

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERÍA**

**DISEÑO DEL SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES DEL IASA
(EL PRADO) EN LA BANDA DE 150 MHZ**

**JUAN PABLO LASSO ENCALADA
DIEGO MIGUEL MÉNDEZ MENA**

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2009

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICADO

Ing. Darío Duque Cajas

Ing. José Robles Salazar, M.B.A.

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado **“DISEÑO DEL SISTEMA DE RACIOCOMUNICACIONES DEL IASA (EL PRADO) EN LA BANDA DE 150 MHZ”**, realizado por Juan Pablo Lasso Encalada y Diego Miguel Méndez Mena, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a Juan Pablo Lasso Encalada y Diego Miguel Méndez Mena que lo entreguen al Ingeniero Gonzalo Olmedo, en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, 12 de Noviembre de 2009

Ing. Darío Duque Cajas

DIRECTOR

Ing. José Robles Salazar, M.B.A.

CODIRECTOR

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño e implementación del sistema de radiocomunicaciones por radio de dos vías en la banda VHF de 150 MHz, que se instaló en la Hacienda “El Prado” propiedad del Instituto Agropecuario Superior Andino (IASA).

El proyecto consistió en realizar un estudio de los arreglos de antenas, en especial de los arreglos de dipolos doblados y una investigación acerca de canales de comunicaciones móviles *Símplex* y *Semidúplex*.

Sobre esta base teórica se desarrolló un análisis práctico del patrón de radiación del arreglo, un estudio del área de cobertura del sistema mediante simulación por software, la implementación y barrido espectral del mismo, incluyendo un análisis comparativo entre los valores de nivel de potencia de recepción obtenidos teóricamente y los obtenidos en la práctica.

El sistema ha permitido cubrir la necesidad del IASA de comunicarse con la red de seguridad de la Escuela Politécnica del Ejército, para lo cual se implementó un canal *Semidúplex* utilizando la repetidora ubicada en el cerro Cruz Loma, propiedad de la ESPE, así como también un segundo requerimiento de comunicar el centro administrativo con las distintas dependencias más alejadas de la hacienda mediante un canal en configuración *Símplex* a una frecuencia.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a mi madre, María Dolores, y a mi padre, Galo Antonio, por nunca dejar de creer en mí, a mis abuelos Galo César, Blanca Leonor, Rafael Galo y María Judith, por ser los grandes ejemplos que me han inspirado a dar lo mejor de mí, a mis hermanos Kathy y Galo Eduardo, a mi primo Andrés y a toda mi familia, porque han sido una parte muy importante en mi formación, a mis tíos Martha y Enrique, que han sido mis segundos padres y finalmente a Cristina, por recordarme siempre que estamos en este mundo para hacer la diferencia.

Juan Pablo

El presente trabajo es dedicado a las personas que creyeron en mí, en mis metas y en mis sueños, con mención especial a mi familia, a mis padres Miguel y Cecilia, a mi hermana Carolina, a Mayari, el amor de mi vida, y a mis abuelitos, que sin duda estarían orgullosos, puesto que sin el apoyo de todos ellos sería imposible alcanzar todas los objetivos profesionales y personales propuestos, este logro y todos los posteriores serán a su nombre.

Diego

AGRADECIMIENTO

Quiero hacer una mención especial a mi abuelo Galo César por su apoyo constante durante el tiempo que me acogió en su casa al inicio de mi carrera, por todas esas mañanas de levantarse temprano para ayudarme. Agradezco también al resto de mi familia, que de una u otra manera estuvo presente para ayudarme a seguir adelante, incluyendo a mis abuelos, hermanos, primos, tíos y en especial a mis padres, que son lo más importante que tengo en este mundo.

Me gustaría agradecer también a todos los profesores que supieron dejarme una enseñanza positiva a lo largo de todos mis años colegiales y universitarios, a mis amigos que estuvieron ahí en los buenos y malos momentos y a mis compañeros de clase, con los cuales supimos crecer día a día y ayudarnos mutuamente para finalizar nuestra carrera universitaria.

Juan Pablo

Agradezco principalmente a Dios y a mi Madre Dolorosa, por darme la oportunidad de vivir esta hermosa experiencia y poder culminarla con éxito, gracias por ser mis guías y consejeros, a toda mi familia, que han sabido apoyarme y brindarme su amor, comprensión y ayuda en todos los momentos, a mis maestros y profesores, que supieron formar adecuadamente mis sueños y habilidades y a mis compañeros.

Quiero hacer un agradecimiento en especial a mis amigos, próximamente exitosos colegas, que desde el principio supieron animar este largo camino y hacerlo mucho más entretenido, muchas gracias, se los digo con todo corazón.

Diego

PRÓLOGO

El Instituto Agropecuario Superior Andino posee varias instalaciones dentro de su campus, entre las que están los laboratorios de las diferentes especialidades, por ejemplo los de Entomología, Fitopatología, Nematología, Fisiología Vegetal, Poscosecha, Biología y Microbiología y sus estaciones meteorológicas.

La existencia de esta variedad de instalaciones y la necesidad de que estén comunicadas entre sí conlleva a la necesidad de implementar un sistema de radiocomunicaciones interno que sea accesible y de fácil manejo para el campus, ayudando a incrementar la eficiencia de todo el trabajo realizado dentro del campus y contribuyendo al desarrollo integral de la carrera y de los estudiantes y personal administrativo.

La importancia del proyecto se fundamenta en la necesidad de comunicación e integración de la información, creando una red que se adapte a las necesidades y que satisfaga los requerimientos del Instituto Agropecuario Superior Andino, pues existía una deficiencia de comunicaciones dentro de la Hacienda El Prado, sobre todo en el sector de Pailones, el cual se pudo cubrir y comunicar con el resto de las instalaciones de la Hacienda mediante el sistema a implementar.

Se utilizó un sistema símplex debido a la factibilidad de implementarlo, ya que se pudieron utilizar equipos e infraestructura de comunicaciones ya existentes en la institución y además el diseño necesario para implementar este sistema fue probado bastante eficaz comparado con otras opciones.

Se ha tomado en cuenta que el DEEE ha adquirido recientemente equipos de telecomunicaciones capaces de efectuar un barrido espectral en la banda de 150 MHz, por

lo que se sacó provecho de la presencia de esta herramienta de trabajo para realizar un análisis de cobertura del sistema.

Finalmente, fue necesario realizar la restauración de las comunicaciones entre la Hacienda El Prado y el campus de la ESPE ubicado en Sangolquí, por lo cual se procedió a activar el enlace de radiocomunicaciones entre estos dos lugares mediante la repetidora ubicada en el cerro Cruz Loma.

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: TEORÍA DE ANTENAS.....	1
1.1. FUNCIONAMIENTO DE LAS ANTENAS	1
1.2. PROPIEDADES DE LAS ANTENAS.....	2
1.2.1. Patrón de Radiación	3
1.2.2. Ganancia Directiva	7
1.2.3. Ganancia de Potencia.....	7
1.2.4. Polarización.....	8
1.2.5. Ancho de Banda.....	9
1.2.6. Impedancia	10
1.2.7. Resistencia de Radiación.....	11
1.2.8. Relación Frente a Espalda (F/B).....	12
1.3. ARREGLO DE 4 DIPOLOS DOBLADOS.....	13
1.3.1. Principio de Funcionamiento.....	13
1.3.2. Diseño y Cálculos para el Funcionamiento en 150 MHz.....	18
1.3.3. Características Físicas de la Antena (Medidas Obtenidas).....	23
1.3.4. Patrón de Radiación	24
1.3.5. Aplicaciones del Arreglo de 4 Dipolos Dobladados.....	34
CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES SIMPLEX	36
2.1 INTRODUCCION.....	36
2.2 SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES MÓVILES.....	37
2.2.1 Elementos de un Sistema de Radiocomunicaciones Móviles.....	37
2.2.2 Clases de Sistemas de Radiocomunicaciones Móviles	39
2.3 CANALES SIMPLEX A UNA FRECUENCIA	42
2.4 CANALES SIMPLEX A DOS FRECUENCIAS	47
2.5 APLICABILIDAD SISTEMAS SIMPLEX IASA.....	50

CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES DEL IASA.....	52
3.1 DETERMINACION DE NECESIDADES DEL IASA.....	52
3.3 DISEÑO DEL SISTEMA.....	69
3.3.1. Determinación del patrón de radiación del arreglo de dipolos doblados	70
3.3.2. Determinación de los niveles de recepción de los equipos utilizados	75
3.3.3. Simulación del sistema en la banda de 150 MHz mediante software de predicción de cobertura.....	79
3.3.4. Simulación del enlace entre el IASA (El Prado) y el campus ESPE (Sangolquí) mediante la repetidora de Cruz Loma con software de predicción de cobertura.	86
3.3.5. Determinación del lugar óptimo para colocar la antena en el IASA	89
3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	90
3.4.1. Programación de los equipos de radio	91
3.4.2. Definición de los grupos de trabajo del sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado)	104
3.4.3. Restauración del enlace entre el IASA (El Prado) y el campus ESPE (Sangolquí).....	104
CAPÍTULO 4: BARRIDO ESPECTRAL	108
4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS	108
4.2 TABULACIÓN DE DATOS	118
4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA PRÁCTICA Y LOS DATOS ESTIMADOS A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN POR SOFTWARE EN LA BANDA DE 150 MHZ.....	124
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
5.1 CONCLUSIONES.....	127
5.2 RECOMENDACIONES.....	129

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES DEL IASA.....	52
Tabla 3.1. Mediciones de Densidad de Potencia del arreglo de 4 dipolos doblados obtenidas con el equipo Narda NBM-550	73
Tabla 3.2. Especificaciones Técnicas Estación Repetidora Kenwood TKR-750	76
Tabla 3.3. Especificaciones Técnicas estación base de radio Motorola PRO5100.....	77
Tabla 3.4. Especificaciones Técnicas radios portátiles Motorola PRO3150.....	78
Tabla 3.5. Sitios de interés de cobertura del sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado)	80
Tabla 3.6. Resultados de niveles de recepción de señal de la estación base obtenidos de la simulación downlink en <i>Radio Mobile</i>	83
CAPÍTULO 4: BARRIDO ESPECTRAL	108
Tabla 4.1. Características Técnicas del Analizador de Espectros GW Instek GSP-830	111
Tabla 4.2. Niveles de recepción obtenidos en el barrido espectral realizado para el sistema de radiocomunicaciones VHF del IASA (El Prado).....	119
Tabla 4.3. Puntos de medición considerados en el barrido espectral, ordenados según distancia a la estación base	123
Tabla 4.4. Cuadro comparativo de los niveles de recepción de señal obtenidos para distintos puntos del IASA con el software Radio Mobile y con el analizador de espectros GSP-830.....	125

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: TEORÍA DE ANTENAS.....	1
Figura 1.1. Gráfica tridimensional del patrón de radiación de una antena omnidireccional	3
Figura 1.2. Patrón de radiación de una antena omnidireccional en el plano E.....	4
Figura 1.3. Patrón de radiación de una antena omnidireccional en el plano H.....	4
Figura 1.4. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas.....	5
Figura 1.5. (De izquierda a derecha): Patrones de radiación para una antena isotrópica, para una antena omnidireccional y para una antena direccional.....	6
Figura 1.6. Polarizaciones de la antena: a) lineal, b) elíptica, c) circular.....	9
Figura 1.7. Dipolo doblado y sus parámetros	13
Figura 1.8. Dipolo doblado: Modo línea de transmisión (izquierda) y Modo antena (derecha)...	14
Figura 1.9. Arreglo lineal de N+1 dipolos de media longitud de onda	18
Figura 1.10. Factor de arreglo para un arreglo lineal uniforme	20
Figura 1.11. Arreglo de 4 dipolos doblados y sus dimensiones.....	23
Figura 1.12. Ingreso de datos para construir el arreglo de 4 dipolos doblados en MMANA-GAL	24
Figura 1.13. Determinación de las fuentes de alimentación de la antena.....	25
Figura 1.14. Simulación de la antena en curso	26
Figura 1.15. a) Cortes horizontal y vertical del patrón de radiación de la antena dipolo doblado	27
Figura 1.15. b) Patrón de radiación de la antena dipolo doblado.....	28
Figura 1.16 a) Cortes horizontal y vertical del patrón de radiación del arreglo de 2 dipolos doblados	29
Figura 1.16. b) Patrón de radiación del arreglo de 2 dipolos doblados	29
Figura 1.17. a) Cortes horizontal y vertical del patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados colineales	30
Figura 1.17. b) Patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados colineales.....	31
Figura 1.18. a) Cortes horizontal y vertical del patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados lineales.....	32

Figura 1.18. b) Patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados lineales	33
Figura 1.19. Arreglo de 4 dipolos doblados instalado y en funcionamiento	35
CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES SIMPLEX	36
Figura 2.1: Elementos básicos de un sistema de comunicaciones simplex.	36
Figura 2.2. Ilustración de una comunicación en un canal símplex a una frecuencia	43
Figura 2.3. Ilustración del concepto de ayuda mutua entre estaciones móviles en sistemas símplex	44
Figura 2.4. Interferencia cocanal en canales símplex a una frecuencia.....	45
Figura 2.5. Interferencia entre estaciones con frecuencias similares	46
Figura 2.6. Utilización del espectro radioeléctrico en canales símplex a 2 frecuencias.....	48
Figura 2.7. Ilustración de una comunicación en un canal símplex a dos frecuencias	49
Figura 2.8. Ilustración de una comunicación en un canal semidúplex a dos frecuencias.....	49
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES DEL IASA.....	52
Figura 3.1. Foto de una situación de emergencia en la hacienda “El Prado”	52
Figura 3.2. Mapa con ubicaciones de interés para las comunicaciones por radio en la Hacienda “El Prado”	53
Figura 3.3. Prevención Central	54
Figura 3.4. Ganadería.....	54
Figura 3.5. Carretera a Pailones.....	55
Figura 3.6. Pailones y sus sembríos	55
Figura 3.7. Prevención de entrada a la hacienda.....	56
Figura 3.8. Aulas.....	56
Figura 3.9. Bodega.....	57
Figura 3.10. Prevención de salida a San Luis de Loreto	57
Figura 3.11. Sembríos San Luis de Loreto.....	58
Figura 3.12. Laboratorios	58
Figura 3.13. Criadero de Pollos	59
Figura 3.14. Foto Panorámica de Zonas Montañosas dentro del IASA (El Prado)	60
Figura 3.15. Foto prevención de entrada, IASA (El Prado)	61
Figura 3.16. Foto Planta Administrativa, IASA (El Prado).....	61

Figura 3.17. Foto Aulas, IASA (El Prado)	62
Figura 3.18. Foto Laboratorio e Invernaderos, IASA (El Prado)	62
Figura 3.19. Foto Canchas deportivas, IASA (El Prado)	63
Figura 3.20. Foto Planta Administrativa, IASA (El Prado).....	63
Figura 3.21. Foto Bar, IASA (El Prado).....	64
Figura 3.22. Foto Invernaderos, IASA (El Prado)	64
Figura 3.23. Foto Panorámica entrada, IASA (El Prado).....	65
Figura 3.24. Foto Panorámica de aulas, IASA (El Prado).....	65
Figura 3.25. Foto Camino a Pailones, IASA (El Prado)	66
Figura 3.26. Foto Bodegas, IASA (El Prado)	66
Figura 3.27. Foto Panorámica desde Pailones, IASA (El Prado)	67
Figura 3.28. Foto Ganadería, IASA (El Prado)	67
Figura 3.29. Foto Panorámica desde camino a Loreto, IASA (El Prado)	68
Figura 3.30. Vista virtual desde el IASA (El Prado) al Cerro Cruz Loma	69
Figura 3.31. Medidor de Banda Ancha Narda NBM-550	70
Figura 3.32. Medición del patrón de radiación del arreglo de dipolos doblados	71
Figura 3.33. Patrón de radiación del arreglo de dipolos doblados obtenido con el equipo Narda NBM-550	74
Figura 3.34. Estación Repetidora Kenwood TKR-750	76
Figura 3.35. Estación base Motorola PRO 5100.....	77
Figura 3.36. Radio Motorola PRO3150 perteneciente al IASA (El Prado).....	79
Figura 3.37. Simulación del mapa cobertura del arreglo de 4 dipolos doblados de la estación base en los lugares más cercanos a las oficinas del IASA (El Prado).....	81
Figura 3.38. Simulación del mapa cobertura del arreglo de 4 dipolos doblados de la estación base en los lugares más alejados de las oficinas del IASA (El Prado)	82
Figura 3.39. Simulación del mapa cobertura total del arreglo de 4 dipolos doblados de la estación base	84
Figura 3.40. Simulación uplink sistema interno de radiocomunicaciones del IASA (El Prado) ..	85
Figura 3.41. Simulación área de cobertura de la estación repetidora de la ESPE ubicada en Cruz Loma	87
Figura 3.42. Simulación área de cobertura obtenida al realizar el enlace uplink entre el IASA (El Prado) y la repetidora de la ESPE.....	88

Figura 3.43. Ubicación final del arreglo de cuatro dipolos doblados en la Prevención Central de la Hacienda “El Prado”	90
Figura 3.44. Motorola Radio Interface Box (RIB).....	92
Figura 3.45. Cable de programación para radios Motorola PRO 3150.....	92
Figura 3.46. Interfaz de programación de las radios Motorola PRO 3150.....	93
Figura 3.47. Programación de personalidades convencionales para radios Motorola PRO 3150.	94
Figura 3.48. Programación de la Personalidad Convencional #2 de los radios PRO 3150.....	96
Figura 3.49. Configuración de la opción <i>Scan List</i> en las radios PRO 3150.....	97
Figura 3.50. Configuración de la opción <i>Personality Assignment To Zone</i> en las radios PRO 3150	98
Figura 3.51. Cable de programación para la estación de radio base PRO 5100	99
Figura 3.52. Programación de los niveles de potencia de transmisión de la estación base PRO 5100.....	100
Figura 3.53. Configuración de la personalidad convencional “Seguridad” de la estación base PRO 5100.....	101
Figura 3.54. Asignación de zona y canal de la personalidad convencional “Seguridad” de la estación base PRO 5100.....	101
Figura 3.55. Configuración de la personalidad convencional “IASA” de la estación base PRO 5100.....	102
Figura 3.56. Asignación de zona y canal de la personalidad convencional “IASA” de la estación base PRO 5100	102
Figura 3.57. Configuración de la opción <i>Scan List</i> en la estación base PRO 5100	103
Figura 3.58. Configuración de la opción <i>Personality Assignment to Zone</i> en la estación base PRO 5100.....	103
Figura 3.59. Estación repetidora de la ESPE instalada en la propiedad del Comando Conjunto de las FF.AA. ubicado en Cruz Loma	105
Figura 3.60. Conexión de administración entre una PC y la estación repetidora de la ESPE	106
Figura 3.61. Configuración existente en la estación repetidora de la ESPE.....	106
Figura 3.62. Simulación del enlace entre la estación repetidora de Cruz Loma y la estación base del IASA (El Prado).....	107
CAPÍTULO 4: BARRIDO ESPECTRAL	108
Figura 4.1. Antena Motorola VHF conectada al analizador de espectros GSP-830	108
Figura 4.2. Analizador de Espectros GW-INSTEK GSP-830	109

Figura 4.3. Nivel de recepción de señal obtenido en la Prevención Central	112
Figura 4.4. Nivel de recepción de señal obtenido en la Ganadería	112
Figura 4.5. Nivel de recepción de señal obtenido en la Carretera a Pailones	113
Figura 4.6. Nivel de recepción de señal obtenido en Pailones.....	113
Figura 4.7. Nivel de recepción de señal obtenido en los Sembríos de Pailones	114
Figura 4.8. Nivel de recepción de señal obtenido en la Entrada al IASA (El Prado).....	114
Figura 4.9. Nivel de recepción de señal obtenido en las Aulas	115
Figura 4.10. Nivel de recepción de señal obtenido en la Bodega	115
Figura 4.11. Nivel de recepción de señal obtenido en la Prevención de Salida a Loreto.....	116
Figura 4.12. Nivel de recepción de señal obtenido en los Sembríos de San Luis de Loreto	116
Figura 4.13. Nivel de recepción de señal obtenido en los Laboratorios.....	117
Figura 4.14. Nivel de recepción de señal obtenido en el Criadero de Pollos	117
Figura 4.15. Mapa de las áreas de la hacienda “El Prado” más cercanas al edificio de oficinas del IASA	120
Figura 4.16. Mapa de las áreas de la hacienda “El Prado” más alejadas del edificio de oficinas del IASA.....	121
Figura 4.17. Gráfica de los niveles de recepción de señal en los distintos puntos de medición ..	122
Figura 4.18. Gráfica comparativa de los niveles de recepción de señal obtenidos para distintos puntos del IASA con el software Radio Mobile y con el analizador de espectros GSP-830.....	126

INDICE DE HOJAS TECNICAS

Hojas Técnicas Equipo Medidor de Banda Ancha Narda NBM-550.....	ANEXO A1
Hojas Técnicas Estación Repetidora Kenwood TKR-750	ANEXO A2
Hojas Técnicas Estación Base Motorola PRO 5100	ANEXO A3
Hojas Técnicas Estación Portátil Motorola PRO 3150	ANEXO A4
Hojas Técnicas Equipo Analizador de Espectros GW INSTRON GSP-830	ANEXO A5

GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

AC	Alternate Current
CDMA	Code Division Multiple Access
CSQ	Carrier Squelch
DC	Direct Current
DPL	Digital Private Line
DQT	Digital Quiet Talk
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frecuencia Modulada
FSK	Frequency Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPS	Global Positioning System
LCD	Liquid Crystal Display
N-CDMA	Narrow Band CDMA
W-CDMA	Wide Band CDMA
PAMR	Public Access Mobile Radio
PLMN	Public Land Mobile Network
PMR	Private Mobile Radio
PSK	Phase Shift Keying
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTT	Push-To-Talk
QT	Quiet Talk
RF	Radio Frequency
RIB	Motorola Radio Interface Box
SDMA	Space Division Multiple Access
SINAD	Signal To Noise And Distorsion

SMB	Sub-Miniature Connector
TDMA	Time Division Multiple Access
TFT	Thin Film Transistor
TPL	Tones Private Line
TTL	Transistor-Transistor Logic
UHF	Ultra High Frequency
USB	Universal Serial Bus
VHF	Very High Frequency
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
Wi-Fi	Wireless Fidelity

CAPITULO 1

TEORÍA DE ANTENAS

FUNCIONAMIENTO DE LAS ANTENAS

Las antenas forman parte de los sistemas de comunicación como elementos encargados de transmitir y recibir información a través de ondas electromagnéticas. Las antenas sirven para transformar las ondas electromagnéticas que viajan por el espacio libre en ondas guiadas o viceversa, dependiendo de si la antena es la transmisora o la receptora.

Cuando la antena funciona como *transmisora*, se dice que está irradiando la energía que se le ha suministrado en forma de ondas en el espacio libre.

Cuando la antena funciona como *receptora*, se dice que está captando la energía de la onda en algún punto del espacio para luego absorberla y entregar esa información al equipo receptor.

Además de transmitir y recibir las ondas, las antenas tienen la responsabilidad de direccionar esas ondas de acuerdo a las necesidades de la transmisión que se realiza. Así, de acuerdo al diseño de la antena y a la aplicación en la que se la vaya a utilizar, se puede tener antenas direccionales y omnidireccionales.

Las *antenas direccionales* son aquellas que concentran la energía que irradian solamente en una dirección específica. Se utilizan para realizar transmisiones entre dos sitios de interés específico. Al diseñar este tipo de antenas, mientras más angosto sea el ancho del haz de radiación, se considerará que la calidad de la antena es mejor, pues se

deducirá que es más “direccional”. Aplicaciones típicas de este tipo de antenas son: enlaces punto a punto (cliente-proveedor) para servicios de internet, enlaces satelitales, enlaces dedicados para transmisión de datos en redes privadas, entre otros.

Ejemplos de antenas direccionales son: antenas parabólicas, antenas de microondas, antenas de panel, antenas yagi, entre las más importantes.

Las *antenas omnidireccionales* son aquellas que irradian energía en todas las direcciones dentro de cierta zona de cobertura, alrededor del lugar donde están instaladas. Algunas de las aplicaciones de estas antenas son: redes wi-fi, radiodifusión, comunicaciones móviles, entre muchas otras más. El ejemplo más representativo de las antenas omnidireccionales es la antena dipolo simple.

PROPIEDADES DE LAS ANTENAS

Las propiedades de las antenas son las que determinarán el funcionamiento de acuerdo al diseño que se realice, para la aplicación que se necesite. Estos parámetros permitirán además describir el efecto que tendrán las antenas utilizadas en el sistema de comunicación. Por lo general, las antenas mantendrán sus características invariables cuando estén funcionando como transmisoras o como receptoras.

Las propiedades más importantes, y que se estudiarán a continuación son:

- Patrón de radiación
- Ganancia Directiva
- Ganancia de Potencia
- Polarización
- Ancho de Banda
- Impedancia
- Resistencia de Radiación

- Relación Frente a Espalda (F/B)

Patrón de Radiación

El patrón de radiación se utiliza para visualizar gráficamente la manera en que la antena produce la radiación de energía en todos los ángulos posibles en el espacio.

Usualmente, el gráfico del patrón de radiación se construye utilizando un sistema de coordenadas esféricas, expresando la intensidad de campo eléctrico (aunque en unos pocos casos se grafica el campo magnético) en función de las distintas posiciones angulares de dicho sistema de coordenadas (θ, ϕ) , a una distancia constante, dando lugar a las componentes ortogonales $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$. El patrón de radiación es una gráfica tridimensional, con la apariencia mostrada en la figura 1.1.

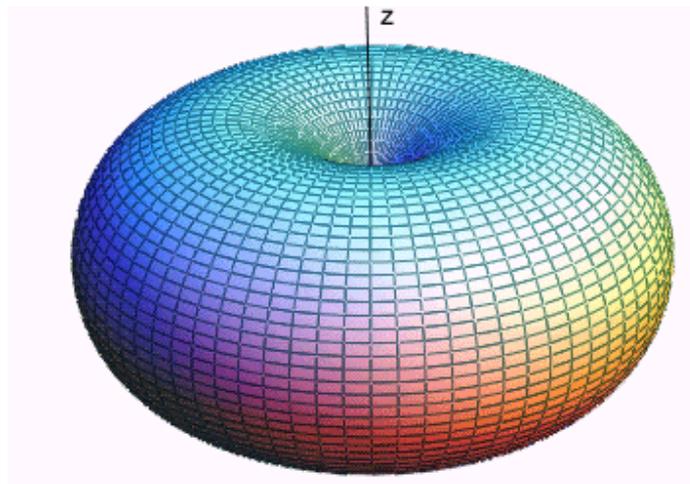


Figura 1.1. Gráfica tridimensional del patrón de radiación de una antena omnidireccional¹

Muchas veces es más útil realizar cortes de la gráfica tridimensional y analizar gráficas bidimensionales, sobre todo en los planos E y H, que son los de más interés.

¹ Imagen tomada de: http://www.upv.es/antenas/Tema_3/Diagrama_espira.htm, Diagrama de radiación

El *plano E* es un plano paralelo al vector intensidad de campo eléctrico en la dirección en la que dicho campo adquiere su máximo valor. La gráfica bidimensional en el plano E para el patrón de la antena omnidireccional mostrado anteriormente se muestra en la figura 1.2

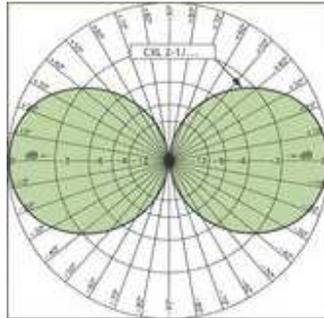


Figura 1.2. Patrón de radiación de una antena omnidireccional en el plano E²

El *plano H* es un plano que se encuentra perpendicular al plano E. La intersección entre ambos planos define la dirección de máxima radiación de la antena. La figura 1.3 muestra el patrón de radiación en el plano H para una antena omnidireccional.

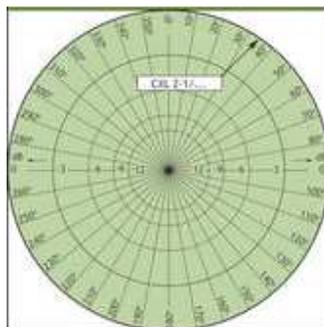


Figura 1.3. Patrón de radiación de una antena omnidireccional en el plano H²

² Imagen tomada de:

http://www.procom.dk/esl/Page_menu/Procomlab/Terminos_de_antenas/Como_describir_lo_buena_que_es_una_antena,_¿Cómo_describir_lo_buena_que_es_una_antena?

Las gráficas expresan los niveles de potencia entre 0 y 360 grados en términos de decibelios. Generalmente, se toma 0 dBs como el nivel máximo y se construye la gráfica con niveles negativos.

Además del diagrama en coordenadas esféricas, el patrón de radiación se puede representar también en coordenadas cartesianas. La gráfica se construye con los valores de ángulos en el eje X y con los niveles de potencia en el eje Y. Con esta representación, es más fácil determinar distintos parámetros de la radiación de la antena como son los valores del haz principal, el ancho del haz a -3dB, el lóbulo secundario, entre otros. Se utiliza sobre todo cuando se tienen patrones de radiación de antenas muy direccionales. La figura 1.4 muestra un ejemplo de patrón de radiación en coordenadas cartesianas.

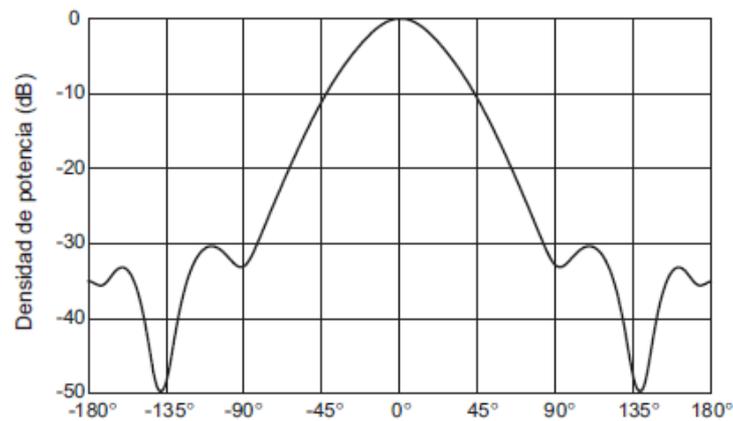


Figura 1.4. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas³

Entre los parámetros que se pueden definir en el patrón de radiación de una antena, se encuentran los siguientes:

³ Imagen tomada de: CARDAMA AZNAR, Ángel; ROCA, Lluís Jofre, **Antenas**, Segunda Edición, Editorial UPC, Barcelona, Septiembre de 2002, página 21

El *lóbulo principal* representa la región espacial en la que la radiación es máxima. La dirección en la que se apunte el lóbulo principal definirá el lugar con el cual se realizará la comunicación entre antenas.

Los *lóbulos laterales* son aquellos cuyo nivel de potencia es menor al del lóbulo principal. Generalmente, no son de interés para la transmisión, por lo que se recomienda mantenerlos en niveles bajos para evitar desperdicios en la potencia transmitida.

El *ancho del haz a -3dB*, representado por $\Delta\theta_{-3dB}$, representa el ancho de la porción del haz en la que todos los niveles de potencia están por encima de la mitad de la potencia máxima. Mientras más angosto sea este parámetro, más directiva será la antena.

El *ancho del haz entre ceros*, representado por $\Delta\theta_c$, representa el rango de valores angulares comprendidos entre dos niveles mínimos de potencia.

La *relación del lóbulo principal a secundario*, representada por “NLPS”, es el cociente entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario (que es el lóbulo lateral de mayor valor). Se expresa en dBs.

Los principales tipos de patrones de radiación son: para una antena isotrópica⁴, para una antena omnidireccional y para una antena direccional, como se muestra en la figura 1.5.



Figura 1.5. (De izquierda a derecha): Patrones de radiación para una antena isotrópica, para una antena omnidireccional y para una antena direccional⁵

⁴ Antena Isotrópica: Antena ideal que se toma como referencia para definir algunos parámetros de las antenas. Se dice que es una antena que irradia la misma energía en todas las direcciones.

Ganancia Directiva

La ganancia directiva de una antena es un parámetro que define la relación entre la densidad de potencia que irradia la misma en una dirección y a cierta distancia fija del lugar donde se encuentra, y la densidad de potencia que sería irradiada en la misma dirección por una antena o radiador isotrópico, utilizando el mismo nivel de potencia, tal como se describe en la siguiente fórmula:

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_{rad}}{4\pi r^2}} \quad (1)$$

Donde P_{rad} es la potencia total radiada, y se obtiene calculando la integral de la densidad de potencia $P(\theta, \phi)$ en todas las direcciones del espacio.

Cuando se habla de la ganancia directiva en la dirección donde existe máxima radiación, se está haciendo referencia a la *directividad* de la antena.

Ganancia de Potencia

A diferencia de la ganancia directiva, en lugar de realizar los cálculos en base de la potencia radiada, se utiliza la potencia entregada a la antena. La ganancia de potencia es necesaria para definir las pérdidas que tiene la antena, pues permitirá notar que no toda la potencia entrante será radiada al espacio. La fórmula de la ganancia de potencia es:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_{in}}{4\pi r^2}} \quad (2)$$

⁵ Imagen tomada de: CARDAMA AZNAR, Ángel; ROCA, Lluís Jofre, **Antenas**, Segunda Edición, Editorial UPC, Barcelona, Septiembre de 2002, página 22

Haciendo uso de un artificio matemático, la ganancia de la antena permite también determinar la eficiencia de la antena:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P_{rad} P(\theta, \phi)}{P_{rad} \frac{P_{in}}{4\pi r^2}}$$

Definiendo:

$$\frac{P_{rad}}{P_{in}} = \eta \quad (3) \quad (\text{Eficiencia de la antena})$$

Se tendría:

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (4)$$

Con lo cual, se puede definir a la ganancia de la antena como el producto de su eficiencia por su ganancia directiva.

Polarización

Existe un vector de campo en cada punto del espacio $\vec{E}(\vec{r}, t)$, en función de la posición y el tiempo. La polarización es la representación de la orientación del vector de campo en un punto fijo en el espacio al transcurrir el tiempo.

La polarización de una antena en una dirección determinada es la de la onda radiada por ella en esa dirección.

El plano que contiene campos eléctricos y magnéticos es llamado plano de polarización y es ortogonal a la dirección de propagación. Por lo general, la punta del vector del campo eléctrico se mueve a lo largo del plano de polarización en forma elíptica.

La polarización de la onda es especificada por la forma y la orientación de la elipse y de la dirección en la que el vector atraviese la elipse.

La forma de la elipse esta especificada por la relación axial, la relación del eje mayor y el eje menor. La orientación esta especificada por el ángulo de inclinación, el ángulo entre el eje mayor y la dirección de propagación. Usualmente la polarización de una antena se mantiene relativamente constante en el lóbulo principal, pero varia considerablemente en los lóbulos menores.

Una antena puede estar polarizada linealmente, elípticamente o circularmente, como se muestra en la figura 1.6:

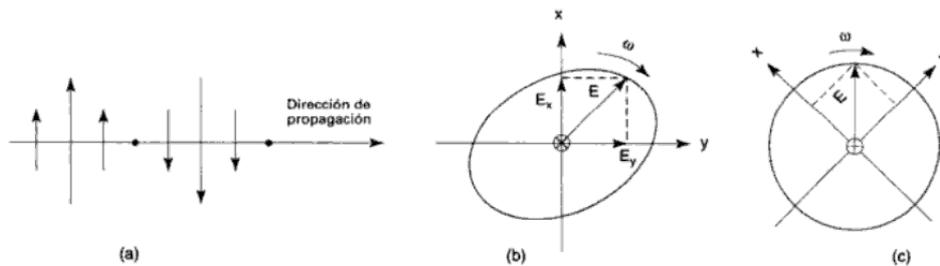


Figura 1.6. Polarizaciones de la antena: a) lineal, b) elíptica, c) circular.⁶

En una polarización especificada la radiación de una antena es denominada polarización de referencia o copolar, la radiación en la polarización ortogonal es llamada polarización cruzada o contrapolar.

Ancho de Banda

Las antenas por su geometría finita están limitadas a operar satisfactoriamente en una banda o margen de frecuencias, este margen se denomina ancho de banda de la antena

⁶ Imagen tomada de: TOMASI, Wayne, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, Cuarta Edición, Editorial Pearson Education, 2003, página 382.

(BW). El ancho de banda puede ser especificado como la relación entre el margen de las frecuencias en las que se cumplen las especificaciones y la frecuencia central, esta relación puede ser expresada en forma de porcentaje:

$$\text{Ancho de Banda} = \frac{f_H - f_L}{f_C} \times 100 \quad (5)$$

Donde f_H representa a la frecuencia más alta en la banda, f_L representa a la frecuencia más baja y f_C es la frecuencia central. El ancho de banda porcentual es constante respecto a la frecuencia.

El ancho de banda de la antena estará sujeto al sistema del que forma parte y afectará al parámetro más sensible de la aplicación. Los parámetros pueden dividirse en dos grupos, según su relación con el diagrama o con la impedancia. En el primero se encuentra la directividad, la pureza de polarización, el ancho de haz, el nivel de lóbulo principal a secundario y la dirección de máxima radiación. En el segundo se encuentra la impedancia de la antena, el coeficiente de reflexión y la relación de onda estacionaria.

El ancho de banda de un arreglo de antenas lineal o plano está limitado por distancia entre los elementos del arreglo medida en longitudes de onda.

Impedancia

Es un parámetro eléctrico que depende de las dimensiones de la antena y de la forma de los elementos que la componen.

La radiación de una antena es consecuencia directa del flujo de corriente de radiofrecuencia. La corriente va hacia la antena pasando por la línea de transmisión. El punto de alimentación de la antena es definido como el punto de la antena donde se conecta la línea de transmisión, y presenta una carga de corriente alterna a la línea de transmisión, denominada impedancia de entrada a la antena. Si la impedancia de salida del transmisor y la impedancia de entrada de la antena son iguales a la impedancia característica de la línea

de transmisión, no habrá ondas estacionarias en la línea y se transmitirá una potencia máxima a la antena, la cual será irradiada.

La impedancia de entrada de una antena es la relación del voltaje de entrada a la antena a la corriente de entrada de la misma:

$$Z_{ent} = \frac{E_i}{I_i} \quad (6)$$

Donde Z_{ent} representa la impedancia de entrada a la antena [ohms], E_i es el voltaje de entrada a la antena [voltios] e I_i es la corriente de entrada a la antena [amperios].

La impedancia de entrada es igual a la suma de la resistencia de radiación más la resistencia efectiva.

Resistencia de Radiación

Este parámetro está determinado por la capacidad que tiene la antena de disipar la energía que recibe del generador, radiándola al espacio.

Su valor en ohmios es el equivalente a una resistencia física que disipará la misma energía que radia la antena, cuando por las dos circula una corriente de igual intensidad.

La resistencia de radiación es función de la longitud del conductor y de la frecuencia de trabajo.

La Resistencia de Radiación es la resistencia de la antena a la corriente alterna, y es representada por la relación de la potencia irradiada por la antena entre el cuadrado de la corriente en su punto de alimentación:

$$R_r = \frac{P_{rad}}{i^2} \quad (7)$$

Donde: R_r representa la resistencia de radiación [ohms], P_{rad} es la potencia irradiada por la antena [watts] e i es la corriente en el punto de alimentación de la antena [amperios].

La resistencia de radiación de una antena, se refiere a un punto arbitrario de la antena, que poseería distintos valores de corriente para distintos puntos de resistencia.

Por lo general la resistencia de radiación de una antena es referida a un punto en el que existe en la antena el máximo valor de corriente y es función directa de la potencia radiada, o al punto de alimentación, donde este valor es la componente activa de la impedancia de entrada.

La eficiencia de la antena es la relación de la potencia irradiada por ella entre la suma de la potencia irradiada y la potencia disipada, o la relación de la potencia irradiada por la antena entre la potencia total de entrada, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{i^2 R_r}{i^2 (R_r + R_e)} = \frac{R_r}{R_r + R_e} \quad (8)$$

Donde η es la eficiencia de la antena, i es la corriente de la antena (amperios), R_r es la resistencia de radiación (ohms) y R_e es la resistencia efectiva de la antena (ohms).

Relación Frente a Espalda (F/B)

La relación frente a espalda, también llamada eficiencia direccional, es definida como la relación de su ganancia máxima en dirección delantera entre su máxima ganancia en dirección trasera.

ARREGLO DE 4 DIPOLOS DOBLADOS

Principio de Funcionamiento

Antena Dipolo Doblado

Una antena dipolo doblado está conformada al conectar dos dipolos simples paralelos cortocircuitados en su extremo. Los dipolos son de radio a y de longitud l , la distancia de separación es s y siempre se asume despreciable comparada con la longitud de onda λ . La figura 1.7 muestra al dipolo doblado:

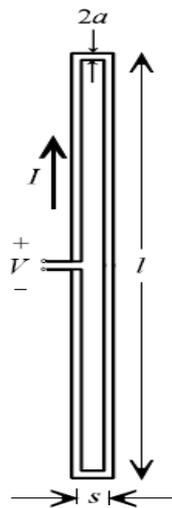


Figura 1.7. Dipolo doblado y sus parámetros⁷

La impedancia de entrada de un dipolo doblado se define por la razón de voltaje con la corriente en el punto de alimentación del dipolo:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (9)$$

⁷ Imagen tomada de: <http://www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece4990notes9.pdf>, Folded Dipole

El dipolo doblado trabaja con una línea de transmisión no balanceada. La corriente del dipolo doblado puede ser descompuesta en dos modos distintos: modo antena y modo de línea de transmisión. La figura 1.8 muestra ambos modos:

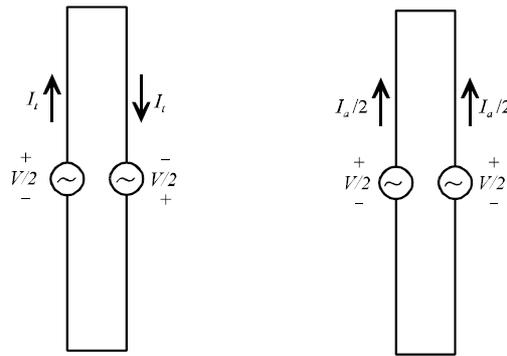


Figura 1.8. Dipolo doblado: Modo línea de transmisión (izquierda) y Modo antena (derecha)⁷

En el modo antena, las corrientes fluyen en la misma dirección, permitiendo una radiación significativa, mientras que en el modo de línea de transmisión, las corrientes fluyen en direcciones opuestas, lo que permite poca radiación.

La corriente total de entrada de un dipolo doblado puede ser definida como la suma de la corriente de la línea de transmisión y de la corriente de la antena. Tomando en cuenta los gráficos de la figura 1.8, se tiene:

$$I = I_t + \frac{I_a}{2} \quad (10)$$

Así, la impedancia total de entrada del dipolo doblado se define de la siguiente manera:

$$Z = \frac{V}{I_t + \frac{I_a}{2}} \quad (11)$$

Insertando un conjunto de fuentes de voltaje en el modo de línea de transmisión, se convierte al dipolo doblado en un conjunto de 2 líneas de transmisión de longitud $l/2$. Cada línea de transmisión se maneja con un voltaje $V/2$, quedando lo siguiente:

$$I_t = \frac{V/2}{Z_t} = \frac{V}{2Z_t} \quad (12)$$

Donde:

Z_t = impedancia de entrada de la línea de transmisión de longitud $l/2$

Por otro lado, se sabe que la ecuación general para la impedancia de entrada de una línea de transmisión con impedancia característica Z_o con una carga Z_L es:

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_L + jZ_o \tan \beta l}{Z_o + jZ_L \tan \beta l} \quad (13)$$

Como la línea está en cortocircuito, la impedancia de carga $Z_L=0$, y además, se tiene que la longitud es $l/2$. De esta manera, se obtiene:

$$Z_t = jZ_o \tan\left(\frac{\beta l}{2}\right) \quad (14)$$

La corriente de la antena de dipolo doblado puede ser relacionada a un dipolo simple equivalente, considerando a las corrientes como coincidentes para propósitos de campos lejanos:

$$I_a = \frac{V/2}{Z_d} = \frac{V}{2Z_d} \quad (15)$$

Donde:

Z_d = Impedancia de entrada de un dipolo de longitud l y radio equivalente a_e

Se toma en cuenta el radio equivalente del dipolo debido a la proximidad de los 2 brazos, que produce una capacitancia que altera la distribución de la corriente en un dipolo aislado. El radio equivalente viene dado por:

$$a_e = \sqrt{as} \quad (16)$$

Dadas las relaciones de corrientes y voltajes entre el modo de línea de transmisión y el modo antena, la impedancia de entrada del dipolo doblado se puede escribir:

$$Z_{d.dob.} = \frac{4Z_t Z_d}{Z_t + 2Z_d} \quad (17)$$

Cuando el dipolo doblado tiene una longitud de $\lambda/2$, se tiene que la impedancia de entrada de la línea de transmisión equivalente es la de una línea de transmisión de cuarto de longitud de onda, que está en circuito abierto:

$$Z_t = jZ_o \tan\left(\frac{\beta l}{2}\right) = jZ_o \tan\left(\frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{1}{4}\right) = jZ_o \tan\frac{\pi}{2} = \infty$$

Entonces, la impedancia del dipolo doblado de media longitud de onda será:

$$Z_{dip.dob.} = \lim_{Z_t \rightarrow \infty} \left\{ \frac{4Z_t Z_d}{Z_t + 2Z_d} \right\} = 4Z_d = 300\Omega \quad (18)$$

Donde $Z_d = 75 \Omega$, que es la impedancia normalizada de la antena dipolo simple.

Así, se concluye que el dipolo doblado de media longitud de onda puede ser resonante con una impedancia aproximada de 300Ω , que es usualmente la impedancia utilizada para sistemas de televisión.

Otra diferencia que tiene el dipolo doblado con el dipolo simple es el hecho de que el segundo tiene un patrón de radiación omnidireccional totalmente, mientras que el patrón de radiación del dipolo doblado tiene una forma más parecida a la de una cardioide. Por último, el dipolo doblado permite lograr un ancho de banda mayor al del dipolo simple, pudiendo alcanzar un rango de operación del 5% a partir de la frecuencia central.

Arreglo de dipolos doblados

Las antenas dipolo se utilizan generalmente cuando se requieren patrones de radiación con características omnidireccionales. Sin embargo, su ganancia es muy pequeña, lo que no satisface las necesidades de muchos sistemas de comunicaciones, pues se requiere de enlaces punto a punto con lóbulos de radiación altamente directivos, por lo cual la disposición de varios dipolos u otros elementos dentro de un arreglo se hace sumamente necesaria, para lograr mayores niveles de ganancia y directividad.

Al incrementar la ganancia por un determinado factor, se hace posible la reducción de la potencia de transmisión sin afectar el nivel de la señal en el sitio de recepción, lo que hace que el sistema de comunicaciones sea más efectivo, en especial si la antena de recepción utilizada también contribuye cierta ganancia.

Con lo mencionado, se puede concluir que el arreglo de dipolos doblados trabajará con las mismas características que lo haría un solo dipolo, pero al tener varios elementos, tendrá una mejor ganancia que permitirá dar una mejor cobertura, a la vez que la antena será más efectiva en enlaces punto a punto que requieren una mejor directividad que la que proporcionaría el dipolo por sí solo.

Diseño y Cálculos para el Funcionamiento en 150 MHz

Criterios de diseño

El primer parámetro de diseño para el arreglo de dipolos doblados es la distancia que debe existir entre sus elementos. Para determinarla, se debe saber que el arreglo es de tipo uniforme en una dimensión, como el que se muestra en la figura 1.9

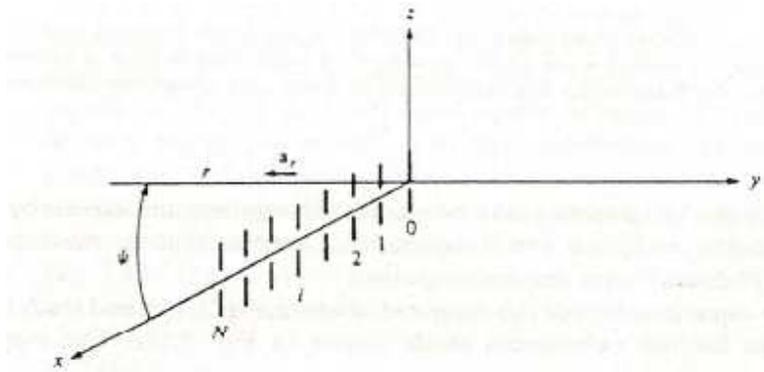


Figura 1.9. Arreglo lineal de N+1 dipolos de media longitud de onda⁸

Los elementos se encuentran a una distancia d entre sí. Cada uno de ellos tiene una excitación constante de $C=I_0$, con una fase que va cambiando a una razón $\alpha*d$ de elemento a elemento. Así, aplicando el principio de multiplicación de patrones, el patrón de radiación está dado por:

$$F(\theta, \phi) = I_0 \sum_{n=0}^N e^{jn\alpha d + jk_0 n d \cos\psi} \quad (19)$$

⁸ COLLIN, Robert, **Antennas and Radiowave Propagation**, Primera Edición, Editorial McGraw Hill Book Company, New York, 1985, página 109

Donde ϕ es el ángulo entre el vector unitario \widehat{a}_r y el eje del arreglo, siendo $\widehat{r}_n = nd\hat{i}$, $a_r \cdot r_n = nd$, $\cos \psi = nd \sin \theta \cos \phi$. La ecuación mostrada anteriormente es una serie geométrica, se la puede sumar utilizando la siguiente relación:

$$\sum_{n=0}^N w^n = \frac{1 - w^{N+1}}{1 - w}$$

De esta manera, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} F &= I_0 \frac{1 - e^{j(N+1)(\alpha + \beta_0 \cos \psi)d}}{1 - e^{j(\alpha + \beta_0 \cos \psi)d}} \\ &= I_0 e^{j(N/2)(\alpha + \beta_0 \cos \psi)d} \frac{\sin\{[(N+1)/2](\alpha + \beta_0 \cos \psi)d\}}{\sin[(\alpha + \beta_0 \cos \psi)d/2]} \end{aligned} \quad (20)$$

Que representa a la magnitud y fase del arreglo, pero como sólo la primera afecta al patrón de radiación, se desarrolla el estudio del módulo únicamente:

$$|F| = I_0 \left| \frac{\sin\{[(N+1)/2](\alpha + \beta_0 \cos \psi)d\}}{\sin[(\alpha + \beta_0 \cos \psi)d/2]} \right| \quad (21)$$

Para simplificar el análisis se utilizan las siguientes variables:

$$u = \beta_0 d \cos \psi \qquad u_0 = \alpha d$$

Con estas transformaciones, el factor de arreglo puede ser expresado así:

$$|F| = I_0 \left| \frac{\sin\left\{\left[\frac{(N+1)}{2}\right](u + u_0)\right\}}{\sin[(\alpha + \beta_0 \cos \psi)d/2]} \right| \quad (22)$$

Esta función tiene características muy parecidas a las de la función *Sinc*, excepto que es periódica. Esto se demuestra en la figura 1.10

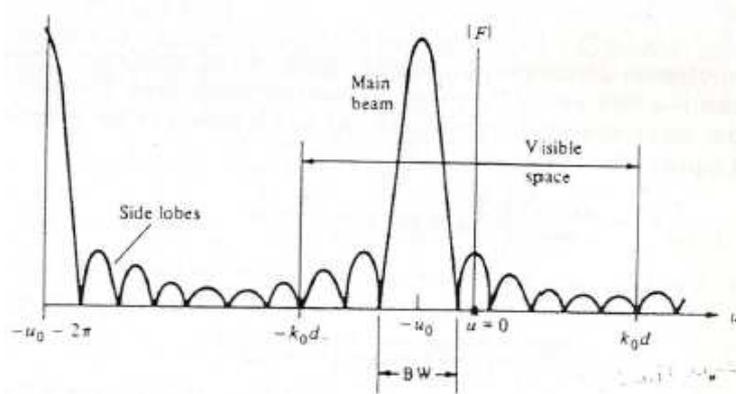


Figura 1.10. Factor de arreglo para un arreglo lineal uniforme⁹

La figura mostrada exhibe al factor de arreglo como función de u , su máximo valor se encuentra en $u=-u_0$ y cuando $(u+u_0)/2=m\pi$. Los picos más pequeños son llamados lóbulos laterales, existen $N-1$ de ellos entre los lóbulos principales. Como función de u , el patrón de arreglo se repite cada 2π unidades.

La zona visible de la gráfica se encuentra en el rango $-\beta_0 d \leq u \leq \beta_0 d$ debido a que $\cos\psi$ varía entre -1 y 1 . En la práctica, se requiere sólo un lóbulo principal en el espacio físico y esto obliga a escoger el espaciamiento d lo suficientemente pequeño para que la zona visible esté en el rango mencionado.

La antena que se utilizaría en la Hacienda “El Prado” es un arreglo de radiación lateral en el cual $\alpha=0$, así que $u_0=0$, lo que ocasiona que el lóbulo principal ocurra en $u=0$, que significa que $\cos\psi = 0$ y por lo tanto $\psi = \pi/2$. De esta manera, se tendrá que la radiación ocurre de manera lateral al eje del arreglo y se puede deducir que todos los elementos están alimentados en fase. Observando la figura 1.10 se concluye que si se

⁹ COLLIN, Robert, **Antennas and Radiowave Propagation**, Primera Edición, Editorial McGraw Hill Book Company, New York, 1985, página 111

mantiene el espaciamiento d entre los elementos en un valor menor a la longitud de onda λ , la zona visible no tendrá más de un lóbulo principal puesto que los otros estarán al menos a una distancia de 2π del lóbulo ubicado en $u=0$.

El segundo parámetro en el diseño de la antena es la longitud de los dipolos doblados que debe ser igual a la mitad de la longitud de onda λ que hace que la antena esté en resonancia, es decir que la amplitud de la distribución de corriente a lo largo de los brazos del dipolo es igual a la corriente en los terminales de entrada del mismo. Además la corriente en cada brazo será la misma debido al acoplamiento mutuo que existe entre ellos. Sin embargo, en la práctica, la longitud de los brazos del dipolo doblado será un pequeño porcentaje menor a $\lambda/2$.

El último parámetro a considerar es la separación que tienen los brazos de los dipolos, la cual debe ser muy pequeña con relación a la longitud de onda para que exista un acoplamiento mutuo lo suficientemente fuerte entre ellos y para que la diferencia de fase del campo irradiado por ambos sea despreciable, haciendo que el campo total radiado sea dos veces más fuerte que el que irradiaría un dipolo simple. Además la potencia irradiada será cuatro veces mayor a la de un solo dipolo.

Cálculos

Para poder determinar las dimensiones del arreglo de dipolos doblados, primero se debe calcular la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{150 * 10^6 \text{ Hz}}$$

$$\lambda = 2\text{m}$$

Como se mencionó en la sección anterior, el arreglo de dipolos doblados es de radiación lateral, y por lo tanto la separación entre sus elementos del arreglo debe ser menor

a la longitud de onda. Además, el diseño de arreglos de radiación longitudinal exige que sus elementos estén aislados al menos por una media longitud de onda entre sí. Por lo tanto, la **distancia d entre los dipolos doblados** será:

$$\frac{\lambda}{2} \leq d \leq \lambda$$

Para cumplir con este rango y para que exista una distancia prudencial entre los elementos del arreglo, se ha fijado un valor de:

$$d = 162 \text{ cm.}$$

El valor de la **longitud de los dipolos** doblados se determina como se expone a continuación:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{2 \text{ m}}{2} = 1 \text{ m}$$

Puesto que en los criterios de diseño se estableció que en la práctica la longitud de los dipolos debe ser ligeramente menor a la mitad de longitud de onda calculada y debido también a que es imposible obtener una dimensión exacta al momento de doblar el aluminio y dar forma a los dipolos doblados, el valor final con el que se los ha construido es:

$$l = 88 \text{ cm}$$

Para finalizar los cálculos necesarios en este diseño, se procede a determinar la **separación entre los brazos del dipolo doblado**, que como se dijo antes, debe ser despreciable con respecto a la longitud de onda. Además, cabe mencionar que su dimensión se verá afectada por las características de las herramientas utilizadas para dar forma al dipolo doblado. La distancia obtenida para este parámetro es:

$$s = 10 \text{ cm},$$

valor que corresponde al 5% de la longitud de onda ($0,05 \lambda$).

Características Físicas de la Antena (Medidas Obtenidas)

La figura 1.11 muestra a la antena arreglo de dipolos doblados y las medidas reales de su construcción que garantizan un buen funcionamiento en la banda de 150 MHz:

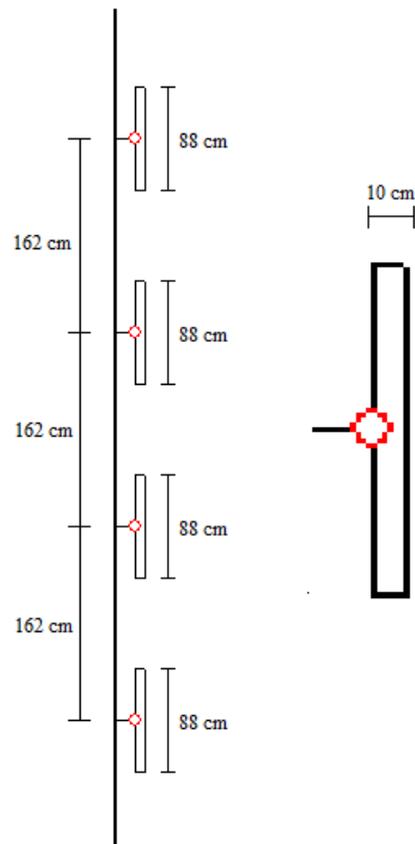


Figura 1.11. Arreglo de 4 dipolos doblados y sus dimensiones

Patrón de Radiación

Obtención del Patrón de Radiación

Para obtener el patrón de radiación de la antena, se utilizó el software de análisis de antenas llamado MMANA-GAL. El método de funcionamiento de este programa consiste en ingresar todos los elementos físicos de la antena, determinar las fuentes de alimentación de energía que tiene y luego, mediante el método de los momentos, el programa simula y calcula el patrón de radiación que tendría la antena en estudio.

La figura 1.12 muestra la manera en la que se construye la antena en el software MMANA-GAL. Se ingresa los elementos físicos uno por uno, con las medidas reales de la antena. Para construir el arreglo de dipolos doblados, se optó por ingresar una línea a la vez, utilizando los elementos llamados “Line parallel axis y” y “Line parallel axis z”, que constan en la lista que se observa:

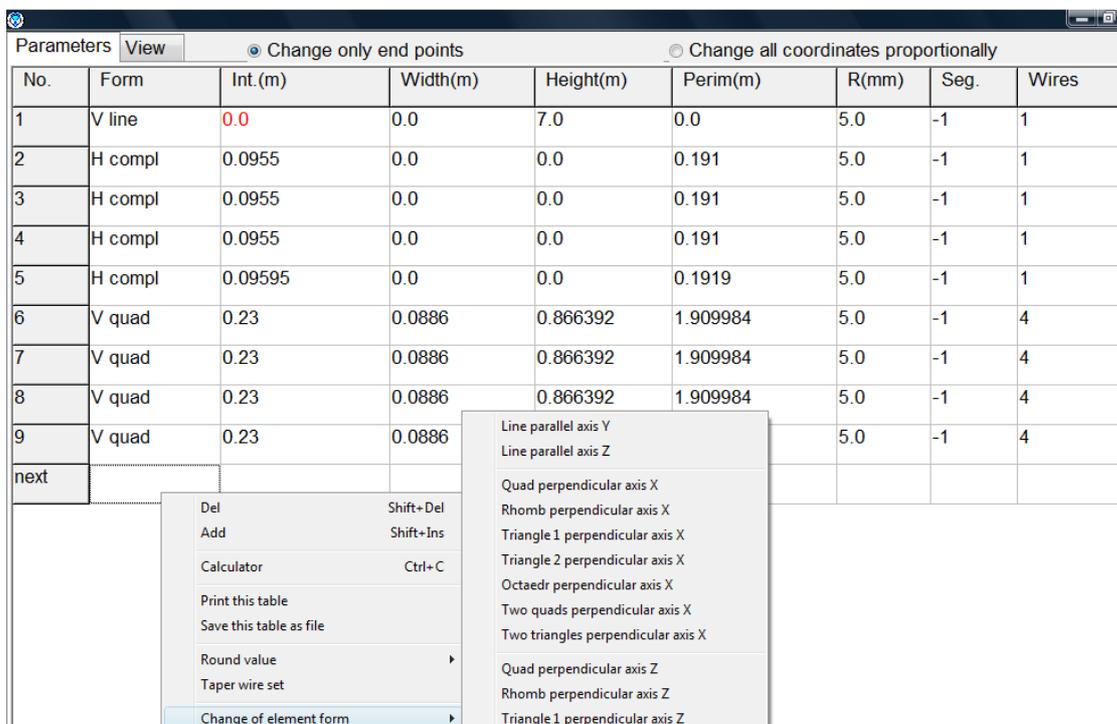


Figura 1.12. Ingreso de datos para construir el arreglo de 4 dipolos doblados en MMANA-GAL

Una vez ingresados todos los datos necesarios con las medidas correctas, ya se puede observar la antena construida y se procede a ingresar las fuentes de alimentación de la antena, como se muestra en la figura 1.13:

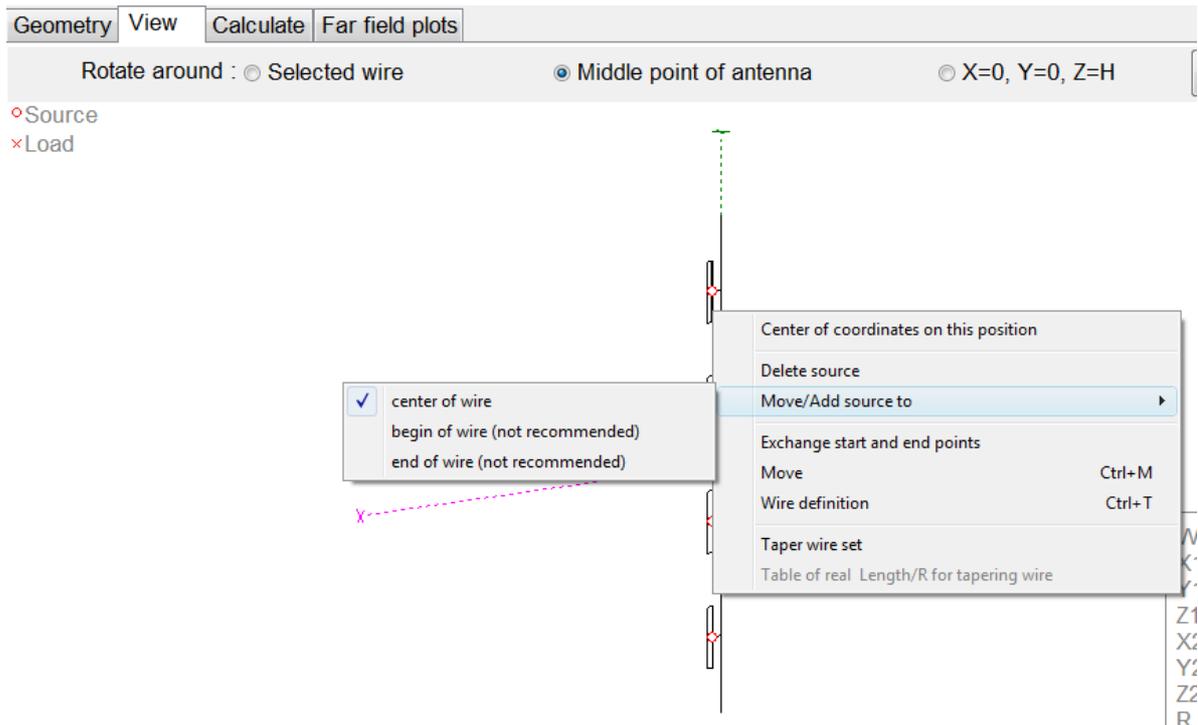


Figura 1.13. Determinación de las fuentes de alimentación de la antena

Como se puede observar, se tiene que escoger el lugar en donde se sabe que la guía de onda de la antena estará conectada, y colocar ahí la fuente que se desea añadir. En la figura que se muestra arriba, las fuentes están representadas por los círculos rojos, y se ubica una en uno de los brazos de cada dipolo doblado.

Ya con la construcción de la antena lista, se puede proceder a realizar la simulación que determinará el patrón de radiación de la antena. Se ingresa la frecuencia a la que trabaja la antena y se inicia el cálculo, tal como lo muestra la figura 1.14:

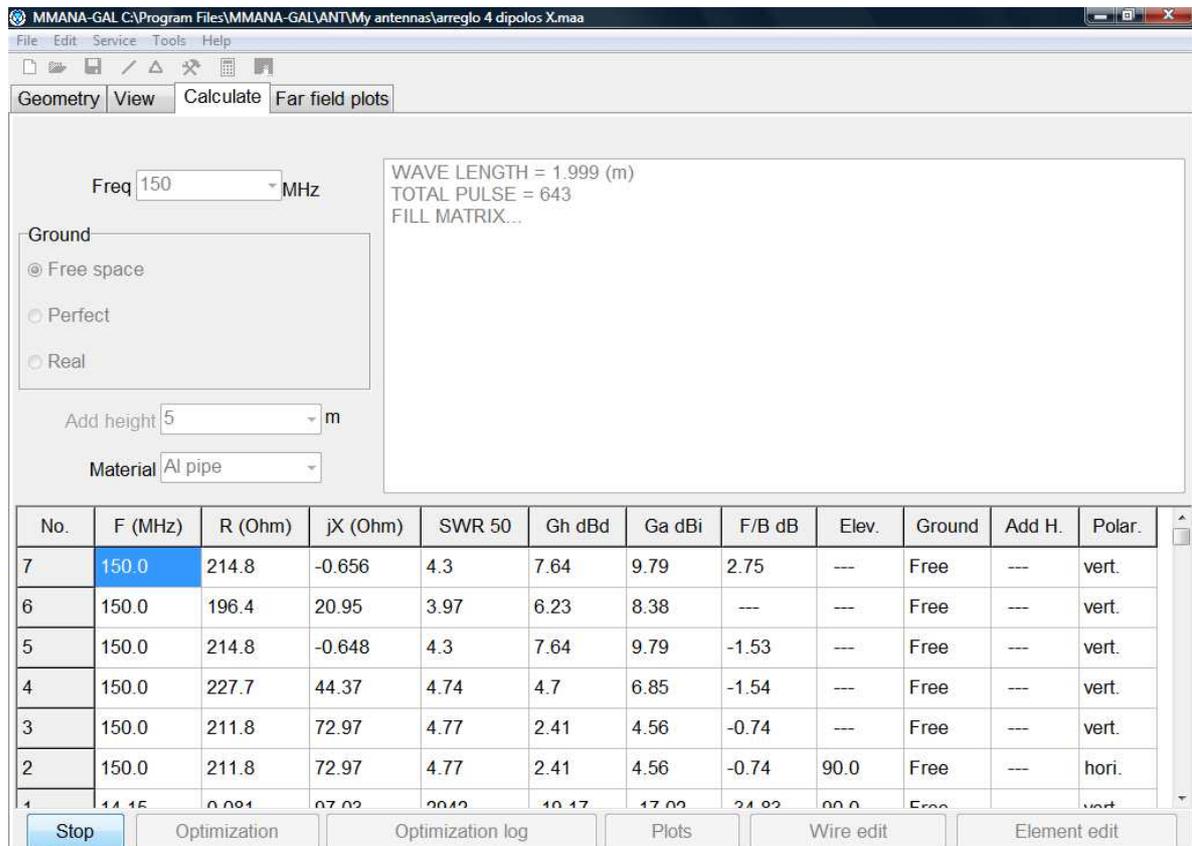


Figura 1.14. Simulación de la antena en curso

Una vez que el programa termina de realizar los cálculos necesarios, el patrón de radiación es obtenido y se encuentra listo para ser analizado.

Análisis de los resultados obtenidos mediante el software MMANA-GAL

Para poder realizar un análisis completo del patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados lineales utilizado en el proyecto, se incluye también la simulación de una antena dipolo doblado, de un arreglo de 2 dipolos doblados y de un arreglo de 4 dipolos doblados colineales.

En primera instancia, se tiene al dipolo doblado. La figura 1.15 muestra los cortes horizontal y vertical del patrón de radiación obtenido, y además el patrón de radiación completo visto en tres dimensiones:

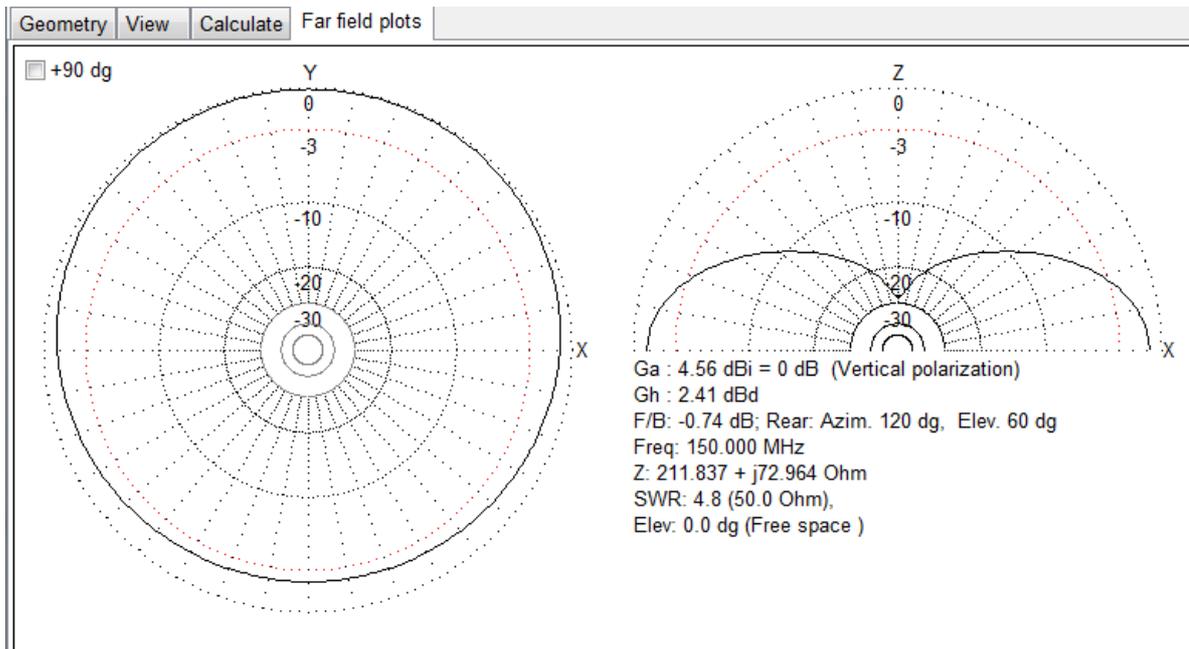


Figura 1.15. a) Cortes horizontal y vertical del patrón de radiación de la antena dipolo doblado

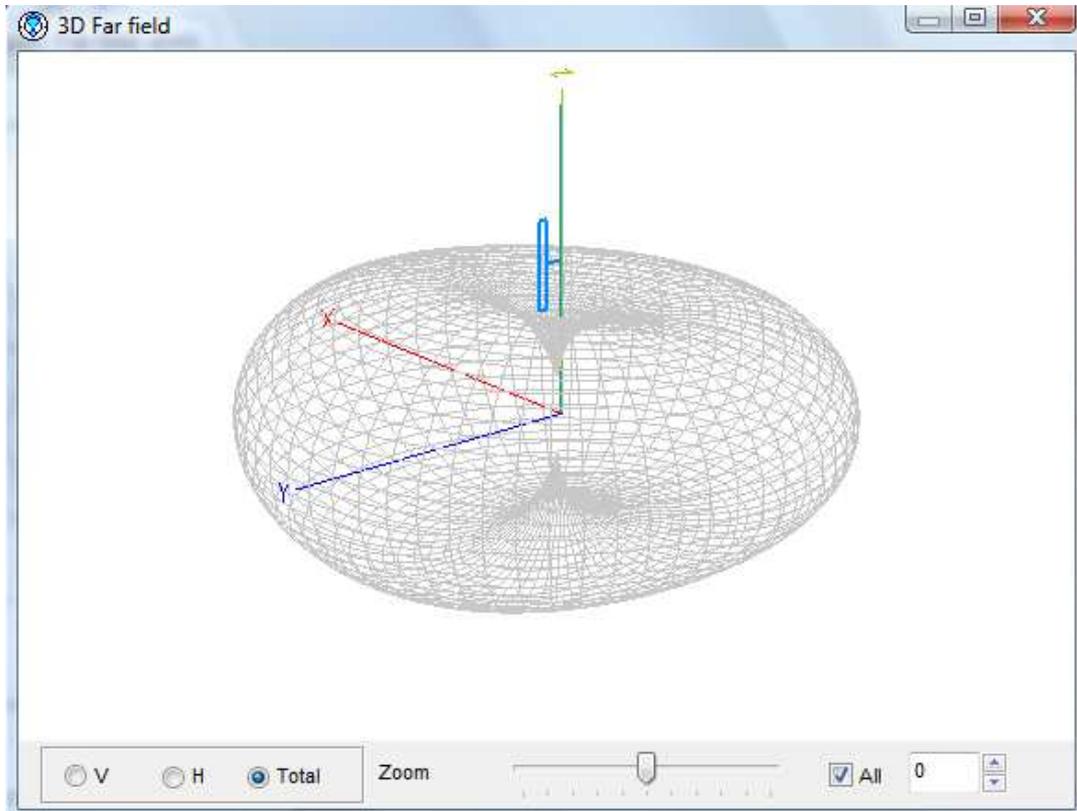


Figura 1.15. b) Patrón de radiación de la antena dipolo doblado

El gráfico de mayor interés para el análisis es el del corte horizontal del patrón de radiación, pues ayudará a predecir el área de cobertura que proporcionará la antena.

Se puede observar que el patrón de radiación obtenido es típico de este tipo de antena. Su forma es bastante parecida a la de una cardioide y se observa que la ganancia máxima tiene un valor de 4.56 dBi. La polarización de la antena es vertical.

La siguiente antena a analizar es el arreglo de 2 dipolos doblados. La figura 1.16 muestra los cortes horizontal y vertical del patrón de radiación de esta antena y la visualización del mismo en tres dimensiones:

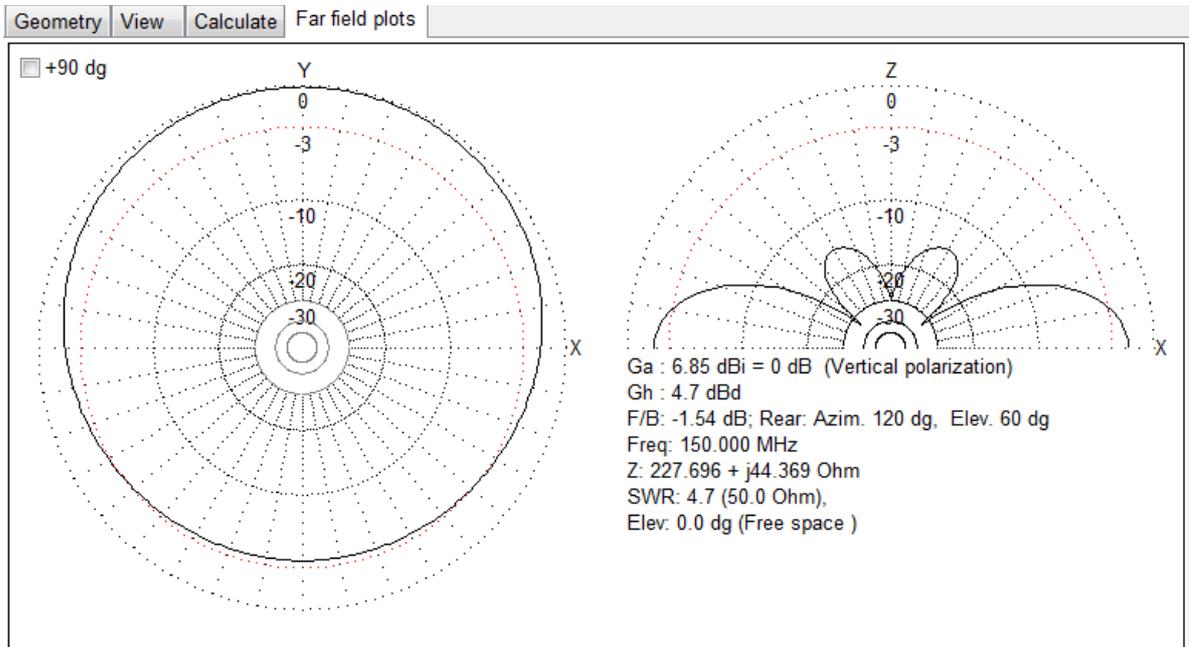


Figura 1.16 a) Cortes horizontal y vertical del patrón de radiación del arreglo de 2 dipolos doblados

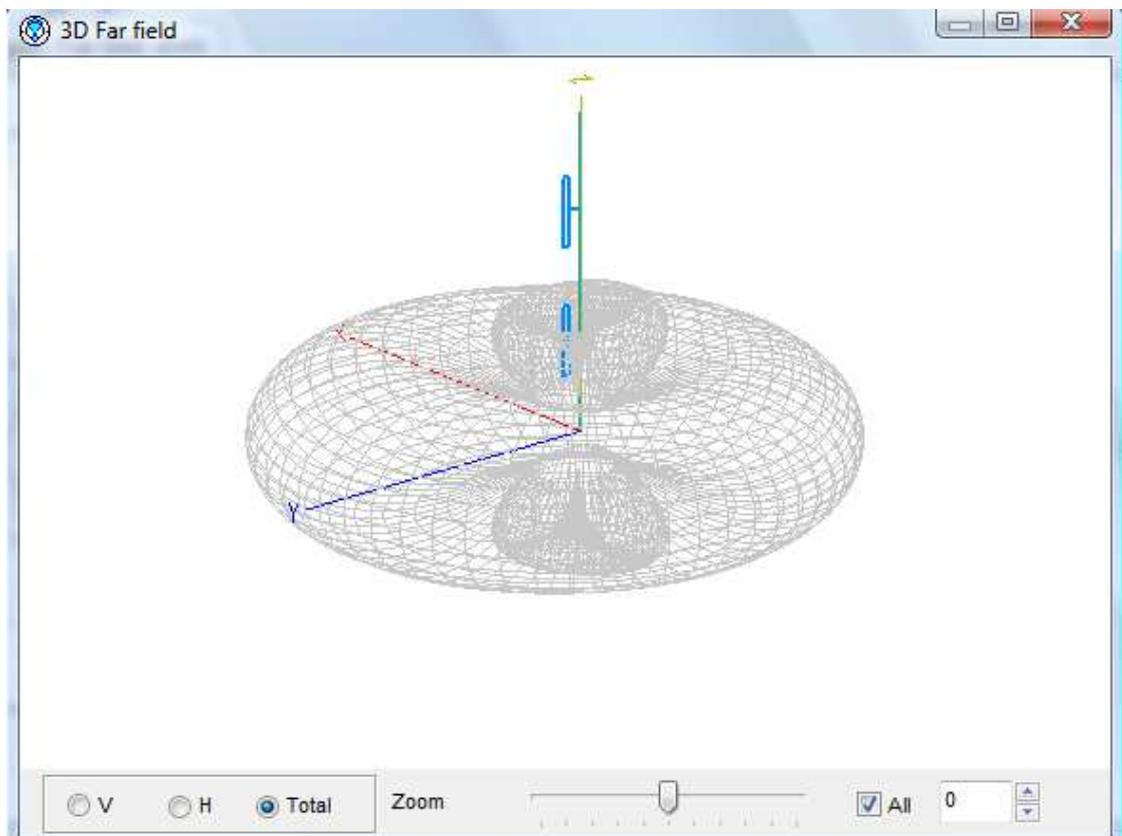


Figura 1.16. b) Patrón de radiación del arreglo de 2 dipolos doblados

En el diagrama del corte horizontal del patrón de radiación, se observa que su forma es muy parecida a la que se obtiene utilizando un solo dipolo doblado. Sin embargo, mejora la ganancia de la antenna, pues se logran mejores niveles en todas las direcciones con respecto a lo que se obtuvo en el caso anterior. La ganancia máxima es de 6.85 dBi.

La tercera simulación analiza al arreglo de 4 dipolos doblados colineales, en la cual dos de los dipolos apuntan en una dirección, y los otros dos lo hacen en la dirección opuesta. La figura 1.17 muestra gráficamente lo explicado, así como los cortes del patrón de radiación de esta antenna y la gráfica tridimensional del mismo:

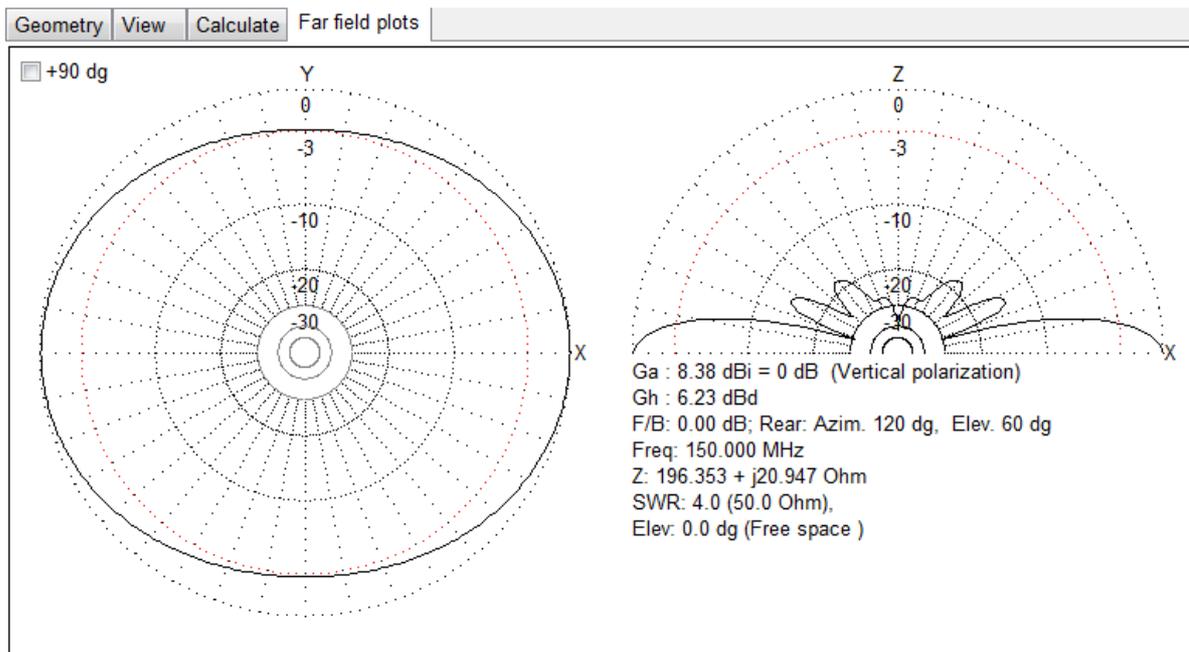


Figura 1.17. a) Cortes horizontal y vertical del patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados colineales

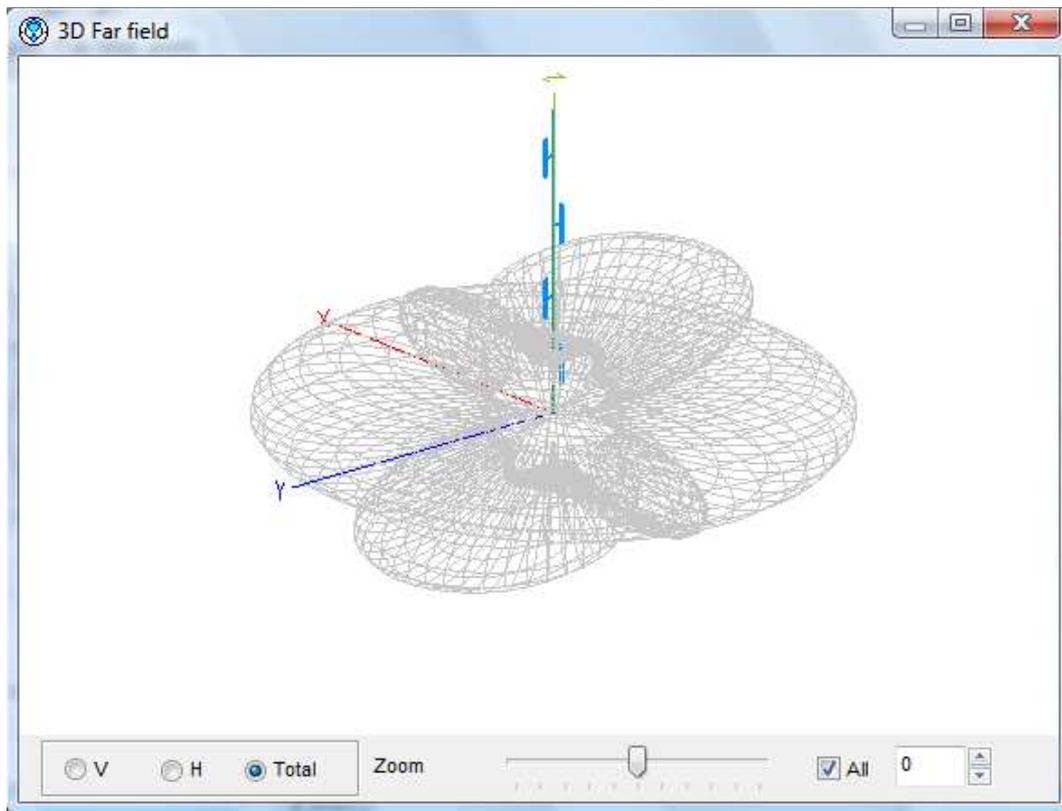


Figura 1.17. b) Patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados colineales

En este caso, se tiene un patrón de radiación totalmente simétrico, producto de la manera en que están dispuestos los dipolos doblados, pues al tener la misma cantidad de elementos apuntando en direcciones opuestas, el arreglo irradia energía uniformemente en ambos sentidos. Por otro lado, la ganancia de la antena mejora con respecto a los dos casos anteriores, teniendo un nivel máximo de 8.38 dBi.

La última antena que se va a analizar es el arreglo de 4 dipolos doblados lineales. La figura 1.18 refleja los resultados obtenidos para los cortes horizontal y vertical del patrón de radiación y la gráfica tridimensional del mismo:

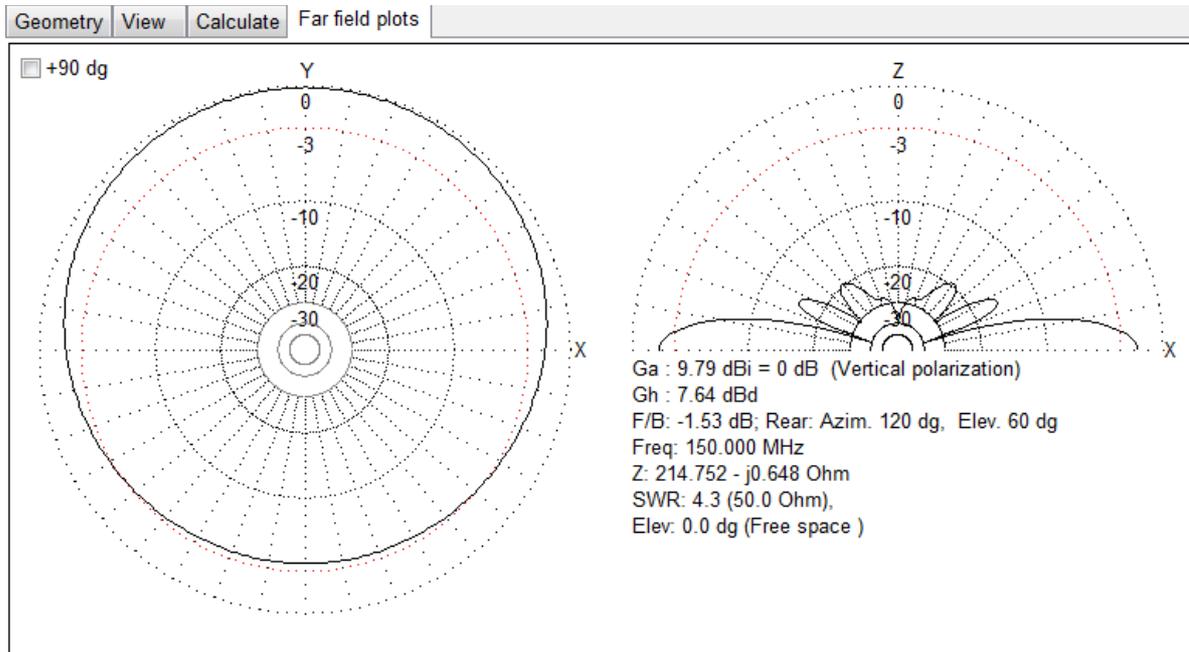


Figura 1.18. a) Cortes horizontal y vertical del patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados lineales

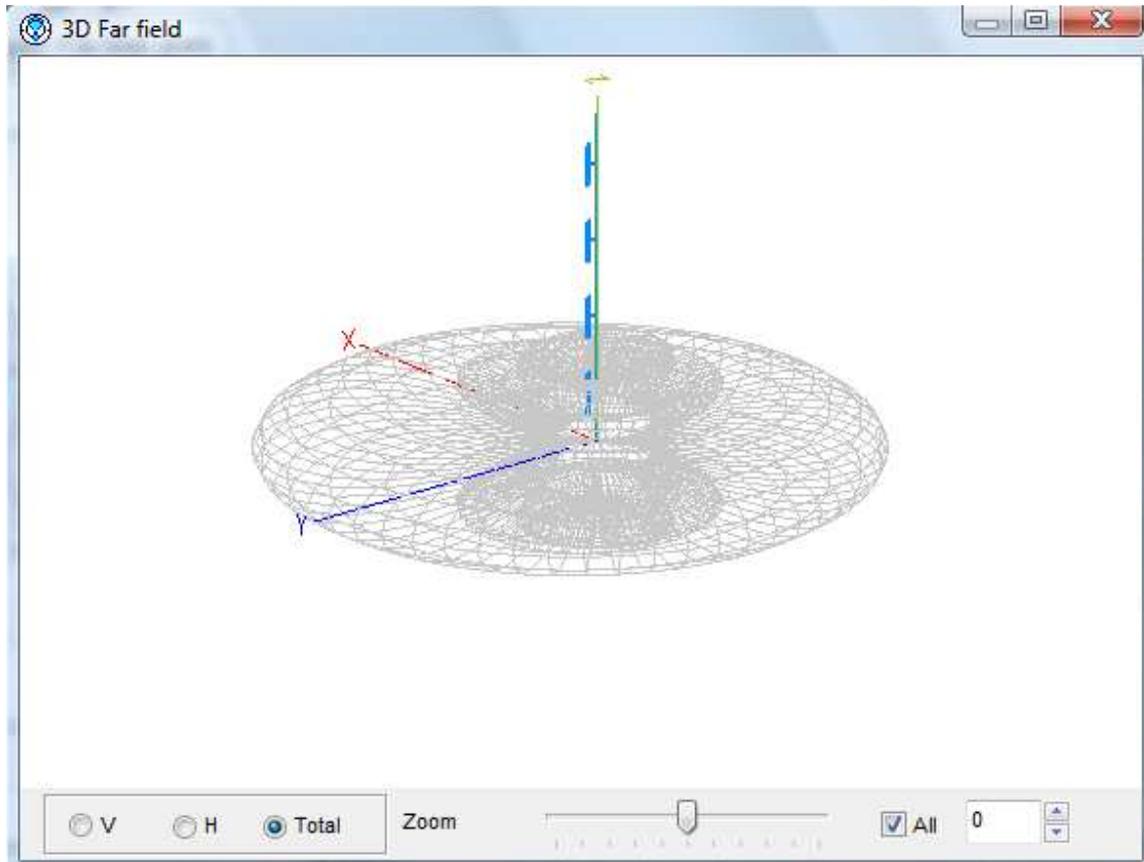


Figura 1.18. b) Patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados lineales

Se observa que de acuerdo al patrón de radiación obtenido, esta antena es la más óptima de las cuatro analizadas, pues se obtiene el nivel de ganancia más alto, con un máximo de 9.79 dBi, que supera a todos los anteriores.

Se puede concluir que mientras más dipolos doblados compongan el arreglo, mejores niveles de ganancia se tendrán. Además se debe notar que, a diferencia del arreglo de dipolos doblados colineales, al apuntar todos los dipolos en una misma dirección, se concentra una mayor cantidad de energía en ese sentido, lo que hace que el último arreglo analizado sea más óptimo para realizar enlaces punto a punto debido a la mayor ganancia que se obtiene.

Estos argumentos permiten afirmar que el arreglo de 4 dipolos doblados lineales es el más óptimo. Para realizar el enlace punto a punto entre el IASA y la repetidora en Cruz

Loma, se utilizará este arreglo de antenas, debido al excelente nivel de ganancia que proporciona al apuntar la antena en la dirección correcta, así como para dar una buena cobertura del sistema de radiocomunicaciones en los predios de la Hacienda “El Prado”, debido a la forma de su patrón de radiación y a que los niveles de ganancia en todas las direcciones son más altos que los obtenidos para las otras configuraciones analizadas.

Aplicaciones del Arreglo de 4 Dipolos Dobladados

El arreglo de 4 dipolos doblados se utiliza sobre todo en aplicaciones VHF y en ocasiones también para sistemas UHF. Tienen la función de incrementar la impedancia de entrada de la antena, así como el ancho de banda del sistema de radiocomunicaciones.

El uso más común de este arreglo, se utiliza en sistemas de comunicaciones por radio de 2 vías, donde se lo conecta al equipo de radio base y se proporciona la cobertura necesaria para comunicar con radios portátiles y con otras bases que formen parte del sistema. La otra función de la antena es permitir la comunicación en canales símplex de 2 frecuencias, mediante enlaces punto a punto con repetidoras que permiten brindar mayor cobertura en zonas apartadas.

La figura 1.19 muestra un arreglo de 4 dipolos doblados instalada sobre una torre:

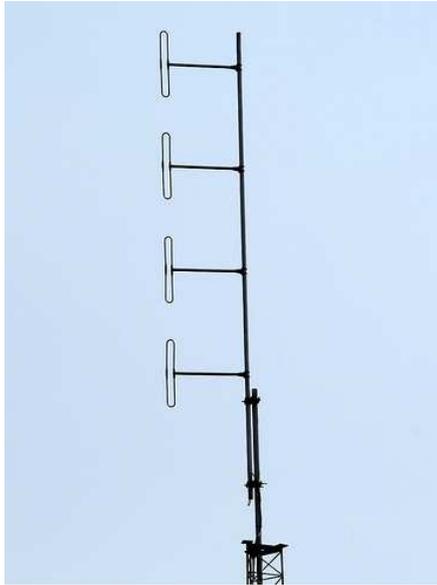


Figura 1.19. Arreglo de 4 dipolos doblados instalado y en funcionamiento¹⁰

¹⁰ Imagen tomada de: <http://www.flickr.com/photos/25823827@N00/248432849>, Vertical Array

CAPITULO 2

SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES SIMPLEX

2.1 INTRODUCCION

Los sistemas electrónicos de comunicaciones se pueden diseñar para manejar distintos modos de transmisión.

En el sistema simplex las transmisiones se hacen en una sola dirección, a esta sistema también se lo suele llamar “sólo en un sentido”, “sólo recibir” o “sólo transmitir”.

Una estación puede sólo ser un transmisor o un receptor, pero no ambos a la vez.

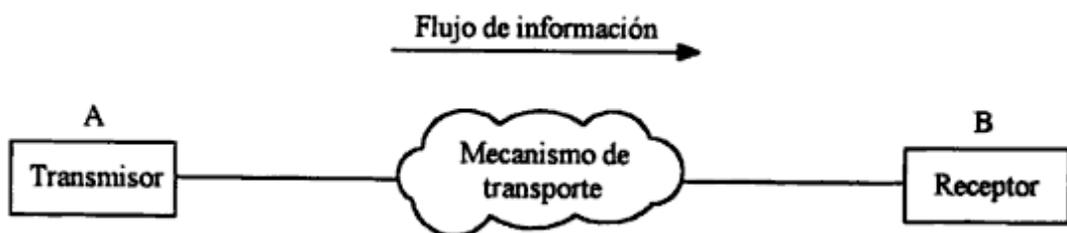


Figura 2.1: Elementos básicos de un sistema de comunicaciones simplex.¹¹

¹¹ Imagen tomada de: HERRERA, Enrique, Introducción a las telecomunicaciones modernas, Editorial Limusa, 2006, página 25.

2.2 SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES MÓVILES

Estos sistemas permiten el intercambio de información entre terminales móviles y terminales fijos, utilizando un medio de transmisión radioeléctrico. Este sistema aprovecha el carácter inalámbrico de los enlaces radioeléctricos y su movilidad.

Los sistemas móviles son de cobertura zonal a diferencia de los sistemas de radiocomunicaciones entre puntos fijos, y debido a esto los terminales pueden encontrarse en cualquier punto del área de cobertura. Esto implica que exista una variación continua del trayecto de propagación, lo que es importante para el diseño de los sistemas de radio móviles. Estos sistemas permiten realizar conexiones entre usuarios fijos, desde centros de control o mediante la red telefónica con usuarios móviles.

El servicio móvil es un servicio de radiocomunicaciones entre estaciones móviles y estaciones fijas, o entre estaciones móviles únicamente. Se pueden distinguir tres clases de servicios móviles:

- Servicio móvil terrestre
- Servicio móvil marítimo
- Servicio móvil aeronáutico

2.2.1 Elementos de un Sistema de Radiocomunicaciones Móviles

Los sistemas de comunicaciones móviles se pueden dividir en dos subsistemas:

- Subsistema de Red: comprende un conjunto de instalaciones y equipos fijos, como son los controladores, nodos de conmutación, registros de usuarios y centros de control, operación y mantenimiento.
- Subsistema de Acceso: comprende un conjunto de estaciones de radio, desplegadas dentro de la zona de cobertura de la red móvil, que permiten el

enlace de los terminales móviles entre sí y a través de la red con los terminales fijos.

Un sistema de radiocomunicaciones móviles consta de los siguientes elementos:

- Estaciones Móviles
- Estaciones Fijas
- Equipos de Control

Estaciones Móviles

Estaciones previstas para su utilización en un vehículo en marcha o que efectúa paradas en puntos indeterminados. Incluye equipos portátiles o de mano, los cuales acompañan al usuario, y equipos transportables, que pueden ser instalados en vehículos. También se las denomina “terminales”.

Estaciones Fijas

Son estaciones radioeléctricas estáticas y pueden cumplir una de las funciones que se detallan a continuación:

- *Estación de base:* Su funcionamiento se controla directamente desde una unidad de control situada en un punto específico. El control puede ser local o remoto, mediante radioenlaces o líneas telefónicas. Las estaciones de base son fuentes y destinatarias de tráfico y de señalización. Están constituidas por equipos transceptores, sistemas radiantes y elementos de conexión.
- *Estación de control:* Estación utilizada para la conexión de una estación de base con la red de telecomunicaciones fija, mediante radioenlace punto a punto. El tráfico de información que transmite es de tránsito.

- *Estación repetidora:* Este tipo de estaciones retransmiten las señales recibidas. Conectan estaciones base con estaciones móviles. Son usadas para conseguir una gran cobertura radioeléctrica y mientras más alto se las ubique, mejor será la cobertura alcanzada. Son usadas también para el relleno de zonas de sombra en la cobertura de una estación base o para proporcionar cobertura en túneles y estacionamientos subterráneos. El tráfico es de tránsito.

Equipos de Control

El conjunto de equipos de control lo forman los dispositivos necesarios para el manejo de las estaciones de base, recepción y generación de llamadas, localización e identificación de usuarios, de quipos y de vehículos, transferencia de llamadas y señalización de canales.

2.2.2 Clases de Sistemas de Radiocomunicaciones Móviles

Se puede clasificar a los sistemas de radiocomunicaciones de acuerdo a diversos criterios, los cuales se explican en esta sección:

Por la modalidad de Funcionamiento

Sistemas de Radiotelefonía: en estos sistemas las transmisiones se realizan en ambos sentidos, de una estación fija a una móvil y viceversa.

Sistemas de Radiobúsqueda o Radiomensajería: en estos sistemas las transmisiones únicamente tienen lugar desde las estaciones fijas a las estaciones móviles.

Por el Sector de Aplicación

De acuerdo a este criterio de clasificación, los sistemas de radiocomunicaciones móviles pueden ser públicos, privados y de telefonía inalámbrica.

Para los Sistemas de Radiotelefonía Móvil Privada, PMR (Private Mobile Radio) y PAMR (Public Access Mobile Radio), su área de acción territorial es limitada y no están conectados en forma expresa a la red telefónica pública conmutada PSTN (Public Switced Telephone Network). Estos sistemas son utilizados por empresas en sus vehículos cuya actividad requiere el intercambio de órdenes o información.

Las redes PMR por lo general tienen un tamaño reducido y asignación rígida de frecuencias.

Las redes de telefonía móvil pública PLMN (Public Land Mobile Networks) están abiertas a la correspondencia pública general y con una cobertura que puede llegar a todo un continente.

Por el modo de explotación

Existen tres modos de operación en comunicaciones móviles:

- Simplex
- Semiduplex
- Duplex

Por ser los sistemas de comunicaciones símplex el tema principal de este capítulo, se explicará más a fondo esta clasificación en la siguiente sección.

Por la modulación y canalización

La modulación y el ancho de banda por lo general están relacionados con la técnica de multiacceso. En los sistemas móviles analógicos con multiacceso se utiliza la modulación analógica de frecuencia (FM) de banda estrecha. La frecuencia máxima de audio se limita a 3000 Hz.

Existen dos tipos de canalizaciones para sistemas analógicos:

- *Canalización Normal:* La separación de canales es de $\Delta f = 25 \text{ KHz}$. En sistemas PMR/PAMR, la desviación de frecuencia es $f_d = 5 \text{ KHz}$ y el ancho de banda que se necesita para la transmisión es de 16 KHz. Se encuentra en un período de extinción en beneficio de la canalización. En PLMN analógica, la desviación de frecuencia utilizada es de $f_d = 9.5 \text{ KHz}$ y el ancho de banda necesario es de 24 KHz. De esta manera se logra una mejor calidad de voz. Estos sistemas también se encuentran en fase de extinción.
- *Canalización Estrecha:* En esta canalización la separación de canales es de $\Delta f = 12.5 \text{ KHz}$. La excursión de frecuencia es de $f_d = 1.5 \text{ KHz}$ y el ancho de banda que se necesita es de 8.5 KHz. A diferencia de la canalización normal, la diferencia entre anchura del canal y el ancho de banda es pequeña, la tolerancia de frecuencia de la portadora debe ser más estricta. Esta canalización es usada únicamente en PMR.

En los sistemas móviles digitales con multiacceso TDMA, se utiliza una modulación de frecuencia digital FSK (Frequency Shift Keying) o modulación diferencial de fase. Las redes digitales PLMN utilizan modulación de frecuencia con desplazamiento mínimo y prefiltrado gaussiano: GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). La canalización estándar suele ser un múltiplo del valor estándar 25 KHz.

Los sistemas móviles digitales con multiacceso CDMA utilizan modulación de fase coherente PSK (Phase Shift Keying) y se requiere de una canalización de banda ancha de

1.5 MHz (CDMA de banda estrecha N-CDMA) y 5 MHz (CDMA de banda estrecha W-CDMA).

Por la banda de frecuencias utilizada

- *Banda VHF*: Este rango de frecuencias se encuentra entre 30 y 300 MHz, y se divide en tres partes: *La banda baja* se encuentra entre 30 y 80 MHz, la *banda alta* se encuentra entre 140 y 170 MHz y la *banda III*, que fue creada para solucionar el problema de saturación del espectro radioeléctrico en VHF, se encuentra entre 223 y 235 MHz.
- *Banda UHF*: Esta banda cubre las frecuencias del espectro radioeléctrico entre 300 MHz y 3 GHz. Está distribuida de la siguiente manera: En la *banda baja*, está entre los 406 y 470 MHz, la *banda alta* cubre desde los 862 y 960 MHz y se tiene una última banda entre 1800 y 1900 MHz utilizada para telefonía celular.

Por el tipo de multiacceso

- Frequency Division Multiple Access (FDMA)
- Time Division Multiple Access (TDMA)
- Space Division Multiple Access (SDMA)
- Code Division Multiple Access (CDMA)

2.3 CANALES SIMPLEX A UNA FRECUENCIA

Los canales símplex a una frecuencia son aquellos que utilizan la misma frecuencia tanto para transmisión como para recepción, permitiendo realizar sólo una de estas dos funciones a la vez. Es por este motivo que todos los equipos del sistema que están dentro de la zona de cobertura pueden comunicarse entre sí y escuchar todas las conversaciones, haciendo que las transmisiones sean denominadas de *línea compartida* o *party line*.

Para iniciar una transmisión en un sistema de este tipo, los equipos utilizados tienen un botón llamado “Presione Para Hablar”, más conocido como PTT (por sus siglas en inglés, *Push-To-Talk*), que al ser presionado hace conmutar el switch de antena hacia el transmisor, desactivando el receptor. Esto se ilustra en la figura 2.2:

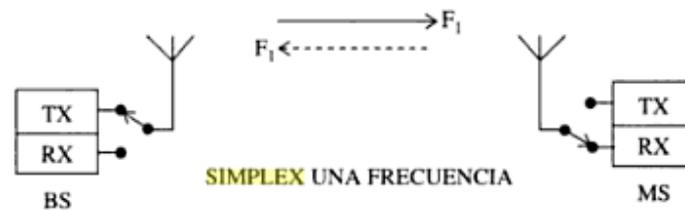


Figura 2.2. Ilustración de una comunicación en un canal simplex a una frecuencia¹²

Entre las ventajas de esta clase de canal de comunicaciones se pueden mencionar a la característica de ayuda mutua posible entre los radios portátiles gracias a su capacidad de comunicarse directamente entre ellos y la aparente optimización del uso del espectro radioeléctrico al necesitarse una sola frecuencia de transmisión.

Por el contrario, una de las limitaciones de compartir un canal de frecuencia con otros grupos de usuarios puede acarrear problemas cuando una transmisión y una recepción toman lugar al mismo tiempo y en un lugar muy cercano.

El concepto de ayuda mutua mencionado anteriormente se basa en el hecho de que la zona de cobertura de una estación móvil es más pequeña que la de una estación base. Así, existirán ocasiones en las que una estación móvil no tendrá a la base dentro de su zona de cobertura, pero sí tendrá a otra estación móvil en ella, haciendo la comunicación hacia la

¹² Imagen tomada de: HERNANDO, José M., *Comunicaciones Móviles*, Segunda Edición, Editorial Ramón Areces S.A., Madrid, 2004, página 8

base posible gracias a la estación móvil intermediaria debido a que están compartiendo la misma frecuencia. La figura 2.3 ilustra un ejemplo de ayuda mutua:

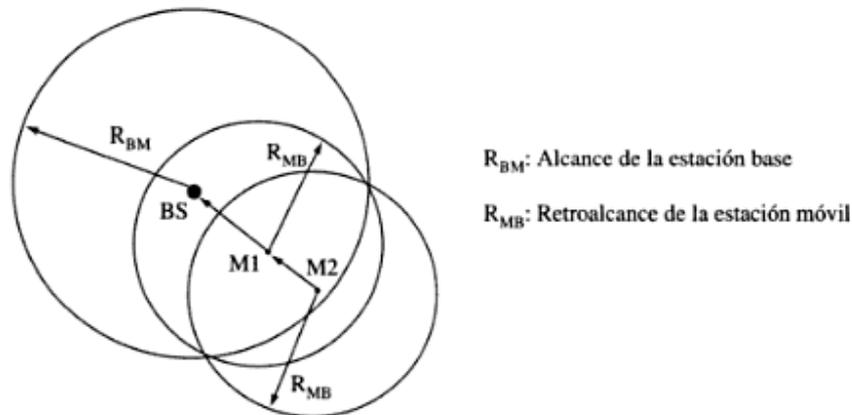


Figura 2.3. Ilustración del concepto de ayuda mutua entre estaciones móviles en sistemas simplex¹³

En la figura de arriba, la estación base está representada por las letras BS, y las estaciones móviles son M1 y M2. Como se puede observar, M1 y M2 se encuentran dentro de la zona de cobertura de BS, representada por R_{BM} . Sin embargo, se puede advertir que BS está fuera del rango que cubre M2, haciendo imposible que este último se comunique directamente con BS. Es así que M1 funcionará como un intermediario entre las otras dos estaciones y retransmitirá lo que M2 envíe a BS, pues se encuentra dentro de la zona de cobertura de ambas. De esta manera, se aprovecha el uso de la misma frecuencia en todas las estaciones para garantizar la comunicación incluso en zonas que la estación base no cubriría por sí sola.

Una seria desventaja de utilizar sistemas simplex de una frecuencia es la propensión a interrumpir de manera no intencional a otras comunicaciones en curso, causando la llamada *interferencia cocanal*. Para explicar cómo sucede este fenómeno, se muestra un ejemplo en la figura 2.4:

¹³ Imagen tomada de: HERNANDO, José M., **Comunicaciones Móviles**, Segunda Edición, Editorial Ramón Areces S.A., Madrid, 2004, página 9

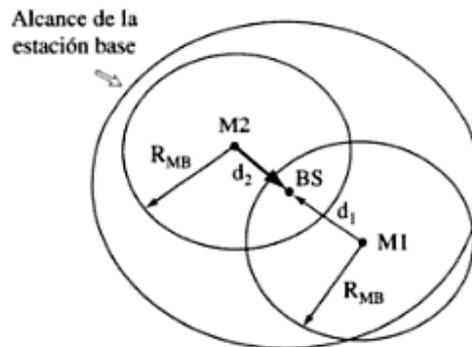


Figura 2.4. Interferencia cocanal en canales simplex a una frecuencia³

Como se puede observar, M1 y M2 se encuentran fuera de la zona de cobertura del otro, por lo tanto no escucharán cuando el otro está transmitiendo. Si M1 transmite desde su distancia d_1 , llegará a la base con una potencia menor de lo que lo haría M2 desde su distancia d_2 , pues d_2 es menor que d_1 . Es así que, si M1 se está comunicando con BS y repentinamente M2 lo comienza a hacer también (pensando que el canal está libre), entonces el intercambio entre M1 y BS se bloqueará, siendo M2 el responsable de la interferencia cocanal producida y de la captura del receptor de BS sin siquiera saberlo.

Otro caso en la que se produce interferencia en estos canales de transmisión se suscita cuando existen múltiples estaciones base de distintos sistemas operando a frecuencias muy cercanas en el mismo lugar. Para explicar este fenómeno, se presenta la figura 2.5:

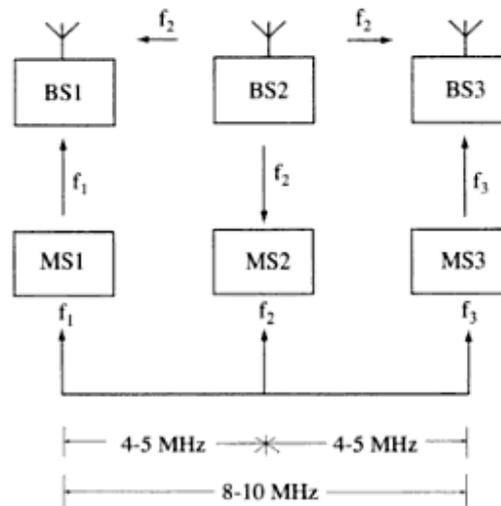


Figura 2.5. Interferencia entre estaciones con frecuencias similares¹⁴

Las tres estaciones están funcionando a sus respectivas frecuencias, pero éstas tienen valores muy cercanos. Así, si se está produciendo una comunicación entre BS1 y MS1 o entre BS3 y MS3 y BS2 comienza a transmitir, las dos primeras comunicaciones pueden ser interferidas o incluso bloqueadas totalmente. A este fenómeno se le llama *interferencia de canal adyacente*.

Para minimizar los efectos de interferencia de un transmisor sobre un receptor cercano, es necesario separarlos físicamente una distancia de al menos 300 metros, para lograr una atenuación del orden de los 60 dBs o mayor entre las señales de las estaciones involucradas.

Cuando resulta imposible aislar las estaciones de la manera adecuada, se recurre a la separación por frecuencia, que es posible gracias a la *selectividad* de los receptores y que para que sea óptima debe ser de 4 a 5 MHz entre cada estación. Siendo así, se puede deducir que para un rango de frecuencias de 8 a 10 MHz sólo se pueden tener tres frecuencias en el mismo sitio, lo cual indica que a pesar de que los sistemas simplex

¹⁴ Imagen tomada de: HERNANDO, José M., **Comunicaciones Móviles**, Segunda Edición, Editorial Ramón Areces S.A., Madrid, 2004, página 10

parecen ser eficientes en el uso del espectro radioeléctrico a simple vista, en realidad no lo son cuando existen varios sistemas en el mismo lugar.

Otro factor a tener en cuenta es que la reutilización de frecuencias necesaria en las bandas VHF y UHF (hoy en día congestionadas) es limitada en los canales símplex de una frecuencia. Si existen dos sistemas que requieren de un área de cobertura extensa, sus estaciones base deberán ser instaladas en sitios con alta elevación para satisfacer esta necesidad y si ambos se encuentran operando en el mismo canal, lo más posible es que exista interferencia cocanal entre las estaciones base del un sistema con las estaciones móviles del otro. Para evitar este tipo de problemas y maximizar la reutilización de frecuencias, estos sistemas se diseñan para cubrir áreas pequeñas, lo cual se logra mediante la limitación de la potencia de transmisión de las terminales utilizadas a 5W.

2.4 CANALES SIMPLEX A DOS FRECUENCIAS

Para obtener una mejor eficiencia en el uso del espectro, se utilizan los canales símplex a dos frecuencias. Los canales de radio utilizan una frecuencia para transmisión y otra para recepción, mismas que se encuentran a una separación de entre 4 y 5 MHz que evitará tener las interferencias que se presentaban en los canales símplex a una frecuencia debido al aislamiento que hay entre ellas.

El diseño que se aplica consiste en asignar un bloque o sub-banda de frecuencias de transmisión dentro de la banda asignada y otro bloque o sub-banda de frecuencias para recepción. Una vez realizadas estas asignaciones, se procede a emparejar una frecuencia del un bloque con una frecuencia del otro bloque y se destina una pareja a cada estación base. La figura 2.6 muestra un ejemplo de lo explicado:

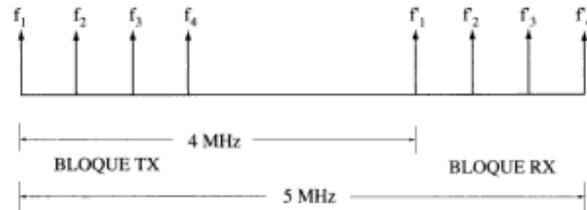


Figura 2.6. Utilización del espectro radioeléctrico en canales símplex a 2 frecuencias¹⁵

En este ejemplo, se tendrá que para la primera estación base se utilizarán las frecuencias f_1 para transmisión y f'_1 para recepción. Para la segunda, se tendrá a f_2 para transmisión y f'_2 para recepción, y así sucesivamente. Se puede notar que, a diferencia de los canales símplex a una frecuencia, aún si las estaciones base 1 y 3 están transmitiendo a sus respectivas frecuencias y repentinamente existe una recepción de la estación base 2 a f'_2 , no se producirá interferencia cocanal, pues la separación entre las frecuencias involucradas es suficiente.

El problema con estos sistemas es que las estaciones móviles no se escucharán entre sí y sólo podrán comunicarse con la base, lo cual puede causar colisiones al tratar de comunicarse con ella al mismo tiempo y saturar la carga en el canal de radio.

Este tipo de sistemas son los más utilizados en aplicaciones PMR (Private Mobile Radiosystems) y la potencia de transmisión típica de las estaciones es de 25 W. Una ilustración de los sistemas símplex a dos frecuencias se muestra en la figura 2.7:

¹⁵ Imagen tomada de: HERNANDO, José M., **Comunicaciones Móviles**, Segunda Edición, Editorial Ramón Areces S.A., Madrid, 2004, página 11

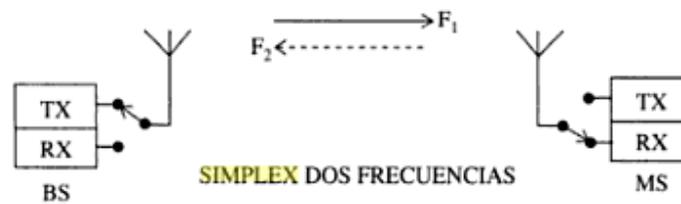


Figura 2.7. Ilustración de una comunicación en un canal simplex a dos frecuencias¹⁶

La solución para permitir la comunicación entre las estaciones móviles es hacer que una de las estaciones base funcione como repetidora y asignarle las frecuencias inversas a las de las estaciones móviles, es decir, si para las estaciones móviles se tiene que la frecuencia de transmisión es f y la de recepción es f' , entonces en la repetidora se asignará f' para transmisión y f para recepción. A este tipo de sistemas con repetidora usualmente se los llama *Semidúplex a dos frecuencias* o *Half-Duplex* y se tiene a la repetidora trabajando en modo dúplex mientras que las estaciones móviles funcionan en modo simplex a dos frecuencias. La figura 2.8 presenta este modo de operación:

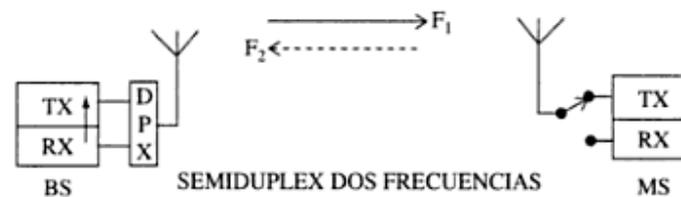


Figura 2.8. Ilustración de una comunicación en un canal semidúplex a dos frecuencias⁵

Se puede deducir entonces que para que se comuniquen las estaciones móviles, el paso por la repetidora será obligatorio, a menos que se hayan configurado también con canales simplex a una frecuencia. En este caso, los canales simplex a una frecuencia se utilizan para comunicaciones entre estaciones móviles cuando se encuentran muy alejadas de la estación base repetidora y no tienen cobertura de ella.

¹⁶ Imagen tomada de: HERNANDO, José M., *Comunicaciones Móviles*, Segunda Edición, Editorial Ramón Areces S.A., Madrid, 2004, página 8

La estación base o repetidora debe estar conectada a un duplexor que permita hacer la conmutación entre ambas frecuencias, que deben tener una separación de al menos 600 KHz para que exista una operación óptima. Usualmente se las instala en sitios de alta elevación por motivos de cobertura y se las puede dejar en funcionamiento sin monitoreo constante.

2.5 APLICABILIDAD SISTEMAS SIMPLEX IASA

Los sistemas descritos en los apartados anteriores se pueden utilizar en los predios de la Hacienda “El Prado” debido a las características de la topografía de la zona en que se desea proveer cobertura y también por el tipo de servicio que se requiere ofrecer al IASA.

La zona en la que se encuentra ubicada la Hacienda “El Prado” tiene un terreno muy irregular, por lo que es necesario utilizar un sistema que brinde una cobertura amplia aún en zonas difíciles de cubrir. Los **sistemas PMR** (Private Mobile Radio) con canales símplex generalmente hacen posible obtener una amplia zona de cobertura, debido a la facilidad de propagación que tienen las ondas en la frecuencia en que operan (en el caso de este proyecto en la banda VHF), incluso en zonas montañosas. Además, el hecho de poder disponer de una repetidora ubicada convenientemente y los buenos niveles de potencia de transmisión de las estaciones utilizadas en estos sistemas, ayudan también a que la zona de cobertura sea lo suficientemente amplia.

El otro motivo para afirmar que este tipo de sistemas de radiocomunicaciones son aplicables a las necesidades del IASA, es el hecho de que se precisa tener más de un canal de comunicación, de manera que se brinde una comunicación interna entre las estaciones ubicadas dentro de la Hacienda “El Prado” y otra con las estaciones ubicadas dentro de la red de seguridad de la ESPE. La planificación de frecuencias para sistemas PMR descrita en las secciones anteriores y la posibilidad de configurar distintos tonos tanto en la estación repetidora como en las estaciones base y móviles del sistema permiten proveer estos múltiples canales sin ningún tipo de interferencias con otros sistemas VHF que puedan estar en la misma zona de cobertura, como las que se explicaron en este capítulo.

Por último, el hecho de que las estaciones portátiles y la estación base tengan canales símplex para comunicarse entre sí, hace que las conversaciones puedan ser escuchadas por todos los miembros del grupo de trabajo configurado en el canal asignado al IASA, lo cual es necesario porque la estación base ubicada en la prevención, deberá tener información constante de las posibles emergencias que pueden tener las personas que utilizan las estaciones móviles en lugares apartados de la hacienda, para poder socorrerlos de manera eficiente. Por otro lado, es conveniente también que todos los usuarios de las estaciones móviles estén siempre alertas a lo que pueda suceder.

CAPITULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES DEL IASA

3.1 DETERMINACION DE NECESIDADES DEL IASA

El Instituto Agropecuario Superior Andino dispone de 600 hectáreas en la hacienda El Prado, que se encuentra ubicada en el sector de Selva Alegre, en el cantón Rumiñahui, donde funciona el área académica y el campo de prácticas e investigación agropecuaria, que sirven a los programas docentes de la Facultad.

La gran extensión del campus principal de la institución genera la necesidad de crear un sistema interno de comunicaciones que permita coordinar de manera rápida y económica las actividades entre sus miembros administrativos, docentes y de seguridad, además de comunicarlos con el personal de seguridad ubicado en el campus de la ESPE en Sangolquí, sobre todo en casos de emergencia como el incendio forestal que se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Foto de una situación de emergencia en la hacienda “El Prado”

Las áreas donde más interesa que exista el servicio del sistema de radiocomunicaciones VHF, que se va a diseñar, se encuentran en la siguiente lista:

- 1) Prevención Central
- 2) Ganadería
- 3) Carretera a Pailones
- 4) Pailones
- 5) Sembríos Pailones
- 6) Prevención de entrada a la hacienda
- 7) Aulas
- 8) Bodega
- 9) Prevención de salida a San Luis de Loreto
- 10) Sembríos San Luis de Loreto
- 11) Laboratorios
- 12) Criadero de Pollos

En la figura 3.2 se muestra un mapa donde se pueden observar las localizaciones de las dependencias del IASA descritas en la lista anterior:

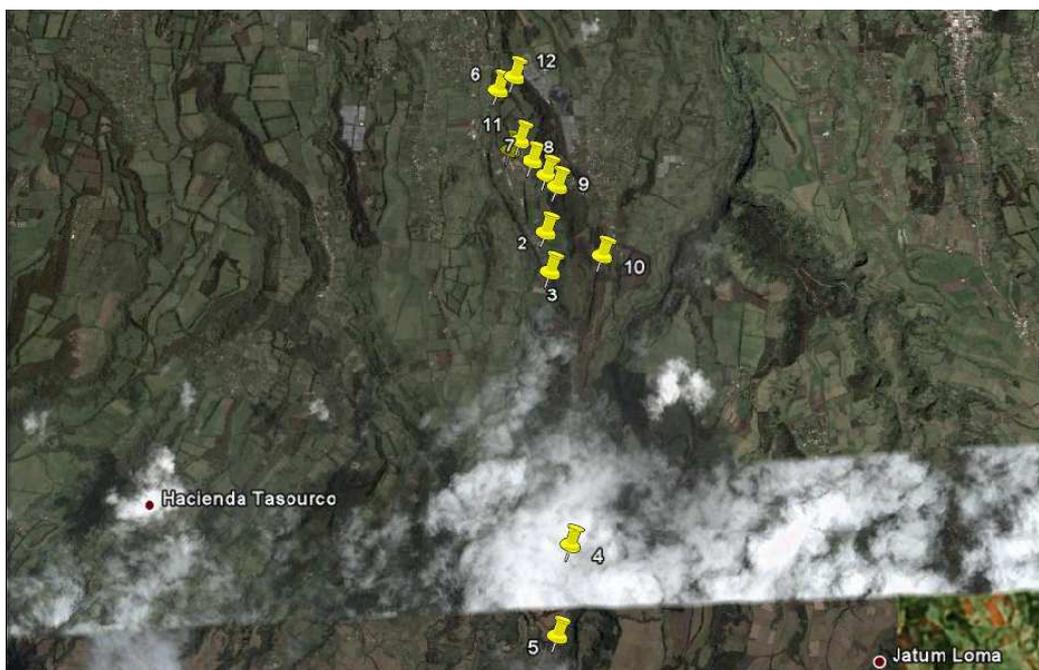


Figura 3.2. Mapa con ubicaciones de interés para las comunicaciones por radio en la Hacienda “El Prado”

Las imágenes mostradas entre las figuras 3.3 y 3.14 muestran acercamientos que permiten observar de manera más detallada las ubicaciones mostradas en la figura 3.2:



Figura 3.3. Prevención Central



Figura 3.4. Ganadería



Figura 3.5. Carretera a Pailones

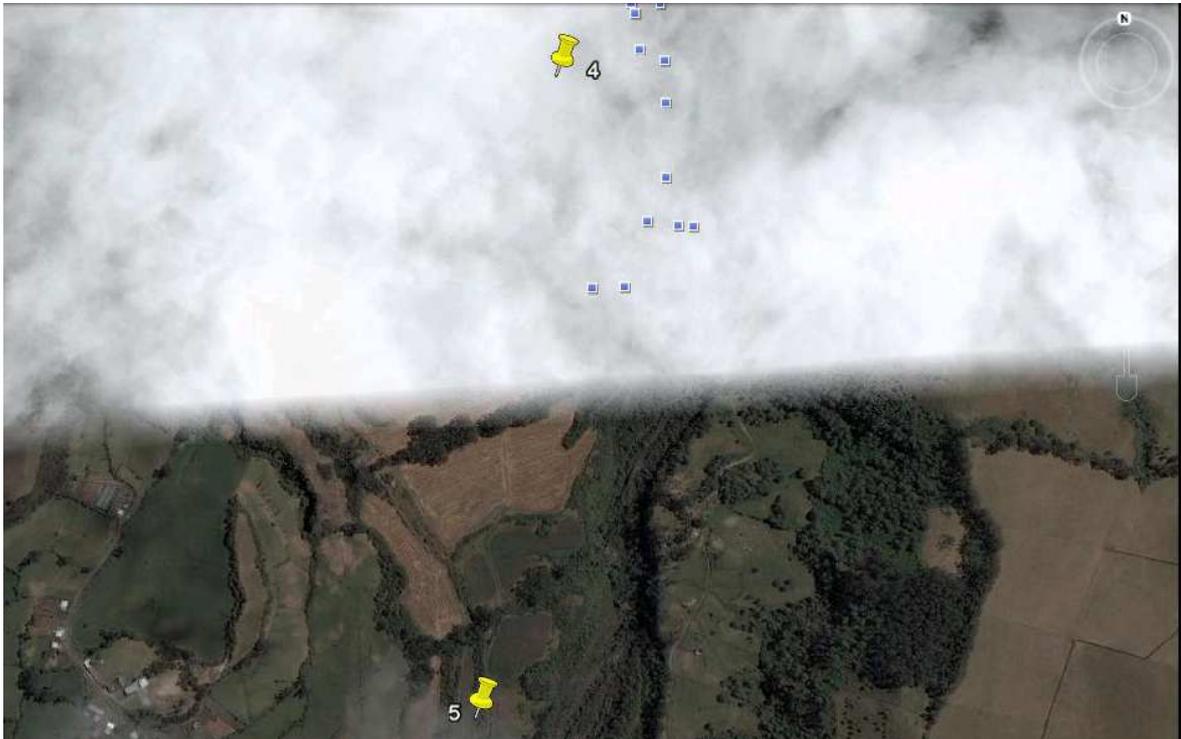


Figura 3.6. Pailones y sus sembríos

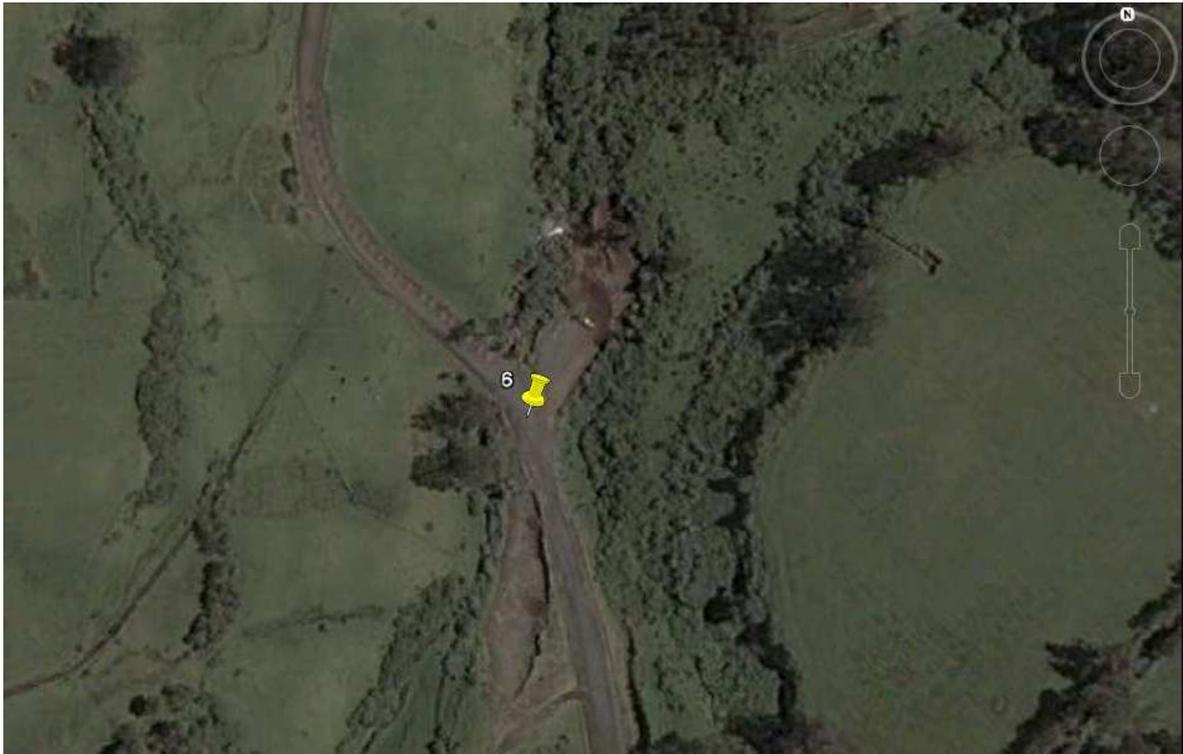


Figura 3.7. Prevención de entrada a la hacienda



Figura 3.8. Aulas

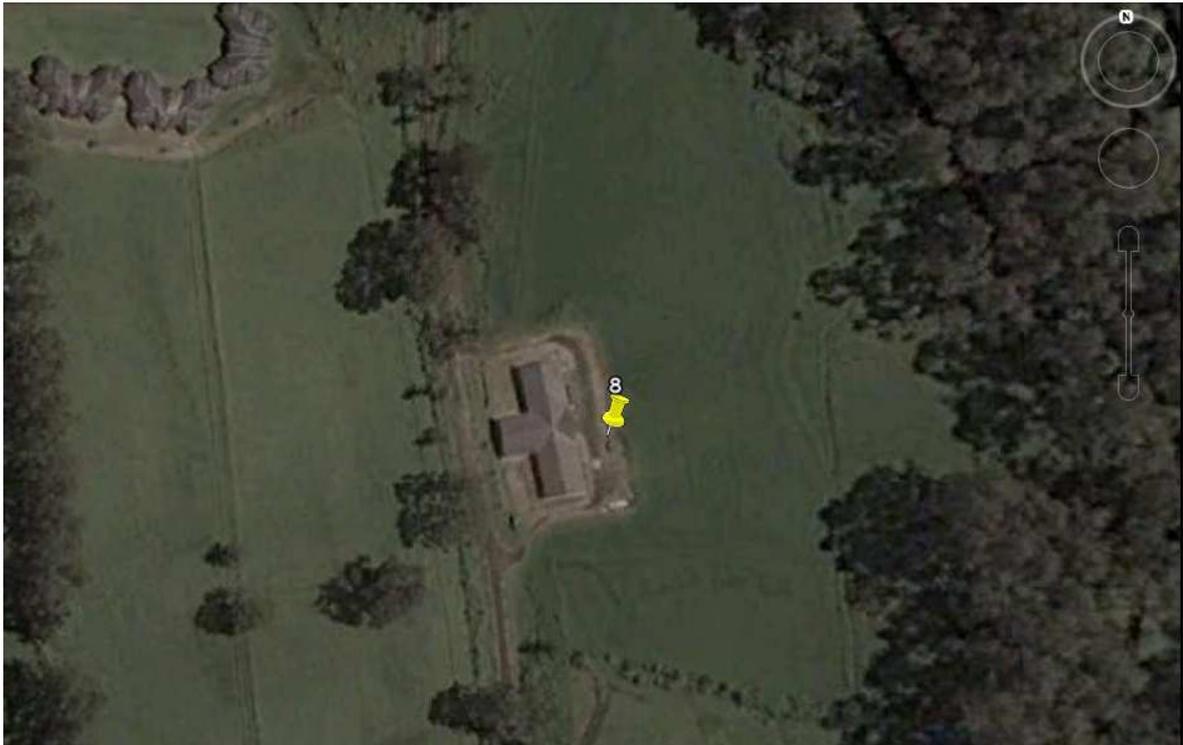


Figura 3.9. Bodega



Figura 3.10. Prevención de salida a San Luis de Loreto



Figura 3.11. Sembríos San Luis de Loreto

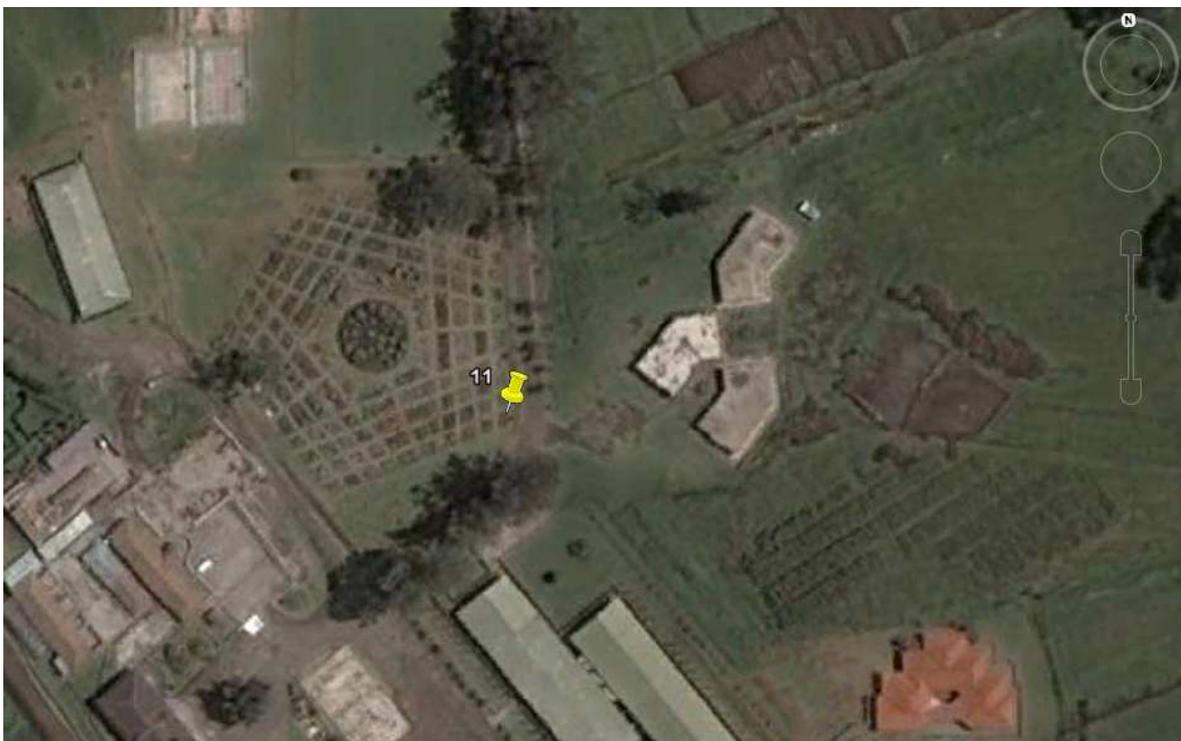


Figura 3.12. Laboratorios

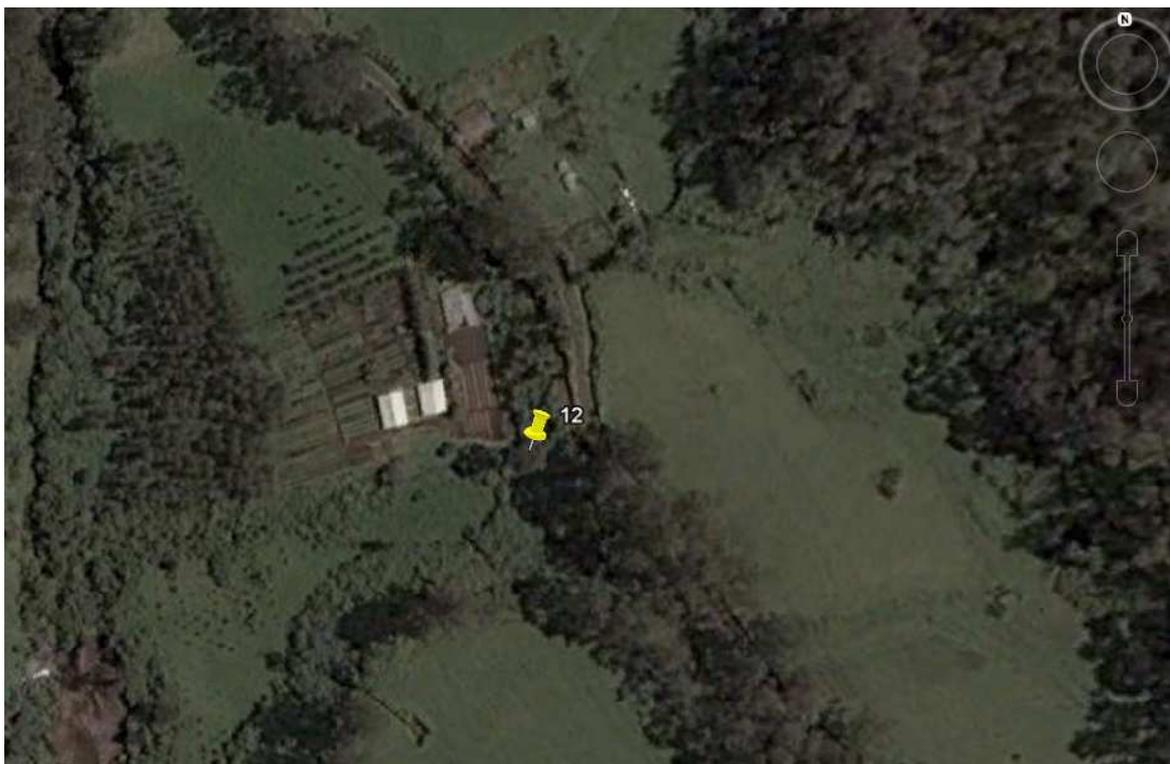


Figura 3.13. Criadero de Pollos

Todas las imágenes de mapas mostradas en las figuras anteriores han sido obtenidas utilizando las coordenadas conseguidas mediante un equipo *GPS* (*Global Positioning System*) y el software *Google Earth*, que permite visualizar cualquier posición del globo terráqueo a través de fotografías tomadas desde un satélite.

Lo expuesto en los mapas permite deducir que la zona de cobertura del sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado) es bastante extensa e irregular (figura 3.14), presentando características bastante montañosas que pueden dar lugar a atenuaciones considerables de la señal, por lo cual se puede utilizar un sistema símplex a una frecuencia en la banda VHF que comunique a los radios directamente entre sí. Además, para que exista una buena comunicación entre los radios del IASA, que se quieren añadir el canal de seguridad de la ESPE con los radios ubicados en el campus Sangolquí, se necesitará utilizar una repetidora que permita llegar con buenos niveles de señal entre ambos lugares.



Figura 3.14. Foto Panorámica de Zonas Montañosas dentro del IASA (El Prado)

Debido a los motivos expuestos, es necesario realizar las comunicaciones internas entre las dependencias del IASA mediante un sistema símplex a una frecuencia y la comunicación con el campus Sangolquí se hará a través de un sistema Half-Dúplex utilizando la estación repetidora perteneciente a la ESPE ubicada en el cerro Cruz Loma.

3.2. RECONOCIMIENTO DEL LUGAR Y DETERMINACION DE FACTIBILIDAD

Se realizó un recorrido de las zonas de interés de la hacienda “El Prado” descritas en la sección anterior para determinar la factibilidad de implementar el proyecto de radiocomunicaciones en el IASA I y se obtuvieron las siguientes imágenes:



Figura 3.15. Foto prevención de entrada, IASA (El Prado)



Figura 3.16. Foto Planta Administrativa, IASA (El Prado)



Figura 3.17. Foto Aulas, IASA (El Prado)

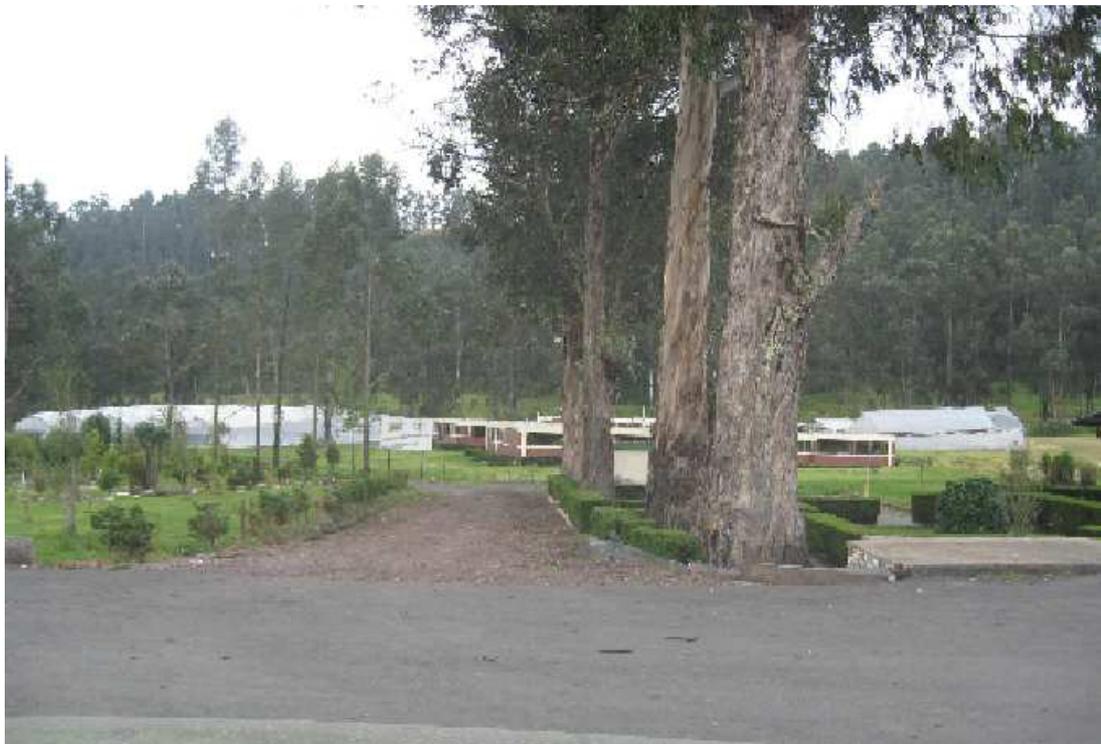


Figura 3.18. Foto Laboratorio e Invernaderos, IASA (El Prado)



Figura 3.19. Foto Canchas deportivas, IASA (El Prado)



Figura 3.20. Foto Planta Administrativa, IASA (El Prado)



Figura 3.21. Foto Bar, IASA (El Prado)



Figura 3.22. Foto Invernaderos, IASA (El Prado)



Figura 3.23. Foto Panorámica entrada, IASA (El Prado)



Figura 3.24. Foto Panorámica de aulas, IASA (El Prado)



Figura 3.25. Foto Camino a Pailones, IASA (El Prado)



Figura 3.26. Foto Bodegas, IASA (El Prado)



Figura 3.27. Foto Panorámica desde Pailones, IASA (El Prado)



Figura 3.28. Foto Ganadería, IASA (El Prado)



Figura 3.29. Foto Panorámica desde camino a Loreto, IASA (El Prado)

Con lo visto en el reconocimiento realizado, se pudo deducir que es factible implementar un sistema de radiocomunicaciones en la banda VHF debido a que la zona a la que se debe proveer el servicio se encuentra ubicada en un valle y por la forma de su topografía, permite establecer un excelente enlace entre los equipos de radio en todas las ubicaciones de interés y la estación repetidora de la ESPE ubicada en Cruz Loma.

De acuerdo a la figura 3.30, se puede establecer que existe línea de vista entre la Hacienda “El Prado” y el cerro Cruz Loma:

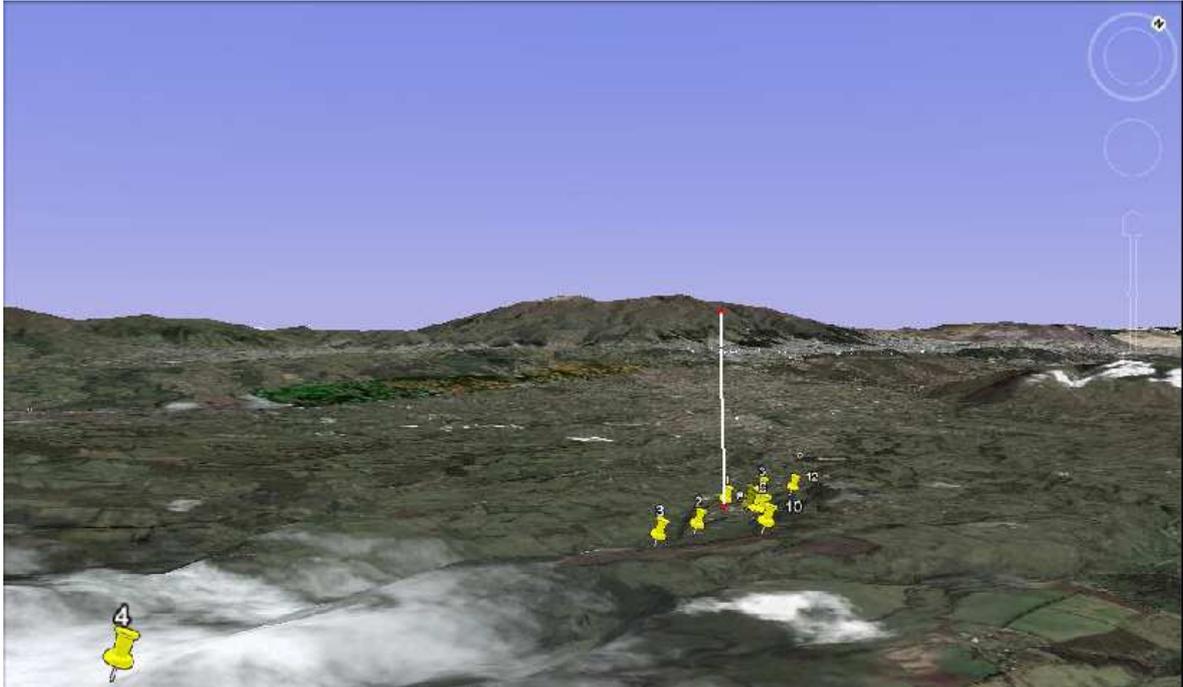


Figura 3.30. Vista virtual desde el IASA (El Prado) al Cerro Cruz Loma

Se puede deducir entonces que, utilizando una antena cuyo patrón de radiación sea omnidireccional para que permita cubrir toda la zona de interés de la Hacienda “El Prado” y con equipos de radio con características técnicas adecuadas, se podrá tener una comunicación eficiente entre ellos y con la repetidora de Cruz Loma, haciendo factible la implementación del sistema de radiocomunicaciones del IASA que se quiere obtener.

Para comprobar la factibilidad del enlace entre ambos sitios, se puede referir al cálculo del perfil topográfico y pérdidas del mismo, donde se muestra que la comunicación punto a punto sí es posible. Este análisis se muestra en la figura 3.62, del apartado 3.4.3 de este documento, denominado “Restauración del enlace entre el IASA (El Prado) y el campus ESPE (Sangolquí)”.

3.3. DISEÑO DEL SISTEMA

De acuerdo a lo descrito en el capítulo 1, se determinó que la antena arreglo de 4 dipolos doblados es la más prolija para su utilización en el sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado) debido a la forma de su patrón de radiación y a sus niveles de ganancia. Además, se realizó un análisis de los equipos de radio existentes en el IASA y en el DEEE.

En las secciones siguientes, se describirán las pruebas hechas para determinar el patrón de radiación real del arreglo de 4 dipolos doblados y también se mostrarán las simulaciones del sistema de radiocomunicaciones con los equipos seleccionados para su implementación.

3.3.1. Determinación del patrón de radiación del arreglo de dipolos doblados

En el capítulo 1 se describió el patrón de radiación teórico del arreglo de 4 dipolos doblados. Sin embargo ya en la práctica, los cálculos reales no son del todo ciertos y las características de radiación de la antena pueden variar debido a errores que pueden darse en su construcción, características de los materiales utilizados e incluso distintas obstrucciones que puede haber en las cercanías de la zona donde se la ha instalado.

Para la medición del patrón de radiación real del arreglo de 4 dipolos doblados, se utilizó el equipo Narda NBM-550, que es un medidor de campo eléctrico en zonas de campos lejanos. Una vez medido el campo eléctrico mediante la punta de prueba integrada al equipo, éste se encarga de aproximar el campo magnético y con ello realiza una multiplicación que permite obtener la densidad de potencia de la señal radiada por la antena. Como se sabe, el patrón de radiación es una medida de la densidad de potencia de la antena en todas las direcciones, por lo cual se puede decir que el equipo utilizado es el correcto para este tipo de medición.



Figura 3.31. Medidor de Banda Ancha Narda NBM-550

Para la medición del campo eléctrico y magnético del arreglo de cuatro dipolos doblados se tomó en cuenta un radio fijo de 25 metros en un plano horizontal dividido cada 5° , en cuyo centro se encuentra una radio base conectada a la antena. En cada posición se contabilizó el máximo valor producido al presionar el botón *PTT (Push to Talk)* de la estación base por 30 segundos. Se tomó como 0° a la dirección en la que apuntan los dipolos doblados de la antena y se comenzó a girar alrededor de ella a partir de ese punto. La figura 3.32 muestra la manera como se dispuso al equipo para realizar las mediciones:



Figura 3.32. Medición del patrón de radiación del arreglo de dipolos doblados

Una vez cubiertos todos los 360° alrededor de la antena, se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 3.1:

Ángulo (°)	Densidad de Potencia (W/m²)
0	0,024665
5	0,019763
10	0,017642
15	0,018424
20	0,021586
25	0,024264
30	0,020721
35	0,013928
40	0,018013
45	0,010376
50	0,017035
55	0,009613
60	0,008809
65	0,017572
70	0,015696
75	0,011605
80	0,014521
85	0,01854
90	0,016497
95	0,019062
100	0,01863
105	0,014458
110	0,017741
115	0,019128
120	0,010005
125	0,013412
130	0,011234
135	0,01134
140	0,008897
145	0,018444
150	0,018075

155	0,010284
160	0,005925
165	0,009354
170	0,009171
175	0,013767
180	0,009348
185	0,006138
190	0,014778
195	0,013068
200	0,00852
205	0,009804
210	0,012114
215	0,010914
220	0,010338
225	0,00741
230	0,008538
235	0,006726
240	0,00669
245	0,00941
250	0,01118
255	0,00708
260	0,0154
265	0,01323
270	0,017738
275	0,012078
280	0,015264
285	0,013152
290	0,0192
295	0,015446
300	0,015894
305	0,019312
310	0,015205
315	0,01281
320	0,022401
325	0,019413
330	0,01509
335	0,016719
340	0,017682
345	0,02033
350	0,02275
355	0,021558

Tabla 3.1. Mediciones de Densidad de Potencia del arreglo de 4 dipolos doblados obtenidas con el equipo Narda NBM-550

La figura 3.33 muestra el patrón de radiación obtenido al graficar los resultados en Microsoft Excel:

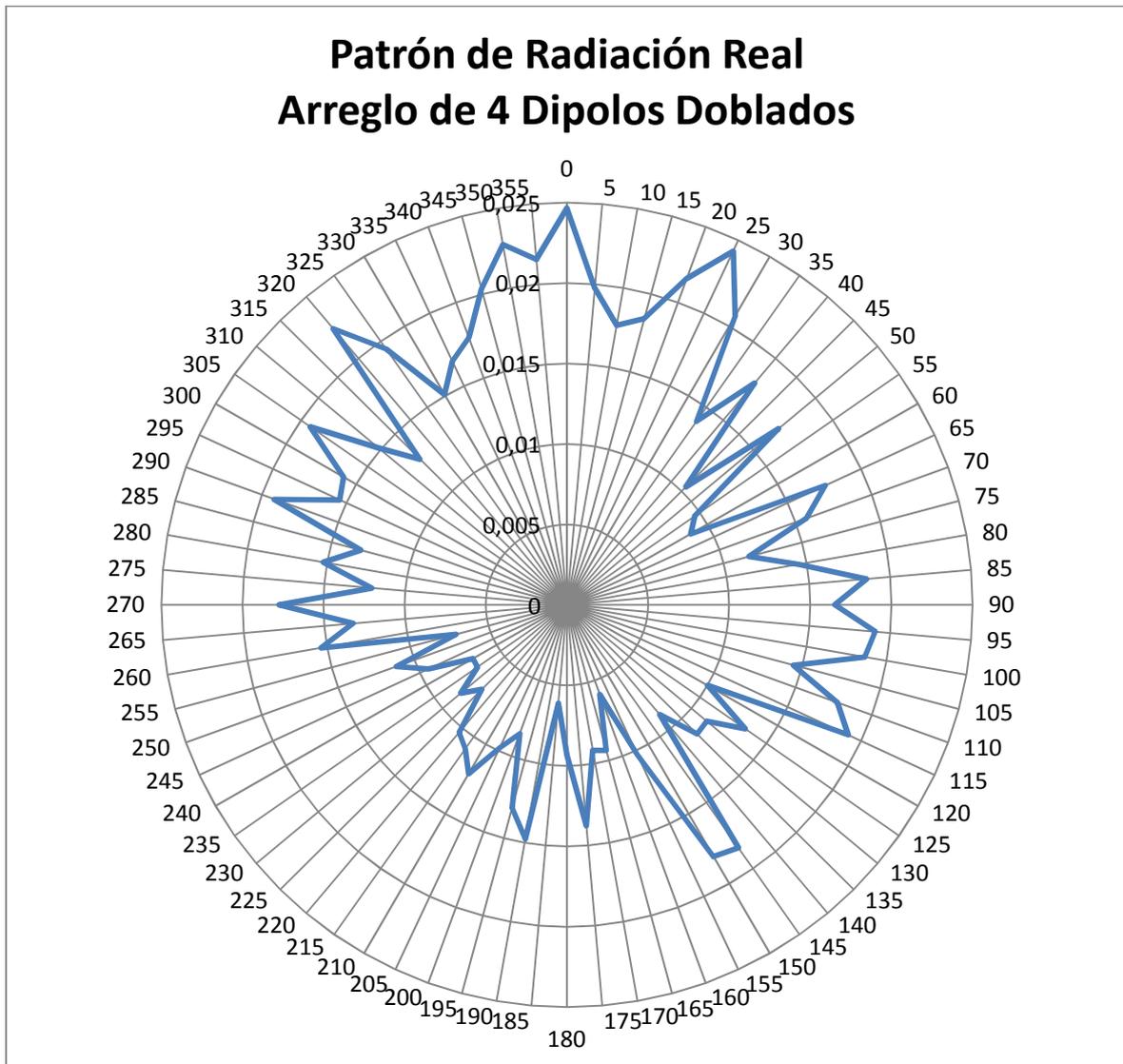


Figura 3.33. Patrón de radiación del arreglo de dipolos doblados obtenido con el equipo Narda NBM-

550

Se observa que de acuerdo a lo visto en el patrón de radiación obtenido teóricamente, la aproximación obtenida de manera real es bastante buena. Se puede ver características omnidireccionales en la gráfica que se muestra arriba, pues se observan niveles de densidad de potencia en todas las direcciones alrededor de la antena.

Lo que sí se puede observar es que la forma obtenida no es una cardioide perfecta como la que se tiene al calcular el patrón de radiación teóricamente, sino que se obtienen distintos picos en ciertas direcciones que, cabe destacar, mantienen cierto promedio que deja deducir que la antena sí está irradiando energía de la manera esperada (en todas las direcciones). Esto se debe a que las mediciones realizadas son de naturaleza discreta.

3.3.2. Determinación de los niveles de recepción de los equipos utilizados

Para poder implementar el sistema de radiocomunicaciones VHF en la banda de 150 MHz que debe funcionar en el IASA (El Prado) se tienen tres tipos de equipos: una estación repetidora, una estación base de radio y estaciones móviles o portátiles.

Estación Repetidora

La estación repetidora utilizada es una de marca Kenwood, modelo TKR-750 diseñada para funcionar en las bandas VHF y UHF, es un equipo perteneciente a la Escuela Politécnica del Ejército y se encuentra ubicado en el cerro Cruz Loma. Sus especificaciones técnicas son:

Características Técnicas	Valores para funcionamiento en VHF
Frecuencia	136-174 MHz
Canales	16 CH
Tamaño	48.3 cm x 8.80 cm x 34.00 cm.
Peso	9.70 Kg.
Alimentación DC	13.2 V
Potencia de Salida	25-50 W
Espaciamiento de Canales	12.5/25 KHz
Limitación de Modulación	± 2.5 KHz a 12.5 KHz ± 5 KHz a 25 KHz
Zumbido y Ruido FM	50 dB a 25 KHz 45 dB a 12.5 KHz
Distorsión de Audio	3%
Sensibilidad (20 dB SINAD ¹⁷)	0.45 µV (-113.9 dBm)
Selectividad (EIA SINAD ¹⁷)	85 dB a 25 KHz 77 dB a 12.5 KHz
Intermodulación	72 dB
Salida de Audio (parlante externo)	4W con distorsión inferior al 5 %
Codificación	CSQ, TPL, DPL

Tabla 3.2. Especificaciones Técnicas Estación Repetidora Kenwood TKR-750



Figura 3.34. Estación Repetidora Kenwood TKR-750

¹⁷ SINAD: Signal To Noise And Distorsion: Relación entre el nivel de la señal total transmitida (en dB) y la el nivel de la componente de ruido + distorsión que contiene esa señal total.

Estación base de radio

La estación base utilizada fue asignada al IASA (El Prado) por parte del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército. Este equipo es de marca Motorola, modelo PRO5100. Sus características técnicas son:

Características Técnicas	Valores para funcionamiento en VHF
Frecuencia	136-174 MHz
Canales	64 CH
Tamaño	19.8cm x 17.90 cm x 5.90 cm.
Peso	1.65 Kg.
Alimentación DC	12.0 V
Potencia de Salida	25-45 W
Espaciamiento de Canales	12.5/20/25 KHz
Limitación de Modulación	0 KHz a ± 5 KHz
Zumbido y Ruido FM	-45 dB
Distorsión de Audio	3%
Sensibilidad (12 dB SINAD)	0.22 μ V (-120.2 dBm)
Selectividad (EIA SINAD)	-80 dB
Intermodulación	-78 dB
Salida de Audio	45W con distorsión inferior al 5 %
Codificación	CSQ, TPL, DPL

Tabla 3.3. Especificaciones Técnicas estación base de radio Motorola PRO5100



Figura 3.35. Estación base Motorola PRO 5100

Estaciones de radio portátiles

Las estaciones de radio portátiles utilizadas en el sistema de radiocomunicaciones del IASA son de marca Motorola, modelo PRO3150. Son equipos de propiedad del IASA desde hace algún tiempo atrás y sus especificaciones técnicas para funcionamiento en VHF (también pueden funcionar en UHF) son:

Características Técnicas	Valores para funcionamiento en VHF
Frecuencia	136-174 MHz
Canales	16 CH
Tamaño	13.7cm x 5.75 cm x 3.75 cm.
Peso	15.8 oz.
Duración Batería	8 horas a 5 W
Potencia de Salida	1-5 W
Espaciamiento de Canales	12.5/20/25 KHz
Limitación de Modulación	± 2.5 KHz a 12.5 KHz ± 4.0 KHz a 20.0 KHz ± 5.0 KHz a 25.0 KHz
Zumbido y Ruido FM	-40 dB
Distorsión de Audio	3%
Sensibilidad (12 dB SINAD)	0.25 μ V (-119 dBm)
Selectividad (EIA SINAD)	-60 dB a 12.5 KHz -70 dB a 25.0 KHz
Intermodulación	-65 dB
Salida de Audio	500 mW
Codificación	CSQ, TPL, DPL

Tabla 3.4. Especificaciones Técnicas radios portátiles Motorola PRO3150



Figura 3.36. Radio Motorola PRO3150 perteneciente al IASA (El Prado)

3.3.3. Simulación del sistema en la banda de 150 MHz mediante software de predicción de cobertura

La simulación del sistema de radiocomunicaciones del IASA se la realizó mediante el software *Radio Mobile*, que utiliza el modelo de predicción de cobertura de Longley-Rice, también conocido como *Irregular Terrain Model*.

Para la simulación, se consideró realizar el análisis de cobertura en los enlaces de bajada (downlink) y en los enlaces de subida (uplink) del sistema.

Para poder realizar el análisis de cobertura del sistema en el software *Radio Mobile*, es necesario conocer las coordenadas de los lugares donde se necesita proveer el servicio. La tabla 3.5 muestra esta información:

Lugar	Latitud	Longitud
Prevención Central	0° 23' 8.37" S	78° 24' 59.13" O
Ganadería	0° 23' 37.1" S	78° 24' 47.9" O
Carretera a Pailones	0° 23' 50.8" S	78° 24' 46.9" O
Pailones	0° 25' 23.5" S	78° 24' 43.0" O
Sembríos Pailones	0° 25' 54.0" S	78° 24' 48.4" O
Entrada IASA	0° 22' 47.1" S	78° 25' 2.7" O
Aulas	0° 23' 12.5" S	78° 24' 51.6" O
Bodega	0° 23' 17.5" S	78° 24' 47.0" O
Prevención Loreto	0° 23' 21.7" S	78° 24' 43.6" O
Sembríos Loreto	0° 23' 46.5" S	78° 24' 29.3" O
Laboratorios	0° 23' 5.1" S	78° 24' 55.7" O
Criadero de Pollos	0° 22' 42.9" S	78° 24' 57.0" O

Tabla 3.5. Sitios de interés de cobertura del sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado)

Simulación Downlink

En esta simulación se colocará a la estación base de radio en un punto fijo en la prevención central del IASA (El Prado), se determinará la cobertura de la antena arreglo de 4 dipolos doblados alrededor de ese punto y se analizarán los niveles de recepción en los puntos de interés dentro de la hacienda mencionados en la tabla 3.5.

La figura 3.37 muestra el mapa de cobertura del arreglo de 4 dipolos doblados en las zonas más cercanas a la prevención central del IASA (El Prado). Se ha excluido los sectores más alejados dentro de la hacienda para que lograr una mejor comprensión de la gráfica. La simulación permite determinar gráficamente los promedios de niveles de recepción de señal en distintas áreas del mapa mediante las manchas de distintos colores que se observan.

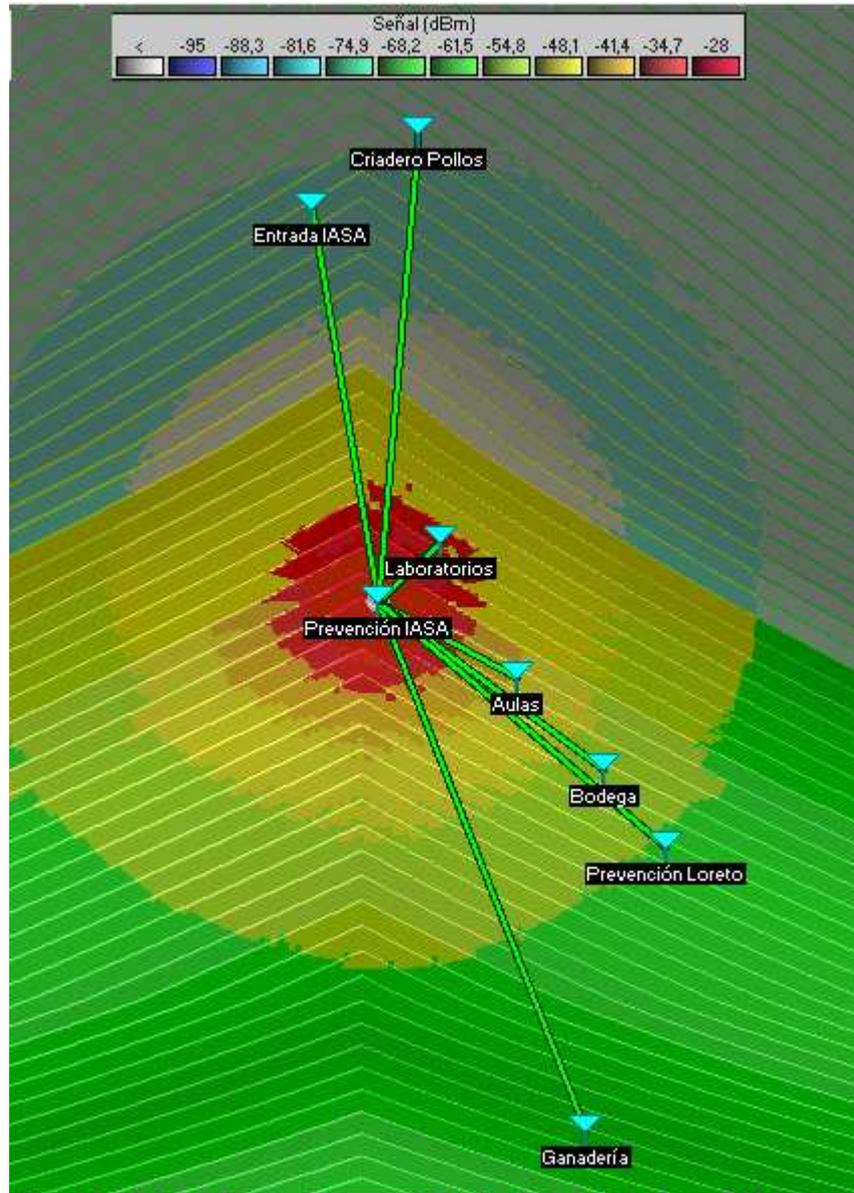


Figura 3.37. Simulación del mapa cobertura del arreglo de 4 dipolos doblados de la estación base en los lugares más cercanos a las oficinas del IASA (El Prado)

En la figura 3.38 se muestra un área un poco más amplia dentro de la hacienda “El Prado” que permite mostrar los resultados de cobertura obtenidos por el software *Radio Mobile* en las áreas de Pailones y San Luis de Loreto, que están un poco más alejadas de las oficinas centrales:



Figura 3.38. Simulación del mapa cobertura del arreglo de 4 dipolos doblados de la estación base en los lugares más alejados de las oficinas del IASA (El Prado)

En la figura de arriba, se ha incluido en la gráfica al sitio llamado “Bodega” para hacer referencia a la mayor distancia que tienen los sitios analizados aquí con respecto a los analizados en la figura 3.37. El objetivo ha sido que ambas figuras permitan facilitar comprensión del análisis de cobertura realizado en *Radio Mobile*. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos:

Lugar	Nivel de recepción de señal (simulación) (dBm)
Previsión Central	-28,0
Ganadería	-61,2
Carretera a Pailones	-66,8
Pailones	-85,8
Sembríos Pailones	-85,9
Entrada IASA	-56,4
Aulas	-39,7
Bodega	-48,3
Previsión Loreto	-60,0
Sembríos Loreto	-69,0
Laboratorios	-41,0
Criadero de Pollos	-53,8

Tabla 3.6. Resultados de niveles de recepción de señal de la estación base obtenidos de la simulación downlink en *Radio Mobile*

Por último, en la figura 3.39 se muestra un mapa aún más amplio que permite visualizar el área total de cobertura de la antena conectada a la estación base del sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado):

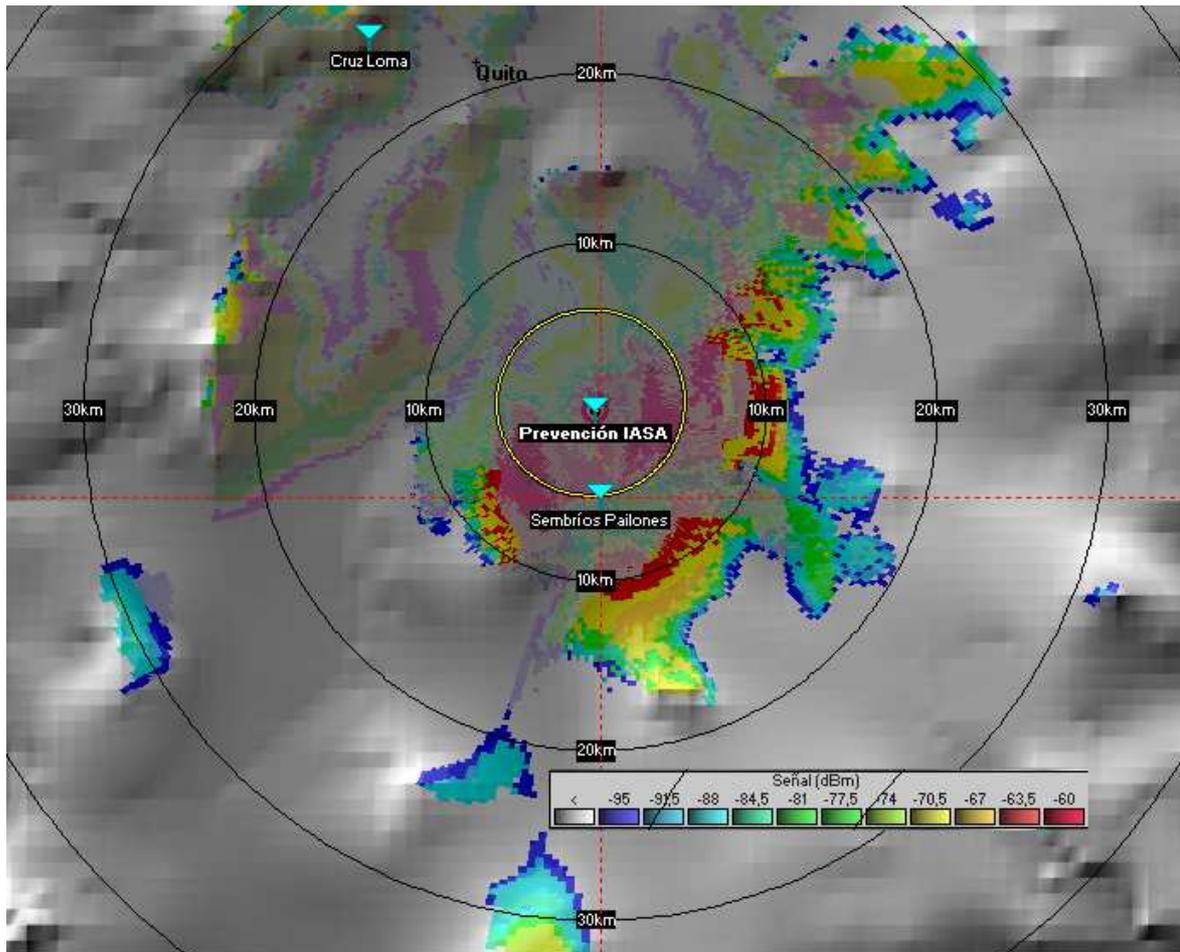


Figura 3.39. Simulación del mapa cobertura total del arreglo de 4 dipolos doblados de la estación base

En la figura mostrada, se puede deducir que la ganancia de la antena, la forma de su patrón de radiación y la potencia de transmisión de la estación base de radio utilizada en el sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado), permiten obtener una zona extensa de cobertura, llegando incluso a ciertos sectores de la ciudad de Quito.

Simulación Uplink

Esta simulación tiene como objetivo determinar el área de cobertura que se podrá obtener con las radios portátiles PRO3150 utilizadas en el sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado). Esto es importante, pues la cobertura total del sistema no sólo depende de las características de la estación base, sino también de la ubicación y características que tengan las radios portátiles que se estarán moviendo constantemente dentro de la hacienda “El Prado”.

Se simulará a un radio portátil ubicado en la locación denominada “Sembríos Pailones”, pues representa al lugar de interés más alejado de las oficinas centrales del IASA y por lo tanto se pueden evaluar los resultados en el peor de los escenarios posibles ya una vez que el sistema se ponga en funcionamiento. La figura 3.40 muestra la simulación:

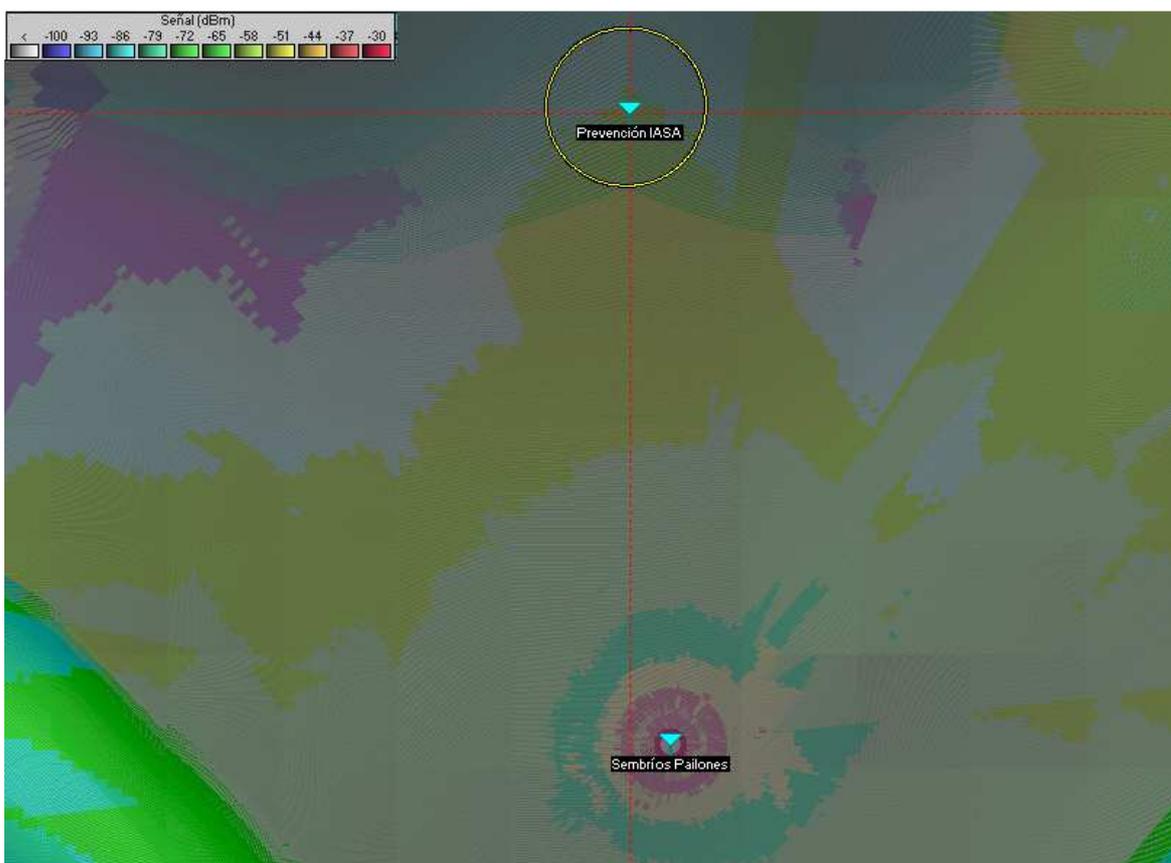


Figura 3.40. Simulación uplink sistema interno de radiocomunicaciones del IASA (El Prado)

La simulación determinó que, en la prevención central del IASA, lugar donde se simuló la localización de la estación base, el nivel de recepción de señal transmitida por un radio portátil ubicado en los sembríos de Pailones es de $-86,5$ dBm, lo cual demuestra que la cobertura del sistema interno de radiocomunicaciones sí satisfará las necesidades de este servicio en todos los puntos de interés dentro de los predios de la hacienda “El Prado”.

3.3.4. Simulación del enlace entre el IASA (El Prado) y el campus ESPE (Sangolquí) mediante la repetidora de Cruz Loma con software de predicción de cobertura.

Como se mencionó anteriormente, otra de las necesidades del IASA (El Prado) es añadir sus estaciones de radio a la red de seguridad de la ESPE (Sangolquí). La red mencionada es un grupo de trabajo programado en todas las radios de la red de la ESPE, que para comunicarse entre sí utilizan una repetidora ubicada en el cerro Cruz Loma. Es así que se hace necesario determinar si es posible establecer una comunicación entre las radios del sistema del IASA y la repetidora de Cruz Loma, que a su vez permitirá la comunicación con las radios ubicadas en el campus ESPE (Sangolquí). Igual que en la sección anterior, se realizarán las simulaciones de los enlaces uplink y downlink entre la estación repetidora y la estación base del IASA (EL Prado).

Simulación Downlink

La figura 3.41 muestra la zona de cobertura total de la estación repetidora de la ESPE ubicada en el cerro Cruz Loma:

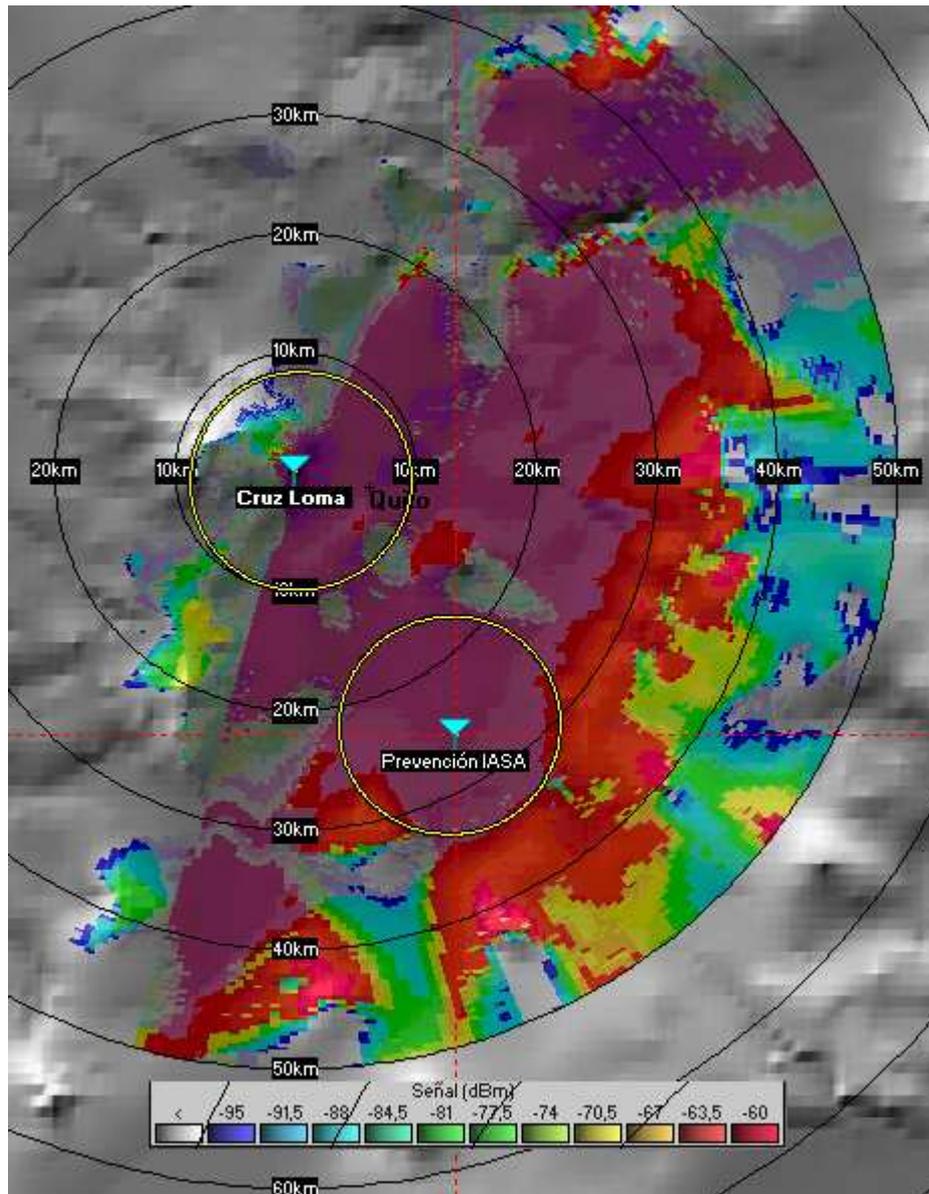


Figura 3.41. Simulación área de cobertura de la estación repetidora de la ESPE ubicada en Cruz Loma

La figura muestra que el área que cubre la estación repetidora es bastante extensa. Esto se debe a la ganancia de la antena que tiene conectada (que también es un arreglo de 4 dipolos doblados) y a la alta potencia a la que capaz de transmitir. La estación base ubicada en el IASA recibe de la repetidora un nivel de señal de $-43,9$ dBm.

Simulación Uplink

En la figura 3.42 se puede observar la simulación del área de cobertura de la estación base del IASA (El Prado) cuando transmite su señal a la estación repetidora de la ESPE:

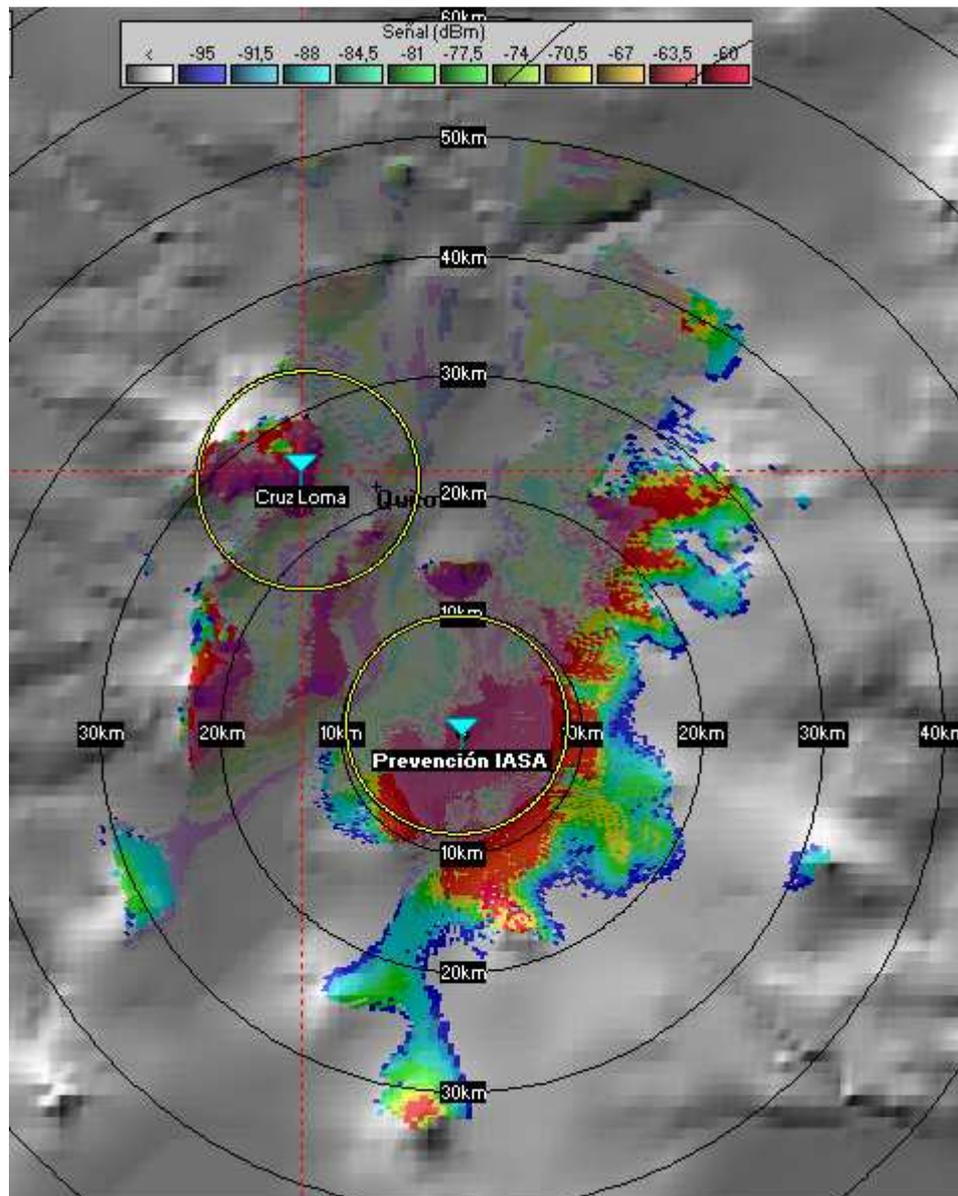


Figura 3.42. Simulación área de cobertura obtenida al realizar el enlace uplink entre el IASA (El Prado) y la repetidora de la ESPE

Se puede observar que el área de cobertura de la estación base se incrementa al enlazarla con la estación de Cruz Loma respecto a la cobertura que se tenía al enlazarla con los radios portátiles. Esto se debe a que, a pesar de la mayor distancia que existe con Cruz Loma, la ganancia de la antena conectada a la repetidora y su potencia de transmisión tienen valores mucho más altos que los de los radios portátiles, haciendo que las pérdidas totales del enlace sean menores.

El nivel de recepción de señal en la repetidora cuando transmite la estación base del IASA es de -57.9 dBm. Con este valor y con los resultados obtenidos en el enlace downlink, se puede afirmar que la comunicación entre las radios del IASA y las de la red de seguridad de la ESPE (Sangolquí) será posible.

3.3.5. Determinación del lugar óptimo para colocar la antena en el IASA

Dados los resultados obtenidos en el análisis del sistema de radiocomunicaciones a implementarse en el IASA (El Prado), se concluyó que el área de cobertura no variaría en gran medida al cambiar la posición en donde se instalará la radio base, por lo tanto se decidió implementar el arreglo de cuatro dipolos doblados en el lugar donde más lo requerían, es decir en el centro administrativo de la institución, en el lugar denominado “Prevención Central”, así se lograría una eficiencia máxima en el sitio donde existe la mayor densidad de usuarios de radios móviles. La figura 3.43 muestra la ubicación final de la radio base del IASA “El Prado”.



Figura 3.43. Ubicación final del arreglo de cuatro dipolos doblados en la Prevención Central de la Hacienda “El Prado”

3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Luego de haber determinado el diseño del sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado), tomando en cuenta todas las consideraciones necesarias mencionadas a lo largo de este capítulo, se puede proceder a ponerlo en funcionamiento.

La implementación de este sistema de radiocomunicaciones consiste en realizar la programación correcta de las estaciones base, repetidora y portátiles que serán parte de él, la instalación de la antena arreglo de 4 dipolos doblados y de la estación base de radio en

los predios del IASA (El Prado), así como pruebas piloto de la implementación, pruebas de aceptación por parte del personal del IASA “El Prado” y análisis de la operación para ofrecer mejoras en el sistema. A continuación se describen las actividades más relevantes realizadas durante este proceso.

3.4.1. Programación de los equipos de radio

El sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado) constará de una estación base de radio ubicada en la prevención central de la hacienda, que está ubicada en su edificio administrativo y además de 4 radios portátiles que estarán siendo utilizados en ubicaciones variadas dentro de los predios de la institución. Para que puedan comunicarse correctamente entre sí, es necesario que se programe a todas las estaciones de manera adecuada.

Programación de las estaciones de radio portátiles

Las radios portátiles utilizadas son de marca MOTOROLA, modelo PRO3150. Para programar estas estaciones, el fabricante ha creado el software denominado “*Entry Level Professional Radio CPS R02.01.03-LA*”.

Para que exista comunicación entre el computador donde se encuentra instalado el software y la radio portátil a programar, es necesario conectarlos utilizando el equipo denominado “*Motorola Radio Interface Box (RIB)*”, o dicho en español, “*Caja de Interfaz de Radio*”, como la que se muestra en la siguiente figura:



Figura 3.44. Motorola Radio Interface Box (RIB)

El RIB se conecta al puerto serial de la computadora, con un cable serial DB9 y se conecta al radio mediante el denominado “*programming cable*”. Este cable puede variar de acuerdo al tipo de puerto de programación que tenga la radio que se desea programar. Así, se tienen cables que terminan en distintos tipos de conectores. Las radios PRO 3150 se programan mediante un cable que tiene dos plugs de audio, como el que se muestra en la figura siguiente:



Figura 3.45. Cable de programación para radios Motorola PRO 3150

La función principal del RIB es convertir los niveles de voltaje del puerto RS232 del computador en niveles de voltaje TTL como los que utilizan los circuitos de las estaciones de radio de Motorola. El puerto serial de los computadores tiene líneas de datos de transmisión y recepción separadas que varían entre voltajes positivos de 6 a 9 VDC hasta voltajes negativos de -6 a -9 VDC al realizar transiciones entre 0s y 1s binarios. El proceso de conversión de voltaje convierte esos niveles de voltaje a los niveles TTL de 0 y +5 VDC. Una vez conectados el computador y la radio portátil de manera correcta, se puede realizar la programación de la estación.

El entorno del software de Motorola para programar las radios portátiles PRO 3150 tiene la apariencia mostrada a continuación:

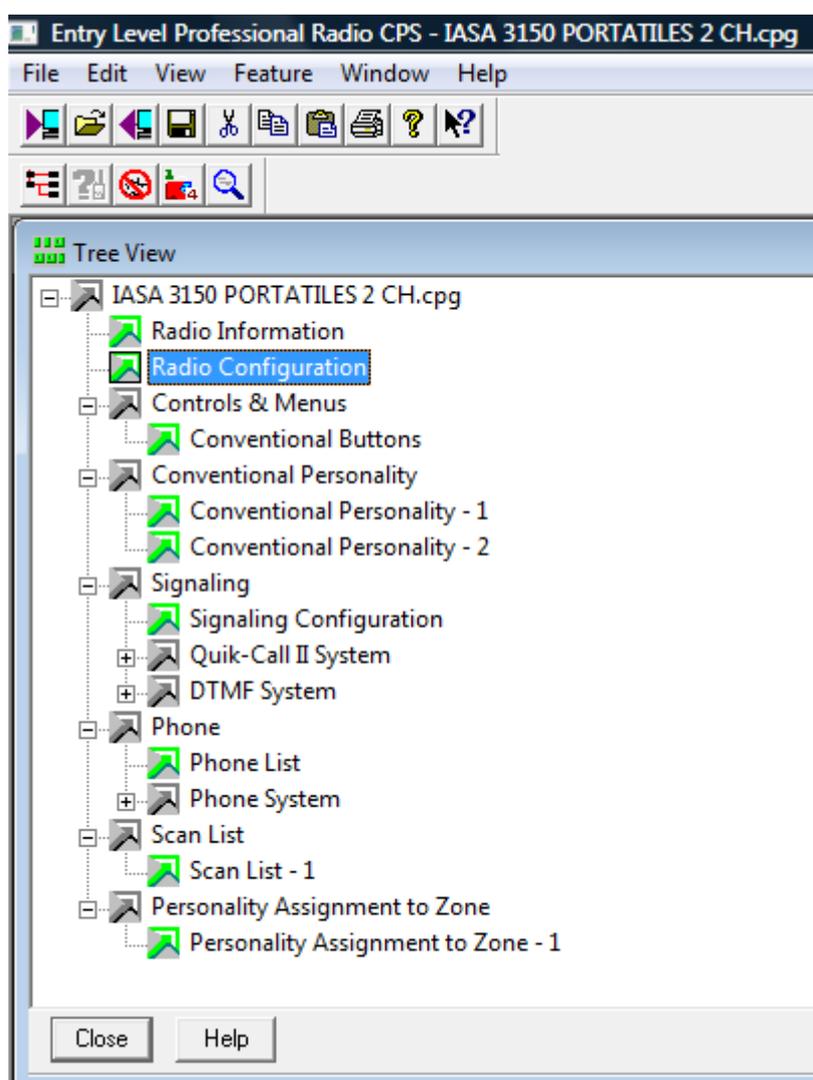


Figura 3.46. Interfaz de programación de las radios Motorola PRO 3150

De acuerdo a las necesidades del IASA (El Prado) y a las características de las radios PRO 3150, de entre las opciones que se observan en la figura anterior, las más relevantes a programar son: *Conventional Personality*, *Scan List* y *Personality Assignment to Zone*.

Se han programado dos personalidades convencionales en las radios portátiles. La programación de la primera de ellas se muestra en la siguiente figura:

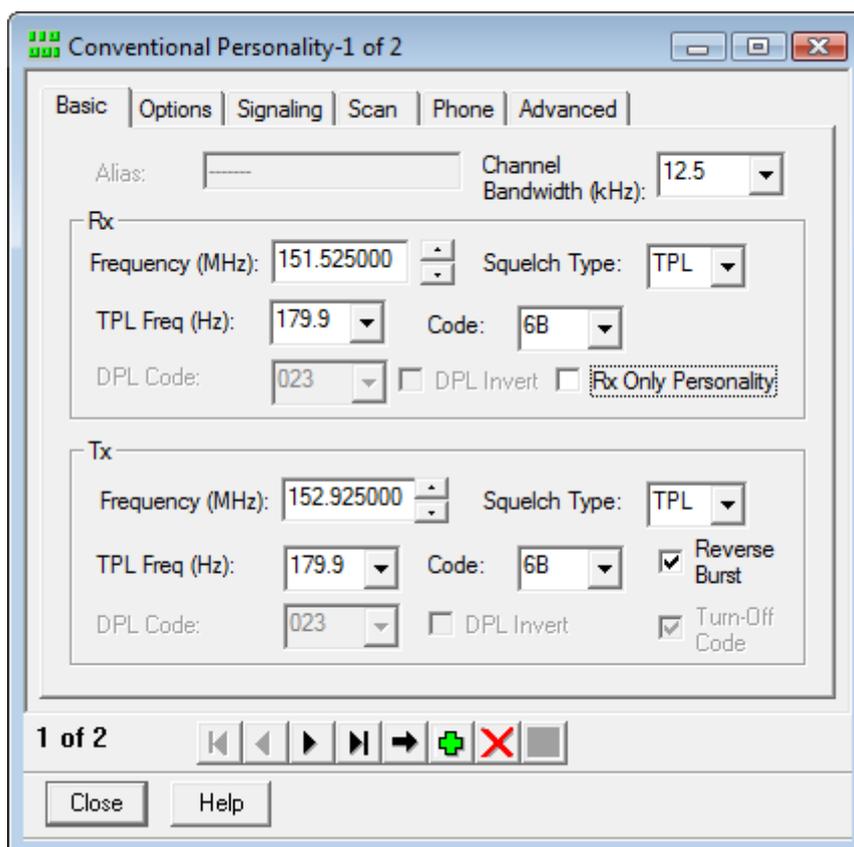


Figura 3.47. Programación de personalidades convencionales para radios Motorola PRO 3150

Dentro de la programación de personalidades convencionales, se tienen distintos parámetros para transmisión y recepción, tal como se puede observar en la figura 3.47. A continuación se explica su significado y las opciones de programación de cada uno de ellos.

Channel Bandwidth (KHz): Se refiere al espaciamiento entre canales con el que funcionarán los radios. Se pueden programar valores 12,5, 20 y 25 KHz.

Frequency (MHz): Se refiere a la frecuencia a la que funcionarán los radios tanto en transmisión como en recepción. Para esta personalidad convencional, se ha programado la frecuencia de transmisión en 152,925 MHz y la de recepción en 151,525 MHz. Se han escogido frecuencias diferentes para crear un canal half-duplex que permita realizar las comunicaciones mediante repetidora entre los radios del IASA y los radios de la red de seguridad de la ESPE (Sangolquí). Se tiene una separación de 1,4 MHz entre ambas frecuencias, lo cual se realiza para evitar interferencias de canal adyacente tal como se explica en la teoría del capítulo 2. Las frecuencias utilizadas han sido asignadas previamente a la ESPE por parte de los organismos reguladores gubernamentales.

Squelch Type: Esta opción es la que permite suprimir las señales no deseadas en cada canal de comunicación y escuchar solamente a los radios programados para funcionar en mismo el grupo de trabajo. Esto se logra mediante la programación de distintos tonos o códigos, que pueden ser de tipo CSQ (*Carrier Squelch*), DPL (*Digital Private Line*) o TPL (*Tones Private Line*).

En esta personalidad convencional, se ha programado un tono TPL que concuerda con el programado en los radios de la red de seguridad de la ESPE, lo cual permite que al sintonizar el canal 1 de los radios PRO 3150 del IASA (El Prado), se pueda tener comunicación con dicho grupo de trabajo. Los tonos TPL son tonos subauditivos en el rango de 67,0 a 254,0 Hz, y actúan como codificadores de audio durante la transmisión para excluir tráfico no deseado dentro del canal de comunicación. El software de los radios PRO 3150 permite escoger uno de entre 42 códigos posibles. En este caso, se ha programado el código 6B, que está a una frecuencia de 179,9 Hz.

Los códigos DPL son códigos digitales expresados como un número octal de 3 dígitos, el cual es transmitido junto con el audio. Usa tonos por debajo de los 300 Hz y se lo utiliza también para evitar tráfico no deseado en el canal de comunicación, permitiendo tener una eficiente reutilización de frecuencias mediante la programación de distintos códigos DPL por canal. La diferencia con los tonos TPL es que éstos son señales analógicas, mientras los códigos DPL son datos digitales que incluso permiten invertir la polaridad de los pulsos para obtener aún más códigos. El software utilizado permite escoger uno de entre 214 códigos DPL.

Si se escoge la opción CSQ, el radio trabajará exclusivamente utilizando una frecuencia portadora, sin codificación alguna, lo cual es poco recomendable debido a la utilización poco eficiente del espectro, a la alta posibilidad de interferencias y a la disminución de la privacidad de las transmisiones.

En la siguiente figura, se muestra la configuración de la segunda personalidad convencional que se programó en los radios PRO 3150:

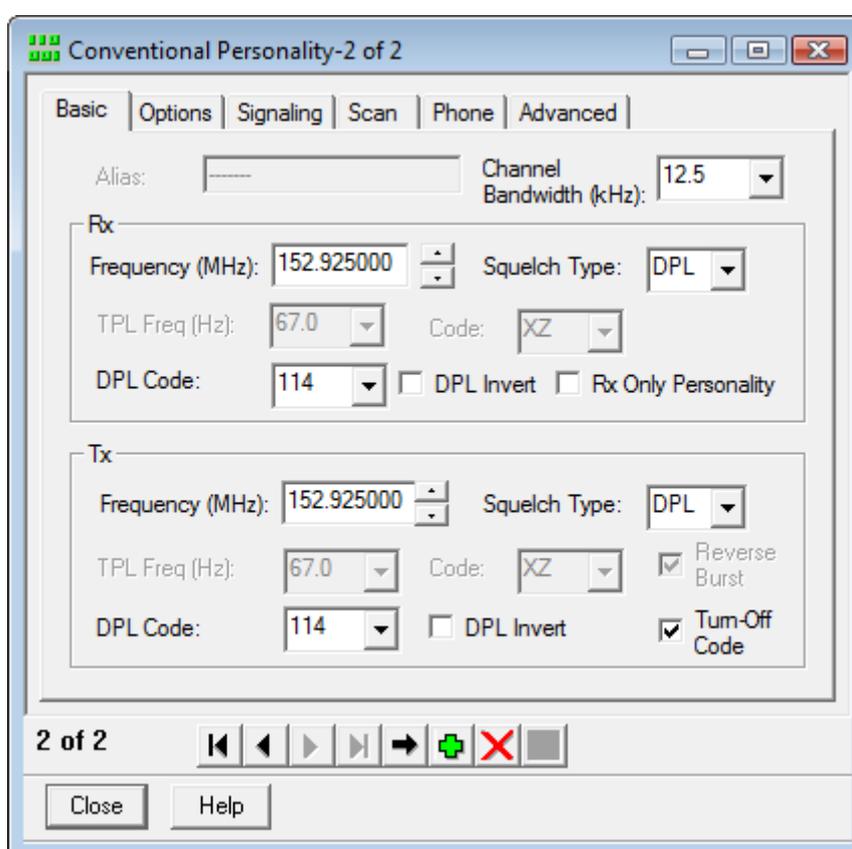


Figura 3.48. Programación de la Personalidad Convencional #2 de los radios PRO 3150

Para la segunda personalidad convencional, se utilizó una sola frecuencia en transmisión y recepción. Esto se lo realizó para obtener un canal símplex de una frecuencia donde los radios se comunicaran directamente entre sí sin necesidad de una repetidora. Se utilizó esta configuración porque se demostró que era suficiente para proveer cobertura en todos los sitios de interés dentro de la hacienda “El Prado”. Además, como se puede observar, se utilizó un código DPL en lugar de un tono TPL, como se lo hizo anteriormente. El código DPL seleccionado es el 114.

Ahora se procederá a mostrar la manera en que se programó la opción “*Scan List*”, para lo que será útil la siguiente figura:

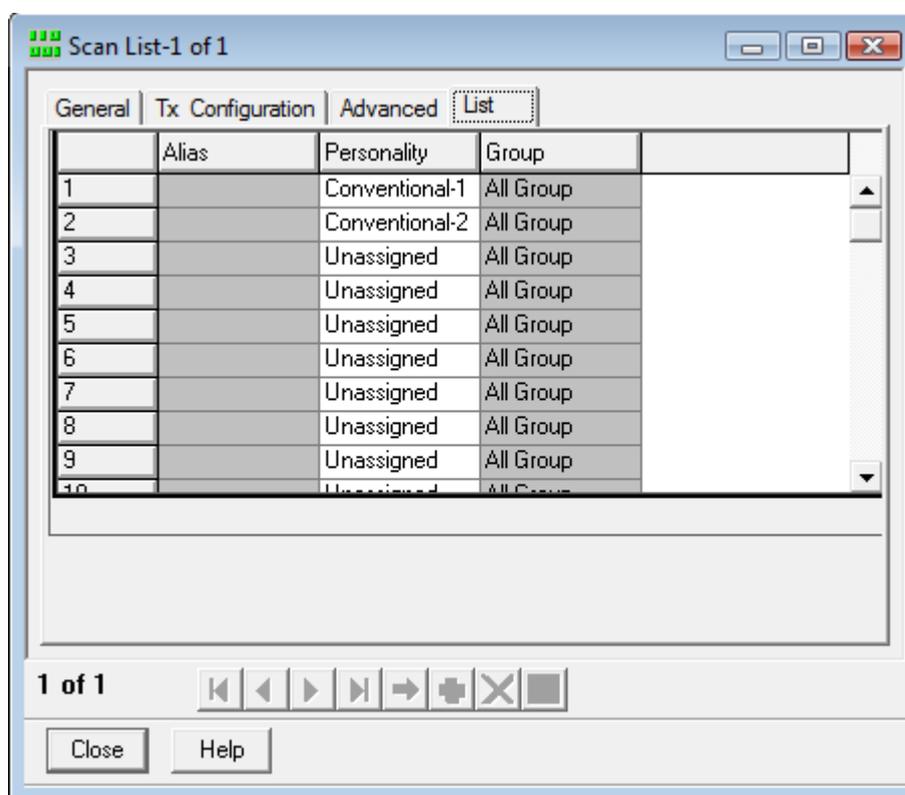


Figura 3.49. Configuración de la opción *Scan List* en las radios PRO 3150

El software utilizado para programar las radios PRO 3150 sirve también para otras radios, por lo que la lista de búsqueda ofrece la opción de programar hasta 16 canales. Las radios del IASA tienen sólo 4 canales, y en este caso sólo han hecho falta 2 de ellos. El objetivo de programar esta lista de búsqueda es asociar cada canal a una personalidad convencional diferente, para así crear los grupos de trabajo que se necesiten en las radios. En la figura se puede observar que se tendrá a la personalidad convencional 1 al sintonizar el canal 1 de las radios y a la personalidad convencional 2 al sintonizar el canal 2 de las radios. El resto de canales estarán vacíos.

Por último, se procederá a explicar la programación realizada en la opción “*Personality Assignment to Zone*”, mostrada en la figura 3.50:

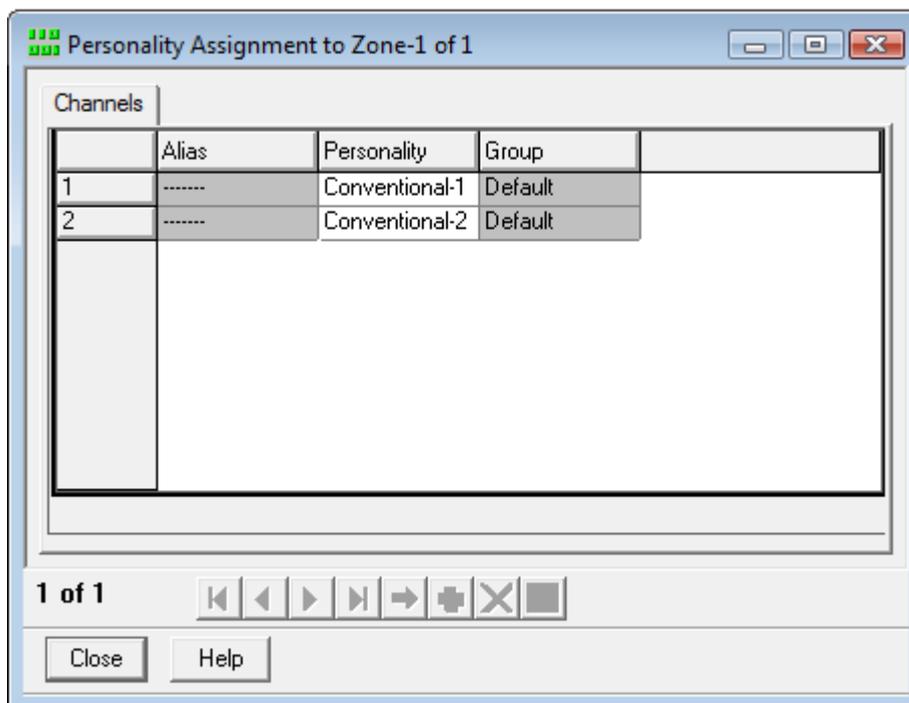


Figura 3.50. Configuración de la opción *Personality Assignment To Zone* en las radios PRO 3150

Ciertas radios Motorola pueden tener más de una zona de trabajo, esto se utiliza cuando se tienen sistemas de radio troncalizados en los que se tiene un alto número de usuarios y grupos de trabajo. En este caso, sólo ha hecho falta una zona de trabajo, en la que se asignan las personalidades convencionales a los respectivos canales de los radios, simplemente confirmando lo que se configuró anteriormente en la lista de búsqueda (Scan List).

Programación de la estación de radio base

Para programar la estación de radio base PRO 5100 instalada en el IASA (El Prado), el procedimiento es exactamente el mismo que el explicado para las radios portátiles, excepto que se utiliza un software distinto llamado “*Professional Radio CPS R06.07.04*” y además, el cable de programación para conectar la estación base con el RIB es distinto, en lugar de tener los 2 plugs de audio que tenía el cable de los radios PRO 3150, tiene un conector cuadrado de 16 pines que se enchufa a la parte posterior del equipo. La siguiente figura muestra este cable:

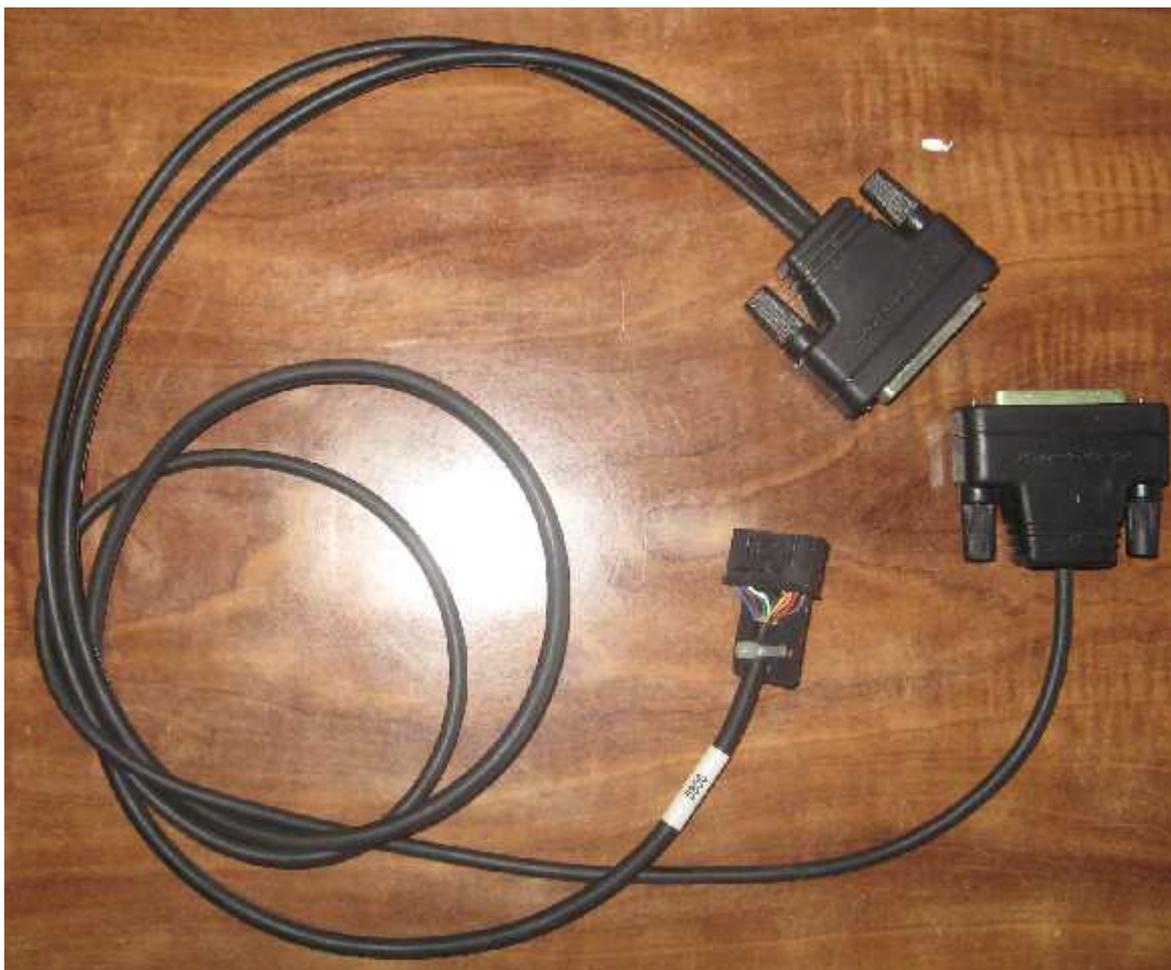


Figura 3.51. Cable de programación para la estación de radio base PRO 5100

El entorno del software de programación utilizado para configurar la estación base de radio es muy similar al que se utilizó para programar las estaciones portátiles. La única diferencia entre la programación aquí realizada y la que se hizo con los radios portátiles es que se pudo asignar un nombre a cada personalidad convencional. Así, el canal 1 tendrá la personalidad convencional llamada “Seguridad” y el canal 2 tendrá la llamada “IASA”. Las siguientes figuras muestran la programación realizada en la estación base PRO 5100 instalada en el IASA (El Prado):

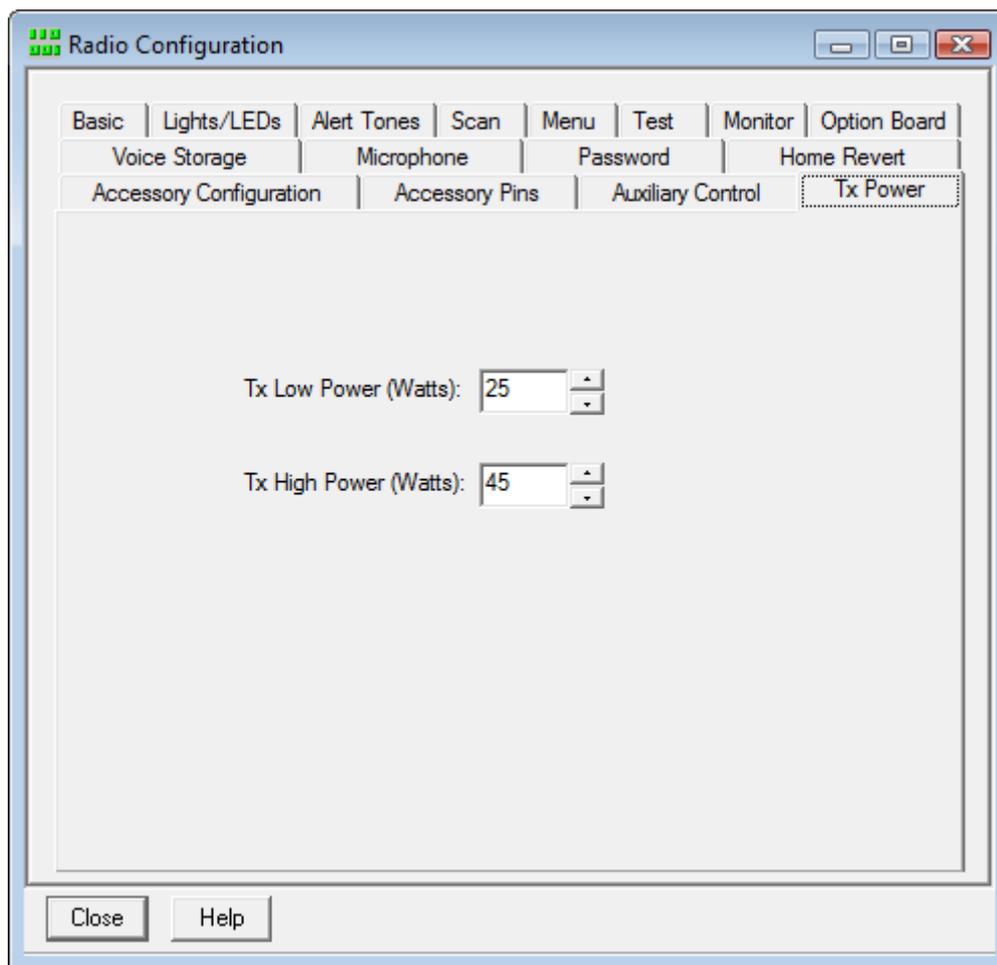


Figura 3.52. Programación de los niveles de potencia de transmisión de la estación base PRO 5100

El software permite regular la potencia de transmisión que tendrá la estación base. En este caso, se ha asignado un rango entre 25 y 45 watts, que son los valores diseñados de fábrica para el equipo PRO 5100 y que se utilizaron en las secciones anteriores para la simulación del sistema.

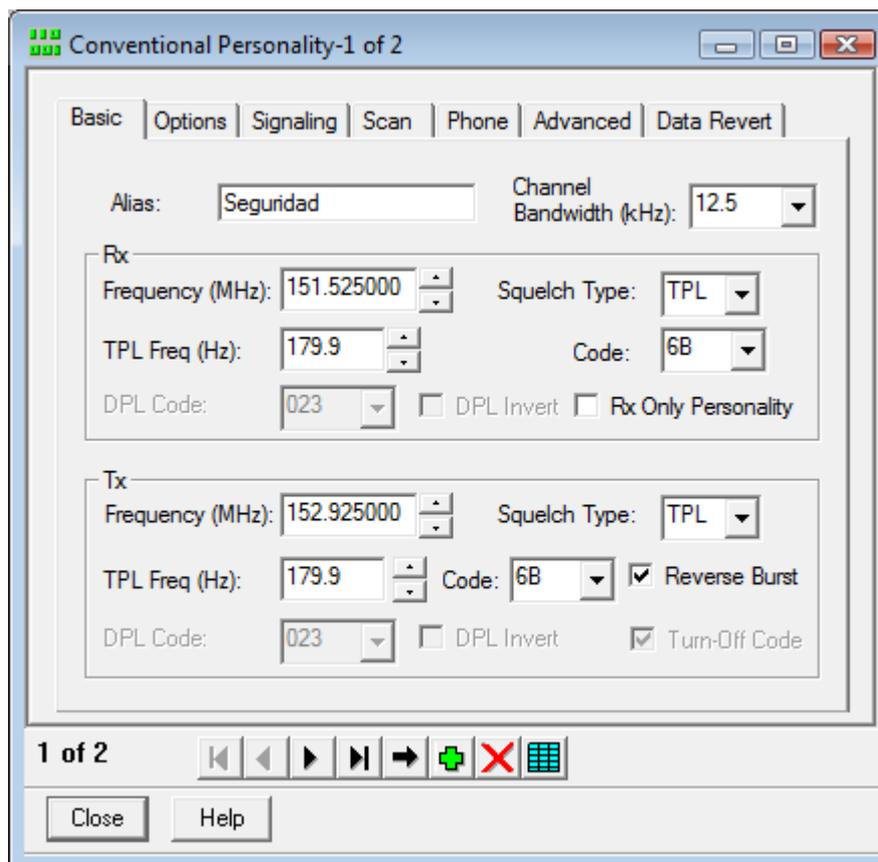


Figura 3.53. Configuración de la personalidad convencional “Seguridad” de la estación base PRO 5100

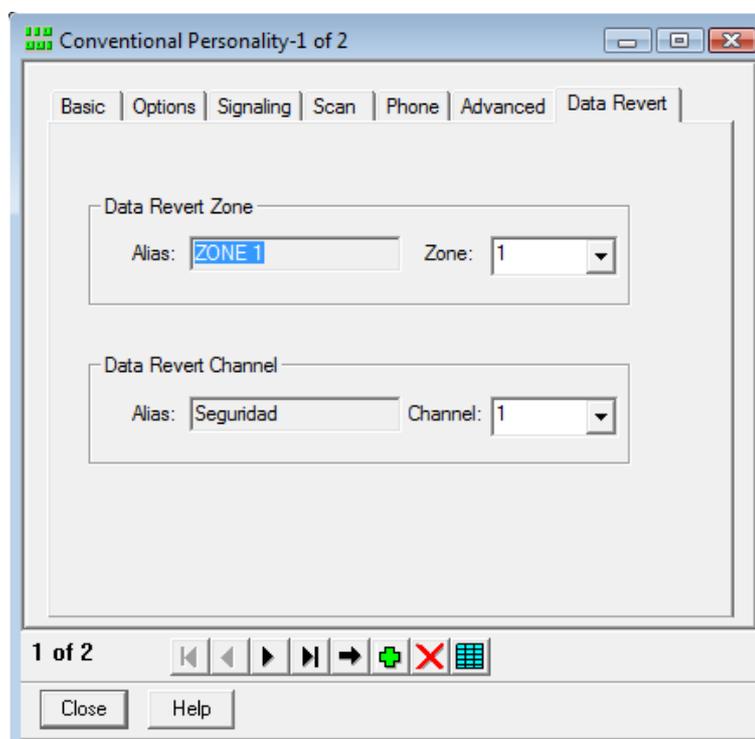


Figura 3.54. Asignación de zona y canal de la personalidad convencional “Seguridad” de la estación base PRO 5100

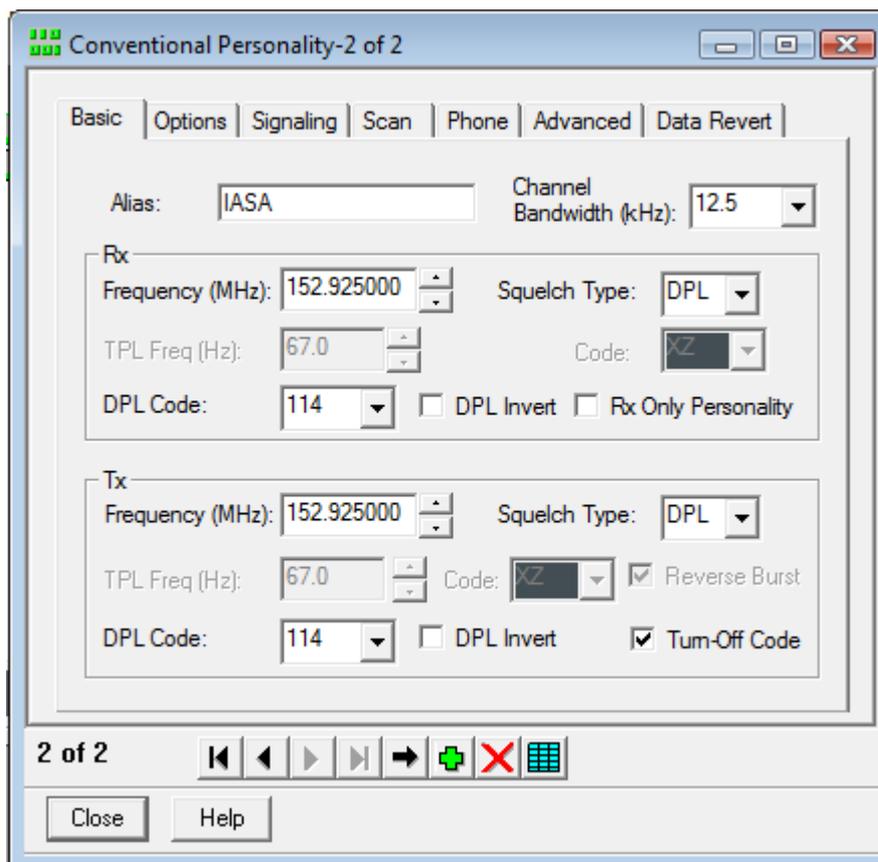


Figura 3.55. Configuración de la personalidad convencional “IASA” de la estación base PRO 5100

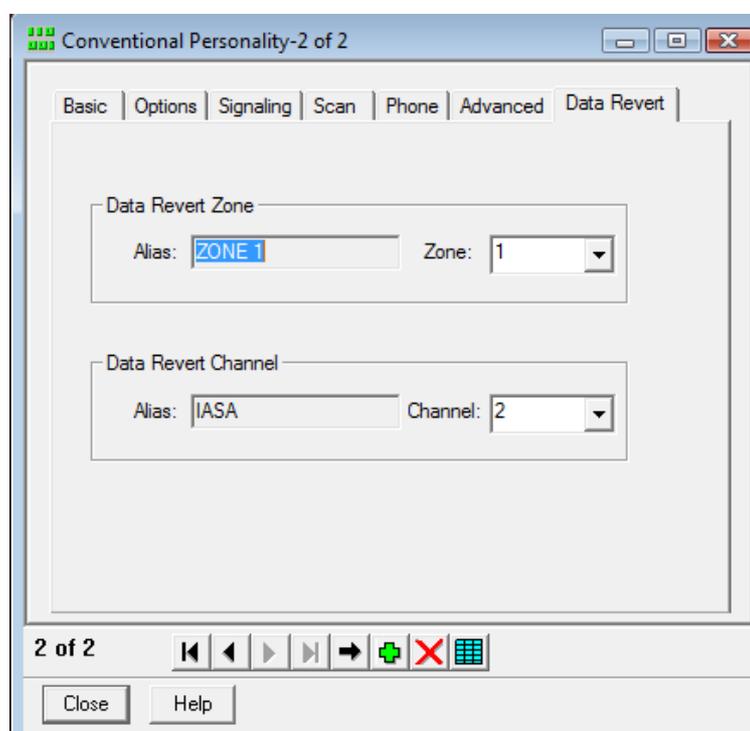


Figura 3.56. Asignación de zona y canal de la personalidad convencional “IASA” de la estación base PRO 5100

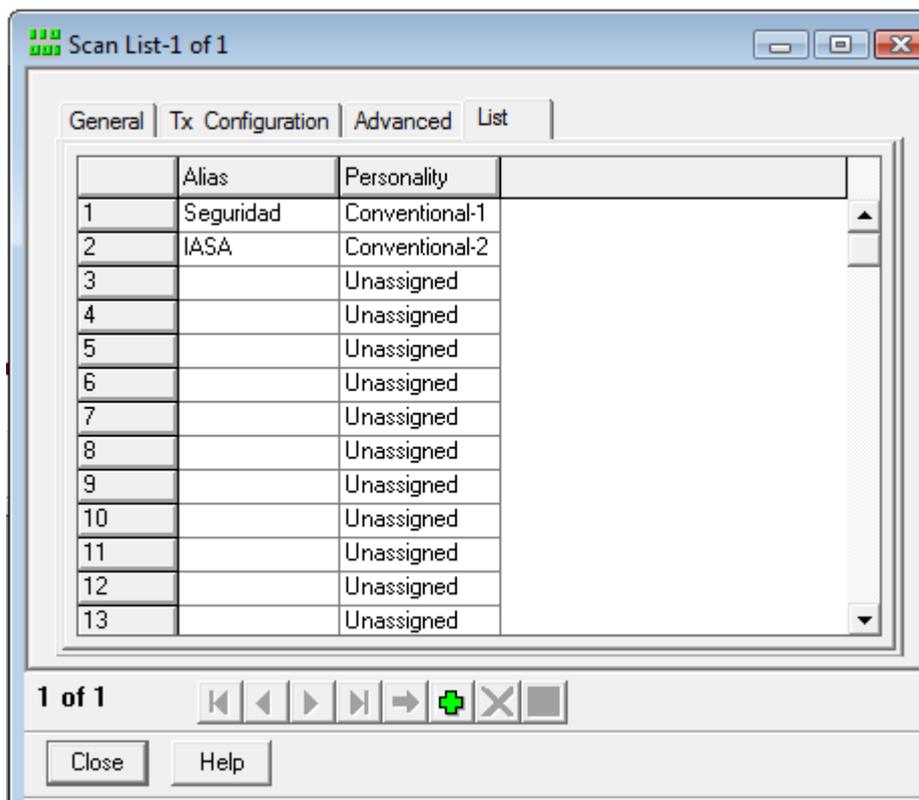


Figura 3.57. Configuración de la opción *Scan List* en la estación base PRO 5100

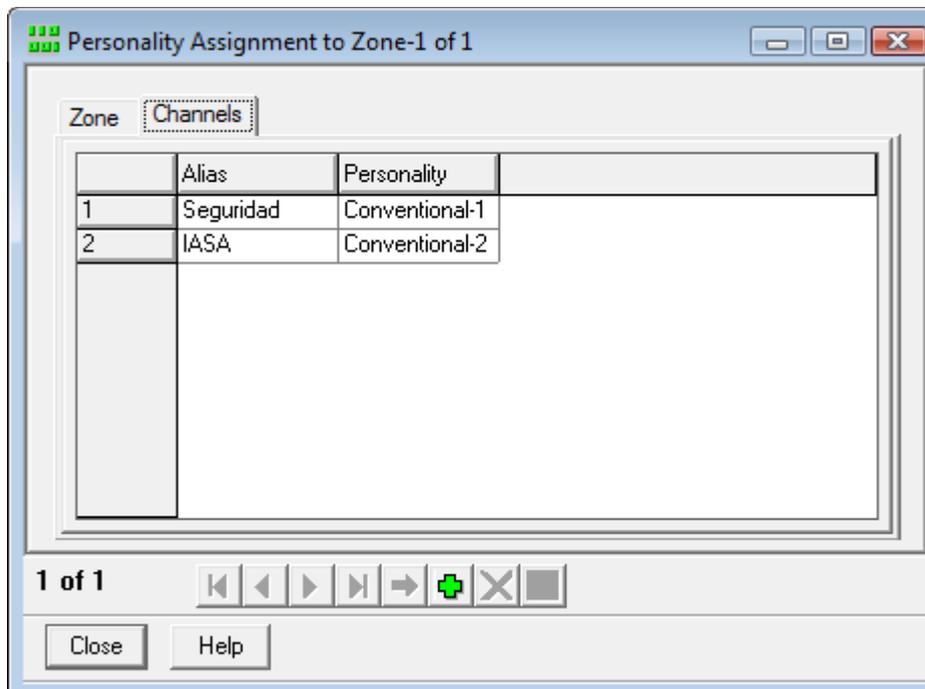


Figura 3.58. Configuración de la opción *Personality Assignment to Zone* en la estación base PRO 5100

Como se puede observar en las figuras anteriores, todas las configuraciones realizadas en la estación base PRO 5100 son las mismas que se realizaron en los radios

portátiles PRO 3150, por lo que se han omitido las explicaciones de estas configuraciones, tomando a las hechas anteriormente como válidas.

3.4.2. Definición de los grupos de trabajo del sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado)

Con las configuraciones realizadas en las radios PRO 3150 y PRO 5100, pertenecientes al IASA y además de los requerimientos de comunicación expuestos anteriormente, se decidió la implementación de dos grupos de trabajo:

- Seguridad ESPE
- Comunicación Interna IASA

El grupo de trabajo “Seguridad ESPE” se refiere a la comunicación en el canal 1 del sistema de comunicaciones del IASA (El Prado), este canal tiene una configuración *Half-Duplex* en la cual se ha establecido una comunicación a dos frecuencias mediante la repetidora propiedad de la Escuela Politécnica del Ejército ubicada en Cruz Loma.

El siguiente grupo de trabajo “Comunicación Interna IASA” hace referencia a la utilización del canal 2 del sistema de radiocomunicaciones del IASA, en dicho canal se ha configurado un canal *Simplex* a una frecuencia, mediante una comunicación directa entre terminales sin la necesidad de una estación repetidora, suficiente para proveer de cobertura a todas las áreas de interés de la Hacienda “El Prado”.

3.4.3. Restauración del enlace entre el IASA (El Prado) y el campus ESPE (Sangolquí)

Dada la importancia del canal de seguridad de la ESPE para todas las dependencias de la misma, fue necesaria la utilización de la repetidora de Cruz Loma para lograr la comunicación del IASA con todo el sistema de comunicaciones de la Escuela.



Figura 3.59. Estación repetidora de la ESPE instalada en la propiedad del Comando Conjunto de las FF.AA. ubicado en Cruz Loma

Para restaurar el enlace de la estación repetidora de la ESPE con la Hacienda “El Prado”, fue necesaria la revisión de la programación del equipo repetidor KENWOOD TKR-750 ubicado en la caseta de equipos de la ESPE que se encuentra en Cruz Loma, procurando hacer que las especificaciones del canal de seguridad configurado previamente en esta estación sean las mismas que posteriormente se configurarían en el canal 1 de las terminales ubicadas en el IASA (El Prado). Se observó mediante la conexión del puerto de administración del equipo y a través del software KPG-91D, que la estación repetidora mantenía la siguiente configuración:



Figura 3.60. Conexión de administración entre una PC y la estación repetidora de la ESPE

KPG-91D [TKR-750 VHF : 146-174 MHz (K)] [File Name : kpg91d.dat]

File Model Edit Program Tools Setup View Window Help

Channel Information [Channel - 16]

No.	RX Frequency	TX Frequency	QT/DQT Dec	QT/DQT Enc	Ch Name	Multi Table	W/N	Power	Ope Mode	Scan Add	CW ID
1	152,92500	151,52500	179,9	179,9		Yes	Wide	High	Repeat	No	No
2	152,92500	151,52500	D023N	D023N		Yes	Wide	High	Repeat	No	No
3	152,92500	151,52500	D031N	D031N		Yes	Wide	High	Repeat	No	No
4	152,92500	151,52500	D043N	D043N		Yes	Wide	High	Repeat	No	No
5	152,92500	151,52500	D051N	D051N		Yes	Wide	High	Repeat	No	No
6	152,92500	151,52500	D065N	D065N		Yes	Wide	High	Repeat	No	No
7	152,92500	151,52500	D071N	D071N		Yes	Wide	High	Repeat	No	No
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											

Channel Edit Close Help

Figura 3.61. Configuración existente en la estación repetidora de la ESPE

De acuerdo a lo observado en la figura 3.60, se tiene que la frecuencia de recepción es 152,925 MHz y la frecuencia de transmisión es 151,525 MHz, las cuales obviamente son intercambiadas con las frecuencias de transmisión y recepción programadas en las terminales PRO 3150 y en la estación base PRO 5100.

Además, la codificación configurada es de tipo TPL (equivalente a QT o *Quiet Talk*) para el canal de seguridad con un tono subaudible de 179,9 Hz y para el resto de los canales (inherentes al sistema de radiocomunicaciones de la ESPE, más no al del IASA (El Prado) una codificación digital DPL (equivalente a DQT o *Digital Quiet Talk*). La codificación QT utiliza tonos subaudibles entre 67 y 254,1 Hz. La codificación DQT utiliza números octales de 3 dígitos con códigos desde 000 hasta 777.

Por último se tiene activada la opción de *Multi Table* para todos los canales, la cual es equivalente a la opción *Scan List* de las terminales MOTOROLA existentes en el IASA (El Prado).

Una vez habilitadas dichas propiedades en los equipos de comunicación del IASA (El Prado) e instalada la antena de la estación base apuntando en dirección de la ubicación de la repetidora, el enlace que permitirá la comunicación del canal seguridad de la ESPE con el del IASA estará restablecido y en funcionamiento. En la figura 3.61 se puede constatar que el enlace entre ambos sitios es factible tanto en ubicación como en niveles de recepción de la señal. Las coordenadas de Cruz Loma son: 0° 11' 16,1" S, 78° 32' 7,4" W.

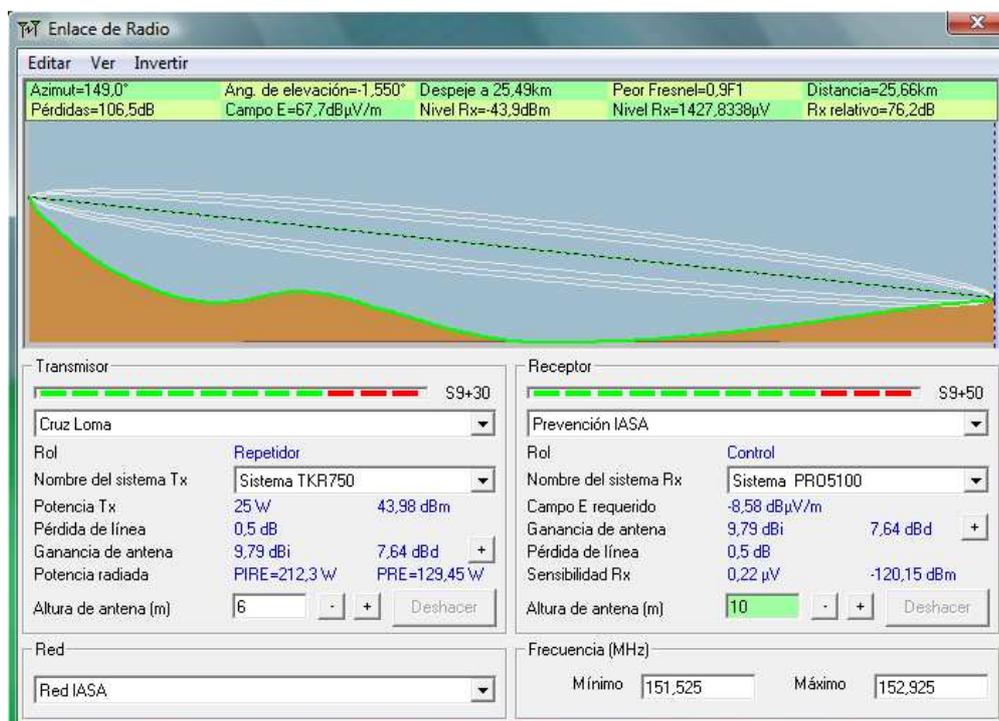


Figura 3.62. Simulación del enlace entre la estación repetidora de Cruz Loma y la estación base del IASA (El Prado)

CAPITULO 4

BARRIDO ESPECTRAL

4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

El objetivo de realizar un barrido espectral en los predios de la hacienda “El Prado” fue detectar los niveles de recepción de señal del sistema de radiocomunicaciones implementado en la banda de 150 MHz. Las pruebas se realizaron utilizando el canal 2 configurado en las estaciones de radio, que como se dijo anteriormente, es una canal *simplex* a una frecuencia. Por lo tanto, este barrido espectral sirvió para evaluar la cobertura de las estaciones sin utilizar una estación repetidora.

Para llevar a cabo este barrido espectral, se utilizó una antena VHF idéntica a las que tienen las radios portátiles PRO 3150, que funciona en la banda de 136 a 174 MHz. Esta antena fue conectada al equipo analizador de espectros de marca GW INSTRUMENTS, modelo GSP-830, tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura 4.1. Antena Motorola VHF conectada al analizador de espectros GSP-830

Para poder realizar las mediciones, se procedió a emitir una señal de la estación base de radio ubicada en la prevención central del IASA, presionando el botón PTT por 30 segundos y capturando el nivel de señal obtenido por la antena VHF conectada al analizador de espectros en la frecuencia de transmisión configurada en la estación base, que es de 152,925 MHz. Las pruebas se realizaron en los mismos puntos de interés mencionados en las simulaciones del software Radio Mobile del capítulo 3.

Analizador de Espectros GW-INSTEK GSP-830

En esta sección se realizará una pequeña descripción del analizador de espectros utilizado para realizar las mediciones de barrido espectral del sistema de radiocomunicaciones VHF del IASA (El Prado). La figura 4.2 muestra una imagen frontal de este equipo de medición:



Figura 4.2. Analizador de Espectros GW-INSTEK GSP-830¹⁸

Este equipo es de gran funcionalidad, ya que permite trabajar en cualquier lugar gracias a la opción de operación sin conexión a la red eléctrica AC, pues el equipo viene provisto con 2 baterías de ion-litio de 10,8 VDC que llegan a durar hasta 3 horas cada una.

¹⁸ Imagen Tomada de: <http://www.blii.com/instek%20images/gsp-830L.jpg>, GW Instek GSP-830 Spectrum Analyzer

Además, permite capturar las pantallas que muestran las mediciones realizadas y guardarlas en un dispositivo USB Flash para su posterior análisis en cualquier PC. Las especificaciones técnicas más relevantes del equipo se muestran en la tabla 4.1:

Características Técnicas	Valor
Rango de Frecuencias	9 KHz – 3 GHz
Rango de Span	2 KHz - 3 GHz en secuencia 1-2-5, full span, cero span
Rango de Tiempo de Barrido	50 ms - 25,6 s
Rango de Resolución de Ancho de Banda	3 KHz, 30 KHz, 300 KHz, 4 MHz
Precisión de Resolución de Ancho de Banda	15 %
Rango de Medida de Amplitud	-103 dBm - +20 dBm, 1MHz – 15 MHz, Niv. Ref. \geq -30 dBm -120 \pm 1 dBm - +20 dBm, 15 MHz – 600 MHz, Niv. Ref a -50 dBm
Rango de Nivel de Referencia	-110 dBm a +20 dBm
Precisión de Amplitud	\pm 1 dB a 100 MHz
Piso de Ruido de Rango Dinámico Promedio	-135 dBm/Hz, 1MHz – 15 MHz, Niv. Ref. \geq -30 dBm -152 \pm 1 dBm/Hz, 15 MHz – 600 MHz, Niv. Ref a -50 dBm
Display	640 x 480, TFT LCD a color de alta resolución
Marcadores	10 Marcadores para picos, 5 pares de marcadores normal-delta; funciones: delta, pico, marcador de seguimiento
Función Autoset	Sí
Entrada RF	Conector tipo N-hembra de 50 Ω nominal; VSWR 2:1 a 0 dBm de nivel de referencia
Entrada DC	Conector de 5.5 mm, 12 V
RS-232 C	Sub-D hembra de 9 pines
Conector USB	Panel frontal: receptáculo tipo A; Panel posterior: receptáculo tipo mini-B. Compatible con USB Flash 2.0
Terminal Salida Voltaje DC	Tipo SMB macho, salidas de +9V/100mA máximo
Fuente de poder	AC 100 – 240 V, 50 – 60 Hz

Dimensiones	330 ancho x 170 altura x 340 profundidad (mm)
Peso	6 Kg. Aprox.
Baterías	2 baterías ion-litio de 10.8 VDC

Tabla 4.1. Características Técnicas del Analizador de Espectros GW Instek GSP-830

Mediciones obtenidas

Las mediciones que se obtienen en un barrido espectral son los niveles de potencia de recepción de la señal transmitida por cierto equipo a distintas distancias de su punto de instalación dentro de la zona de cobertura del sistema que se analiza.

En este caso, se ha tomado en cuenta como estación fija a la radio base PRO 5100 de la prevención central del IASA, por lo que se puede decir que se realizará un análisis de la cobertura provista por su potencia de transmisión y por la ganancia de la antena arreglo de 4 dipolos doblados conectada a ella.

Los resultados obtenidos han sido capturados del analizador de espectros GSP-830 a manera de imágenes, mediante un dispositivo USB Flash. Las siguientes figuras muestran los niveles de recepción en las zonas de interés dentro del IASA (El Prado) que se describieron en el capítulo 3:

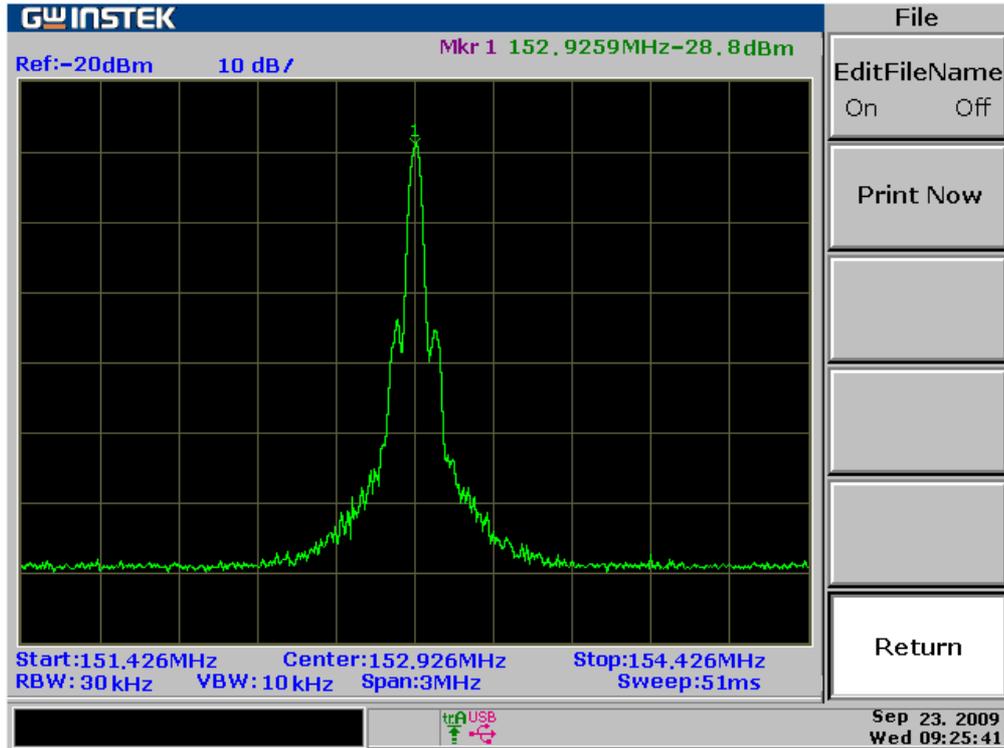


Figura 4.3. Nivel de recepción de señal obtenido en la Prevención Central

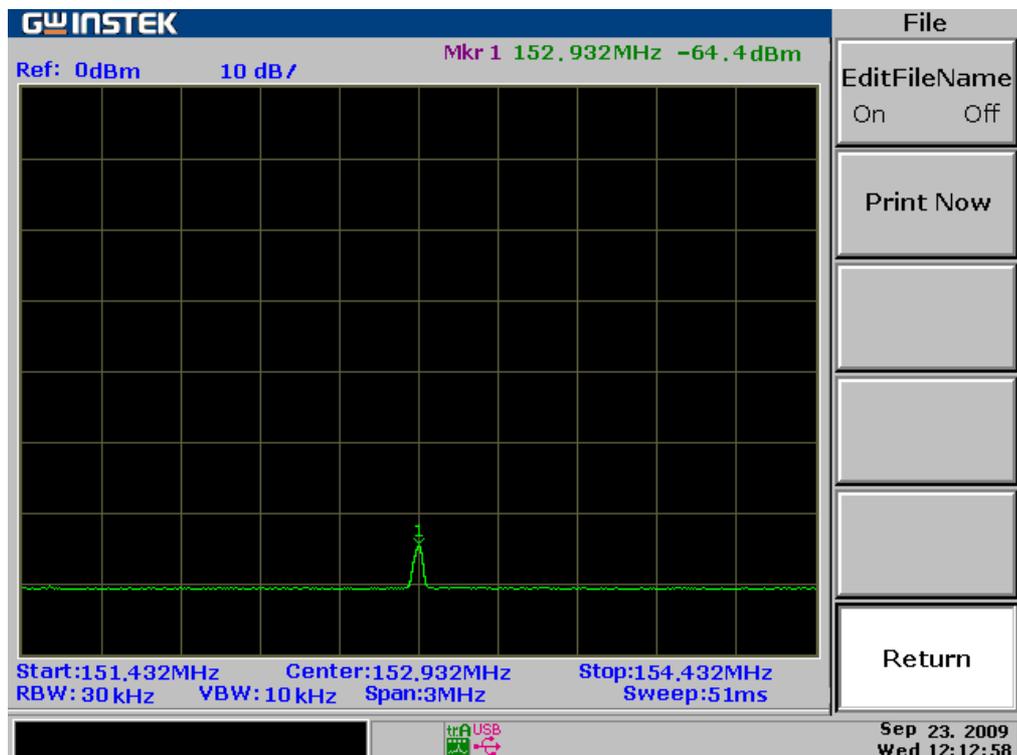


Figura 4.4. Nivel de recepción de señal obtenido en la Ganadería

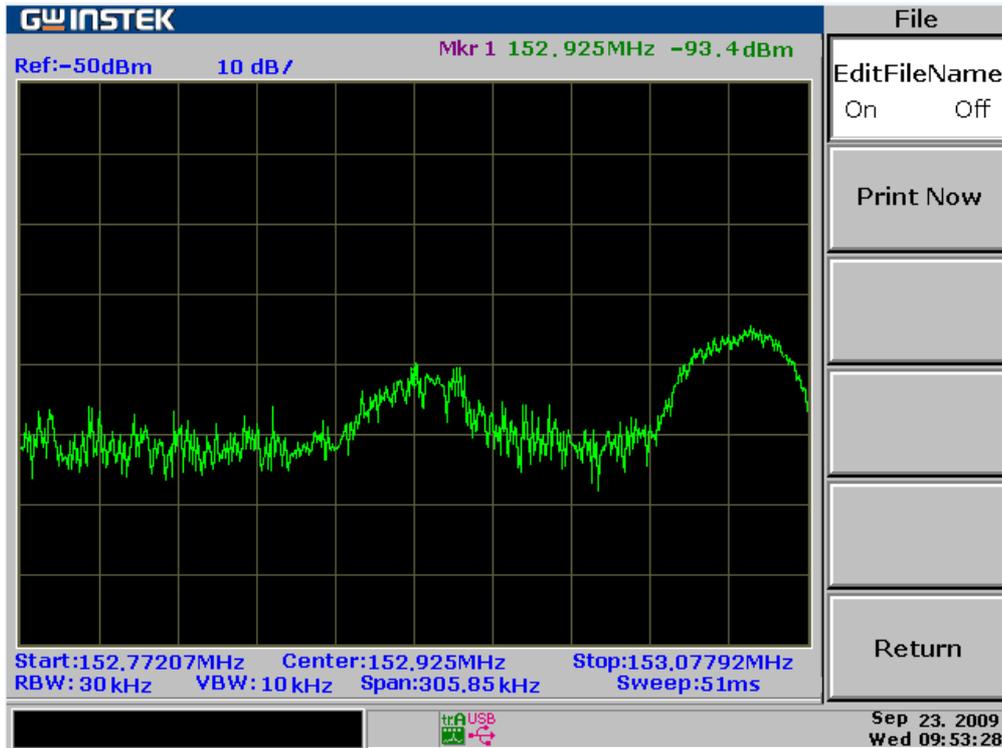


Figura 4.5. Nivel de recepción de señal obtenido en la Carretera a Pailones

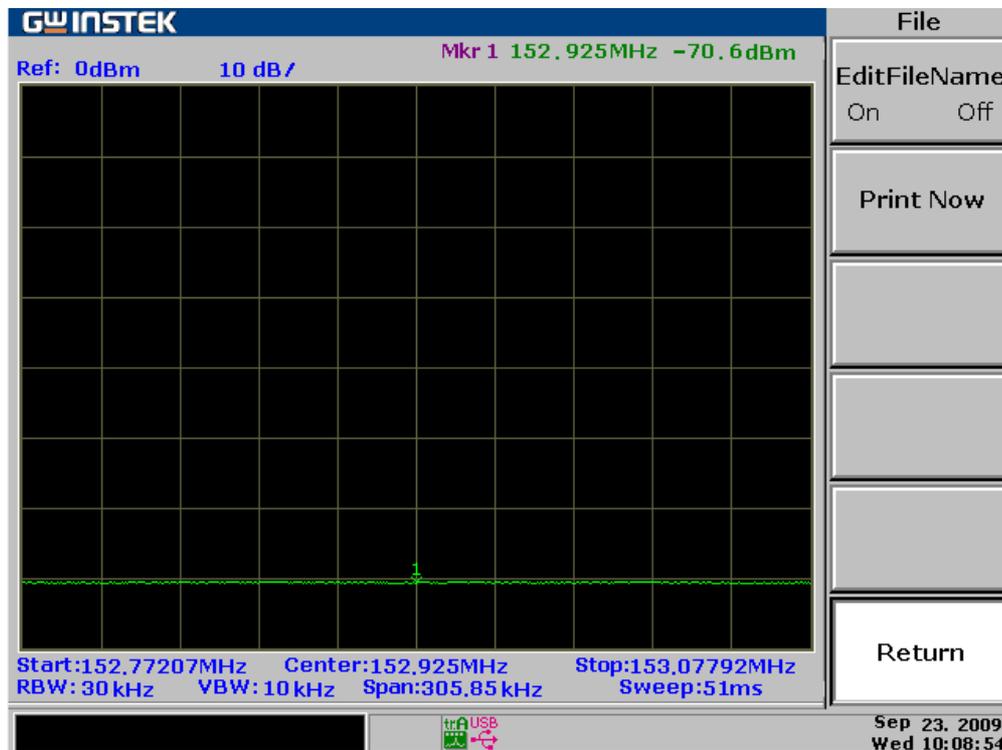


Figura 4.6. Nivel de recepción de señal obtenido en Pailones

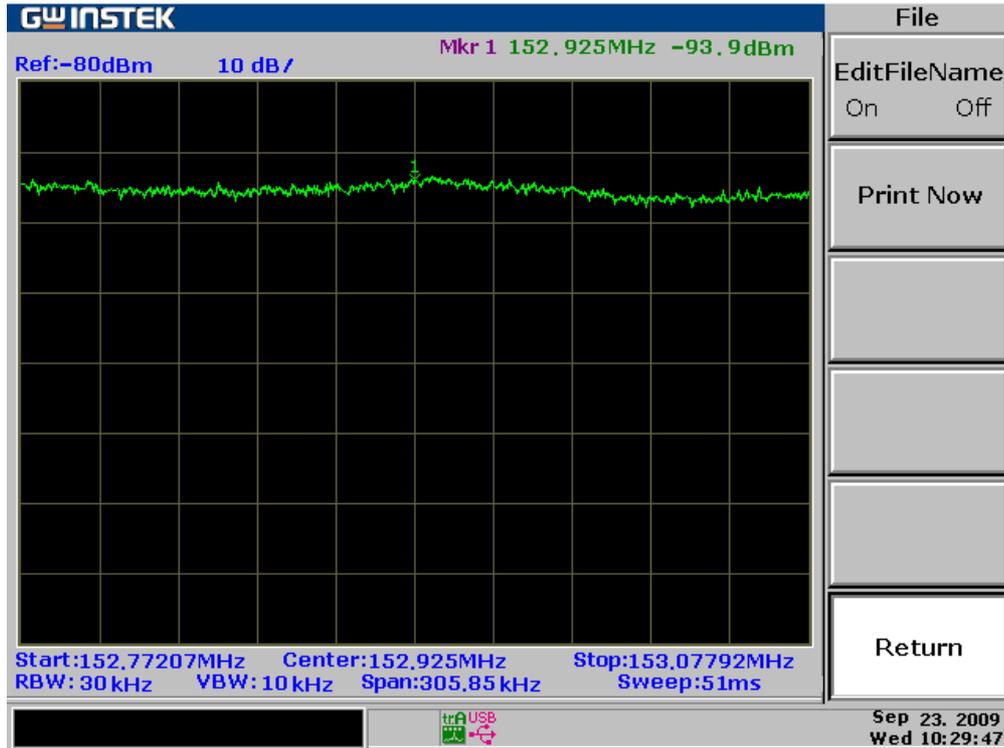


Figura 4.7. Nivel de recepción de señal obtenido en los Sembríos de Pailones

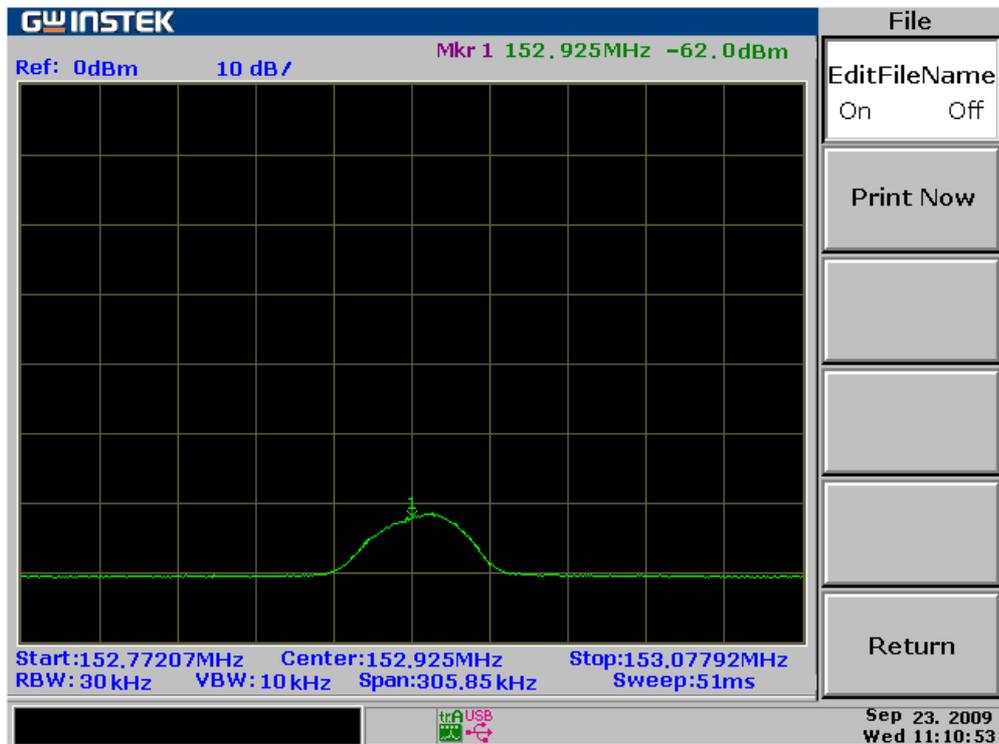


Figura 4.8. Nivel de recepción de señal obtenido en la Entrada al IASA (El Prado)

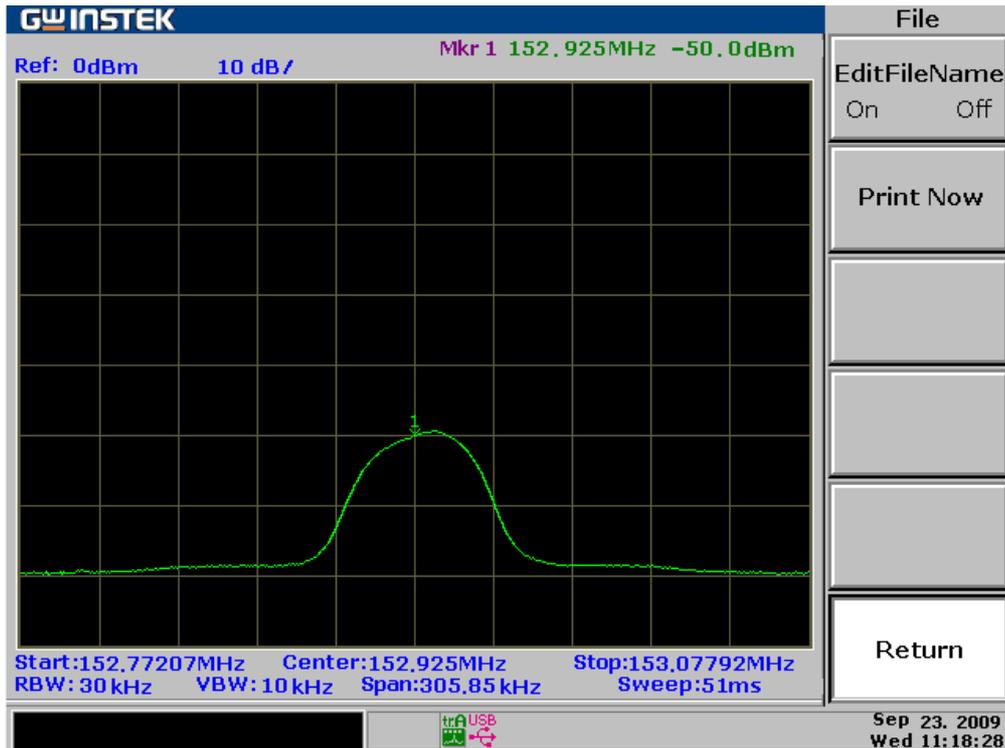


Figura 4.9. Nivel de recepción de señal obtenido en las Aulas

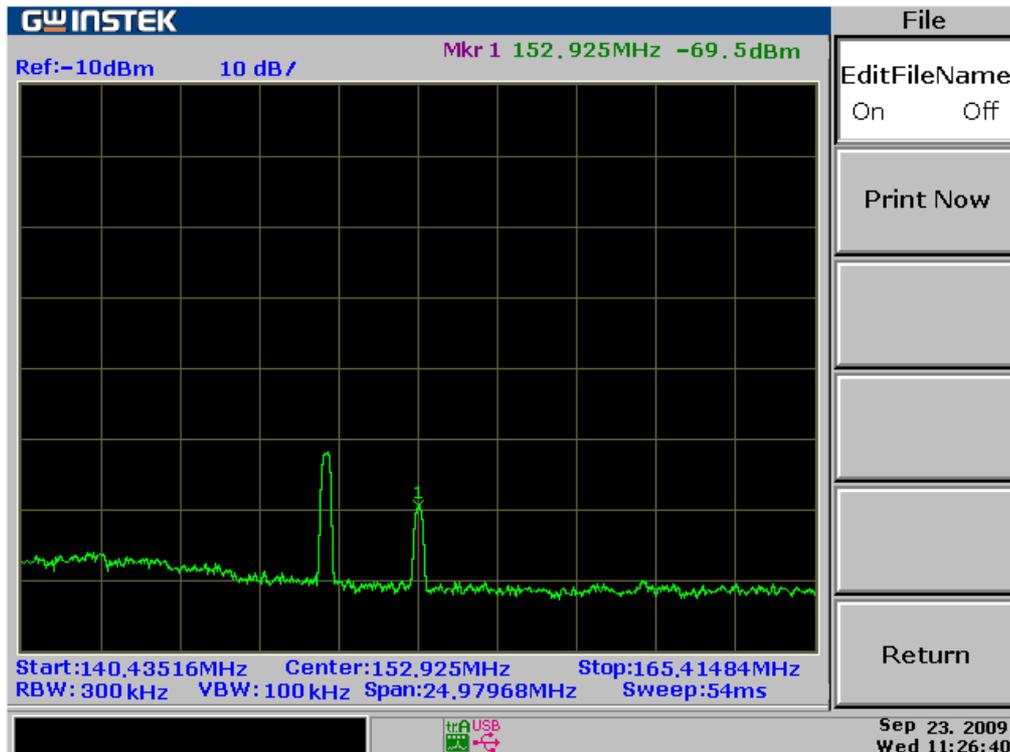


Figura 4.10. Nivel de recepción de señal obtenido en la Bodega

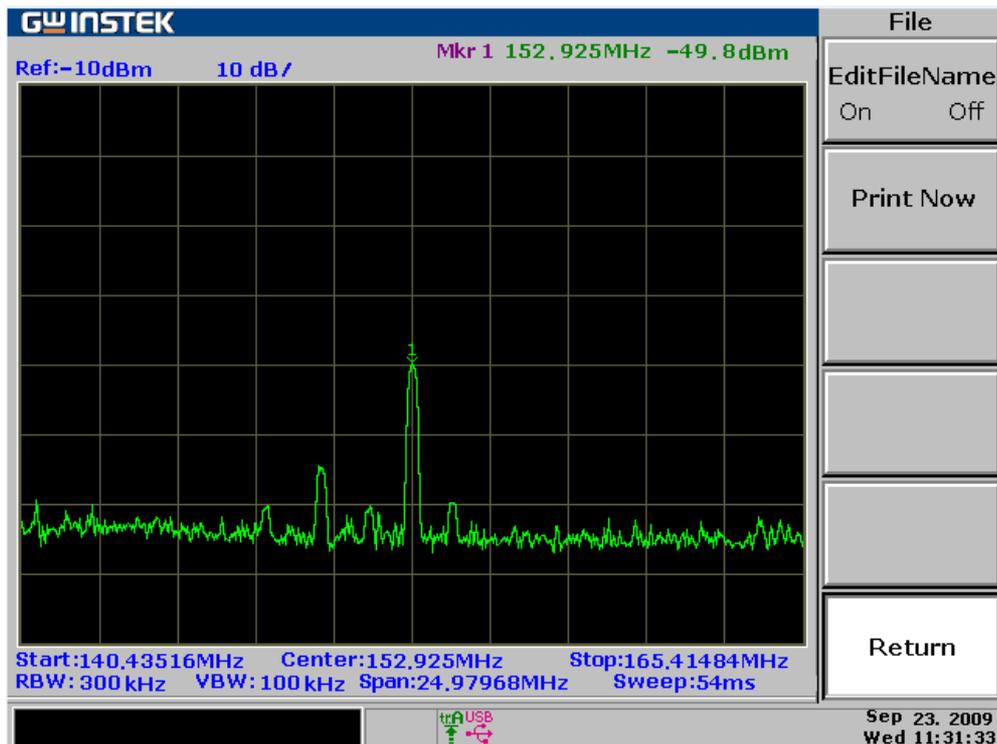


Figura 4.11. Nivel de recepción de señal obtenido en la Prevención de Salida a Loreto

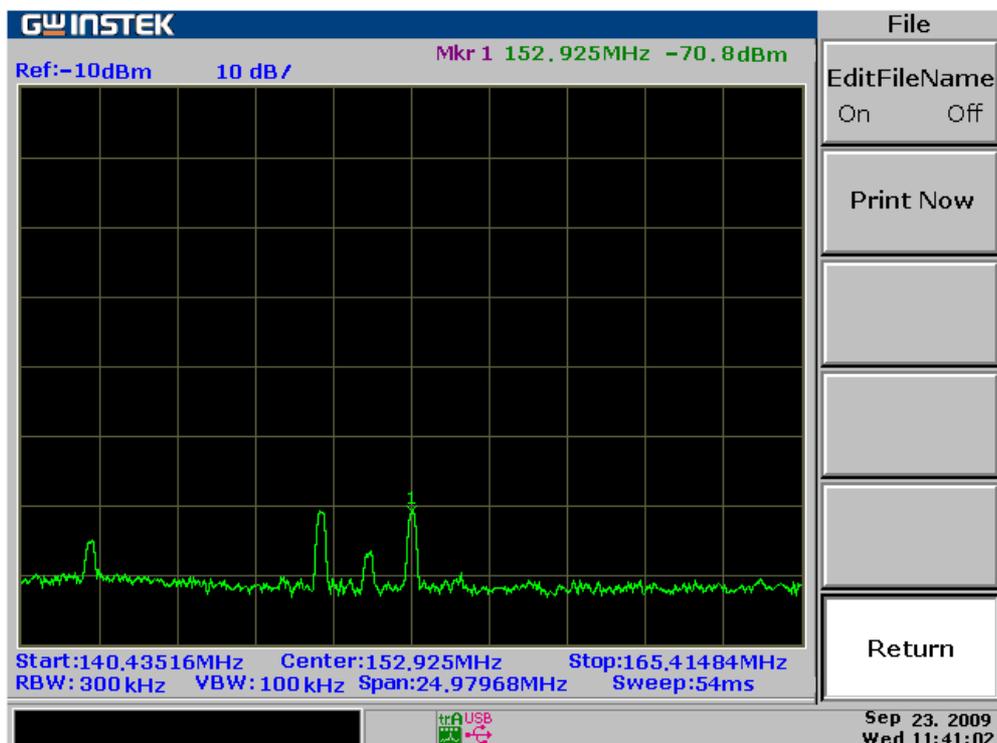


Figura 4.12. Nivel de recepción de señal obtenido en los Sembríos de San Luis de Loreto

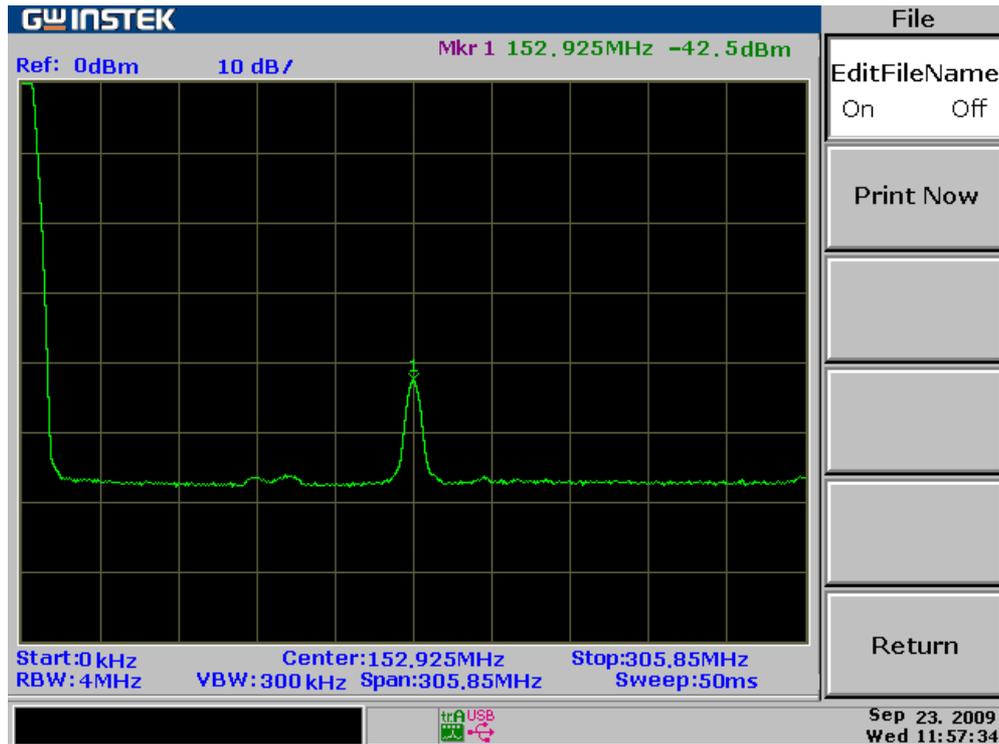


Figura 4.13. Nivel de recepción de señal obtenido en los Laboratorios

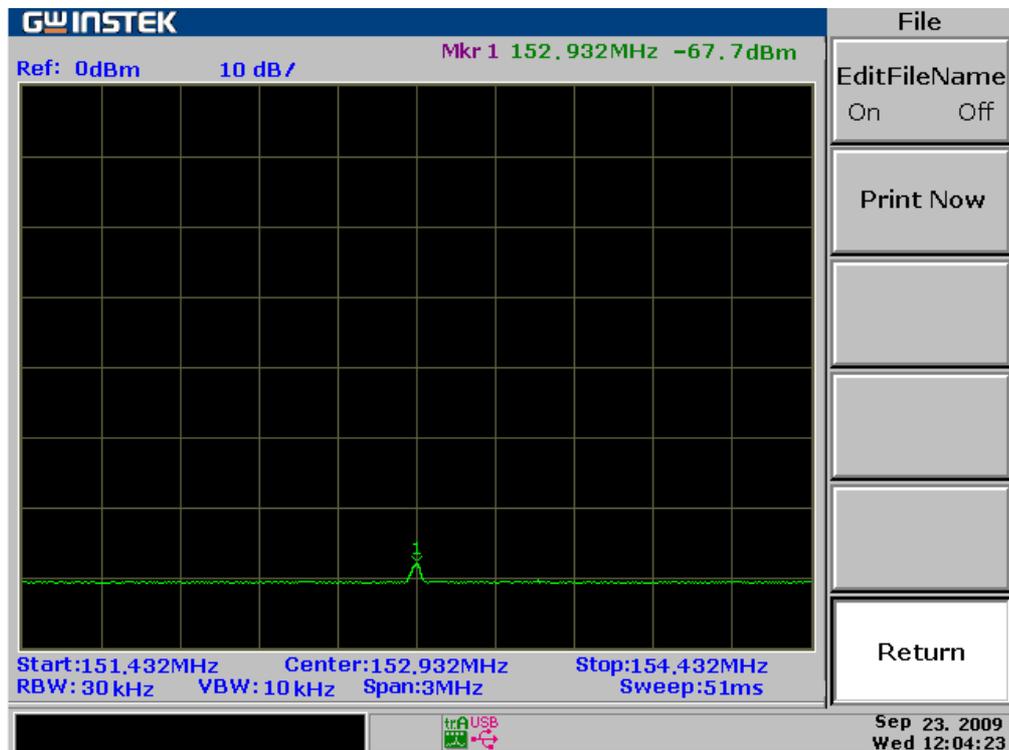


Figura 4.14. Nivel de recepción de señal obtenido en el Criadero de Pollos

En las figuras anteriores, se muestra el nivel de recepción captado por el analizador de espectros mediante la antena VHF conectada a él tanto gráficamente como

textualmente. La línea verde dentro de la pantalla negra muestra un número 1, que es el marcador programado para observar el nivel de señal en la frecuencia de 152,925 MHz. En la parte superior de la gráfica, se observa el nombre del marcador en letras violetas (*Mkr1*), la frecuencia en la que está el marcador (en MHz) y el nivel de señal obtenido en esa frecuencia (en dBm), observándose estos últimos dos valores en letras verdes. La tabulación y análisis de los datos recolectados y mostrados aquí, se realiza en las siguientes secciones.

4.2 TABULACIÓN DE DATOS

Una vez obtenidos los datos de niveles de recepción que arrojó el barrido espectral, se puede proceder a ordenar estos datos y analizarlos de manera coherente. La tabla 4.2 muestra una lista de los lugares donde se realizaron las mediciones con sus respectivos niveles de recepción de señal y la distancia que existe entre cada uno de estos puntos de medición y el lugar de instalación de la estación base Motorola PRO 5100 con su respectiva antena:

Lugar	Nivel de recepción de señal (dBm)	Distancia a la estación base (Km)
Prevención Central (1)	-28,8	0,020
Ganadería (2)	-64,4	0,95
Carretera a Pailones (3)	-93,4	1,36
Pailones (4)	-70,6	4,19
Sembríos Pailones (5)	-93,9	5,08
Entrada IASA (6)	-62,0	0,67
Aulas (7)	-50,0	0,25
Bodega (8)	-69,5	0,46
Prevención Loreto (9)	-49,8	0,62
Sembríos Loreto (10)	-70,8	1,49
Laboratorios (11)	-42,5	0,14
Criadero de Pollos (12)	-67,7	0,77

Tabla 4.2. Niveles de recepción obtenidos en el barrido espectral realizado para el sistema de radiocomunicaciones VHF del IASA (El Prado)

Para poder analizar los datos obtenidos de manera correcta, se necesita conocer la localización de cada uno de los sitios expuestos en la tabla 4.2. Para esto, y para determinar las distancias mostradas en la tabla, se utilizaron los siguientes mapas de Google Earth:

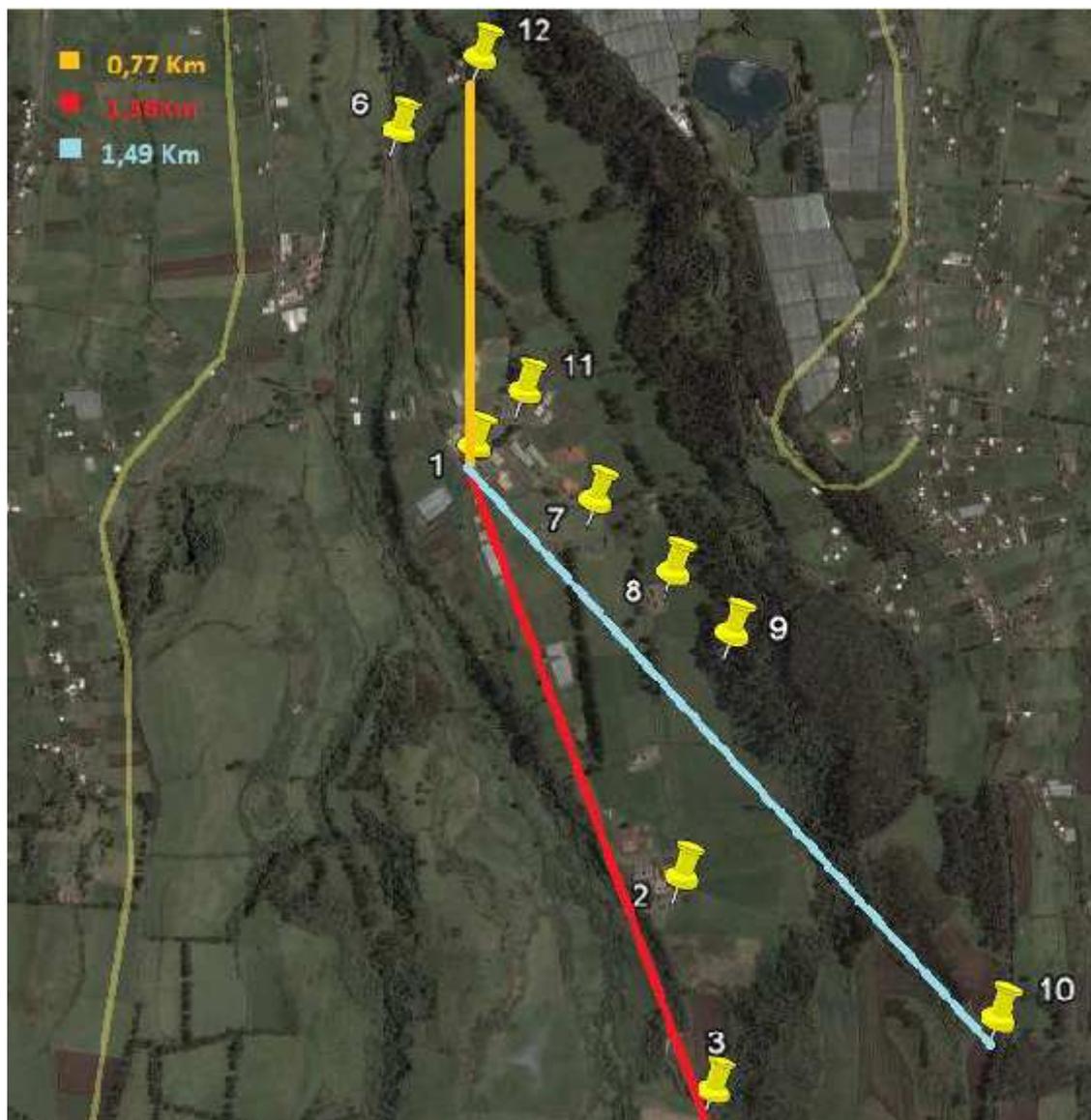


Figura 4.15. Mapa de las áreas de la hacienda "El Prado" más cercanas al edificio de oficinas del IASA



Figura 4.16. Mapa de las áreas de la hacienda “El Prado” más alejadas del edificio de oficinas del IASA

Observando los datos de la tabla 4.2, se puede deducir que a medida que la distancia entre la estación base (elemento transmisor) y la antena receptora conectada al analizador de espectros, el nivel de recepción de señal generalmente disminuye, aunque existen algunas excepciones. Esto se puede apreciar de mejor manera en la siguiente gráfica:

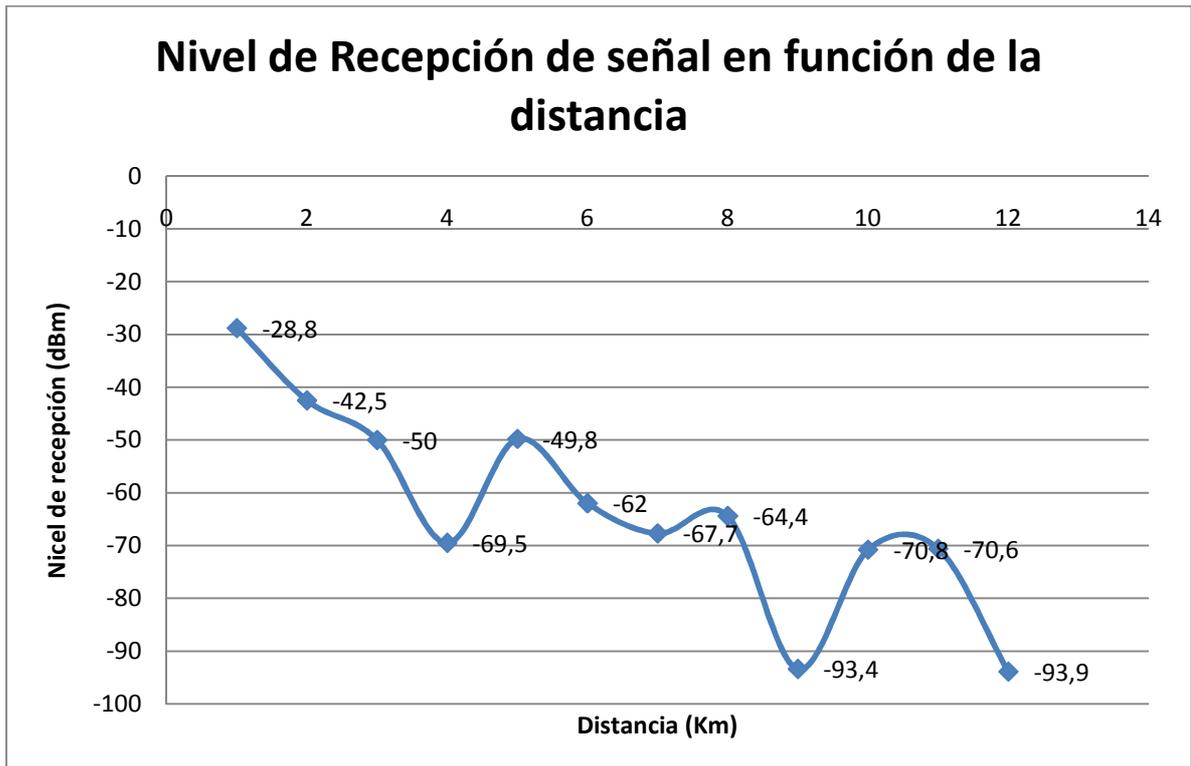


Figura 4.17. Gráfica de los niveles de recepción de señal en los distintos puntos de medición

La tabla 4.3 exhibe la lista de los sitios de medición ya ordenados con sus valores de niveles de potencia de recepción. El orden se hace desde el más cercano hasta el más lejano a la estación base de radio:

Lugar	Distancia a la estación base (Km)	Nivel de recepción de señal (dBm)
Prevención Central (1)	0,02	-28,8
Laboratorios (11)	0,14	-42,5
Aulas (7)	0,25	-50
Bodega (8)	0,46	-69,5
Prevención Loreto (9)	0,62	-49,8
Entrada IASA (6)	0,67	-62
Criadero de Pollos (12)	0,77	-67,7
Ganadería (2)	0,95	-64,4
Carretera a Pailones (3)	1,36	-93,4
Sembríos Loreto (10)	1,49	-70,8
Pailones (4)	4,19	-70,6
Sembríos Pailones (5)	5,08	-93,9

Tabla 4.3. Puntos de medición considerados en el barrido espectral, ordenados según distancia a la estación base

La gráfica muestra que, aunque en general, la distancia es el factor más relevante al momento de obtener las pérdidas en el espacio libre de un enlace radioeléctrico, no se puede decir que los niveles de recepción varían de manera uniforme en función de ella. Esto se debe a que las ondas siguen un modelo de propagación aleatorio, en el cual, además de la distancia del enlace, también se deben tomar en cuenta factores como el patrón de radiación de la antena y los obstáculos que pueden haber entre la estación transmisora y la receptora. Así, se observa que la gráfica no sigue una línea de tendencia marcada, sino que más bien los datos siguen un patrón bastante aleatorio.

El ejemplo más claro de lo explicado en el párrafo anterior es la comparación entre los niveles de recepción obtenidos en la carretera a Pailones y el mismo Pailones, que tienen niveles de recepción de -93,4 dBm y -70,6 dBm respectivamente. A pesar de que la distancia entre la estación base y Pailones es mayor que la que se tiene con la carretera que conduce hacia este lugar, el nivel de recepción de señal en Pailones es más alto. Esto se debe a que, como se constató al momento de hacer la medición, la carretera se encuentra en

un lugar más bajo que Pailones, haciendo que existan más obstrucciones entre la estación base y la antena receptora que se conectó al analizador de espectros.

Por otro lado, se pudo observar también que este tipo de sistema de radiocomunicaciones no necesita que exista línea de vista entre las estaciones que se comunican. Esto se da gracias a la excelente propagación de ondas en esta banda de frecuencias, a la propagación por multitrayecto que existe y a las grandes potencias de transmisión que tienen los equipos utilizados.

4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA PRÁCTICA Y LOS DATOS ESTIMADOS A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN POR SOFTWARE EN LA BANDA DE 150 MHZ

La tabla 4.4 presenta los valores de niveles de recepción de señal teóricos obtenidos a través de la simulación por software del capítulo 3 y también los resultados reales obtenidos mediante el analizador de espectros GSP-830. A partir de estos datos, se construyó una gráfica comparativa de ambos conjuntos de valores.

Lugar	Nivel de recepción de señal (Simulación) (dBm)	Nivel de recepción de señal (Barrido Espectral) (dBm)
Prevención Central (1)	-28	-28,8
Laboratorios (11)	-41	-42,5
Aulas (7)	-39,7	-50
Bodega (8)	-48,3	-69,5
Prevención Loreto (9)	-60	-49,8
Entrada IASA (6)	-56,4	-62
Criadero de Pollos (12)	-53,8	-67,7
Ganadería (2)	-61,2	-64,4
Carretera a Pailones (3)	-66,8	-93,4
Sembríos Loreto (10)	-85,9	-70,8
Pailones (4)	-85,8	-70,6
Sembríos Pailones (5)	-85,9	-93,9

Tabla 4.4. Cuadro comparativo de los niveles de recepción de señal obtenidos para distintos puntos del IASA con el software Radio Mobile y con el analizador de espectros GSP-830

La gráfica con las curvas obtenidas a partir de los valores de la tabla anterior se exhibe en la figura 4.18:

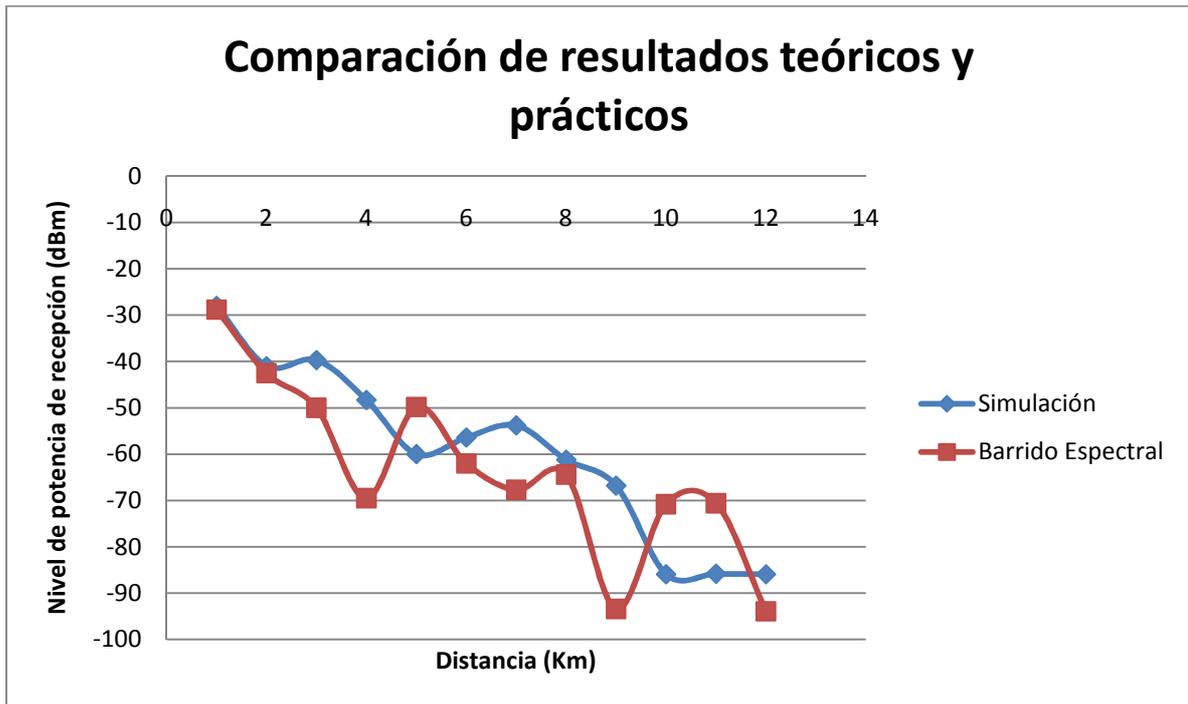


Figura 4.18. Gráfica comparativa de los niveles de recepción de señal obtenidos para distintos puntos del IASA con el software *Radio Mobile* y con el analizador de espectros *GSP-830*

A partir de estos resultados se puede obtener una clara idea del área de cobertura del sistema de comunicaciones del IASA (El Prado). Como se puede observar, los valores teóricos son muy parecidos a los que se consiguieron mediante el barrido espectral, concluyendo que el modelo utilizado para la realización de las simulaciones mediante el software *Radio Mobile*, es el correcto y que las mediciones se realizaron de manera prolija. Por lo tanto, el área de cobertura predicha por las simulaciones del tercer capítulo es sin duda alguna, confiable para representar la superficie real de cobertura dentro del sistema de comunicaciones en el IASA (El Prado).

Por supuesto, existe un margen de error entre los valores reales y los valores teóricos. Esto puede darse debido a condiciones muy diversas, como irregularidades del terreno, posibles datos de altitud erróneos en los mapas que utiliza el software, obstáculos no considerados dentro de las cartas topográficas de *Radio Mobile* (edificios, por ejemplo), factores climáticos, la conductividad cambiante del terreno, entre otros.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La antena “*arreglo de 4 dipolos doblados*” permite tener las mismas características de patrón de radiación de un solo dipolo doblado, pero ayuda a mejorar significativamente la ganancia obtenida, consiguiendo así aumentar el área de cobertura provista desde el punto donde se la instala y mejorar la calidad de las comunicaciones entre las estaciones del sistema.
- Los sistemas PMR (*Private Mobile Radio*) ofrecen la oportunidad de proveer a una institución comunicaciones móviles que garantizan la privacidad de sus transmisiones, que se puedan realizar de manera eficiente dentro de un área de cobertura considerable y sin tener que pagar una tarifa mensual por el servicio, como sucedería al contratar un plan de telefonía celular, por ejemplo.
- La banda de 150 MHz, en la que funciona el sistema de radiocomunicaciones del IASA (El Prado), contribuye a que los niveles de recepción de la señal de las estaciones del sistema sean excelentes, incluso en zonas apartadas de la hacienda a más de 5 kilómetros desde la antena de la estación base del sistema.
- El canal 2, implementado en las estaciones de radio del sistema para proveer la comunicación interna del IASA (El Prado), se configuró como un sistema *simplex a una frecuencia* debido a que habría sido totalmente innecesario proveer un área de cobertura extra, implementándolo mediante repetidora como se hizo en el caso del canal 1, que necesita comunicarse con la ESPE (Sangolquí). Además, el hecho de que el sistema tiene pocas estaciones disminuye la posibilidad de interferencias entre ellas, por lo cual asignar dos frecuencias al canal 2 habría sido innecesario.

- Se pudo constatar que, la elevada potencia de transmisión de la estación repetidora de la ESPE, su ubicación a una altura considerable en el Cerro Cruz Loma y la excelente ganancia de la antena de dipolos doblados mediante la cual transmite su información, contribuyen a que ésta pueda brindar un extensa área de cobertura con excelentes niveles de potencia de la señal. En la simulación se observó que su área de cobertura llega hasta aproximadamente unos 50 Km alrededor de su punto de instalación.
- Además de la repetidora, se puede decir que la estación base y las estaciones portátiles implementadas en el sistema de comunicaciones VHF por radio de 2 vías del IASA (El Prado) tienen excelentes características técnicas que permiten alcanzar una zona de cobertura que satisface las necesidades de la institución, a la vez que ayudan a que las comunicaciones de voz sean lo suficientemente claras.
- La utilización de tonos TPL y códigos DPL permite la creación de distintos canales de comunicación en el sistema utilizando de manera eficiente el espectro radioeléctrico, pues se puede utilizar una sola frecuencia de recepción del canal y al cambiar los canales lo único que conmutará es el tono o código configurado para cada uno de ellos.
- Se comprobó la confiabilidad que proporciona el software *Radio Mobile* y el modelo de propagación de Longley-Rice que utiliza, pues los resultados obtenidos para la simulación del sistema y los que arrojó el barrido espectral realizado en la hacienda “El Prado” muestran niveles de recepción de señal bastante parecidos en las diferentes áreas de la zona de cobertura.
- Las características de propagación de las ondas en la banda VHF y la utilización de propagación de las ondas por multitrayecto permiten que el sistema proporcione comunicaciones móviles incluso sin línea de vista entre las estaciones de radio implementadas.

- El equipo Narda NBM-550 permitió comprobar que el patrón de radiación del arreglo de 4 dipolos doblados instalado en el IASA (El Prado) es omnidireccional tal como lo dice la teoría, mediante la medición del campo eléctrico irradiado por la antena a una distancia constante en varios puntos alrededor de su ubicación.
- El barrido espectral realizado con el equipo Gw Instek GSP-830 permitió observar que, de acuerdo al lugar donde se realiza la medición de nivel de recepción de señal y a factores como la distancia y los obstáculos existentes entre la antena transmisora y la antena VHF portátil conectada al equipo, la señal tendrá desvanecimientos e irá variando su nivel aleatoriamente dentro del área de cobertura.
- Los equipos y la tecnología de radiocomunicaciones implementada en el IASA (El Prado), permiten de una manera eficiente y económica, cumplir con todos los requerimientos de comunicación de la institución.
- La aplicación de tecnologías nuevas en el país contribuye al recambio tecnológico necesario para entrar en la nueva era tecnológica demostrando que en el Ecuador se pueden llevar a cabo proyectos de investigación con tecnología de avanzada, contribuyendo a un crecimiento integral de nuestro país.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para un proyecto de esta magnitud es indispensable que se realice un censo de las necesidades de los usuarios del sistema, para poder satisfacer todos los requerimientos con la implementación del sistema más óptimo y de menor costo.
- Al realizar las mediciones de campo eléctrico para obtener el patrón de radiación de una antena con el equipo Narda NBM-500, es conveniente mantener una precisión de la distancia entre la antena y los puntos de medición, pues la punta de prueba es muy sensible y si la distancia no se mantiene constante, la muestra obtenida puede tener un gran margen de error.

- Al construir el arreglo de dipolos doblados, es recomendable que las dimensiones de la antena se acerquen lo máximo posible a las que se obtuvieron en el diseño, para lo cual se debe utilizar las herramientas adecuadas y construir la antena poniendo énfasis en los criterios de diseño de antenas.
- Para que el sistema actual de comunicaciones en el IASA (El Prado) no quede obsoleto dentro de algunos años, es necesario el continuo monitoreo tanto de sus equipos como de la eficiencia y niveles de calidad propios del sistema.
- En caso de requerir en un futuro, un área de cobertura mayor a la que presenta este sistema de radiocomunicación, puede tomarse en cuenta la habilitación de un código DPL en la estación repetidora de Cruz Loma y la reprogramación de las radios base y portátiles que se requieran en el sistema.
- Es recomendable en la implementación de estos sistemas, el trabajo bajo estándares internacionales que rigen esta tecnología, para poder obtener un ambiente multimarca, tomando de cada fabricante sus mejores opciones, mejorando así el desempeño del mismo.
- Dado el cambiante mundo tecnológico de las comunicaciones, se recomienda en un futuro la implementación de sistemas que mejoren las vías de comunicación de la institución, brindando un mejor servicio de acuerdo a los avances tecnológicos, no solo en el IASA (El Prado), sino en toda la Escuela Politécnica del Ejército.

ANEXO A1

Hojas Técnicas Equipo Medidor de Banda Ancha Narda
NBM-550

ANEXO A2

Hojas Técnicas Estación Repetidora Kenwood TKR-750

ANEXO A3

Hojas Técnicas Estación Base Motorola PRO 5100

ANEXO A4

Hojas Técnicas Estación Portátil Motorola PRO 3150

ANEXO A5

Hojas Técnicas Equipo Analizador de Espectros

GW INSTEK GSP-830

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <http://yv5apf.com/Antenas%20direccionalesa.pdf>, antenas direccionales
- http://www.upv.es/antenas/Tema_3/Diagrama_espira.htm, Diagrama de radiación
- http://www.procom.dk/esl/Page_menu/Procomlab/Terminos_de_antenas/Como_describir_lo_buena_que_es_una_antena, ¿Cómo describir lo buena que es una antena?
- CARDAMA AZNAR, Ángel; ROCA, Lluís Jofre, *Antenas*, Segunda Edición, Editorial UPC, Barcelona, Septiembre de 2002, página 21
- <http://www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece4990notes9.pdf>, Folded Dipole
- <http://www.flickr.com/photos/25823827@N00/248432849>, Vertical Array
- COLLIN, Robert, *Antennas and Radiowave Propagation*, Primera Edición, Editorial McGraw Hill Book Company, New York, 1985
- TOMASI, Wayne, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, Cuarta Edición, Pearson Educación, 2003.
- VOLAKIS, John, *Antenna engineering handbook*, Cuarta Edición, McGraw-Hill Professional, 2007.
- CADENA, Sylvia, *Redes inalámbricas en los países en desarrollo: Una guía práctica para planificar y construir infraestructuras de telecomunicaciones de bajo costo*, BookSprint, Inglaterra, 2007.
- RUDGE, Alan, *The Handbook of antenna design*, Volumen 1, IET, 1982.

- TOMASI, Wayne, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, Cuarta Edición, Pearson Educación, 2003.
- HERNANDO, José, Transmisión por radio *Colección E.T.S.I. de Telecomunicación*, Quinta Edición, Editorial Ramón Areces, 2004.
- HERRERA, Enrique, *Introducción a las telecomunicaciones modernas*, Editorial Limusa, 2006.
- HERNANDO, José María., *Comunicaciones Móviles*, Segunda Edición, Editorial Ramón Areces S.A., Madrid, 2004.
- HERNANDO, José María; PEREZ-FONTAN, F., *Introduction to Mobile Communications Engineering*, Primera Edición, Artech House Publishers, Norwood, MA – EE.UU., 1999.
- http://londoncomms.com/products/kenwood_tkr750_tkr850/82/,
KenwoodTKR750/850
- http://www.motorola.com/Business/XL-ES/Productos+y+Servicios+para+Empresas/Radios+de+Dos+Vias+para+Empresas/Radios+Moviles/Grandes+Empresas/PRO5100_LATAM_XL-ES, Radio Móvil Profesional PRO5100
- http://www.narda-sts.us/products_highfreq_bband.php, Narda Safety Test Solutions
- http://www.rfparts.com/heliox_FSJ450B.html, Andrew Heliox Coax Cable
- <http://www.repeater-builder.com/motorola/rss/rss-rib.html>, An overview of the radio service box
- www.reddogrados.com/radio_nerd_guy.php, PL Tones and DPL Codes

- <http://www.repeater-builder.com/kenwood/pdfs/tkr-750-850.function-v101.pdf>, TKR-750-850.function-v101.pdf
- <http://www.blii.com/instek%20images/gsp-830L.jpg>, GW Instek GSP-830 Spectrum Analyzer
- www.tequipment.net/InstekGSP-830.asp, GSP-830 Spectrum Analyzer

Sangolquí, 12 de Noviembre de 2009

AUTORES

Juan Pablo Lasso Encalada

Diego Miguel Méndez Mena

COORDINADOR DE CARRERA

Ing. Gonzalo Olmedo Cifuentes