DEDICATORIA

A mi sobrinita Sigal,

por alegrar mis días

y recordarme lo importante

AGRADECIMIENTOS

"El mayor espectáculo es un hombre esforzado luchando contra la adversidad; pero hay otro aún más grande: ver a otro hombre lanzarse en su ayuda"

Oliver Goldsmith *(1728-1774)*

Agradezco a mis padres por los sacrificios que han hecho para llenarme de oportunidades.

Agradezco a mis hermanas por acompañarme y apoyarme en todo.

Agradezco a mis tíos Alicia y Mauri, y a Nurit por su imprescindible ayuda.

Agradezco al Profesor Miguel Diaz por su amable y paciente atención.

Agradezco a la Prof. Neveska Rodríguez por su orientación y por su confianza en mi.

Agradezco a Tania Bentolila por su ayuda, apoyo y amistad incondicional.

Agradezco al profesor Ivan Escalona por la atención prestada.

Agradezco al Ing. Francisco Maldonado y a la empresa PLC de Venezuela por brindarme la oportunidad de trabajar en este importante proyecto.

Agradezco al Prof. Cotúa por contestar mis preguntas y aclarar pacientemente mis dudas.

Por último, agradezco a todos los que con un consejo o una palabra de aliento ayudaron en la culminación de este proyecto.

RESUMEN

Este proyecto surgió en respuesta a la necesidad de actualizar el sistema de protección, monitoreo y control de las subestaciones eléctricas de 34,5 y 115 kv de la empresa CADAFE. El estudio se realizó para las subestaciones asignadas al Centro de Operación y Distribución (C.O.D) de Maracay y se centró en el diseño de la topología de la red de transmisión vía microondas y en la elaboración del esquema de direccionamiento IP para comunicar los dispositivos de televigilancia, telemetría y voz sobre IP (*VoIP*) de cada subestación. El estudio incluye investigación bibliográfica sobre pérdidas de señal en enlaces de microondas, probabilidad de desvanecimiento y confiabilidad. Así mismo se estudiaron aspectos a considerar para la configuración y diseño de las redes de área local (LAN). Se revisaron especificaciones técnicas de los radios y antenas *Redline Communications* y del *Switch Ethernet Moxa EDS-508*. Se hizo un levantamiento de la ubicación de las subestaciones de la Región Central. Se realizó un diseño preliminar de la red en *Radio Mobile* y a continuación, se determinaron los cálculos considerando la red diseñada en las condiciones menos favorables. Se realizó la distribución de equipos y a continuación el plan de frecuencias. Finalmente, se repitieron los cálculos de los enlaces a la frecuencia asignada para establecer la potencia mínima y máxima para el equipo transmisor y receptor. Se realizó el esquema de direccionamiento IP para los dispositivos de las subestaciones. Se determinó que todos los enlaces diseñados para la red preliminar resultaron factibles. Adicionalmente, para establecer un enlace en la banda de frecuencias de 5,8 GHz es suficiente comprobar la existencia de línea de vista y que las pérdidas no son relevantes. Para poder establecer prioridades a los dispositivos según su servicio, es necesario deshabilitar el servidor DHCP ya que éste asigna direcciones de manera automática.

Palabras Claves: Enlaces microondas, Asignación de Frecuencias Direccionamiento IP.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO 2
I.1 Antecedentes 2
I.1.1 Sistema de Transmisión de CADAFE 2
I.1.2 CADAFE en el Estado Aragua 3
I.1.3 Sistema de Supervisión y Control de subestaciones eléctricas de CADAFE 3
I.1.4 Detalles técnicos y requerimientos del proyecto 4
I.2 Propuesta de PLC de Venezuela 5
I.3 Objetivos 6
I.3.1 Objetivos General 6
I.3.2 Objetivos Específicos 6
I.4 Justificación 7
I.4.1 CADAFE en Venezuela 7
I.4.2 Fallas o problemas en líneas eléctricas 8
I.5 Alcance y Limitaciones 8
CAPITULO II. MARCO REFERENCIAL 10
II.1 Enlace de microondas 10
II.1.1 Atenuación por lluvia 10
II.1.2 Atenuación por gases 11
II.1.3 Pérdidas por Reflexión 12
II.1.4 Pérdidas de espacio libre (PEL) 16
II.1.5 Pérdidas por difracción 16
II.1.6 Margen de Desvanecimiento 17
II.1.7 Probabilidad de desvanecimiento 18
II.1.7.1 Probabilidad de desvanecimiento plano 18
II.1.7.2 Probabilidad de desvanecimiento selectivo 21
II.1.8 Confiabilidad 21
II.2 OFDM 21
II.3 Modulación Adaptativa 22

II.4 Elementos de sistemas microondas 23
II.4.1 Antena 23
II.5 Red de Área Local (LAN - Local Area Network) 24
II.5.1 Ethernet 24
II.5.2 Switch Ethernet 25
CAPITULO III. METODOLOGÍA Y DESARROLLO 27
III.1 Fase I: Documentación y levantamiento de información 27
III.1.1 Estudio de detalles técnicos, requerimientos y antecedentes del proyecto 28
III.1.2 Investigación y estudio de equipos 28
III.1.3 Estudio Teórico 30
III.1.4 Investigación de coordenadas de los nodos de la red 31
III.2 Fase II: Estudio Técnico y Diseño 31
III.2.1 Análisis Topográfico de las áreas involucradas 31
III.2.2 Diseño de la red en *Radio Mobile*: 32
III.2.3 Ubicación de Estaciones Repetidoras 33
III.2.4 Cálculos de los Enlaces para las condiciones menos favorables .. 33
III.2.4.1 Pérdidas por Reflexión 34
III.2.4.2 Atenuación por lluvia y por gases 35
III.2.4.3 Factor de ocurrencia de desvanecimiento 35
III.2.4.4 Niveles de Transmisión y Recepción 36
III.2.5 Distribución de los equipos 38
III.2.5.1 Red de Fibra Óptica de CADAFE 38
III.2.5.2 Tipo de nodo de la red 38
III.2.5.3 Tipo de comunicación 39
III.2.5.4 Canales de frecuencia 39
III.2.5.5 Costos 39
III.2.6 Asignación de frecuencia 40
III.2.7 Cálculos de los enlaces a la frecuencia asignada 41
III.2.7.1 Pérdidas a la frecuencia asignada 41
III.2.7.2 Potencia máxima y mínima de los equipos 41
III.2.8 Esquema de direccionamiento IP 42

III.2.8.1 Jerarquización de servicios 42
CAPITULO IV. RESULTADOS 44
IV.1 Diseño Preliminar de la red 44
IV.2 Resultados del cálculo de los enlaces en las condiciones menos favorables 46
IV.2.1 Potencia mínima en el receptor 48
IV.2.2 Potencia mínima en el transmisor 50
IV.3 Distribución de los equipos y asignación de frecuencias 52
IV.4 Cálculos de los enlaces a la frecuencia asignada 54
IV.4.1 Cálculo de Potencias máximas y mínimas en el receptor y en el transmisor 54
IV.5 Esquema de direccionamiento IP 55
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 56
APÉNDICES Y ANEXOS ..... 2do Tomo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro de una señal modulada en OFDM. 22
Figura 2. Topología preliminar de la red. 44
Figura 3. Topología preliminar de la red ampliada. 45
Figura 4. Diagrama de Bloques de la Red. 52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pérdidas considerando el peor escenario.....47
Tabla 2. Cálculo de la potencia mínima para recepción.....49
Tabla 3. Potencia mínima en el transmisor.....51

INTRODUCCIÓN

La elaboración del presente trabajo surge de la necesidad de registrar los datos y los resultados derivados del estudio técnico y diseño de un sistema inalámbrico para la empresa CADAFE que proporcione distintos servicios para la protección, monitoreo y control de subestaciones ubicadas en la región central de Venezuela y del Centro de Operación y Distribución (C.O.D) a la cual se encuentran relacionadas.

Está estructurado en cinco capítulos. En el primer capítulo se describen los antecedentes del proyecto, se enumeran los objetivos generales y específicos, se establece el alcance y las limitaciones de este Trabajo Especial de Grado y se finaliza con la justificación del mismo.

El capítulo dos abarca la investigación previa a la ejecución del proyecto. En el tercer capítulo se presenta, junto a la metodología utilizada, el desarrollo del proyecto el cual agrupa las actividades realizadas en la elaboración del mismo.

En el cuarto capítulo se agrupan, comparan y analizan los resultados obtenidos en los cálculos y el diseño realizado durante el desarrollo del proyecto y en el quinto se dan conclusiones y recomendaciones.

Diseñar una red de interconexión inalámbrica para protección, control y monitoreo confiable, implica una meticulosa búsqueda de fuentes de información relevantes que permitan sistematizar el conocimiento del tema, la realización de cálculos y el uso de la creatividad y del sentido común para la resolución de un proyecto real de ingeniería de campo.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En este capítulo se describe la importancia y envergadura que tiene la Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE) en la industria de la generación eléctrica en Venezuela, así como las limitaciones y fallas que presenta su sistema de protección, control y transmisión de datos para las subestaciones en la actualidad. Se enumeran los objetivos que se espera lograr con el desarrollo del mismo y se define su alcance y limitaciones.

I.1 Antecedentes

I.1.1 Sistema de Transmisión de CADAFE

El Sistema de Transmisión de CADAFE está conformado por una red de subestaciones eléctricas que se encuentran distribuidas a lo largo y ancho del territorio nacional y que se identifican según el máximo nivel de tensión de las líneas a las cuales se encuentran relacionadas en subestaciones de 115 kv o de 34,5 kv.

En cada uno de los estados de Venezuela, CADAFE posee uno o más Centros de Operación y Distribución (C.O.D), cuya principal función es la supervisión y control de las subestaciones de 34,5 kv del estado respectivo.

Existen además, tres Despachos de Carga Regionales ubicados en la Región Oriental, Occidental y Central del país, los cuales se encargan de la generación y

transmisión de la energía eléctrica. Estos son: el Despacho Oriental Barbacoa, el Despacho Central La Mariposa y el Despacho Occidental Valera.

I.1.2 CADAFE en el Estado Aragua

El proceso de distribución y comercialización de la energía eléctrica generada y transmitida por CADAFE para la Región Central del país se realiza a través de la empresa filial ELECENTRO, la cual es responsable del manejo de los C.O.D de los estados de esta región.

Por otra parte la información proveniente de las subestaciones de 115 kv, no llega directamente a los Centros de Operación y Distribución, sino que primero pasa al Despacho de Carga Central La Mariposa, y éste la envía posteriormente al C.O.D.

I.1.3 Sistema de Supervisión y Control de subestaciones eléctricas de CADAFE

En la actualidad los sistemas de supervisión, control y comunicación de CADAFE y sus empresas filiales no cumplen su tarea en forma eficiente. La transmisión inalámbrica entre las subestaciones se efectúa con equipos que desde hace un tiempo no han tenido un desempeño satisfactorio, ya que la velocidad a la cual se realiza la transmisión de los datos de este sistema es de 300 bps, y las prestaciones de los equipos utilizados no cubren los mínimos requerimientos para la implementación de nuevas herramientas de supervisión como: televigilancia sobre IP, voz sobre IP y telemetría remota.

Particularmente las subestaciones no atendidas (de 34,5 kv) cuentan con un sistema de monitoreo automatizado de subestaciones eléctricas llamado "Sistema de Teleseñal" el cual quedó totalmente fuera de servicio debido al deficiente mantenimiento de sus partes.

Las subestaciones atendidas (de 115 kv) tienen únicamente un sistema de comunicaciones vía telefónica que permite comunicar a los operadores con el Despacho de Carga y con el C.O.D.

I.1.4 Detalles técnicos y requerimientos del proyecto

Para mitigar las fallas y limitaciones mencionadas, CADAFE planteó un proyecto cuyos detalles técnicos y requerimientos se incluyeron en la Licitación General Nro. 2005-DT-014 "Actualización y Ampliación de los Sistemas de Supervisión, Control, y Comunicaciones Asociados a los Centros de Operación y Distribución (C.O.D)".

A continuación se enumeran los aspectos relevantes de las especificaciones de la licitación mencionada que la empresa PLC de Venezuela consideró para la elaboración de su propuesta y que fueron utilizados para los cálculos y diseños realizados en el presente trabajo:

1. Acatar las recomendaciones IEEE 802.11, 802.16-2004 y Normas ETSI

2. Redundancia en aspectos fundamentales

3. Servicios de voz, data y video sobre IP

4. Distancia máxima para enlaces Punto a Punto (PTP) superior a 80 km. y Punto a Multipunto (PMP) superior a 25 km.

5. Mutua autentificación de la base y la unidad de subscriptor.

6. Equipos nuevos. Homologados por CONATEL.

7. Radios que operen en la banda de 5.8 GHz con tecnología OFDM, capaces de configurarse para enlaces PTP o PMP

8. Conexión de red 10/100Base T y puerto de administración RS-232 serial.

9. Torres de 15 m. de altura mínima, con capacidad de al menos cinco radios para enlaces PTP.

10. Interfaz E1 en las subestaciones que requieran conexión con la red de fibra óptica de CADAFE.

El sistema debía estar diseñado de forma tal que las subestaciones de 34,5 kv estuvieran comunicadas con el C.O.D de la zona respectiva y las subestaciones de 115 kv comunicadas primero con el Despacho de Carga y luego con el C.O.D.

I.2Propuesta de PLC de Venezuela

En respuesta a la Licitación General Nro. 2005-DT-014, la compañía PLC de Venezuela, elaboró una oferta que especifica las antenas y equipos de radio seleccionados para conformar la red inalámbrica, y los distintos dispositivos que conformarían las Redes de Área Local de cada subestación.

Las antenas y radios digitales propuestos son de la marca Redline Communications, usando antenas de panel de plano modelo A2804MTF, parabólicas modelo A3104RWP y antena sectorial modelo A6017RWS. En el caso de los radios, se utilizaron los modelos AN30 y AN50. (Ver Apéndice B. Equipos Redline Communications)

PLC de Venezuela propuso además el diseño de dos arquitecturas de redes de área local (LAN) para subestaciones de 34,5 Kv y 115 Kv. Éstas pueden observarse las Figuras A.1 y A.2 del Anexo A respectivamente.

Para cada subestación se propuso para la interconexión de dispositivos el Switch *Ethernet Moxa* EDS-508-T, que tiene ocho puertos, tres de los cuales se utilizarán para comunicar los servicios de televigilancia, voz y datos sobre IP y el resto se distribuirá entre los radios de la subestación y entradas para computadoras del personal.

I.3 Objetivos

I.3.1 Objetivo General

Establecer los requerimientos técnicos necesarios para la instalación de una red de interconexión inalámbrica de las subestaciones de la empresa CADAFE y del C.O.D ubicado en la ciudad de Maracay para la Región Central del país.

I.3.2 Objetivos Específicos

1. Revisar antecedentes, detalles técnicos y requerimientos del proyecto

2. Investigar las coordenadas exactas de subestaciones, puntos de repetición y del C.O.D de Maracay así como del Despacho de Carga Central.

3. Estudiar el perfil de cada uno de los enlaces de la red utilizando el programa Radio Mobile.

4. Realizar cálculos teóricos para comprobar la factibilidad de los enlaces.

5. Diseñar la topología de la red basándose en los resultados de los cálculos de los enlaces obtenidos, en las características de los equipos y en el perfil topográfico de la zona.

6. Realizar la distribución de los equipos en las distintas subestaciones, puntos de repetición, Despacho de Carga La Mariposa y en el C.O.D.

7. Diseñar el plan de uso de frecuencias para la red inalámbrica.

8. Diseñar una Red de Área Local (LAN) para cada subestación

9. Realizar el esquema de direccionamiento IP para todos los equipos asociados a la red.

10. Implementar las Redes VPN que sean necesarias para la interconexión IP de las diferentes redes LAN de cada una de las subestaciones.

I.4 Justificación

I.4.1 CADAFE en Venezuela

CADAFE, creada en 1958, ha logrado desarrollar una infraestructura eléctrica en generación, transmisión y distribución que permite alcanzar un alto grado de electrificación del territorio nacional.

En la actualidad, el proceso de distribución y comercialización de la energía eléctrica generada y transmitida por CADAFE se realiza a través de una red de distribución de subestaciones con las cuales se proporciona energía eléctrica a más de dos millones de suscriptores del sector privado o público a nivel nacional.

Electricidad del Centro (ELECENTRO) es la empresa encargada de la distribución de energía de Aragua y es responsable de las subestaciones relacionadas al C.O.D Maracay, C.O.D Cagua y C.O.D Aragua, a través de las cuales se provee el servicio de energía eléctrica a aproximadamente un millón y medio de habitantes que se encuentran principalmente distribuidos entre las ciudades Maracay, Turmero, El Limón, La Victoria, Cagua y Villa de Cura.

I.4.2 Fallas o problemas en líneas eléctricas

Las líneas eléctricas son propensas a sufrir variaciones en la tensión o interrupciones que pueden ocasionar fallas o problemas en la distribución de energía eléctrica. La ocurrencia de tales eventos y la falta de un sistema de supervisión y control adecuado ocasionan que una zona específica se quede sin servicio eléctrico hasta que los suscriptores notifiquen a la empresa la falla.

I.5 Alcance y Limitaciones

La empresa PLC de Venezuela se ha comprometido a diseñar y ejecutar un proyecto, financiado por CADAFE, que tiene como objetivo principal actualizar y ampliar el sistema de transmisión inalámbrica de esta empresa, para la supervisión y control de subestaciones y Centros de Operación y Distribución, siguiendo sus exigencias y las de sus empresas filiales.

El proyecto a realizar por PLC de Venezuela, comprende el suministro e integración de un sistema de control, supervisión y transmisión de datos para subestaciones eléctricas en toda la zona del territorio nacional. Para esto, en cada subestación se implementará una Red de Área Local, en la cual se integrarán

Servicios de Voz sobre IP (*VoIP*), Televigilancia sobre IP y Monitoreo, Control y Telemetría Remota vía IP.

Este proyecto estará enfocado al estudio técnico y teórico de aspectos relevantes para el establecimiento de los enlaces inalámbricos PTP y PMP, al diseño de la topología de la red y a la elaboración de esquemas de direccionamiento IP de los equipos de las redes de área local para las subestaciones y otros nodos de la red.

Debido a la gran cantidad de subestaciones responsabilidad de CADAFE y sus empresas filiales, el presente estudio se realizará únicamente para las subestaciones ubicadas en la Región Central del país, relacionadas al C.O.D de Maracay.

CAPITULO II. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se describen los conceptos básicos de la tecnología de transmisión vía microondas y se establecen las ecuaciones y principios necesarios para realizar cálculos en enlaces dentro de la banda de frecuencias correspondiente. Se describen, además, elementos de las Redes de Área Local y del protocolo Ethernet que se utilizaron para el desarrollo del proyecto, así como para el análisis de los resultados y conclusiones.

II.1 Enlace de microondas

Las microondas son ondas electromagnéticas en el espectro de frecuencias comprendido entre 0,3 y 300 GHz. Los enlaces a frecuencias dentro de éste rango, la señal puede verse distorsionada o atenuada por distintos factores que se describen a continuación:

II.1.1 Atenuación por lluvia

La atenuación por lluvia de un enlace depende de la cantidad de agua que exista en el aire, del tamaño de las gotas y de su deformación al caer, además varía según la polarización y frecuencia de la señal.

Es posible estimar la atenuación por lluvia a largo plazo para frecuencias de hasta 40 GHz, según la Recomendación de la UIT–P.530, a través de la ecuación:

$$Llluvia_{dB} = \gamma_{R,f}.defect$$

Ecuación 1. R-REC-P.530-10 (2005)

Siendo $\gamma_{R,f}$ la atenuación específica medida en dB/km que depende de la frecuencia a la cual se realiza la comunicación y de la intensidad de precipitación *R* (mm/h) durante el 0,01% del tiempo y la longitud efectiva del trayecto (*defect)* que se obtiene según la ecuación 2. *R* varía según la región en la cual se encuentre el enlace. Para Venezuela tiene un valor de 95 mm/h.

$$defect = \frac{d}{1 + \frac{d}{35.e^{-0.015.R}}}$$

Ecuación 2. Fuente: UIT REC-P.530-10 (2005)

Donde *d* es la longitud real del enlace en km.

En el Anexo B, se observa un nomograma a través del cual es posible obtener la atenuación específica ($\gamma_{R,f}$) a una frecuencia y polarización determinada si se conoce la intensidad de precipitación de la región.

II.1.2 Atenuación por gases

Recomendación UIT-R P.676-5 (aprobada en Febrero/2005):

"La atenuación específica en frecuencias de hasta 1 000 GHz debida al aire seco y al vapor de agua puede evaluarse con gran exactitud para cualquier valor de presión, temperatura y humedad. Para ello se suman cada una de las rayas de resonancia debidas al oxígeno y al vapor de agua, junto con los pequeños factores adicionales debidos al espectro de oxígeno no resonante de Debye, por debajo de 10 GHz" (p.1)

La atenuación por gases en un enlace de longitud *d*, se puede obtener de:

$$Lgases_{dB} = (\gamma_w + \gamma_o).d$$

Ecuación 3. Fuente: Rec. UIT-R P. 676-5 (2005)

Donde γ_w y γ_o (db/km) son las atenuaciones específicas del vapor de agua y del oxígeno respectivamente. En el Anexo C se encuentra un gráfico en el cual se presentan los valores de γ_w y γ_o en función de la frecuencia. (Rec. UIT-R P.676-5, 2005)

II.1.3 Pérdidas por Reflexión

La reflexión ocurre cuando una onda que se propaga a través de la atmósfera incide en una superficie extensa, aproximadamente plana, que genera una onda incidente y otra reflejada. Las pérdidas por reflexión se generan cuando la onda reflejada incide en el receptor. (BARBOZA, 1996)

El ángulo con el que incide la onda (ψ) y la impedancia de la superficie en la que se refleja (Z), determinan el coeficiente de reflexión (*R*) según la relación:

$$R = \frac{sen(\psi) - Z}{sen(\psi) + Z} = |R|.e^{-j\beta}$$

Ecuación 4. Fuente: BIANCHI (1997)

La impedancia del suelo, varía según la polarización de la onda incidente y la permitividad (ε_r) y conductividad (σ) del terreno:

$$Zv = \frac{\sqrt{\varepsilon o - cos\,2\psi}}{\varepsilon o}$$

Ecuación 5. Fuente: Universidad de Vigo (s.f)

$$Zh = \sqrt{\varepsilon o - cos 2\psi}$$

Ecuación 6. Universidad de Vigo(s.f)

El ángulo Ψ en mrad depende de las alturas del transmisor (*htx*), del receptor (*hrx*) y de la distancia entre ambos (*d*):

$$\Psi = \frac{htx + hrx}{d}$$

Ecuación 7. Fuente: FERNANDEZ (2003)

ε_o puede obtenerse a través de la ecuación:

$$\varepsilon_o = \varepsilon_r - j60\sigma\lambda$$

Ecuación 8. Fuente: Universidad de Vigo (s.f)

En el Anexo D se observa una gráfica que muestra valores típicos de permitividad (ε_r) y conductividad (σ) para diferentes tipos de terrenos en función de la frecuencia.

Existen dos modelos para calcular la ubicación del punto de reflexión y las pérdidas en el enlace debido a este fenómeno: el modelo de reflexión de tierra plana y el de tierra esférica. El uso de estos depende de la longitud (*d*) del enlace y de la frecuencia de trabajo del mismo. Se utiliza el modelo de reflexión de tierra plana para enlaces que cumplan con la relación 9, de lo contrario se utiliza el modelo de reflexión de tierra esférica.

$$d < 10\lambda^{1/3}$$

Ecuación 9. Universidad de Vigo (s.f)

Donde es la λ longitud de la onda y *d* la distancia del enlace en m.

Para ubicar el punto de reflexión en el modelo de tierra plana se utilizan relaciones geométricas que conducen a las ecuaciones:

$$d1 = \frac{htx.d}{htx + hrx}$$

Ecuación 10. Universidad de Vigo (s.f)

$$d2 = \frac{hrx.d}{htx + hrx}$$

Ecuación 11. Universidad de Vigo (s.f)

Siendo d1 y d2 la distancia del punto de reflexión al transmisor y al receptor respectivamente en km, htx altura del transmisor, hrx altura del receptor en metros.

Las pérdidas por reflexión sobre tierra plana en db se calculan mediante la expresión:

$$Lreflex_{dB} = -10.log\left[1 + (|R|^2 + 2.|R|.cos(\beta + \Delta fase)\right]$$

Ecuación 12. Fuente: FERNANDEZ (2003)

Donde R es el coeficiente de reflexión, β su ángulo y $\Delta fase$ la diferencia de fase entre el rayo directo y el reflejado, la cual se obtiene de la siguiente relación:

$$\Delta fase = \frac{4.\pi.htx.hrx}{\lambda.d}$$

Ecuación 13. Fuente: FERNANDEZ (2003)

Para ubicar el punto de reflexión en el modelo para tierra esférica, se utilizan dos constantes (p y ϕ) las cuales se definen según las siguientes relaciones:

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{6{,}37.k..(htx+hrx) + \left(d/2\right)^2}$$

Ecuación 14. Fuente: FERNANDEZ (2003)

$$\phi = cos^{-1}.\left[\frac{12{,}74.k.|htx - hrx|.d}{p^3}\right]$$

Ecuación 15. Fuente: FERNANDEZ (2003)

La distancia del punto al transmisor d_1 se obtiene a través de la ecuación:

$$d1 = \frac{d}{2} + p.cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right)$$

Ecuación 16. Fuente: BARBOZA DE VIELMA (1996)

Además, para modelo de tierra esférica es necesario realizar la corrección de las alturas de los extremos del enlace. Esto se realiza a través de las relaciones:

$$htx' = htx - \frac{4.d1^2}{51.k}$$

Ecuación 17. Fuente: FERNANDEZ (2003)

$$hrx' = hrx \quad \frac{4.d2^2}{51.k}$$

Ecuación 18. Fuente: FERNANDEZ (2003)

htx' y *hrx'* es la altura en metros del transmisor considerando la corrección realizada para el modelo de tierra esférica

Las pérdidas de reflexión según el modelo de tierra esférica se calculan a través de la siguiente relación:

$$Lreflex_{dB} = -10.log\left[1 + |Re|^2 + 2.|Re|.cos(\beta + \Delta fase)\right]$$

Ecuación 19. Fuente: FERNANDEZ (2003)

Siendo *Re* el coeficiente de reflexión esférico que resulta de la multiplicación del coeficiente de reflexión *R* por un factor de divergencia *D*, que se obtiene de la ecuación:

$$D = \left(\frac{1 + 5.d1^2.d2}{16.k.d.htx'}\right)^{1/2}$$

Ecuación 20. Fuente: FERNANDEZ (2003)

II.1.4 Pérdidas de espacio libre (PEL)

Las Pérdidas de espacio libre (PEL) son aquellas que no se ven afectadas por la presencia de la tierra y se calculan a través de la ecuación:

$$PEL(dB) = 92{,}45 + 10\log(f) + 10\log(d)$$

Ecuación 21. Fuente: Rec. UIT-R P. 525-2 (2005)

Donde f es la frecuencia en GHz y d es la distancia entre los extremos del enlace en km. (Rec. UIT-R P. 525-2, 2005)

II.1.5 Pérdidas por difracción

Las pérdidas por difracción ocurren cuando en la trayectoria del rayo, hay un obstáculo de tamaño mucho mayor a la longitud de onda que elimina parcial o totalmente la señal. (Zuluaga y cols, s.f)

Por el contrario, si el enlace tiene línea de vista se evitan las pérdidas por este fenómeno. Se considera que un enlace tiene línea de vista cuando al menos el 60% de la primera zona de Fresnel se encuentra despejada.

Las zonas de Fresnel son regiones sucesivas del espacio que se forman en el trayecto del rayo entre el transmisor y el receptor y se incrementan en $n\lambda/2$ respecto al haz directo, siendo λ la longitud de la onda y n un número natural. (CORREA y cols, 2005)

El radio de la primera zona ($r1$) se puede calcular a través de la ecuación:

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}}$$

Ecuación 22. Fuente: CORREA (y cols) (2005)

Siendo d_1 y d_2 las distancias relativas del punto donde se calcula el radio a los extremos del enlace y d la suma de ambas.

II.1.6 Margen de Desvanecimiento

El margen de desvanecimiento (MF, *margen de fading*) es resultado de la resta en unidades logarítmicas entre la sensibilidad del receptor S_R y la potencia de la señal recibida P_R como se determina en la ecuación:

$$MF = P_R - S_R$$

Ecuación 23. Fuente: VARELA (s.f)

Representa uno de los parámetros que determina la factibilidad del sistema. Para lo cual debe tomar valores sobre cero.

Para calcular la potencia en el receptor en un sistema real, es necesario considerar las pérdidas que afectan el enlace y las ganancias de la antena transmisora y de la receptora. La *ecuación de Friis* a continuación, muestra la relación entre estos factores y P_R en unidades logarítmicas:

$$P_R = P_t - \sum L + G_t + G_r$$

Ecuación 24. Fuente: VARELA (s.f)

Donde Pt es la potencia de salida del transmisor, Gt y Gr son las ganancias de las antenas transmisora y receptora respectivamente, y L incluye las pérdidas por

reflexión, atenuación por lluvia y gases, pérdidas del espacio libre (PEL) y pérdidas de la línea de transmisión.

II.1.7 Probabilidad de desvanecimiento

La señal transmitida puede sufrir variaciones con respecto al valor nominal de recepción. Éstas son generalmente ocasionadas por multitrayectoria (aparición de varios caminos de propagación entre el transmisor y receptor), de forma que se produce interferencia entre el rayo directo y los rayos que tras recorrer otros trayectos, alcanzan la antena receptora con diversos ángulos, produciendo en el receptor un campo de amplitud variable y fase aleatoria.

El comportamiento de las condiciones del espacio que causan el desvanecimiento de la señal, se puede agrupar para efectos probabilísticos en probabilidad de desvanecimiento plano y probabilidad de desvanecimiento selectivo, siendo la probabilidad total la suma de ambas.

$$Pt = P_{plano} + P_{selectivo}$$

Ecuación 25. Fuente: VARELA (s.f)

II.1.7.1 Probabilidad de desvanecimiento plano

La probabilidad de desvanecimiento plano (*Pp*) es la probabilidad de que ocurra un desvanecimiento en la señal que resulte mayor al margen de desvanecimiento. La probabilidad de ocurrencia decrece por cada 10 db de desvanecimiento obedeciendo a la Distribución de Rayleigh.

$$Pp = Po.10^{-MF/10}$$

Ecuación 26. Fuente: VARELA (s.f)

Siendo *MF* el margen de desvanecimiento y *Po* el factor de ocurrencia de desvanecimiento.

Según el Prof. Francisco Varela, existen cuatro métodos utilizados para evaluar *Po*, estos son: el Método Vigants-Barnet, Método Morita y el Método ITU Recomendación 530–5 de Planificación Inicial y de Planificación Detallada.

El método de planificación Inicial permite calcular el factor de ocurrencia de desvanecimiento (*Po*) sin información detallada del perfil de la trayectoria.

$$Po = K.d^{3.6}.f^{0.89}.(1 + |Ep|)^{-1.4}$$

Ecuación 27. Fuente: VARELA (s.f)

Donde *d* es la longitud del trayecto (km), *f* la frecuencia de trabajo (GHz), *K* el factor geoclimático y *Ep* la inclinación del terreno (mrad).

La inclinación del terreno (*Ep*) se obtiene a partir de la siguiente ecuación donde *h1* y *h2* son las alturas de las antenas de los extremos del enlace.

$$Ep = \frac{(h1 - h2)}{d}$$

Ecuación 28. Fuente: VARELA (s.f)

K se estima a partir de la siguiente relación:

$$K = 5{,}0.10^{-7}.P_L.10^{-0.1(Co-Clat-Clon)}$$

Ecuación 29. V Fuente: VARELA (s.f)

donde P_L es un dato meteorológico que indica el porcentaje de tiempo en que el gradiente de refractividad promedio es menor a los 100 N/Km. Para Venezuela tiene un valor de 20%. (REP 563 de la ITU – R, s.f).

El coeficiente C_{LAT} de latitud ς es dado por:

$C_{LAT} = 0$ (dB)	$53\ ºS \geq \varsigma \geq 53ºN$
$C_{LAT} = -53 + \varsigma$ (dB)	$53ºN$ ó $ºS \leq \varsigma \leq 60ºN$ ó $ºS$
$C_{LAT}t = 7$ (dB)	$\varsigma \geq 60ºN$ ó $ºS$

El coeficiente de longitud C_{lon} dado por:

$C_{lon} = 3$ (dB)	Europa y Africa
$C_{lon} = -3$ (dB)	Norte y Sur América
$C_{lon} = 0$ (dB)	otras.

Co depende del terreno tal que:

Co= 0 (dB)	Altitud de la antena= 0 – 400 m, planos
Co= 3,5 (dB)	Altitud de la antena= 0 – 400 m, ondulados
Co= 2,5 (dB)	Altitud de la antena= 400 – 700 m, planos
Co= 6 (dB)	Altitud de la antena= 400 – 700 m, ondulados
Co= 5,5 (dB)	Altitud de la antena= 700 m y más, planos
Co= 8 (dB)	Altitud de la antena= 700 m y más, ondulados
Co= 10,5 (dB)	Altitud de la antena= 700 m y más, montañosos

II.1.7.2 Probabilidad de desvanecimiento selectivo

La Probabilidad de desvanecimiento selectivo ocurre cuando la dispersión del haz del rayo directo se combina con una señal reflejada en una superficie dando lugar a trayectos múltiples que producen desvanecimiento de la señal y se traducen en reducción en la calidad de funcionamiento. (REC. UIT-R P.530-10, 2001)

II.1.8 Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de un sistema, de no fallar en un determinado período de tiempo. Se calcula como se observa en la ecuación 30, considerando que ésta resulta el complemento de la probabilidad de desvanecimiento total (*Pt*) máxima que puede tener un equipo a una tasa de bits con error (BER, *Bit Error Rate*) determinada. (UIT REC -G.821, G.826)

$$c(\%) = 100 - Pt$$

Ecuación 30. VARELA (*s.f*)

Se han diseñado técnicas que mejoran y mantienen la confiabilidad del sistema. Entre éstas se encuentra la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) que se describe a continuación:

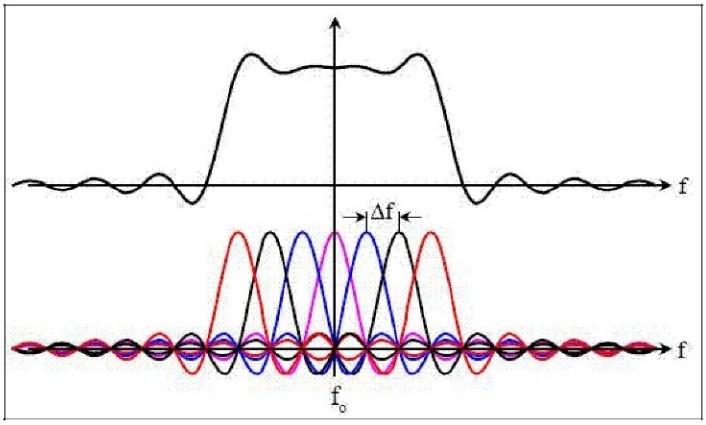
II.2 OFDM

En esta técnica de multiplexación, en vez de transmitir la información en una única portadora, se divide el ancho de banda disponible en un número elevado de subportadoras ortogonales entre sí, cada una de las cuales transporta un ancho de banda muy pequeño, consiguiendo un mejor aprovechamiento del ancho de banda y

haciendo que la respuesta del canal sea aproximadamente plana para cada una de las portadoras. Esto hace que se eliminen los problemas generados por la interferencia intersímbolo (ISI) y la complejidad de la ecualización adaptativa.

OFDM permite solucionar problemas en enlaces inalámbricos que se generan debido a la propagación multicamino, ya que en OFDM el desvanecimiento selectivo es localizado en subportadoras que son relativamente fáciles de ecualizar.

La Figura 1 que se presenta a continuación, se observa el espectro de las subportadoras en la modulación OFDM donde la distancia en frecuencia entre ellas es de *Δf*.



Fuente: http://www.ualberta.ca/~mahmoodi/thesis.html, s,f

Figura 1. Espectro de una señal modulada en OFDM.

II.3 Modulación Adaptativa

Otra técnica utilizada es la modulación adaptativa en la cual el esquema de modulación utilizado para la transmisión de la señal varía según la longitud del enlace. Los tipos de modulación son BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM.

BPSK es el método menos eficiente, y se emplea para las mayores longitudes por lo que requiere más potencia para realizar la transmisión. Por otro lado, 64QAM, es el esquema de modulación de mayor grado, que maneja la más alta velocidad de transferencia de bits, se utiliza para las menores longitudes y requiere la más baja potencia para la transmisión.

Para mantener una misma confiabilidad en los esquemas de modulación mencionados a una misma BER, es necesario aumentar la relación señal a ruido S/N del sistema a medida que se selecciona un esquema de grado superior. (Universidad Nacional de Rosario, s.f)

II.4 Elementos de sistemas microondas

II.4.1 Antena

Según Barboza de Vielma (1996), las antenas son dispositivos usados para la emisión o recepción de ondas electromagnéticas que funcionan generando una distribución de tensión y corriente producto de conectar una fuente de corriente alterna en los terminales de la misma. Las tensiones y corrientes generadas varían de acuerdo a las dimensiones y tipos de antenas.

Según sus características de radiación, las antenas pueden clasificarse en direccionales, omnidireccionales o sectoriales. Las antenas direccionales son aquellas que irradian toda su energía en una misma dirección. El tipo más utilizado en la actualidad es la antena parabólica, la cual tiene una alta ganancia. Las antenas omnidireccionales pueden irradiar en todas las direcciones y las sectoriales concentran la mayor cantidad de energía en una zona cuya apertura varía según la antena.

Independientemente del tipo de antena, todas poseen cierta orientación en el tiempo del campo eléctrico radiado respecto a una dirección dada y este parámetro define la polarización de la antena. La polarización puede ser lineal (horizontal o vertical), circular o elíptica.

Si los componentes del vector del campo eléctrico $\bar{E}$ de una onda electromagnética tienen la misma magnitud, fase y frecuencia, de modo que el vector resultante esté siempre en un mismo plano, y su extremo describa una línea, se dice que la onda está linealmente polarizada y dependiendo la polarización del vector $\bar{E}$ con respecto al plano horizontal la polarización puede ser vertical u horizontal. (Barboza de Vielma, 1996)

II.5 Red de Área Local (LAN - Local Area Network)

Las Redes de Área Local son redes de propiedad privada ubicadas en un área limitada en su extensión. Son utilizadas para conectar computadoras y otros dispositivos con el objetivo de compartir recursos e intercambiar información.

Existen cuatro arquitecturas predominantes en las redes LAN. Éstas son: Red de anillo con paso de testigo (*Token Ring*), Red en bus con paso de testigo (*Token Bus*), Interfaz de datos distribuidos de fibra (FDDI) y la más utilizada en la actualidad: Ethernet. (*Tannenbaum, A, 1997*)

II.5.1 Ethernet

Ethernet o IEEE 802.3 realiza el envío y recepción de datos entre los equipos conectados a la red sobre un medio físico compartido que se comporta como un bus

lógico. Es un medio no confiable ya que no proporciona mecanismos para verificar que las tramas fueron recibidas.

El diseño original de Ethernet, funcionaba a 2,94 Mbps, luego se adaptó para enviar datos a 10 Mbps y en la actualidad existen versiones mejoradas que trabajan a 100 Mbps (*Fast Ethernet*), 1 Gbps (*Gigabit Ethernet*) o 10 Gbps (*10 Gigabit Ethernet*). Para el futuro se esperan versiones que operen a 40 Gbps y 100 Gbps.

Para la transmisión se utiliza la técnica CSMA/CD (Portadora sensible a acceso múltiple con detección de colisiones o *Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection*) en la cual una estación sondea el canal para ver si está libre u ocupado y de esta manera abortar la transmisión o persistir para realizarla. Además, si detecta que hay una colisión genera una señal de aviso para asegurar que el resto de las estaciones de la red tengan conocimiento de la colisión. Para adaptar dinámicamente el número de estaciones que intentan transmitir, se utiliza el algoritmo de retroceso exponencial binario (*binary exponential backoff*), el cual asegura que la colisión se resolverá en un intervalo razonable cuando hay muchas estaciones que colisionan.

Se definen dos categorías de Ethernet: banda base que se subdivide en 10Base5, 10Base2, 10Base-T, 10Base5 y 100Base-T, y banda ancha cuya una única especificación es 10Broad36. Para todos los casos el primer número indica la tasa de transmisión de datos en Mbps y el último número o letra indica el tipo de cable o su máxima longitud y la palabra Base indica que trabaja en Banda Base. (León-García y Widjaja, 2002)

II.5.2 Switch Ethernet

Un *Switch* o conmutador permite interconexiones de múltiples segmentos de red a grandes velocidades haciendo el intercambio de tramas entre redes.

Trabaja en la capa física y de enlace de datos del modelo OSI, procesando la información de las tramas recibidas y manejando las tablas de dirección, la cual indica en qué segmento está ubicada una dirección MAC, para retransmitir la información recibida a todos sus puertos excepto a aquel por el cual la recibió.

Algunos conmutadores Ethernet permiten implantar redes redundantes utilizando el protocolo STP (*spanning tree protocol*), el cual proporciona un método de determinación de las trayectorias entre las estaciones de una red evitando los lazos cuando hay múltiples trayectorias activas entre las estaciones.

Para esto, STP genera una red lógica en forma de árbol sobre una estructura física en forma de malla, permitiendo una única trayectoria activa a la vez entre dos puntos de una red. (Instituto Tecnológico La Paz, s.f)

Para la asignación de direcciones, algunos switch ethernet pueden tener un servidor con protocolo dinámico de configuración de estación (DHCP, *Dynamic Host Configuration Protocol*), el cual permite la asignación automática y temporal de direcciones IP para los clientes de una red local. Es una mejora del protocolo de arranque (Bootp, Bootstrap *protocol*) y compatible con él (Forouzan, 2002).

CAPITULO III.

METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Este capítulo describe las actividades realizadas y los métodos, técnicas y procedimientos utilizados durante la elaboración de este trabajo.

Las actividades se agrupan en tres fases:

Fase I: Documentación y levantamiento de Información

Fase II: Estudio técnico y diseño

Fase III: Análisis de resultados, elaboración de conclusiones y recomendaciones

III.1 Fase I: Documentación y levantamiento de información

En la fase inicial se realizó una investigación que sirvió como base para el cálculo de los enlaces y el diseño de la red inalámbrica para supervisión y control de subestaciones de CADAFE.

Se utilizaron para ello distintas publicaciones de dominio público (libros, revistas, licitaciones, etc.) y documentación privada suministrada por la empresa PLC de Venezuela y CADAFE (manuales, planos, etc.). Además se realizaron entrevistas a profesionales de las empresas involucradas con experiencia en el área y a profesores de distintas Universidades dedicados al tema.

A continuación se presentan los aspectos estudiados e investigados para la Fase I:

III.1.1 Estudio de detalles técnicos, requerimientos y antecedentes del proyecto

Se realizó el estudio de la red de interconexión inalámbrica para control, supervisión y comunicación de subestaciones en la Región Central del país relacionadas al C.O.D de Maracay, con el fin de observar el funcionamiento actual y evaluar los problemas y fallas que presenta.

Para el estudio de los detalles técnicos y requerimientos del proyecto se revisaron las especificaciones de la *Licitación General Nro. 2005-DT-014 "Actualización y Ampliación de los Sistemas de Supervisión, Control, y Comunicaciones Asociados a los Centros de Operación y Distribución (C.O.D)"* elaborada por CADAFE, así como la oferta de PLC de Venezuela que especifica equipos propuestos para conformar la red inalámbrica y para las redes de área local de cada subestación.

III.1.2 Investigación y estudio de equipos

Se recopiló y revisó documentación de los radios digitales marca *Redline Communications* modelos AN50 y AN30 y de las antenas propuestas.

Las Tablas B.1 y B.2 del Apéndice B agrupan los parámetros relevantes para cada equipo y para cada una de sus configuraciones posibles.

Los radios tienen un ancho de banda de 20 MHz y una alta capacidad para el intercambio de datos. Ambos pueden trabajar en la banda de uso libre de 5,8 GHz, y soportan enlaces punto a punto de hasta 80 km de longitud con línea de vista (*LOS, Line of Sight*) y de 10 km para enlaces sin línea de vista (NLOS, *Non Line of Sight*).

Su terminal se encuentra *Indoor* (dentro de la caseta) pero el transceptor está *Outdoor* (a la intemperie) adherido a la antena.

Los dos modelos seleccionan automáticamente el esquema de modulación a utilizar (BPSK, QPSK, 16QAM ó 64QAM) de acuerdo a las características del enlace, aprovechando eficientemente el ancho de banda del espectro y midiendo continuamente el nivel de la relación señal a ruido (*S/N*) para garantizar la continuidad del servicio del sistema.

Ambos utilizan multiplexación por división de frecuencia ortogonal (*OFDM*) para la transmisión inalámbrica, consiguiendo un mejor aprovechamiento del ancho de banda y eliminando la probabilidad de desvanecimiento selectivo. Cuentan además, con una técnica de Repetición Automática de Respuesta (*Authomatic Repeat Request, ARQ*), que reduce los posibles errores de interferencia.

Aplican la técnica de duplexación por división de tiempo dinámica (*Time Division Duplex, TDD*) con la cual el tráfico en los dos sentidos se transmite sobre el mismo canal.

El modelo AN50 puede configurarse para operar de modo punto a punto (PTP) o punto a multipunto (PMP). Los enlaces PMP utilizan Acceso Múltiple por División de Tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*), para asignar los recursos del canal de forma flexible. El AN30 tiene características similares al AN50 pero puede operar únicamente de modo PTP y cuentan con hasta ocho entradas *TDM* para aplicaciones E1/T1.

Los terminales tienen un puerto 10/100 BaseT Ethernet para conectar el radio a un dispositivo para comunicarlo con las redes locales de cada subestación.

Las antenas de panel plano modelo A2804MTF y las parabólicas A3104RWP, están diseñadas para aplicaciones PTP. La principal diferencia entre estas dos antenas es que la segunda tiene mayor ganancia y precio. La antena sectorial A6017RWS tiene

una apertura de 60°, por lo que puede ser utilizada para aplicaciones punto a multipunto.

El *Switch Ethernet Moxa EDS-508-T* propuesto para interconectar los radios y los dispositivos de las redes *LAN* en cada subestación, posee ocho puertos 10/100BaseT y permite gestión remota usa el Protocolo Simple de Gestión (*SNMP*, *Simple Network Management Protocol*) para obtener información de los equipos.

Este dispositivo tiene la capacidad de sostener topologías redundantes a nivel de enlace (Ethernet) con tiempos de recuperación cortos en el caso de fallas y permitiendo la unión de varios anillos en la misma red, gracias al protocolo *TurboRing* diseñado especialmente para conmutadores *Moxa* y el Protocolo de Árbol de Expansión Rápido (*fast spanning tree, 802.1d)* con el cual escoge el camino más eficiente y evita bucles infinitos.

El conmutador propuesto, tiene un mecanismo de calidad de servicio *(Quality of service, QoS*) que le permite inspeccionar las tramas enviadas por los dispositivos para evaluar las etiquetas de clase de servicio (*CoS, Class of Service*) a nivel de enlace y de tipos de servicio (*TOS, Type of Service*) a nivel red, para darle prioridad a la información enviada por un dispositivo frente a otro según el servicio que preste.

El *Switch Ethernet* dispone de un servidor *DHCP/BOOTP* para asignar automáticamente direcciones a los dispositivos conectados que así lo soliciten.

III.1.3 Estudio Teórico

En esta etapa se realizó una extensa investigación para considerar la configuración y diseño de las redes de área local y de las ecuaciones que determinan el cálculo teórico de los enlaces de microondas, elaborándose un marco teórico detallado que

serviría para los cálculos, diseño y otras actividades realizadas en la Fase II, así como para el análisis de los resultados y conclusiones de la Fase III.

III.1.4 Investigación de coordenadas de los nodos de la red

Se consiguió información a través de la empresa CADAFE sobre la ubicación exacta (tomada con GPS) del Despacho de Carga Central La Mariposa, del C.O.D de Maracay y de las subestaciones que se encuentran relacionadas a éste. Además, se obtuvo información de las líneas eléctricas a las que se encuentran relacionadas las subestaciones y de cuáles de éstas se encuentran permanentemente atendidas por un operador y cuales no.

Los detalles de los nodos de la red pueden observarse en el Apéndice C.

III.2 Fase II: Estudio Técnico y Diseño

Una vez estudiados los equipos, requerimientos y aspectos a considerar, se procedió al cálculo de los enlaces y diseño de la red. Esta investigación consta de un análisis topográfico del área, detalles del diseño preliminar y final de la red y del esquema de direccionamiento IP de las subestaciones.

III.2.1 Análisis Topográfico de las áreas involucradas

Se realizó el estudio topográfico de la zona que abarcan los enlaces de la red inalámbrica utilizando como principal herramienta el programa *Radio Mobile*. Este programa construye automáticamente el perfil del enlace de radio entre los nodos de red ubicados según sus coordenadas, al emplear una extensa base de datos de

elevaciones de terreno en forma digital. Se utilizó para los mapas el formato SRTM (*Shuttle Radar Topography Mision*) ya que éste posee mayor resolución en la información digital y es de dominio público para Latinoamérica.

Se ubicaron en el mapa de *Radio Mobile* las coordenadas de cada subestación, C.O.D, punto de repetición y Despacho de Carga para observar su cota y establecer a continuación los enlaces.

III.2.2 Diseño de la red en *Radio Mobile*:

Una vez ubicadas las subestaciones en el mapa, se observaron las distintas topologías con las cuales se podría construir la red redundante teniendo en cuenta el tipo de subestación, la distancia máxima a la que pueden trabajar los radios (máximo 80 km para enlaces PTP y 40 km para PMP), los equipos propuestos y la frecuencia de trabajo.

Las antenas se ubicaron a 15 m sobre la superficie en los casos donde fue posible, y se aumentó esta altura hasta la mínima necesaria para observar el despeje del 60 % de la primera zona de Fresnel, considerando una altura máxima razonable para las torres de 50 m.

El programa *Radio Mobile* se utilizó, básicamente para estudiar el perfil de cada enlace, observar su longitud, garantizar la existencia de línea de vista.

Se configuró la frecuencia mínima de operación de los radios (5,735 GHz) para obtener la primera zona de Fresnel de mayor radio. La potencia de transmisión de los radios, sensibilidad del receptor, ganancia de las antenas y las características climatológicas de la Región Central del país, se configuraron similares a los del sistema, ya que los cálculos necesarios para garantizar la factibilidad de los enlaces

(para lo cual es necesario considerar los factores mencionados) se realizaron después manualmente.

III.2.3 Ubicación de Estaciones Repetidoras

Luego de observar los distintos enlaces con los que se podría construir la red, se evaluó la necesidad de ubicar puntos de repetición para la interconexión de aquellas subestaciones en las que no existía la posibilidad de establecer un enlace con un perfil apto para la comunicación inalámbrica con otros nodos de la red y para cumplir con el requerimiento de CADAFE de diseñar una red redundante.

Se seleccionaron lugares geográficos para la disposición de las estaciones de repetición que ofrecieran las condiciones necesarias de desempeño confiable del enlace pero procurando utilizar el menor número de las mismas para minimizar en la medida de lo posible los costos.

III.2.4 Cálculos de los Enlaces para las condiciones menos favorables

Para asegurar la factibilidad de la red se realizaron cálculos relevantes de enlaces de microondas utilizando parámetros que representan las condiciones menos favorables en base a las ecuaciones y principios investigados en la Fase III.1.3. Como herramienta para facilitar la organización de los cálculos y resultados se usó el programa *Microsoft Office Excel.*

Se realizó un sondeo de las condiciones climatológicas del país, en específico del Estado Aragua, para determinar el tipo de suelo, el clima, la densidad de la lluvia y otros factores necesarios para el cálculo de los enlaces y se fijó como frecuencia de

operación 5,815 Ghz que corresponde al valor de la frecuencia central del canal superior de los radios AN50 y AN30.

III.2.4.1 Pérdidas por Reflexión

Se estudiaron visualmente en *Radio Mobile* cada uno de los enlaces propuestos y se observó si existía una zona en estos que abarcara una superficie aproximadamente plana en la cual el rayo pudiera reflejarse y ocasionar pérdidas.

Para cada uno de estos enlaces se calculó el posible punto de reflexión identificando su altura aproximada en el programa *Radio Mobile* y usando las ecuaciones 10 y 11 del apartado II.1.3. Se estudió gráficamente el comportamiento del rayo para observar si geométricamente era probable que el rayo reflejado coincidiera con el equipo receptor, teniendo en cuenta que el ángulo de incidencia Ψ es igual al ángulo de reflexión.

El coeficiente de reflexión R se calculó con la Ecuación 4 estimando la impedancia del suelo tanto para polarización vertical (Zv) como para polarización horizontal (Zv) y se asignaron valores correspondientes a la permitividad relativa (ε_r) y conductividad (σ) del terreno según la gráfica Anexo D, considerando que en la región en la que se ubican los nodos de la red el suelo es moderadamente seco.

Se utilizó por último la ecuación 12 del apartado II.1.3 para calcular las pérdidas por reflexión para enlaces en los que se utilizó el modelo de tierra plana y la ecuación 19 para aquellos en los que se utilizó el de tierra esférica.

III.2.4.2 Atenuación por lluvia y por gases

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se contempló la intensidad de la lluvia estimando para Venezuela una intensidad de precipitación *R* es de 95 mm/h, y se utilizó el nomograma de lluvia (Ver Anexo B. Nomograma de lluvia) propuesto en la Recomendación UIT-R P.837 para obtener la atenuación específica en ambas polarizaciones y a 5,815 GHz.

Las pérdidas por gases se calcularon ubicando la atenuación específica a la frecuencia de trabajo en el gráfico propuesto en la Recomendación UIT REC-P.676.5

Se utilizaron las Ecuaciones 1 y 2 del apartado II.1.1 para el cálculo de la atenuación por lluvia para ambas polarizaciones y la Ecuación 3 del apartado II.1.2 para la atenuación por gases.

III.2.4.3 Factor de ocurrencia de desvanecimiento

El factor de ocurrencia de desvanecimiento se calculó utilizando el método de Planificación inicial de la UIT. Se escogió este método debido a que no requiere el conocimiento detallado de la topografía del terreno, incluye parámetros relacionados con el clima, geografía y ubicación de los nodos del enlace e involucra mayor cantidad de variables que los métodos Morita y Vigants–Barnet por lo cual resulta de mayor precisión.

Se les asignó a los coeficientes *Clat* y *Clon* los valores de 0 y 3 db respectivamente, propios de la ubicación en la que se encuentra la red y se estudió la topografía del punto en el cual está ubicado cada nodo para definir *Co*.

III.2.4.4 Niveles de Transmisión y Recepción

Para demostrar la factibilidad de los enlaces se estudió la potencia requerida en el transmisor para obtener el nivel de señal necesario en el equipo receptor, considerando un margen de desvanecimiento determinado por la confiabilidad mínima que deben tener los enlaces en el sistema.

La confiabilidad para un sistema utilizando los equipos seleccionados, debe ser mínimo de 99,999 % que corresponde a una probabilidad de error (*Pe*) de 0,001 % a una *BER* de $10^{-9.}$

Debido a que la probabilidad de desvanecimiento selectivo (P_S) la eliminan los radios utilizando *OFDM* para la transmisión inalámbrica, la probabilidad de error en los equipos se reduce a la probabilidad de desvanecimiento plano (P_L) que depende del factor de ocurrencia de desvanecimiento (*Po)* y del margen de desvanecimiento (*MF*).

Estableciendo la probabilidad de desvanecimiento plano como la máxima probabilidad de error, se utilizó la ecuación 26 del apartado II.1.7 para despejar el margen de desvanecimiento y estimar el mínimo que se debería alcanzar, y resultó:

$$Pp = Po.10^{\left(-MF/10\right)} \longrightarrow MF = -10Log\left(\frac{Pp}{Po}\right)$$

Como se mencionó en la sección III.1.2 los radios digitales AN50 y AN30 varían el esquema de modulación según la longitud del enlace y con esto varía la sensibilidad del receptor. Se utilizó para los cálculos, la sensibilidad correspondiente a la modulación (*BPSK, Binary Phase Shift Keying*) y la correspondiente a la Modulación de Amplitud de Cuadratura (*64QAM, 64 Quadrature Amplitude Modulation*) que resultan ser la de menor y mayor valor respectivamente.

A continuación, se utilizó la ecuación 23 del apartado II.1.6 para calcular la potencia en el receptor. Se consideraron únicamente los valores en los cuales la potencia en el receptor resultó mayor a la sensibilidad para calcular el nivel de señal en el transmisor utilizando la ecuación de Friss (Ecuación 23). En los enlaces en los cuales el nivel en el receptor resultó menor a la sensibilidad, se estableció como potencia del receptor la sensibilidad de los equipos, ya que a pesar de que esto se traduce en que la confiabilidad esperada puede ser alcanzada aún con valores de potencia por debajo de la sensibilidad, el equipo no detectará la señal con una potencia de tamaño tan reducido.

Para el cálculo de la potencia en el transmisor (*Ptx*) se consideraron las pérdidas mencionadas en las secciones anteriores calculadas a la mayor frecuencia y las Pérdidas del Espacio Libre (*PEL*) (Ecuación 21).

No se consideraron pérdidas por Difracción ya que los enlaces establecidos se realizaron con la primera zona de Fresnel despejada. Tampoco se incluyeron pérdidas de la línea entre la antena y el transceptor, ya que el último se encuentra *Outdoor* unido directamente a la antena.

Para la ganancia de las antenas de transmsión (*Gtx*) y recepción (*Grx*) se utilizaron las correspondientes a los modelos A6017RWS y A2804MTF en los enlaces donde se podría implementar una comunicación de tipo *PMP* acorde con las capacidades de los equipos (longitud de ambos enlaces menor a 30 km y estar dentro de los 60° de apertura del punto de acceso). En los enlaces que no cumplían con las condiciones antes mencionadas se utilizaron las características de la antena A2804MTF que resulta de menor ganancia que la antena parabólica modelo A3104RWP consistente con la estimación del peor escenario.

III.2.5 Distribución de los equipos

Para realizar la distribución de radios y antenas en los distintos nodos de la red se consideraron detalles del sistema y características de los equipos que se mencionan a continuación:

III.2.5.1 Red de Fibra Óptica de CADAFE

Se colocaron radios *AN30* en subestaciones a través de las cuales pasa la red de fibra óptica que CADAFE pretende instalar, ya que como se explicó anteriormente, estos radios poseen 8 entradas *TDM* para aplicaciones E1/T1.

De las subestaciones relacionadas al Centro de Operación y Distribución de Maracay, La Horqueta es la única que tiene un punto de conexión con la red de fibra óptica de CADAFE.

III.2.5.2 Tipo de nodo de la red

Se consideró si el nodo de la red correspondía a una subestación, a un punto de repetición, al C.O.D o al Despacho de Carga La Mariposa, ya que cada uno de éstos cumple con una función distinta en el sistema de interconexión y tiene por esto requerimientos particulares.

III.2.5.3 Tipo de comunicación

Los radios AN-50 se distribuyeron dependiendo de si la comunicación de subestación o punto de repetición era punto a punto (*PTP*) o punto a multipunto (*PMP*) según el diseño preliminar de la red.

Para las aplicaciones *PMP* se configuraron en puntos de acceso (*Access Points*) o unidades del subscriptor (*Subscriber Units*) dependiendo de la función del nodo en el enlace.

En los puntos de acceso de los enlaces PMP se distribuyeron antenas de sector plano modelo *A6017RWS*. Las antenas de panel plano modelo *A2804MTF* y las antenas parabólicas modelo *A3104RWP* se utilizaron para aplicaciones PTP y para las unidades del subscriptor según la ganancia necesaria para la utilización de la misma.

III.2.5.4 Canales de frecuencia

La cantidad de radios se ve limitada ya que éstos tienen sólo cinco canales en la banda de frecuencia utilizada y al emplear la misma frecuencia y polarización para enlaces de una misma subestación se podrían ocasionar interferencias cocanal.

III.2.5.5 Costos

Se diseñó la red a fin de obtener la mayor cantidad de comunicaciones punto a multipunto, ubicando radios con configuraciones de puntos de acceso y unidades de suscriptor, ya que a pesar de que los radios configurados para aplicaciones PMP son de mayor precio, se reduce la cantidad de radios a utilizar lo que se traduce en menores costos.

En los enlaces PTP y en las unidades de suscriptor de los enlaces PMP se colocaron antenas de panel plano, ya que su ganancia resultó suficiente y su precio es considerablemente menor (Ver Tabla B.1 Apéndice B).

III.2.6 Asignación de frecuencia

Los Radios Digitales de la marca *Redline Communications* utilizados para la comunicación inalámbrica entre los nodos de la red, trabajan, como se mencionó anteriormente, en la banda libre de 5,8 GHz, que abarca las frecuencias en 5,725 GHz a 5,850 GHz. (Ver Anexo E. Especificaciones de los radios)

Se utilizaron los canales de más baja frecuencia (canales 1, 2 y 3) para que se ocasionaran menores pérdidas por reflexión y por factores atmosféricos, así como pérdidas del espacio libre (PEL).

No se emplearon los canales 1A, 2A y 3A para evitar interferencias de canal adyacente (interferencia ocurrida con dos distintas portadoras). Además, se realizó la asignación de forma que dos enlaces consecutivos no coincidieran en la misma frecuencia y polarización para evitar interferencias cocanal (interferencia en la misma banda de frecuencia).

III.2.7 Cálculos de los enlaces a la frecuencia asignada

III.2.7.1 Pérdidas a la frecuencia asignada

Los cálculos de los enlaces se realizaron por segunda vez, considerando la frecuencia y polarización asignada a cada enlace y la distribución de los equipos.

Para las pérdidas de reflexión se calculó nuevamente el índice de permitividad ya que la longitud de la onda de la cual éste depende varía según la frecuencia asignada.

En el caso de la atenuación por lluvia y gas se contempló la atenuación específica (en 1 Km) a la nueva frecuencia, y para la lluvia, al igual que para las pérdidas por reflexión, se consideró además la polarización de la onda.

El factor de ocurrencia de desvanecimiento se calculó utilizando el mismo método usado en la sección III.2.3.3 (Planificación inicial de la UIT), manteniendo todos los coeficientes correspondientes a la zona y variando únicamente la frecuencia.

III.2.7.2 Potencia máxima y mínima de los equipos

Se calcularon los niveles máximos y mínimos de potencia en el transmisor y receptor para establecer un rango en los cuales se puedan configurar los equipos en los enlaces estipulados y con las condiciones establecidas.

La potencia mínima para el transmisor y el receptor se calculó considerando la confiabilidad mínima de los equipos (99,999 %) de la misma manera que se realizó al plantear el peor escenario posible, pero tomando en consideración la frecuencia asignada.

Para establecer el nivel de potencia máximo de los radios, se fijó la potencia de transmisión dependiendo de la ganancia de transmisión de la antena de cada enlace, de forma tal que la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (*PIRE*) fuera menor que 1 W, valor límite establecido por CONATEL en la *Resolución Contentiva de las Condiciones para la Calificación de los Equipos de Uso Libre. Publicado en Gaceta Oficial No. 37.635 el 19 de febrero de 2003.*

III.2.8 Esquema de direccionamiento IP

Las direcciones IP de los dispositivos de cada una de las redes *LAN* de la subestaciones, se asignaron estáticas y de forma manual.

Para realizar el direccionamiento de esta manera, se estudió la necesidad de deshabilitar el servidor DHCP de cada equipo con el cual se podrían asignar direcciones de manera automática a los dispositivos en un rango determinado de direcciones.

Se utilizaron direcciones de clase C privadas para identificar a cada equipo, separando los servicios en tres redes distintas. Se realizó un "Manual de direcciones" en el que están contenidas las direcciones de cada dispositivo para ubicar con mayor facilidad el equipo teniendo la dirección que le corresponda.

III.2.8.1 Jerarquización de servicios

El *Switch Ethernet Moxa,* al cual los radios digitales entregan los datos recibidos para las subestaciones de 34,5 y 115 kv, puede inspeccionar el campo *TOS* de las

tramas enviadas por cada dispositivo de la red LAN y jerarquizar el tráfico, al darle prioridad a la información relacionada a un dispositivo frente a otro.

La prioridad en la transmisión la tendrían los dispositivos de adquisición de datos, a continuación los dispositivos de VoIP y por último el servidor para cámaras de televigilancia.

Se estudió la propuesta de la empresa PLC de Venezuela, de implantar redes privadas virtuales (VPN, *Virtual Area Network*) para mantener la confidencialidad de los distintos servicios en la red.

III.3 Fase III: Análisis de Resultados, Elaboración de Conclusiones y Recomendaciones

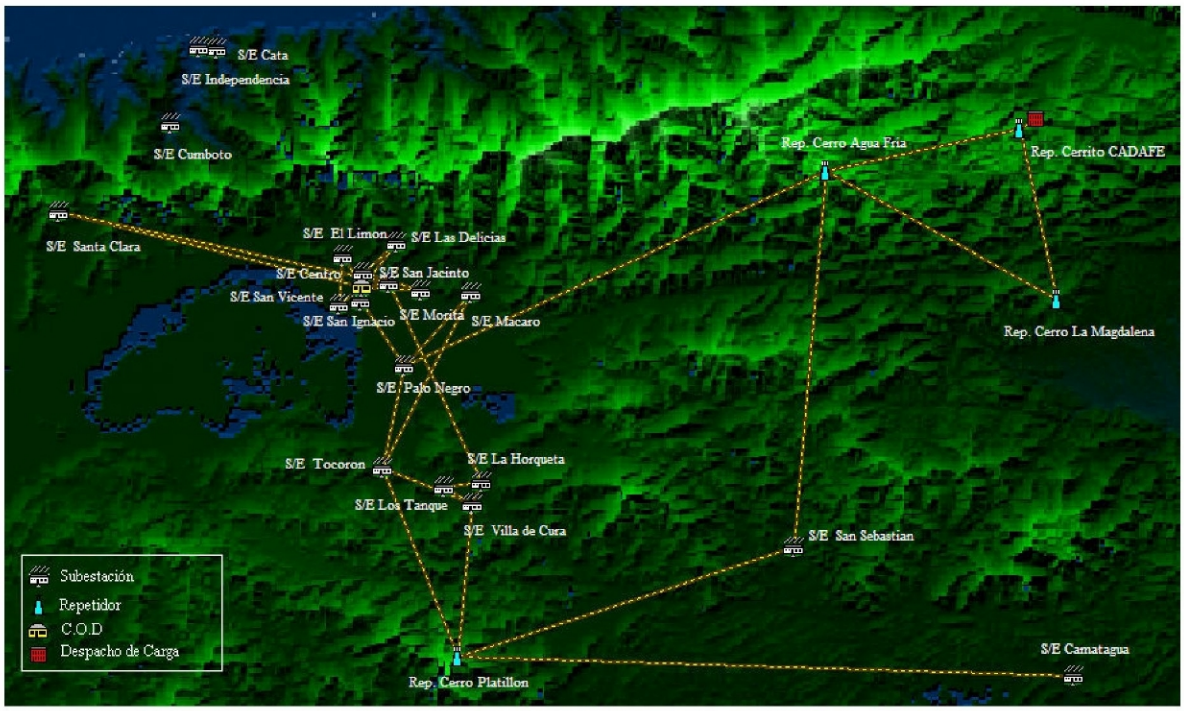
En la última fase del presente trabajo, se analizaron los resultados de los cálculos y del estudio realizado incluídos en el Capítulo IV. Se presentan las conclusiones basadas en el análisis realizado, en la investigación teórica y en el levantamiento de la información.

CAPITULO IV. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto y su discusión detallada.

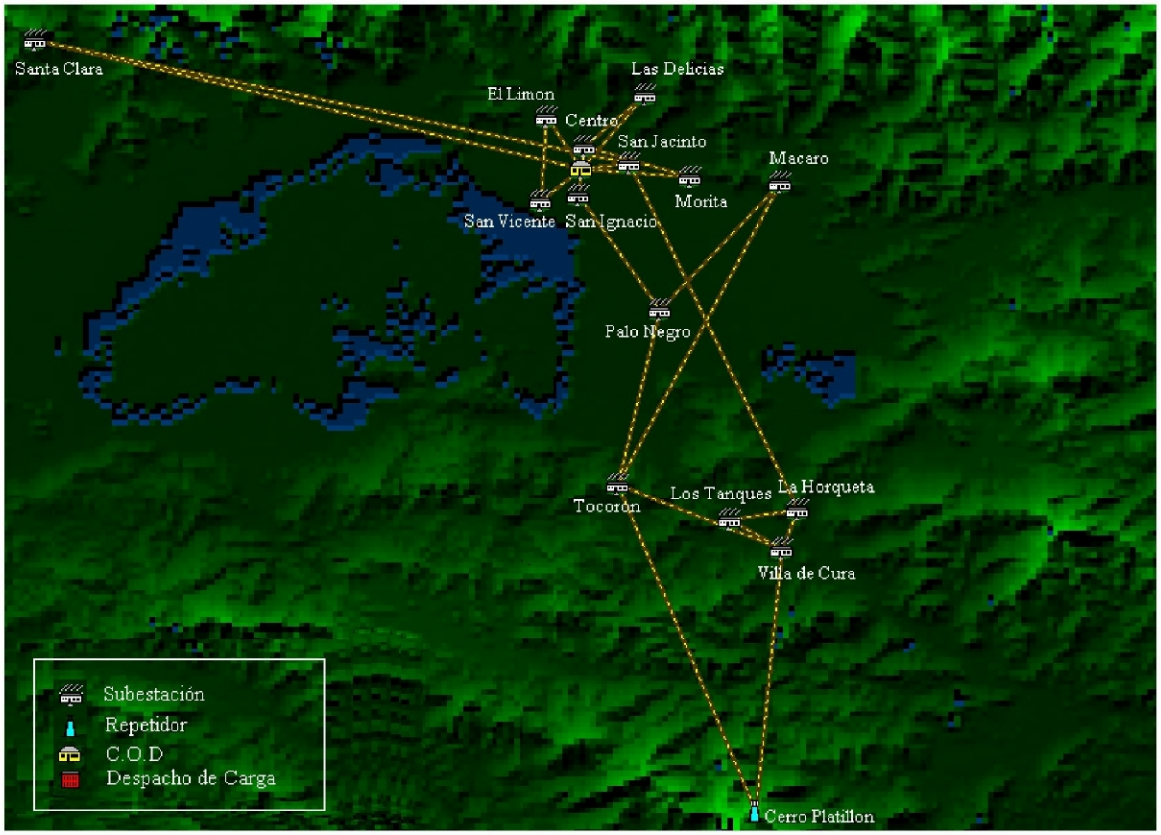
IV.1 Diseño Preliminar de la red

En las Figuras 2 y 3 se observa la topología preliminar de la red a dos escalas distintas, diseñada con una arquitectura redundante formada por la unión de varios anillos a través de los cuales se unen los nodos, gracias a que el *Switch Ethernet Moxa de la serie EDS 508-T* cuenta con el protocolo *TurboRing* y con el protocolo *Fast spanning tree,* para evitar bucles infinitos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Topología preliminar de la red.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Topología preliminar de la red ampliada.

Se proponen como estaciones de repetición los cerros Platillón, Agua Fría, La Magdalena y CADAFE. Estos se seleccionaron entre los puntos de repetición conocidos, ya que su ubicación y cota cumple con las características necesarias para comunicar la mayoría de las subestaciones. (Ver Apéndice C)

Las subestaciones Cata, Cumboto e Independencia no tienen enlaces establecidos con la red, ya que no existe línea de vista entre éstas y nodos o puntos de repetición conocidos. Por la misma razón, los enlaces del Despacho de Carga Central La Mariposa y la subestación Camatagua a la red no cumple con la arquitectura redundante. En estos casos, establecer enlaces aprovechando la operación de los

radios de modo *NLOS*, se ve imposibilitado ya que se observó en *Radio Mobile* que la distancia entre éstas y la subestación o punto de repetición más cercano que podría utilizarse para comunicar las subestaciones a la red o crear enlaces redundantes respectivamente supera los 10 km establecidos como distancia máxima por el fabricante.

Para el C.O.D y las subestaciones Villa de Cura y Tocorón, se proponen torres de 25, 20 y 45 metros respectivamente ya que a alturas menores los enlaces no tienen el 60% de la zona de Fresnel despejada y no proporcionan línea de vista.

IV.2 Resultados del cálculo de los enlaces en las condiciones menos favorables

Se analizan los perfiles de cada enlace y se observa el comportamiento del rayo según el ángulo de incidencia Ψ y la ubicación del punto de reflexión, para determinar los enlaces que pueden sufrir pérdidas por reflexión y la ubicación del punto en éstos donde incide el rayo sobre la superficie. (Ver Apéndice D. Pérdidas por reflexión)

Las pérdidas por lluvia y gases a diferencia de las pérdidas por reflexión, ocurren en todos los enlaces y son independientes del relieve bajo la trayectoria de los mismos.

Para los enlaces con polarización vertical las pérdidas por lluvia resultan mayores y las pérdidas por reflexión menores que con polarización horizontal debido a los valores de la atenuación específica ($\gamma_{R,f}$) para cada polarización. Por otra parte, las Pérdidas del Espacio Libre (PEL) y las pérdidas por gases no varían según la polarización de la onda. En todas, las pérdidas aumentan de manera proporcional a la longitud del enlace.

En la Tabla 1 se presentan las pérdidas en unidades logarítmicas que afectan el enlace del sistema, siendo L_R las pérdidas por reflexión, L_L las pérdidas por lluvia, L_G las pérdidas por gases y S_L la sumatoria de todas las anteriores en db.

Tabla 1. Pérdidas considerando el peor escenario

Lugar/Antena	d(Km)	f (GHz)	PEL	L_R	L_L	L_G	S_L
C.O.D-El Limón	3,92	5,815	106,03	0	1,605	0,04	1,64
Centro - C.O.D	1,47	5,815	101,77	0	0,751	0,01	0,76
Las Delicias - C.O.D	6,07	5,815	107,93	0	2,116	0,05	2,17
San Jacinto - C.O.D	2,94	5,815	104,78	0	1,307	0,03	1,33
Morita - C.O.D	6,55	5,815	108,26	1,32	2,210	0,06	3,59
San Ignacio - Palo Negro	8,67	5,815	109,48	0	2,563	0,08	2,64
Mácaro - Palo Negro	10,80	5,815	110,43	1,20	2,838	0,10	4,13
Tocorón - Palo Negro	9,16	5,815	109,71	1,65	2,632	0,08	4,37
C.O.D-San Ignacio	1,61	5,815	102,16	1,05	0,811	0,01	1,87
C.O.D-San Vicente	3,16	5,815	105,09	0	1,379	0,03	1,41
Cerro Platillón - Tocorón	22,14	5,815	113,55	0	3,659	0,20	3,86
Cerro Platillón - Camatagua	67,17	5,815	118,37	0	4,488	0,60	5,09
Cerro Platillón - San Sebastian	38,87	5,815	115,99	0	4,152	0,35	4,50
Cerro Platillón- Villa de Cura	16,61	5,815	112,30	0	3,352	0,15	3,50
La Horqueta - Villa De Cura	2,37	5,815	103,84	4,33	1,110	0,02	5,46
Villa de Cura- Los Tanques	3,66	5,815	105,73	1,72	1,531	0,03	3,28
Cerro Agua Fría - San Sebastian	40,86	5,815	116,21	0	4,188	0,37	4,56
Cerro Agua Fría- Cerrito Cadafe	21,66	5,815	113,45	0	3,637	0,19	3,83
Cerrito Cadafe- La Mariposa	1,96	5,815	103,02	0	0,954	0,02	0,97
Santa Clara - C.O.D	34,04	5,815	115,42	0	4,049	0,31	4,36
Mácaro - Tocorón	21,32	5,815	113,38	0	3,621	0,19	4,30
Tocorón - Villa de Cura	10,67	5,815	110,38	0	2,823	0,10	2,92
Cerro Agua Fría - Palo Negro	50,55	5,815	117,13	0	4,330	0,45	4,78
Centro - Delicias	4,93	5,815	107,02	0	1,865	0,04	1,91
Santa Clara - San Jacinto	36,79	5,815	115,75	0	4,110	0,33	4,44
La Horqueta - Los Tanques	4,15	5,815	106,28	0	1,668	0,04	1,71
San Jacinto - La Horqueta	23,98	5,815	113,89	3	3,738	0,22	7,38
El Limón - San Vicente	5,28	5,815	107,32	0	1,947	0,05	1,99
Cerro Agua Fría - Cerro Magdalena	28,81	5,815	114,69	0	3,909	0,26	4,17
Cerro Magdalena - Cerrito CADAFE	19,11	5,815	112,91	0	3,506	0,17	3,68
Morita - Centro	6,69	5,815	108,35	2	2,237	0,06	4,20

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del Factor de Ocurrencia de Desvanecimiento (*Po*) a través del método de Planificación Inicial propuesto por la UIT, se clasifican los enlaces según el tipo de relieve en el que se encuentran y la altura de la antena de menor cota para estimar el coeficiente Co (Ver Apéndice E)

IV.2.1 Potencia mínima en el receptor

Se comprueba la factibilidad de los enlaces correspondientes a la red preliminar diseñada ya que se demuestra que la potencia de recepción necesaria para tener un margen de desvanecimiento en el que se alcance la confiabilidad mínima requerida por los equipos (99,999%), tanto para la sensibilidad correspondiente al esquema de modulación de menor grado (BPSK) como para la correspondiente a la de mayor grado (64QAM).

En la Tabla 2 se observan en unidades logarítmicas los valores mínimos de potencia requeridos en la recepción para alcanzar la confiabilidad deseada operando a 5,815 GHz.

Tabla 2. Cálculo de la potencia mínima de recepción

Lugar/Antena	d(Km)	Po	MF(min)	Srx1	Srx2	Prx1	Prx2
C.O.D-El Limón	3,92	1,74E-06	-7,60	-86	-66	-93,60	-73,60
Centro - C.O.D	1,47	8,20E-09	-30,86	-86	-66	-116,86	-96,86
Las Delicias - C.O.D	6,07	1,18E-06	-9,29	-86	-66	-95,29	-75,29
San Jacinto - C.O.D	2,94	4,65E-07	-13,32	-86	-66	-99,32	-79,32
Morita - C.O.D	6,55	1,82E-06	-7,41	-86	-66	-93,41	-73,41
San Ignacio - Palo Negro	8,67	5,30E-05	7,24	-86	-66	-78,76	-58,76
Mácaro - Palo Negro	10,80	1,56E-04	11,94	-86	-66	-74,06	-54,06
Tocorón - Palo Negro	9,16	5,52E-05	7,42	-86	-66	-78,58	-58,58
C.O.D-San Ignacio	1,61	5,83E-08	-22,34	-86	-66	-108,34	-88,34
C.O.D-San Vicente	3,16	1,13E-07	-19,47	-86	-66	-105,47	-85,47
Cerro Platillón - Tocorón	22,14	4,58E-06	-3,39	-86	-66	-89,39	-69,39
Cerro Platillón - Camatagua	67,17	1,02E-03	20,08	-86	-66	-65,92	-45,92
Cerro Platillón - San Sebastian	38,87	9,46E-05	9,76	-86	-66	-76,24	-56,24
Cerro Platillón- Villa de Cura	16,61	1,24E-06	-9,07	-86	-66	-95,07	-75,07
La Horqueta - Villa De Cura	2,37	3,05E-09	-35,16	-86	-66	-121,16	-101,16
Villa de Cura- Los Tanques	3,66	1,94E-07	-17,12	-86	-66	-103,12	-83,12
Cerro Agua Fría - San Sebastian	40,86	1,02E-04	10,07	-86	-66	-75,93	-55,93
Cerro Agua Fría- Cerrito Cadafe	21,66	1,62E-05	2,09	-86	-66	-83,91	-63,91
Cerrito Cadafe- La Mariposa	1,96	1,79E-10	-47,48	-86	-66	-133,48	-113,48
Santa Clara - C.O.D	34,04	1,29E-04	11,10	-86	-66	-74,90	-54,90
Mácaro - Tocorón	21,32	9,81E-04	19,91	-86	-66	-66,09	-46,09
Tocorón - Villa de Cura	10,67	3,95E-06	-4,03	-86	-66	-90,03	-70,03
Cerro Agua Fría - Palo Negro	50,55	2,36E-04	13,73	-86	-66	-72,27	-52,27
Centro - Delicias	4,93	5,84E-07	-12,34	-86	-66	-98,34	-78,34
Santa Clara - San Jacinto	36,79	1,92E-04	12,84	-86	-66	-73,16	-53,16
La Horqueta - Los Tanques	4,15	3,39E-08	-24,70	-86	-66	-110,70	-90,70
San Jacinto - La Horqueta	23,98	7,40E-05	8,69	-86	-66	-77,31	-57,31
El Limón - San Vicente	5,28	2,09E-06	-6,80	-86	-66	-92,80	-72,80
Cerro Agua Fría-Cerro Magdalena	28,81	2,38E-05	3,77	-86	-66	-82,23	-62,23
Cerro Magdalena - Cerrito CADAFE	19,11	7,36E-06	-1,33	-86	-66	-87,33	-67,33
Morita - Centro	6,69	1,07E-06	-9,70	-86	-66	-95,70	-75,70

Fuente: Elaboración propia

Se observan en la tabla anterior los valores correspondientes a la potencia mínima necesaria en el receptor *Prx1* y *Prx2* (dbm) para obtener la confiabilidad deseada según la sensibilidad *Srx1* y *Srx2* (dbm) del equipo calculando un margen de desvanecimiento *MF* para un factor de ocurrencia de desvanecimiento *Po* y confiabilidad determinados. Para valores superiores de potencia, el margen de desvanecimiento será menor y por ende la confiabilidad mayor.

En color rojo pueden observarse valores negativos del margen de desvanecimiento con los cuales no tiene sentido calcular la potencia de recepción, ya que se sabe que la misma no podría ser menor a la sensibilidad del equipo para establecer el enlace. Este resultado indica que cualquier potencia recibida en los equipos receptores por encima de la sensibilidad arrojará una confiabilidad mayor al mínimo requerido.

IV.2.2 Potencia mínima en el transmisor

El nivel de señal en el transmisor calculado utilizando la ecuación de Friss con la potencia mínima en el receptor y las pérdidas calculadas a la mayor frecuencia y considerando las condiciones menos favorables, da como resultado el menor nivel de transmisión.

En los enlaces en los cuales el nivel en el receptor resulta menor a la sensibilidad, se establece como potencia del receptor la sensibilidad de los equipos, ya que como se mencionó anteriormente, cualquier valor que tome este por encima de la sensibilidad alcanzará la confiabilidad requerida.

Los valores de la potencia mínima del transmisor *Ptx1* y *Ptx2* en unidades logarítmicas para la sensibilidad correspondiente al esquema de modulación de menor grado (BPSK) y al de mayor grado (64QAM) pueden observarse en la Tabla 3 que se presenta a continuación.

Tabla 3. Potencia mínima en el transmisor

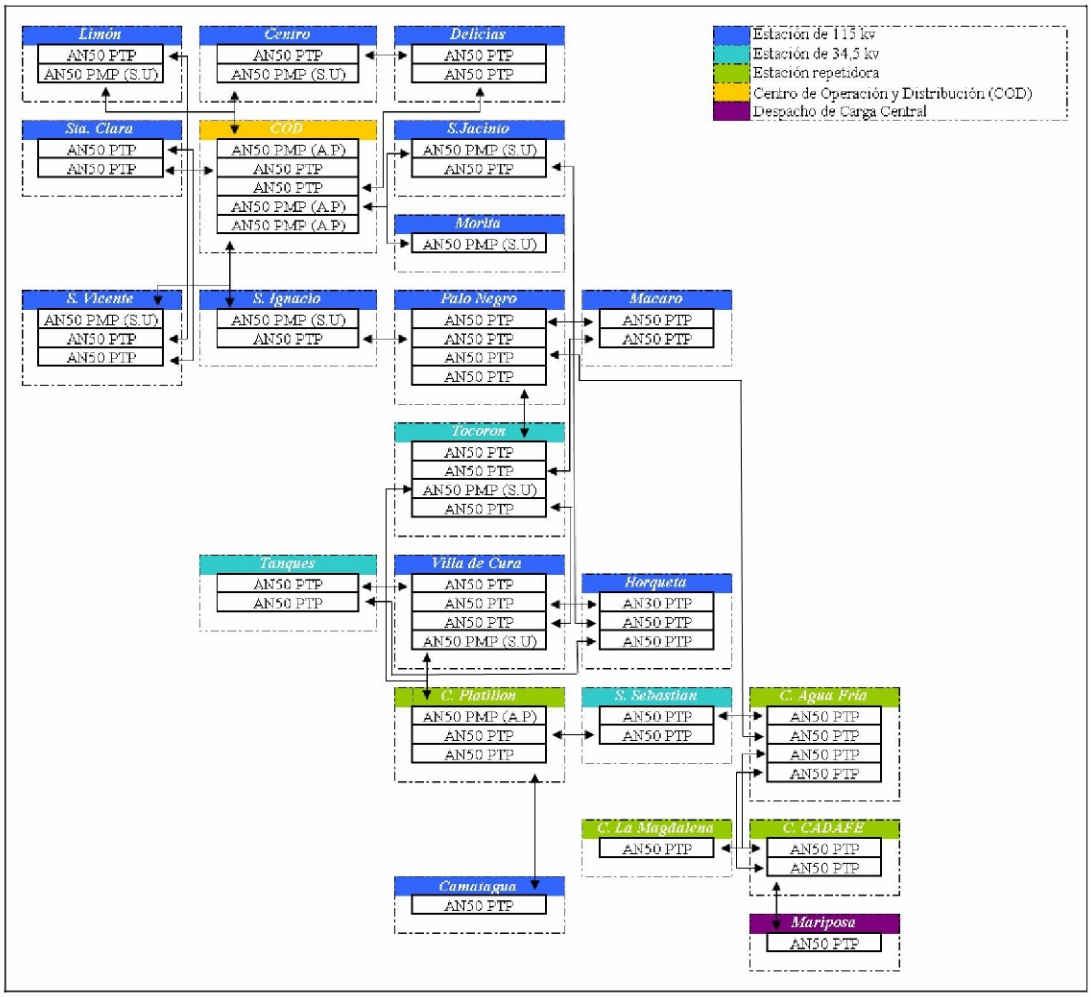
Lugar/Antena	Prx1	Prx2	S_L	Gtx	Grx	Ptx1	Ptx2
C.O.D-El Limón	-86,00	-66,00	107,67	17	28	-23,33	-3,33
Centro - C.O.D	-86,00	-66,00	102,53	17	28	-28,47	-8,47
Las Delicias - C.O.D	-86,00	-66,00	110,10	28	28	-31,90	-11,90
San Jacinto - C.O.D	-86,00	-66,00	106,11	17	28	-24,89	-4,89
Morita - C.O.D	-86,00	-66,00	111,85	17	28	-19,15	0,85
San Ignacio - Palo Negro	-78,76	-58,76	112,12	28	28	-22,64	-33,48
Mácaro - Palo Negro	-74,06	-54,06	114,56	28	28	-15,50	-34,43
Tocorón - Palo Negro	-78,58	-58,58	114,08	28	28	-20,50	-33,71
C.O.D-San Ignacio	-86,00	-66,00	104,03	17	28	-26,97	-6,97
C.O.D-San Vicente	-86,00	-66,00	106,50	17	28	-24,50	-4,50
Cerro Platillón - Tocorón	-86,00	-66,00	117,41	28	28	-24,59	-4,59
Cerro Platillón - Camatagua	-65,92	-45,92	123,46	28	28	1,54	-42,37
Cerro Platillón - San Sebastian	-76,24	-56,24	120,49	28	28	-11,75	-39,99
Cerro Platillón- Villa de Cura	-86,00	-66,00	115,80	28	28	-26,20	-6,20
La Horqueta - Villa De Cura	-86,00	-66,00	109,30	28	28	-32,70	-12,70
Villa de Cura- Los Tanques	-86,00	-66,00	109,01	28	28	-32,99	-12,99
Cerro Agua Fría - San Sebastian	-75,93	-55,93	120,76	28	28	-11,16	-40,21
Cerro Agua Fría- Cerrito Cadafe	-83,91	-63,91	117,28	28	28	-22,62	-37,45
Cerrito Cadafe- La Mariposa	-86,00	-66,00	103,99	28	28	-38,01	-18,01
Santa Clara - C.O.D	-74,90	-54,90	119,77	28	28	-11,13	-39,42
Mácaro - Tocorón	-66,09	-46,09	117,68	28	28	-4,41	-37,38
Tocorón - Villa de Cura	-86,00	-66,00	113,30	28	28	-28,70	-8,70
Cerro Agua Fría - Palo Negro	-72,27	-52,27	121,92	28	28	-6,36	-41,13
Centro - Delicias	-86,00	-66,00	108,93	28	28	-33,07	-13,07
Santa Clara - San Jacinto	-73,16	-53,16	120,19	28	28	-8,97	-39,75
La Horqueta - Los Tanques	-86,00	-66,00	107,98	28	28	-34,02	-14,02
San Jacinto - La Horqueta	-77,31	-57,31	121,28	28	28	-12,03	-37,89
El Limón - San Vicente	-86,00	-66,00	109,32	28	28	-32,68	-12,68
Cerro Agua Fría - Cerro Magdalena	-82,23	-62,23	118,86	28	28	-19,37	-38,69
Cerro Magdalena - Cerrito CADAFE	-86,00	-66,00	116,59	28	28	-26,75	-36,91
Morita - Centro	-86,00	-66,00	112,55	28	28	-29,45	-9,45

Fuente: Elaboración propia

Donde *Prx1* y *Prx2* equivalen a la potencia en el receptor para la sensibilidad estimada de los equipos en los distintos grados de modulación, *Ptx1* y *Ptx2* la potencia del transmisor respectiva y S_L la sumatoria de: pérdidas por reflexión, PEL y atenuaciones debido a lluvia y gases en la atmósfera de cada enlace.

IV.3 Distribución de los equipos y asignación de frecuencias

A continuación se presenta un diagrama de bloques que representa la distribución de los distintos modelos de radios y antenas en los nodos de la red inalámbrica para el diseño definitivo de la misma.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Diagrama de Bloques de la Red.

La red está conformada por 23 enlaces punto a punto y 4 enlaces punto a multipunto. La minoría marcada de enlaces PMP se debe a que la libertad de combinar varios nodos de la red en un mismo enlace se reduce como consecuencia del relieve montañoso de gran parte de la región y debido a la apertura relativamente angosta de la antena y a la distribución de las subestaciones en el área.

La cantidad de radios en cada nodo es limitada por los cinco canales disponibles en la banda de frecuencia utilizada, debido a que emplear la misma frecuencia y polarización para enlaces de una misma subestación podría ocasionar interferencias.

En los enlaces PTP y en las unidades de suscriptor de los enlaces PMP se colocan antenas de panel plano, ya que su ganancia es suficiente para las longitudes de las trayectorias y para las condiciones de la región. Adicionalmente su precio es considerablemente menor (Ver Apéndice B, Tabla B.2), al de las antenas parabólicas propuestas, por lo que estas ultimas no son utilizadas.

La red de fibra óptica que instalará CADAFE tiene un punto de conexión con la subestación La Horqueta, por lo que se encuentran propuestos para su arquitectura, un radio AN30 con 8 entradas *TDM* para aplicaciones E1/T1.

Los tres canales inferiores disponibles en los radios (canales 1-5,735, 2-5,755 y 3-5,775 GHz) son suficientes para asignar frecuencias a todos los equipos microondas de la red, de manera de que dos enlaces consecutivos no coincidan en la misma frecuencia y polarización para evitar interferencias cocanal.

El plan de frecuencia puede apreciarse en el Apéndice F.

IV.4 Cálculos de los enlaces a la frecuencia asignada

Los cálculos se realizan por segunda vez considerando la frecuencia y polarización asignada a cada enlace así como el tipo de aplicación (PTP o PMP) para obtener las pérdidas por los distintos fenómenos físicos y para calcular parámetros importantes de cada uno.

Debido a la elevada magnitud de la frecuencia a la cual se está trabajando, las pérdidas en unidades logarítmicas por lluvia, gases y reflexión calculadas con la frecuencia asignada, resultaron de igual magnitud que considerando el canal de trabajo más alto. La PEL varió, originando una diferencia despreciable en todos los casos del orden de 10^{-2}.

IV.4.1 Cálculo de Potencias máximas y mínimas en el receptor y en el transmisor

El cálculo de la potencia mínima, se realiza de la misma manera que en los apartados IV.2.1 y IV.2.2 y como únicamente varía el valor de la PEL, y de forma despreciable, la potencia mínima tanto para el receptor como para el transmisor resulta de la misma magnitud que a las condiciones menos favorables.

La potencia máxima, en el transmisor depende de la ganancia de la antena de transmisión y al valor límite de PIRE establecido por CONATEL.

El máximo y mínimo nivel de potencia en el transmisor y en el receptor pueden observarse al igual que el resto de los resultados de los cálculos de cada enlace, pueden observarse en el Apéndice G.

IV.5 Esquema de direccionamiento IP

Se deshabilitó el servidor DHCP de los conmutadores de cada nodo de la red para evitar conflictos en la asignación de direcciones, ya que servidores de distintas subestaciones podrían asignar una misma dirección para dispositivos de ubicaciones distintas.

La utilización de redes distintas de la clase C, permite ubicar el equipo al que pertenece la dirección de forma más fácil, haciendo uso del manual de direcciones. (Ver Apéndice H. Manual de Direcciones).

Se observa que contrario a lo propuesto no es necesaria la implementación de redes de Área Virtual (VPN, *Virtual Area Network*) ya que la red trabaja sobre una plataforma privada, y las redes VPN crean túneles IP para mantener la privacidad en infraestructuras públicas de telecomunicaciones (Ver Apéndice I. VPN)

En el capítulo siguiente se derivan las conclusiones relacionadas con los hallazgos del presente estudio.

CAPITULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Todos los enlaces, incluso al considerar las condiciones menos favorables, cumplieron con niveles de confiabilidad superiores al mínimo necesario tanto para el esquema de modulación de menor grado (BPSK) como para el de mayor grado (64QAM) de los radios a una tasa de recepción de errores BER = 10^{-9}. Esto se debe a la elevada ganancia de las antenas propuestas, a la corta longitud de los enlaces en comparación con su alcance máximo y a la técnica OFDM utilizada que hace funciones de ecualización mitigando la probabilidad de desvanecimiento selectivo.

Como el sistema opera en la banda de frecuencias de 5,8 GHz, el aseguramiento de la línea de vista constituye un factor suficiente para garantizar la operatividad de los enlaces. Las pérdidas por lluvia, gases, reflexión, PEL y la probabilidad de desvanecimiento, no resultan determinantes en el diseño de la topología de la red.

Se logró incluir en el diseño de la red todas las subestaciones y elaborar enlaces estables de cada una con el C.O.D, a excepción de las subestaciones: Cata, Cumboto, Independencia y Santa Clara, ya que CADAFE no proporcionó información sobre sitios de repetición ubicados de forma que puedan utilizarse para la interconexión de las mismas de forma LOS o NLOS con el C.O.D.

La antena sectorial modelo A6017RWS tiene un ángulo azimutal muy limitado (60°) que permite hacer comunicaciones PMP incluyendo únicamente dos unidades suscriptoras por enlace.

Debido a la cantidad de dispositivos requeridos y a la topología y funcionamiento de la red, resulta conveniente deshabilitar el servidor DHCP de cada conmutador y la asignación estática de direcciones para de esta manera evitar conflictos en el direccionamiento IP y prescindir de tráfico *broadcast* innecesario ocasionado por dispositivos que solicitan a los servidores la asignación de su dirección.

Se recomienda utilizar equipos de radio y antenas de menor potencia y ganancia respectivamente, para evitar la sobresaturación en los equipos receptores. Así mismo, sustituir las antenas A6017RWS de *Redline Communications* por antenas de mayor apertura para establecer menor cantidad de enlaces PTP y mayor cantidad de PMP y así utilizar menos equipos y reducir los costos.

Es recomendable realizar un barrido de frecuencias en cada nodo de la red antes de realizar la instalación de los equipos, para evitar la posibilidad de interferencia con enlaces de otras redes pertenecientes a terceros que operen a la misma frecuencia.

Para incluir las subestaciones Cata, Cumboto e Independencia se propone el estudio de soluciones alternas a la instalación del enlace microondas tales como: implantación de un sistema satelital, creación de una red de fibra óptica, instalación de un nuevo punto de repetición en algún lugar estratégico de la cordillera del parque Henry Pittier, etc.. Se recomienda profundizar en el estudio de las ventajas y desventajas de los sistemas planteados como posibles soluciones, utilizando como criterios el costo de la instalación y mantenimiento, la confiabilidad del sistema, tiempo de instalación, el ancho de banda, retardo, la compatibilidad con la red microondas y los trámites legales necesarios.

BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional de Telecomunicaciones. (2005, Junio 3). *Condiciones de Seguridad ante las Emisiones de Radiofrecuencia Producidas por Estaciones Radioelectricas Fijas en el Rango De 3 KHz A 300 GHz*, República Bolivariana de Venezuela, Ministerio de Infraestructura: Gaceta Oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela No. 38.201.

Correa, C. y cols. (2005). *Evaluación de Enlaces Inalámbricos Urbanos Usando Protocolo IEEE 802.11b.* Revista de la Facultad Ingeniería, Univ. Tarapacá, Vol. 13 Nº 3, pp. 38-44.

Fernández, M.E. (2003) *Fundamentos de Radiocomunicaciones*. Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar

Forouzan, B. A. (2002). *Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones* (2° ed.). España: Mc Graw Hill.

Giménez, H. y Cristóbal, Y. (2006). *Sistema de teleseñal para la empresa ELECENTRO*. Tesis no publicada, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Núcleo Maracay.

PLC de Venezuela S.A. *Nota Técnica. Licitación General Nro. 2005-DT-014.* Caracas, Venezuela.

Varela, F. (s.f) *Cálculo del comportamiento de una enlace de Radio Comunicaciones. Caracas, Venezuela. UCV*

Widjaja, I. y León-García A. (2002). *Redes de Comunicación.* México: Mc Graw Hill.

(2006) *Información del Estado Aragua* http://www.gobiernoenlinea.ve/venezuela/perfil_aragua.html

Universidad de Nacional de Rosario. *Métodos de Modulación Digital.* http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Radioenlaces/1502.pdf

Universidad Nacional. *Diseño automatizado de enlaces microondas sobre sistemas de información geográfica.* http://www.aciem.org/bancoconocimiento/e/enlacesmicroondas/microonda