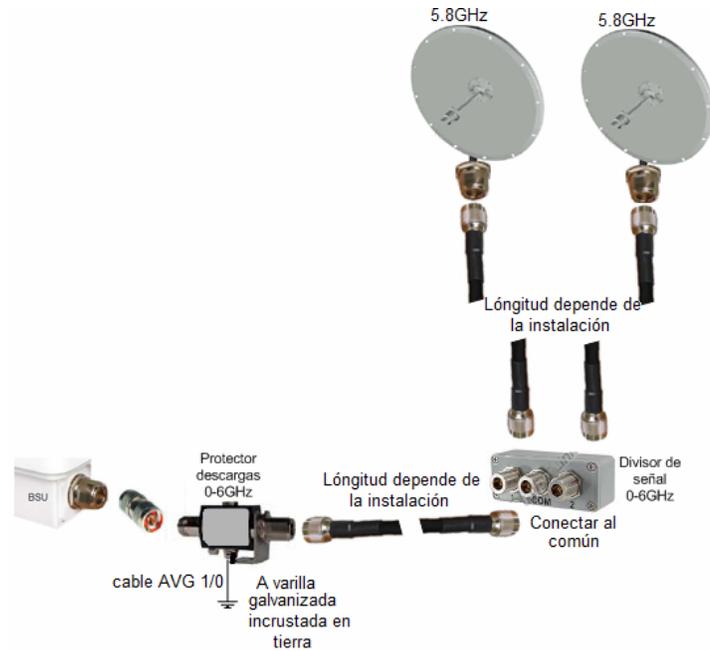


Figura A.7 Conexión de la BSU a las antenas,

5. Si se conecta una única antena a la BSU no se utiliza el divisor de frecuencia, en este caso:

5.1 Si se conecta con protección de descarga, la guía de onda se conecta a este, como en la figura A.7.

5.2 Si no se utiliza protector de descarga, la antena se conecta de forma directa a la BSU, como se muestra en la figura 8.



Figura A.8 Conexión de una antena a la BSU, sin protector de descargas.

A.5 Manual configuración de software

Este manual se centra solamente en los puntos más importantes a establecer en una BSU y un switch de capa 3, dejando de lado aquellos que varían de un fabricante a otro.

- ❖ Se recomienda siempre configurar la BSU por la interfaz ethernet, ya que esta es más estable y segura que la red wireless.

Pasos para ingresar por primera vez a la configuración de la BSU o switch:

1. Conectar la BSU a la PC como se establece en el manual de configuración de hardware.
2. Verificar en el manual suministrado por el fabricante la dirección IP, clave de seguridad y nombre de usuario que la BSU trae por defecto.
3. Ingresar la dirección IP en un browser de Internet, como se muestra en la figura A.9.
4. Digitar el clave de seguridad y nombre de usuario en la pantalla de acceso que se abre, ver figura A.9.

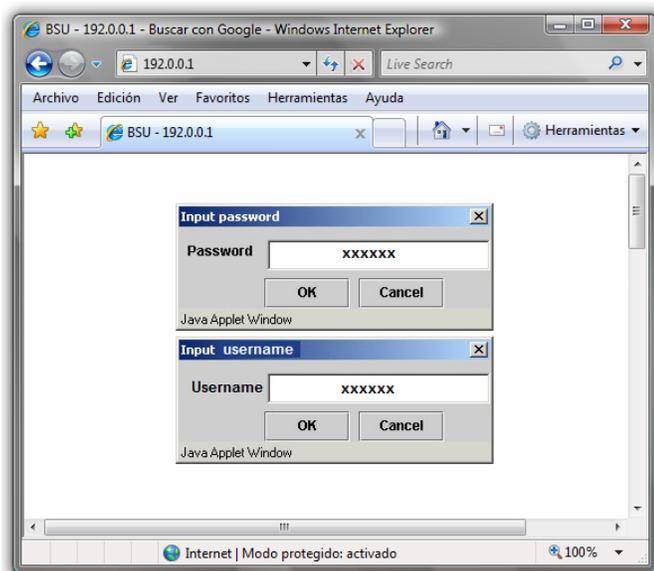


Figura A.9 Pantalla de acceso a BSU

- ❖ Se recomienda sustituir el clave de seguridad y nombre de usuario que da el fabricante por uno nuevo, ya que todos los dispositivos de la misma casa matriz traen por defecto estos parámetros, estos se cambian en la sección de seguridad.
- ❖ Una vez ingresado el clave de seguridad y nombre de usuario correctos, se abren tres pestañas para configurar los parámetros de red, wireless, y seguridad, en el caso del switch solo se configura la interfaz ethernet.

Configuración de los parámetros de red.

- ❖ Se debe ingresar una dirección IP diferente para la interfaz wireless (BSU) y ethernet (BSU y switch).
- ❖ La dirección MAC de las interfaces son diferentes, el fabricante las suministra en las hojas de datos.

Sustituir la dirección IP y máscara de subred que la unidad trae por defecto para la interfaz ethernet (BSU y switch) y wireless (BSU):

1. Seleccionar entre las pestañas wireless o ethernet para ingresar los datos., esto solo para la BSU, en el caso del switch solo la interfaz ethernet aparece.

2. Ingrese la dirección IP definida por usted para la interfaz ethernet (BSU y switch) o wireless (BSU), según la pestaña seleccionada, como se muestra en la figura A.10.

3. Ingrese la máscara de subred definida para la interfaz wireless (BSU) o ethernet (BSU y switch), según la pestaña seleccionada como se muestra en la figura A.10.

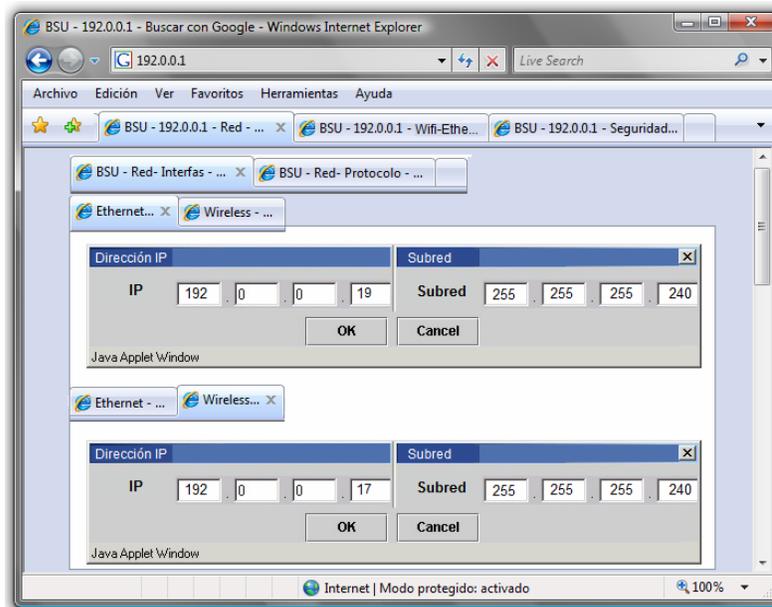


Figura A.10 Modificación de la dirección IP y máscara de subred para ambas interfaces de la BSU

Para establecer las características del protocolo de ruteo:

- ❖ Las BSU y switch pueden transmitir y recibir datos al mismo tiempo en las dos versiones del protocolo RIP en ambas interfaces.

1. Seleccione la interfaz a la cual va configurar los parámetros del protocolo, como se muestra en la figura A.11.

2. En las casillas de TX y RX seleccione entre las versiones 1, 2 o ambas, con la cual desea transmitir y recibir la información.

3. Seleccione la versión de horizonte dividido que desea emplear en la correspondiente interfaz. En el caso del switch solo se aplica a la interfaz ethernet.

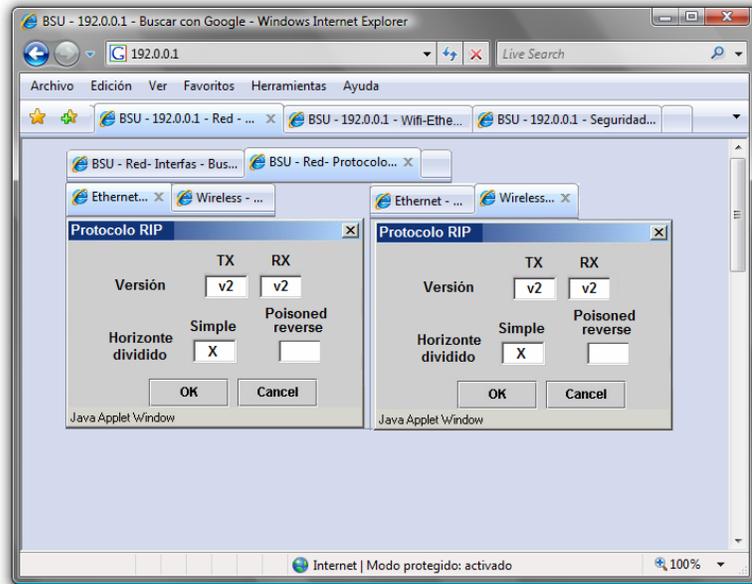


Figura A.11 Configuración de los parámetros del protocolo RIP

Características de Transmisión y recepción wireless y ethernet.

1. Para configurar las características de transmisión y recepción de la interfaz ethernet, marque la pestaña Wifi-Ethe para una BSU, si es un switch trae solo la pestaña ethernet.

2. Al desplegar el menú, seleccione la pestaña ethernet, como se muestra en la figura A.12.

3. Selecciones entre manual y automático la velocidad de transmisión de la interfaz ethernet.

3.1 Si es manual, seleccione la velocidad de conexión.

3.2 Si es automático, la unidad detecta la velocidad de conexión.

4. Seleccione el tipo de conexión, si es fullduplex, halfduplex, o autoduplex.

4.1 Si es fullduplex la unidad transmite y recibe información al mismo tiempo.

4.2 Si en halfduplex solo se transmite y recibe información en un instante de tiempo.

4.3 Si es autoduplex, la unidad detecta automáticamente el tipo de conexión.

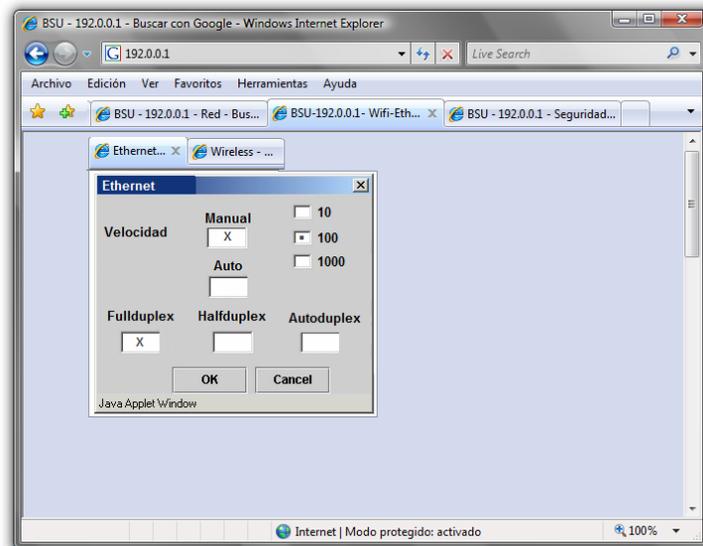


Figura A.12 Configuración de los parámetros de ethernet.

1. Para configurar la interfaz wireless, seleccione la pestaña wireless en el sub menú Wifi-Eth, esto solo aplica a la BSU.
 2. Seleccione el modo de operación o capa física de aplicación de la BSU, como se muestra en la figura A.13.
- ❖ El estándar 802.11a funciona a una frecuencia entre 5.15GHz y 5.85GHz.
 - ❖ Los estándares 802.11b/g trabajan a una frecuencia de 2.412GHz a 2.484GHz.

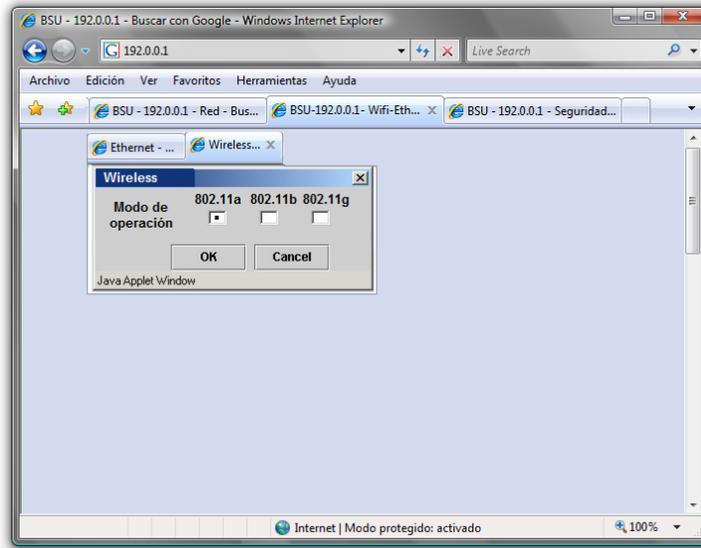


Figura A.13 Modo de operación de la BSU

3. Una vez seleccionado el modo de operación, se despliega el menú correspondiente al estándar, al seleccionar el 802.11a se abren las opciones que se muestran en la figura A.14.

4. Establezca la frecuencia central de operación y la sensibilidad de recepción deseada para un ancho de banda específico.

5. Seleccione la potencia de transmisión deseada.

6. Establezca el valor de fragmentación del paquete.

- ❖ Verifique en las hojas de datos del fabricante cual es el tamaño máximo del paquete, generalmente es de 2346bytes

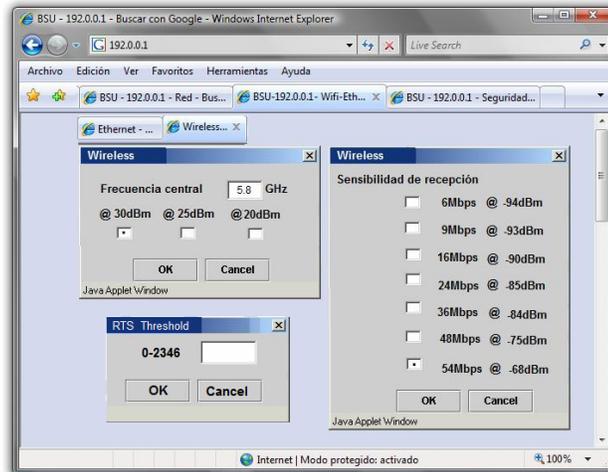


Figura A.14 Sensibilidad y frecuencia de operación

- ❖ Al variar la frecuencia, la potencia de transmisión cambia, en este caso las opciones disponibles son las que se muestran en la figura A.14.

Características de seguridad de la BSU

Cambio de clave de seguridad y nombre de usuario, aplicable a BSU y switch

1. Seleccione la pestaña de seguridad.
2. Para modificar el clave de seguridad y nombre de usuario que trae por defecto, seleccione la pestaña Pass-User.
3. Ingrese el clave de seguridad y nombre de usuario antiguos y sustitúyalos por lo de su preferencia. Esto se muestra en la figura A.15

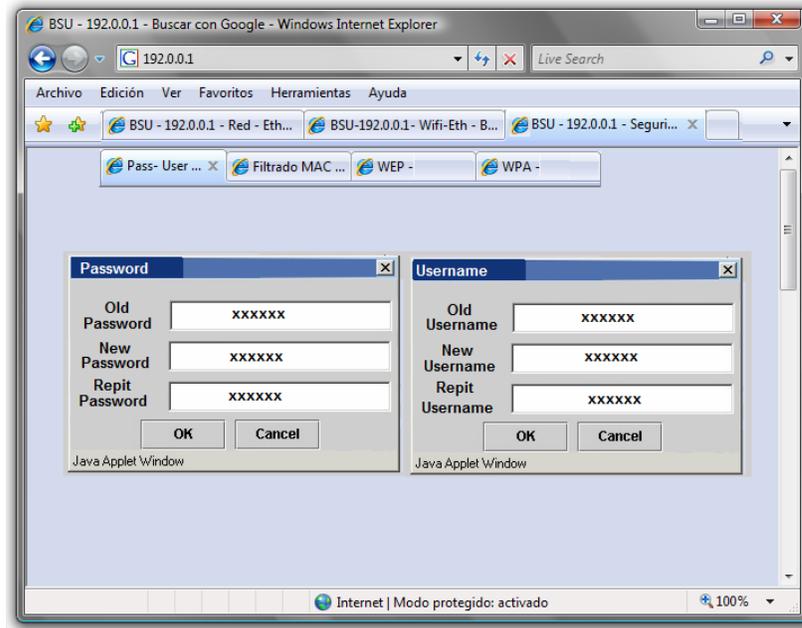


Figura A.15 Cambio de clave de seguridad y nombre de usuario de la BSU.

Filtrado MAC tanto para BSU como para switch

1. Seleccione la pestaña de filtrado MAC como se muestra en la figura A.16.
2. Ingrese las direcciones MAC de los dispositivos que tienen acceso a la red, como se muestra en la figura A.16.
3. Presione la tecla adherir para ingresar más direcciones MAC.
4. La parte derecha de la pantalla muestra las direcciones MAC ingresadas al sistema, con la posibilidad de eliminar alguna si esta es incorrecta.

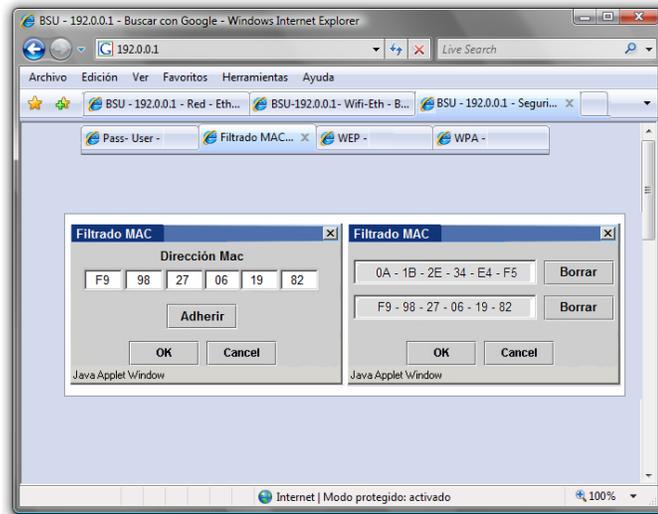


Figura A.16 Filtrado de direcciones MAC

Seguridad WPA, solamente BSU

1. Seleccione la versión WPA a utilizar, como se muestra en la figura A.17.
2. Presione el boton Generar para obtener una clave compartida WPA de 24bits.
3. Copie la clave de encriptación compartida, ya que debe ser la misma en las demás BSU.

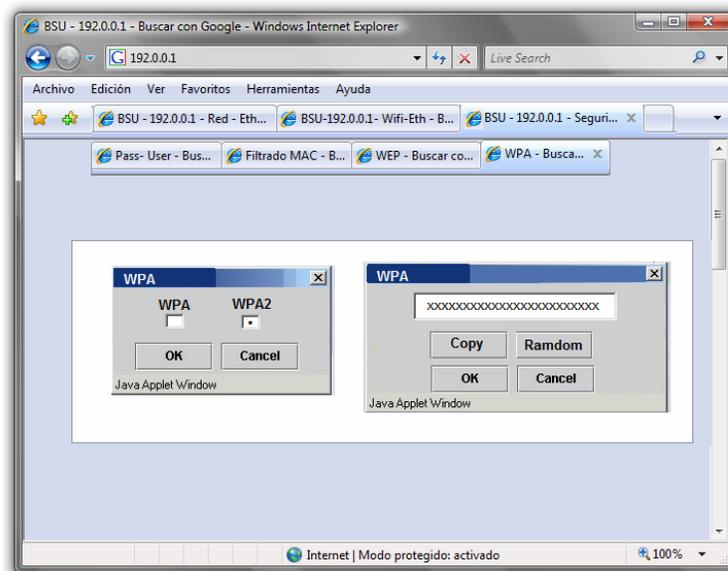


Figura A.17 Configuración WPA

- ❖ Se recomienda cambiar la clave de encriptación compartida con regularidad, esta se puede generar en cualquier BSU del sistema, y debe ser copiada en toda la red.

Anexos

Anexo B.1 Configuración del Simulador Radio Mobile.

En la figura B.1 se presenta la pantalla para configurar los parámetros de la red en el simulador Radio Mobile. Se establece la frecuencia de operación, características del suelo, tipo de clima y pérdidas adicionales en el enlace.

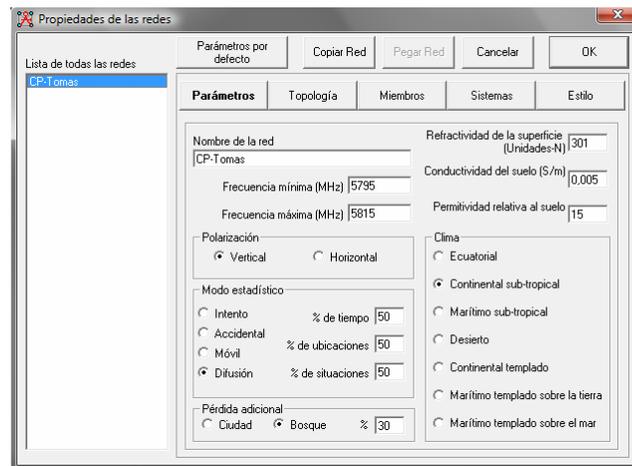


Figura B.1 Configuración de los parámetros de la red

En la figura B.2 se configura la topología de red, según [20] la red de voz se usa para enlaces punto a punto entre una estación base y un subordinado. La red de datos se usa cuando se sondea un grupo determinado de estaciones suplementarias (topología estrella). Finalmente la RED de datos, cluster se emplea para una topología mesh.

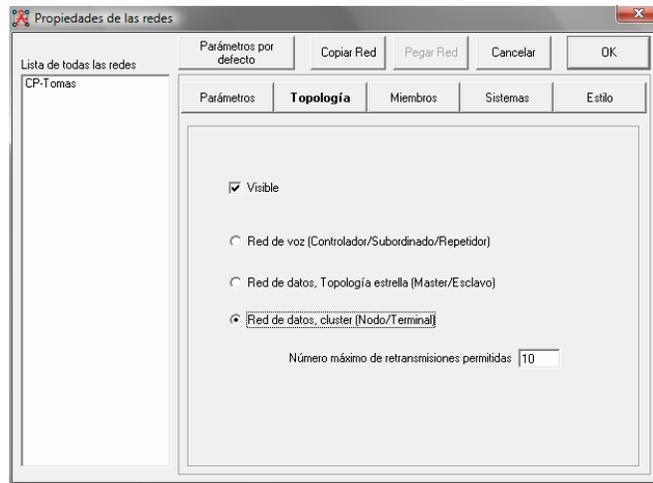


Figura B.2 Configuración de la topología del sistema

Una vez establecido las características de la red, en el programa Radio Mobile se introducen los principales valores del equipo a emplear. En la figura B.3 se presenta la pantalla de configuración del equipo.

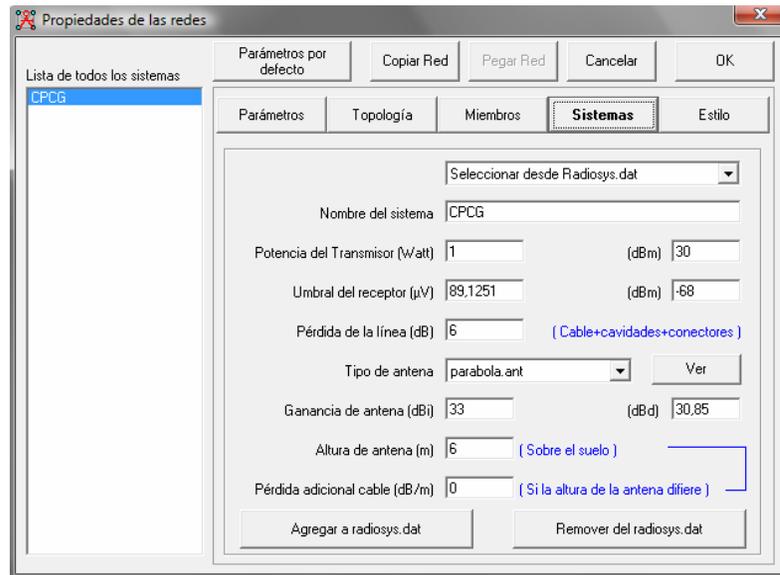


Figura B.3 Configuración de las características del equipo.

Anexo B.2 Plan de atribución de bandas de frecuencias

República de Costa Rica

Plan Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias Radioeléctricas

- CR 2.08** El rango de 108-112 MHz, se utiliza exclusivamente para el servicio de radionavegación aeronáutica. La aplicación es para la operación de sistemas de aterrizaje por instrumentos de las aeronaves (sistemas ILS). El rango 112-117.975 MHz se utiliza para la operación de radiofaros no direccionales (NDB) de localización y radiofaros omnidireccionales de VHF (VOR) que se utilizan de guía para la orientación efectiva de las aeronaves hacia el eje de rumbo deseado.
- CR 2.09** El rango 136-137 MHz se utiliza exclusivamente para el servicio móvil aeronáutico. los servicios móviles terrestres que operan en la actualidad serán en este rango serán reubicados en el rango de 138-144 MHz una separación de canales de 12.5 KHz
- CR 2.10** El rango 137-138 MHz servicio satelital (espacio - tierra) y 148 -149.9 MHz (Tierra - Espacio) se proyecta también para el servicio móvil por satélite (satélites terrestres de órbita baja), para transmisión con datos. No se permitirá sistema de satélites geoestacionario en este rango y además, el servicio de móvil por satélite no limitara el desarrollo y utilización de los servicios fijos, móviles en el rango de 148 - 149.9 MHz según fue aprobado en la CAMR 92. los servicio móviles terrestres que operan en esta banda serán reubicados en el rango de 138 a 144 MHz.
- CR 2.11** Cuando se dé la separación de 12.5 KHz entre canales en el rango 138-144 se reubicarán con prioridad los servicios existentes comprendidos en el rango 136-138 MHz una vez que entre a regir la nueva separación de canales.
- CR 2.12** El rango de frecuencias de 5725 MHz a 5825 MHz, podrá ser utilizado por los sistemas que utilicen la tecnología de espectro disperso y estarán sujetos a las especificaciones técnicas establecidas en los artículos 36 al 43 del Reglamento al Plan Nacional de Atribución de Frecuencias. Los servicios de aficionado que utilicen cualquiera de los rangos asignados para su servicio, operarán sujetos a las condiciones técnicas de instalación y operación establecidas en los artículos del 30 al 35 del Reglamento al Plan Nacional de Atribución de Frecuencias.
(Modificado por Decreto 31608-G del 24/06/04)
- CR 2.13** El servicio móvil por satélite operara sujeto a no causar interferencias a los servicios móviles terrestres y no tendrá derecho a reclamar protección por interferencias de los servicios móviles terrestre.
- CR 2.14** Los servicios móviles terrestres que operan en este rango serán reubicados dentro del rango 150-160 MHz.
- CR 2.15** Los rangos de 150.05 a 156.025 están destinados para los servicios de radiocomunicación fijo y móvil en todo el país. Las frecuencias 151.625,