

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE DIDÁCTICA PARA EL
ANÁLISIS DEL TRAYECTO DE PROPAGACIÓN EN SISTEMAS DE
COMUNICACIÓN POR LÍNEA DE VISTA (SERVICIO FIJO)**



**MARÍA FERNANDA DULCEY MORÁN
BEATRIZ ELENA OLARTE ZÚÑIGA**

*Trabajo de grado presentado como
requisito para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones.*

**Director:
Mg. ALDEMAR HOLGUÍN ROJAS.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN, 2002**

DEDICATORIAS

La pequeñez del hombre se engrandece con la grandeza de Dios. Por eso, Señor, se tú el Señor en esta obra. Consévala y bendícela. Amén.

A mis padres Román y Edilma, que son lo más importante de mi vida y a quienes les debo lo que soy.

A mi hermana Alejandra por ser mi mejor amiga y la persona que me ha apoyado en todo, sin condiciones.

A mi hermanito Guille por ser la alegría de mi vida.

A mis amigos, que aunque tomen rumbos diferentes al mío, permanecerán siempre en mi corazón.

Fernanda.

A mi mamá, Hilda por su amor, dedicación, enseñanzas y apoyo incondicional.

A mi papá, Jorge por su amor, enseñanzas y por haber sido el mejor papá del mundo. Q.E.P.D.

A mis hermanos, Jorge, Juan y Laura por todos los momentos que pasamos juntos.

A mis amigos, por haber sido tan especiales.

Beatriz.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Aldemar Holguín por su dedicación como director de este proyecto.

A los Ingenieros del departamento de transmisión por su asesoría y sugerencias.

A los profesores del departamento de matemáticas por su valiosa colaboración.

A nuestros ángeles de la guarda por haber estado siempre a nuestro lado.

Y especialmente a todos quienes de una u otra manera nos ayudaron a salir adelante durante el transcurso de la carrera.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES POR MICROONDAS	3
2.1. INTRODUCCIÓN	3
2.2. INGENIERÍA DEL RADIOENLACE	5
2.2.1. TRAZADO DEL PERFIL DEL TRAYECTO	6
2.2.2. EFECTOS DEL CURVAMIENTO DEL HAZ DEBIDO A LA REFRACCIÓN	7
2.2.3. DESPEJE DE LA ZONA FRESNEL PARA CONTRARRESTAR LOS EFECTOS DE LA REFLEXIÓN	10
2.2.4. CÁLCULO DE LA ALTURA DE LAS TORRES DE ANTENA	12
2.2.5. EFECTOS VINCULADOS CON LA PROPAGACIÓN	16
2.2.5.1. PÉRDIDAS DE ESPACIO LIBRE	19
2.2.5.2. ATENUACIÓN DEBIDA A GASES ATMOSFÉRICOS	19
2.2.5.3. PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN	22
2.2.5.4. ATENUACIÓN POR HIDROMETEOROS	25
2.2.5.5. PÉRDIDAS DE ECO ADICIONALES	28
2.2.6. CÁLCULOS DEL TRAYECTO	30
2.2.6.1. POTENCIA UMBRAL DE RUIDO EN EL RECEPTOR	31
2.2.6.2. NIVEL DE SEÑAL RECIBIDA	35
2.2.6.3. POTENCIA DE TRANSMISIÓN	45
2.2.7. DISPONIBILIDAD E INDISPONIBILIDAD	47
2.2.7.1. CRITERIOS DE INDISPONIBILIDAD	48
2.2.7.2. CAUSAS DE INDISPONIBILIDAD	49
2.2.7.3. INDISPONIBILIDAD DEBIDA A LOS EQUIPOS	49

2.2.7.4. INDISPONIBILIDAD DEBIDA AL TRAYECTO DE PROPAGACIÓN	51
2.2.8. MÉTODOS DE PROTECCIÓN	60
2.2.8.1. DIVERSIDAD	60
2.2.8.1.1. DIVERSIDAD DE ESPACIO	61
2.2.8.1.2. DIVERSIDAD DE FRECUENCIA	64
2.2.8.1.3. MEJORA POR DIVERSIDAD	65
2.2.8.1.4. COMBINADORES DE DIVERSIDAD	68
2.2.8.2. RESPALDO EN LÍNEA	69
2.2.9. REPETIDORES	71
2.2.9.1. REPETIDORES PASIVOS	72
2.2.9.1.1. REPETIDOR BACK TO BACK	73
2.2.9.1.2. REPETIDOR TIPO CARTELERA	75
2.2.9.2. REPETIDORES ACTIVOS	83
2.2.9.2.1. REPETIDOR BANDA BASE	84
2.2.9.2.2. REPETIDOR HETERODINO FI	84
2.2.9.2.3. REPETIDOR HETERODINO RF	85
2.2.10. PLAN DE FRECUENCIAS	86
3. NORMATIVIDAD – ESTÁNDARES UIT-R	90
3.1. INTRODUCCIÓN	90
3.2. SERIES	90
3.3. RECOMENDACIONES E INFORMES	91
3.3.1. DEFINICION DE TÉRMINOS	91
3.3.2. CIRCUITO FICTICIO DE REFERENCIA	91
3.3.3. ANCHO DE BANDA	92
3.3.4. TRAYECTO DE PROPAGACIÓN	92
3.3.5. OBJETIVOS DE CALIDAD	93
3.3.6. OBJETIVOS DE DISPONIBILIDAD	93
3.3.7. DIVERSIDAD	94

3.3.8. PLAN DE FRECUENCIAS	94
4. DESARROLLO DEL PROYECTO: ANÁLISIS DEL TRAYECTO DE PROPAGACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR LÍNEA DE VISTA	97
4.1. INTRODUCCIÓN	97
4.2. PLANEACIÓN DE RADIOENLACES	98
4.2.1. DEFINICIÓN DEL TIPO Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA (PUNTO DE INICIO)	98
4.2.2. PLAN DE FRECUENCIAS	100
4.2.2.1. SISTEMA DIGITAL	100
4.2.2.2. SISTEMA ANALÓGICO	100
4.2.3. EXTREMOS TRANSMISOR Y RECEPTOR	101
4.2.4. SISTEMA ANTENA	102
4.2.5. TRAYECTOS DE PROPAGACIÓN	103
4.2.6. PERFIL	104
4.2.7. EQUIPOS REPETIDORES	108
4.2.7.1. REPETIDOR BACK TO BACK	109
4.2.7.2. REPETIDOR TIPO CARTELERA	109
4.2.8. OBJETIVOS DE CALIDAD	110
4.2.8.1. SISTEMAS DIGITALES	111
4.2.8.2. SISTEMAS ANALÓGICOS	111
4.2.9. OBJETIVOS DE DISPONIBILIDAD	112
4.2.10. GENERACIÓN DE INFORMES	115
4.3. SIMULACIÓN	117
5. CONCLUSIONES	121
GLOSARIO	123
BIBLIOGRAFÍA	125

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Curvatura equivalente de la tierra.	8
FIGURA 2.2. Altura de las torres con liberación de zona fresnel.	12
FIGURA 2.3. Cálculo de los puntos de reflexión (Telecommunications Transmisión Handbook).	14
FIGURA 2.4. Difracción de la señal sobre un obstáculo (Rec. UIT-R P.526-6).	23
FIGURA 2.5. C/N Vrs S/N (por canal de voz) en un receptor de microondas FM convencional (Telecommunications Transmisión Handbook).	33
FIGURA 2.6.a. Probabilidad de error Vs. modulación PSK (Sistemas de Comunicaciones Electrónicas).	42
FIGURA 2.6.b. Probabilidad de error Vs. modulación QAM (Sistemas de Comunicaciones Electrónicas).	43
FIGURA 2.6.c. Probabilidad de error Vs. modulación FSK (Sistemas de Comunicaciones Electrónicas).	44
FIGURA 2.7. Configuración de equipos (a) en serie, (b) en paralelo.	50
FIGURA 2.8. Margen de desvanecimiento.	51
FIGURA 2.9. Equipos para diversidad de espacio (a) en transmisión y (b) en recepción.	62
FIGURA 2.10. Equipos para diversidad de frecuencia (a) en transmisión y (b) en recepción.	64
FIGURA 2.11. Arreglo de conmutación de protección de microondas. Respaldo en línea.	69
FIGURA 2.12. Croquis de un sistema de repetidores de microondas por línea de vista.	71
FIGURA 2.13. Repetidor pasivo back to back.	73
FIGURA 2.14. Curva de reducción del factor de ganancia (Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales).	74
FIGURA 2.15. Repetidor pasivo tipo cartelera.	75

FIGURA 2.16. Pérdidas de acople del repetidor tipo cartelera (Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales).	76
FIGURA 2.17. (a) Ángulo de transferencia. (b) Configuraciones repetidor pasivo doble (Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales).	80
FIGURA 2.18. Pérdidas de acople del repetidor doble tipo cartelera (Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales).	82
FIGURA 2.19.a. Repetidor banda base.	84
FIGURA 2.19.b. Repetidor heterodino FI.	85
FIGURA 2.19.c. Repetidor heterodino RF.	85
FIGURA 2.20. Secciones de administración y comprobación técnica del espectro Radioeléctrico (Ministerio de Comunicaciones).	87
FIGURA 4.1. Interfaz Sistema de HD-Radiocom al iniciar un proyecto.	99
FIGURA 4.2. Interfaz Perfil con un perfil trazado dentro del área de gráfico.	105
FIGURA 4.3. Interfaz Sistema de HD-Radiocom al finalizar un proyecto.	112
FIGURA 4.4. Interfaz Informe con el informe de un proyecto.	115
FIGURA 4.5. Ventana Simulación (introducción).	117
FIGURA 4.6. Simulación de atenuación por hidrometeoros.	118
FIGURA 4.7. Simulación de reflexión sobre el agua.	119
FIGURA 4.8. Simulación de la difracción sobre un obstáculo sobre/cerca de la trayectoria.	119
FIGURA 4.9. Simulación de refracción atmosférica.	120

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1. Servicios dentro de la banda de microondas (Ministerio de Comunicaciones).	4
TABLA 2.2. Factor de curvatura terrestre según la zona climática (Radiopropagación, conferencias de clase).	10
TABLA 2.3. Radios de despeje de la zona Fresnel (Rec. UIT-R P.530-8).	11
TABLA 2.4. Área mínima requerida para la instalación de torres sujetadas (EIA RS-222-E).	16
TABLA 2.5. Coeficientes de regresión para estimar el valor de la atenuación específica (Rec. UIT-R P.838-1).	26
TABLA 2.6. Alturas y distancias nominales de objetos reflectantes o generadores de eco (Rec. UIT-R P.452-9).	29
TABLA 2.7. Valores del coeficiente C_0 para las tres gamas de alturas de antena más baja y tipos de terreno (Rec UIT-R P.530-8).	55
TABLA 2.8. Normatividad UIT-R para la disposición de canales en sistemas analógicos y digitales.	88
TABLA 4.1. Formato de la base de datos para perfiles, archivo *.mdb.	107
TABLA 4.2. Clasificación del relieve según su forma y pendiente.	114

1. INTRODUCCIÓN

El continuo avance de la tecnología a llevado a la aparición de herramientas software cada vez más efectivas como soporte para el estudio y análisis de sistemas de comunicación. Estas herramientas realizan el procesamiento de datos en forma más exacta y en menor tiempo que los métodos manuales, los cuales son muy lentos y propensos a error.

La razón de ser de este proyecto se debe a un esfuerzo por lograr la apropiación y adaptación de tecnologías con la consecuente generación de una herramienta software didáctica al alcance y al servicio de la comunidad estudiantil, la cual permite que los conocimientos teóricos y empíricos impartidos en materias de tipo práctico como lo es Radiocomunicaciones, sean complementados con la posibilidad de observar el comportamiento de estos sistemas para lograr así una mejor comprensión de los fenómenos que inciden en su funcionamiento.

La aplicación software HD-RADIOCOM (Herramienta de Didáctica de desarrollo para Radiocomunicaciones) es el resultado del estudio del comportamiento de los factores que actúan en un radioenlace de microondas por línea de vista.

HD-RADIOCOM permite efectuar cálculos de radioenlaces por línea de vista que operan en el rango de las microondas y facilita la observación de la forma en que se ven influenciados ante la presencia de fenómenos que afectan su calidad.

Este documento presenta los conceptos más relevantes tenidos en cuenta para la implementación de HD-RADIOCOM, los cuales justifican los procedimientos utilizados para tal fin.

El capítulo 2, “Marco conceptual: Sistemas de Radiocomunicaciones por Microondas”, contiene la base teórica donde se describen los conceptos necesarios,

comprendidos en el área dentro de la cual se centra el alcance de este trabajo de grado: los radioenlaces de microondas por línea de vista. Dichos conceptos incluyen la planeación de radioenlaces con el consecuente estudio de los fenómenos que los afectan (abarcando los pasos 2 a 5 de la ingeniería del radioenlace) y que sustentan el desarrollo de la aplicación.

El capítulo 3, “Normatividad – estándares UIT-R”, es el resultado del estudio de los informes y recomendaciones de la UIT-R que tratan la parte de microondas y de los factores que afectan a los radioenlaces por línea de vista.

El capítulo 4, “Desarrollo del proyecto: Análisis del trayecto de propagación en sistemas de comunicación por línea de vista”, está enfocado directamente en la implementación de la aplicación software, tanto en parte la planeación de enlaces como la simulación y su relación con la interfaz de análisis. Cada una de las etapas que hacen parte de la aplicación, está sustentada por los conceptos y formulamientos matemáticos consignados en el capítulo 2, mediante el uso de referencias.

El capítulo 5, “Conclusiones” contiene, como su nombre lo indica, las conclusiones finales del trabajo desarrollado a lo largo del proyecto, tanto del tema investigado como de la aplicación implementada.

Como documento anexo se entrega un manual de usuario, donde se explican los requerimientos del sistema, el proceso de instalación y la forma de usar la aplicación.

2. SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES POR MICROONDAS

2.1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de radiocomunicaciones por microondas trabajan en el rango de frecuencias comprendido entre 1 y 40 GHz. Dentro de este rango, la transmisión de información por portadora de RF es mayor debido al uso de un amplio ancho de banda. Además, el comportamiento de las ondas frente a la reflexión, refracción y difracción es muy diferente a las que se encuentran dentro de otros rangos.

El mecanismo de propagación más utilizado es el de línea de vista. Un sistema de microondas por línea de vista es aquel que satisface los siguientes criterios:

- La señal sigue una “línea de vista”, lo cual implica una “propagación con visibilidad directa”, definida por la UIT-R como:

*“Propagación entre dos puntos, en la que el rayo directo está suficientemente libre de obstáculos para que la difracción tenga un efecto despreciable”.*¹

- La propagación de la señal se ve afectada por atenuaciones de espacio libre, precipitaciones, absorción de gases y otros fenómenos definidos más adelante.
- Uso de modulación angular (FM, PM, etc.), modulación digital o técnicas de espectro ensanchado y de multiplexación.

Las bandas más utilizadas para radioenlaces por línea de vista (servicio fijo), comprendidas dentro del rango de las microondas son las de 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 15, 18, 23, 26, 28 y 38 GHz. Algunas de estas bandas se utilizan para otros servicios.

¹ Rec. UIT-R PN.310-9.

Banda (GHz)	Servicios																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
6	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
10	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
11	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
13	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
18	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
23	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
26	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
28	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
38	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Servicios:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1: Fijo. | 12: Exploración de la tierra por satélite. |
| 2: Móvil. | 13: Investigación espacial. |
| 3: Móvil por satélite. | 14: Radiodifusión por satélite. |
| 4: Operaciones espaciales. | 15: Radioastronomía. |
| 5: Sistemas de espectro ensanchado. | 16: Aficionados por satélite. |
| 6: Radiocanalización. | 17: Meteorología por satélite. |
| 7: Aficionados. | 18: Enlaces móviles de radiodifusión de televisión. |
| 8: Radiodeterminación por satélite. | 19: Frecuencias patrón y señales horarias por satélite. |
| 9: Radionavegación aeronáutica. | |
| 10: Fijo por satélite. | |
| 11: Radionavegación marítima. | |

Tabla 2.1

Servicios dentro de la banda de microondas (Ministerio de Comunicaciones).

Los radioenlaces de microondas por línea de vista son ampliamente utilizados para las transmisiones de radio de banda ancha en servicio punto a punto. Un enlace puede ser definido como una conectividad de radio desde un transmisor en un extremo cercano a un receptor en un extremo lejano. En este caso, la longitud del enlace está limitada por la “línea de vista”.

Desde sus inicios, los radioenlaces de microondas por línea de vista han sido el medio de transporte básico para configuraciones FDM. La mayoría de los sistemas FDM/FM han sido reemplazados ya sea por su equivalente digital o por conectividad vía fibra óptica.

Algunas de las aplicaciones de los radioenlaces de microondas por línea de vista son las siguientes:

- Enlaces punto a punto en troncales o centrales, que forman parte de una red de comunicaciones (entidades privadas y gubernamentales).
- Sistemas punto a multipunto para televisión, telefonía, datos o la combinación de estos.
- Transporte de televisión u otras señales de video como lo es la televisión por cable en los trayectos: desde la cabecera a los transmisores ópticos, la radiodifusión y el enlace estudio-transmisor.
- Red digital de servicios integrados.
- Telemetría, comandos e información de control.
- Interconectividad de los centros de control de tráfico aéreo.
- Aplicaciones militares: en arreglos punto a punto, punto a multipunto o punto a punto móvil.

Una característica importante de la transmisión por línea de vista es que se puede predecir el nivel de la señal que llega a un receptor con gran precisión.

2.2. INGENIERÍA DEL RADIOENLACE

Los pasos necesarios a seguir en la planeación de un radioenlace de microondas por línea de vista son los siguientes:

1. Ubicar sobre un mapa topográfico los dos puntos a enlazar, con la ayuda de las cartas del instituto Agustín Codazzi en escalas 1:100000 o 1:25000. Si existen y se encuentran disponibles, se deben utilizar DTM (Mapas Digitales de Terreno), por medio de los cuales, es posible tomar todos los datos concernientes a la

topografía de un radioenlace, logrando ahorro en tiempo, recursos y mayor precisión.¹

2. Unir los dos puntos (transmisión y recepción) con una recta.
3. Obtener los siguientes datos de los mapas:
 - Altura sobre el nivel del mar de cada uno de los sitios considerados.
 - Coordenadas planas y geográficas de los sitios.
 - Rumbo en grados con respecto al norte de un sitio con relación al otro.
 - Distancia entre estos.
4. Trazar el perfil del trayecto teniendo en cuenta la curvatura terrestre y el radio de la primera zona Fresnel para el cálculo de la altura de las torres de antena.
5. Seleccionar la frecuencia de operación teniendo en cuenta la interferencia con otros sistemas, obtener las pérdidas del trayecto, seleccionar diámetros y ganancias de antenas, potencias de transmisión y nivel umbral en el receptor.
6. Visitar el terreno. Determinar la ubicación exacta de los puntos para realizar pruebas con los equipos de radio, comparando el perfil del papel con el que realmente se tiene disponible.
7. Instalar y poner en servicio el enlace. En este punto se debe realizar la alineación del haz, la configuración y comprobación de los equipos y una prueba de aceptación para el cliente.

2.2.1. TRAZADO DEL PERFIL DEL TRAYECTO

Después de seleccionar los sitios donde se ubicarán los terminales y los repetidores, se debe trazar el perfil del trayecto sobre un plano rectangular, utilizando una escala adecuada. La información de los obstáculos se toma de

¹ En la Recomendación P.1058-2 se encuentra lo que establece la UIT-R para las bases de datos topográficas digitales.

mapas topográficos. Ante la carencia de mapas digitales, los datos deben ser tomados de mapas suministrados por entidades como el Agustín Codazzi.

Se debe trazar cuidadosamente una línea de un extremo terminal a otro, marcando todos los obstáculos u obstrucciones y los posibles puntos de reflexión, tales como cuerpos de agua, pantanos o áreas desérticas, asignando marcas consecutivas para cada uno de los obstáculos. El valor de la separación horizontal entre puntos de datos depende de la utilización de estos. No se puede recomendar un valor en particular. En la práctica las separaciones horizontales suelen estar comprendidas entre 20 m y 1 Km aproximadamente. Estos son los valores sugeridos por la UIT-R en la Recomendación P.1058-2.

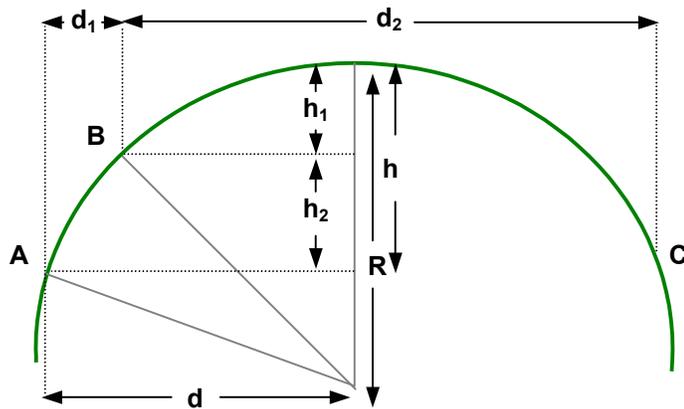
Se debe indicar la localización horizontal para cada punto en el plano y marcar el punto medio del trayecto, el cual es el punto de máxima elevación de la tierra y debe ser considerado como un obstáculo.

2.2.2. EFECTOS DEL CURVAMIENTO DEL HAZ DEBIDO A LA REFRACCIÓN

Las ondas de radio viajan a través de la atmósfera sin seguir una línea recta verdadera; estas sufren curvamiento debido a la refracción y difracción. Las leyes de Snell proveen una relación para una onda electromagnética que pasa de un medio a otro y explican que la velocidad de una onda electromagnética es una función de la densidad del medio a través del cual viaja; de ahí que cada medio posea un índice de refracción diferente medido con respecto al vacío, el cual es aproximadamente igual al del aire.

Se debe entonces calcular el incremento aparente en la altura de los obstáculos a causa del curvamiento del rayo, debido al fenómeno de refracción. La figura 2.1. ilustra el efecto de dicho incremento, el cual esta dado por la siguiente expresión:

$$h_2(m) = d_1 d_2 / 2KR_0 \quad (2.1.a)$$

**Figura 2.1**

Curvatura equivalente de la tierra.

De la figura 2.1 se tiene:

d_1 y d_2 : Distancia desde A a B y de B a C respectivamente (Km).

A y C: Puntos a enlazar.

B: Obstáculo dentro del trayecto A-C.

h_2 : Altura de elevación del obstáculo provocada por el curvamamiento del haz (m).

h : Altura de elevación del horizonte óptico (punto medio del trayecto) provocada por el curvamamiento del haz (m).

$2d$: Distancia en línea recta entre A y C (Km).

R : Radio efectivo de la tierra (Km).

$$R(\text{Km}) = KR_0 \quad (2.1.b)$$

Donde:

K : Factor de curvatura terrestre.

R_0 : Radio real de la tierra (6378 Km).

Por Pitágoras:

$$d^2 + (R - h)^2 = R^2$$

$$d^2 + R^2 - 2Rh + h^2 = R^2$$

$$\begin{aligned} \text{dado que } h^2 \ll d^2 \quad d^2 &= 2Rh \\ \mathbf{h} &= \mathbf{d^2 / 2R} \quad (\text{m}) \end{aligned} \quad \mathbf{(2.1.c)}$$

Por otro lado:

$$\begin{aligned} (d - d_1)^2 + (R - h_1)^2 &= R^2 \\ (d - d_1)^2 + R^2 - 2Rh_1 + h_1^2 &= R^2 \\ \text{dado que } h_1^2 \ll (d - d_1)^2 \quad (d - d_1)^2 &\approx 2Rh_1 \\ \mathbf{h_1(m)} &= \mathbf{(d - d_1)^2 / 2R} \end{aligned} \quad \mathbf{(2.1.d)}$$

Teniendo en cuenta que:

$$h_2 = h - h_1$$

Tomando las ecuaciones 2.1.c y 2.1.d:

$$h_2 = [d^2 - (d - d_1)^2] / 2R$$

Por último:

$$d = (d_1 + d_2) / 2$$

$$h_2(m) = d_1 d_2 / 2R$$

El factor K puede calcularse a partir del siguiente procedimiento:

- En la Recomendación P.453-8 de la UIT-R, se selecciona el valor medio de la refractividad atmosférica considerada al nivel del mar (N_0) para el área de interés, para la altitud media del trayecto (expresión 2.1.e).

$$\mathbf{K = (1 - 0.04665e^{0.005577Ns})^{-1}} \quad \mathbf{(2.1.e)}$$

Donde:

N_s : Refractividad atmosférica en la zona donde se ubica el trayecto del radioenlace.¹

$$N_s = N_0 e^{-h_s/h_0} \quad (2.1.f)$$

Donde:

N_0 : Valor medio de la refractividad atmosférica considerada al nivel del mar.

h_s : Altura de la superficie terrestre sobre el nivel del mar (Km).

h_0 : Altura de escala (Km).

- En ausencia de información de refractividad, se puede escoger un valor de K dependiendo de la zona climática donde se ubique el trayecto (tabla 2.2).

Zona	Factor K
Polar	$6/5 \leq K \leq 4/3$
Templada	$K = 4/3$
Cálida	$4/3 \leq K \leq 3/2$

Tabla 2.2

Factor de curvatura terrestre según la zona climática
(Radiopropagación, conferencias de clase).

2.2.3. DESPEJE DE LA ZONA FRESNEL PARA CONTRARRESTAR EFECTOS DE LA REFLEXIÓN

Después de identificar los obstáculos sobre el trayecto con sus alturas sobre el nivel del mar y el aumento de estas debido al efecto de curvatura de la tierra, debe tenerse en cuenta una extensión adicional para el despeje de la zona Fresnel.

El despeje de la zona de Fresnel se sustenta en la teoría de ondas electromagnéticas que dice que un frente de onda tiene propiedades de expansión

¹ Rec UIT-R P.453-8

cuando viaja a través del espacio. Estas propiedades de expansión, son una consecuencia de las reflexiones y transiciones de fase por el paso de las ondas muy cerca de un obstáculo. El resultado es un incremento o decremento en el nivel de señal recibida, lo cual recibe el nombre de desvanecimiento.

En el diseño de radioenlaces por línea de vista se debe evitar todas las fuentes de desvanecimiento siempre que sea posible. Si se realiza un despeje apropiado del radio Fresnel de un obstáculo, la influencia de este es eliminada. Según los criterios de planificación para el despeje del trayecto:

“La teoría de la difracción indica que el trayecto directo entre el transmisor y el receptor debe estar libre de obstáculos, a partir de una altura por encima del suelo igual, como mínimo al 60% del radio de la primera zona de Fresnel para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre”¹

El radio de la primera zona Fresnel (F_1) (figura 2.2) esta definido como:

$$F_1(m) = 17.3 \sqrt{d_1 d_2 / (f d)} \quad (2.2)$$

Donde:

f: Frecuencia (GHz).

d: Longitud del trayecto (Km).

d_1 y d_2 : Distancias (Km) entre los terminales y el obstáculo.

Clima templado	Clima tropical
0.0 F_1 (es decir, incidencia rasante) si solo existe una obstrucción aislada del trayecto.	0.6 F_1 para longitudes de trayecto superiores a unos 30 Km.
0.3 F_1 si la obstrucción del trayecto se extiende a lo largo de una parte de éste.	

Tabla 2.3

Radios de despeje de la zona Fresnel (Rec. UIT-R P.530-8).

¹ Rec. UIT-R P.530-8

A falta de un procedimiento general que permita obtener una cantidad previsible de pérdidas por difracción para diversos porcentajes de tiempo pequeños, en consecuencia, de un criterio estadístico de despeje del trayecto, se recomienda utilizar los valores indicados en la tabla 2.3.

2.2.4. CÁLCULO DE ALTURA DE LAS TORRES DE ANTENA

Ya se han tenido en cuenta todos los efectos producidos debidos a la variación aparente de la curvatura de la tierra por la refracción y a la presencia de obstáculos dentro del trayecto entre transmisor y receptor. En este punto se puede calcular la altura mínima de las torres de antena, lo cual es necesario ya que los costos en la construcción de estas son bastante elevados y deben ser reducidos al mínimo admisible.

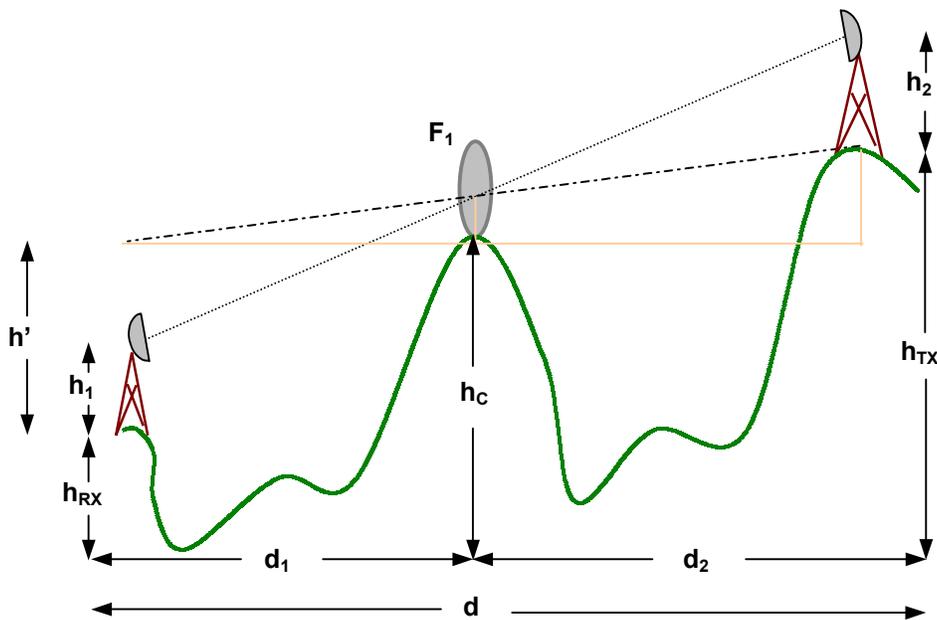


Figura 2.2

Altura de las torres con liberación de zona Fresnel.

De la figura 2.2 se tiene:

h_1 : Altura de la torre de antena en el punto de recepción.

h_2 : Altura de la torre de antena en el punto de transmisión.

h_{RX} : Altura s.n.m. del terreno donde se encuentra el punto de recepción.

h_{TX} : Altura s.n.m. del terreno donde se encuentra el punto de transmisión.

h' : Altura de la torre de antena en el punto de transmisión, cuando la altura h_2 es igual a cero.

F_1 : Radio de la primera zona Fresnel.

h_c : Altura s.n.m. del obstáculo con corrección de curvatura.

Todas las variables deben expresarse en unidades coherentes.

$$h_c = h_0 + h_k + h_a$$

Donde:

h_0 : Altura s.n.m. del obstáculo sin corrección de curvatura.

h_k : Corrección de elevación debida a K (ecuación 2.1.a)

h_a : Valor adicional que debe ser agregado si existen árboles altos en la cima del obstáculo o si se desconoce la presencia de pequeñas protuberancias del terreno.

Si $h_2 = 0$, la altura h_1 se modifica, suponiendo una altura h' , geoméricamente (línea naranja):

$$h_c + F_1 - (h_{RX} + h') / d_1 = h_{TX} - (h_{RX} + h') / d$$

Resolviendo para h' se tiene:

$$h' = d/d_2 (h_c + F_1) - h_{RX} - (d_1/d_2) h_{TX} \quad (2.3.a)$$

Si h_2 es diferente de cero, entonces:

$$\Delta h = (d_1/d_2)h_2 \quad (2.3.b)$$

En este caso y tomando el metro como unidad de medida, la altura de h_1 , es:

$$h_1(m) = h' - \Delta h \quad (2.3.c)$$

Las estadísticas del factor K para un punto pueden determinarse a partir de mediciones o predicciones del gradiente del índice de refracción en los primeros 100m de la atmósfera. Al promediar estos gradientes se obtiene el valor efectivo de K correspondiente a la longitud del trayecto en cuestión K_E . Con este valor se puede recalculan las alturas de torres de antena, para luego compararlas con las alturas halladas anteriormente y finalmente escoger las de mayor altura. ¹

Puntos de reflexión: Debido a las propiedades de expansión del haz, se producen transiciones de fase cuando parte de la onda se refleja. Si esta componente reflejada llega al receptor, provoca un incremento o decremento en el nivel de la señal recibida dependiendo de la diferencia de fase y de la amplitud. Para evitar cualquier efecto nocivo, se pueden obtener los puntos de reflexión de la señal por medio de una observación del perfil sobre el terreno.

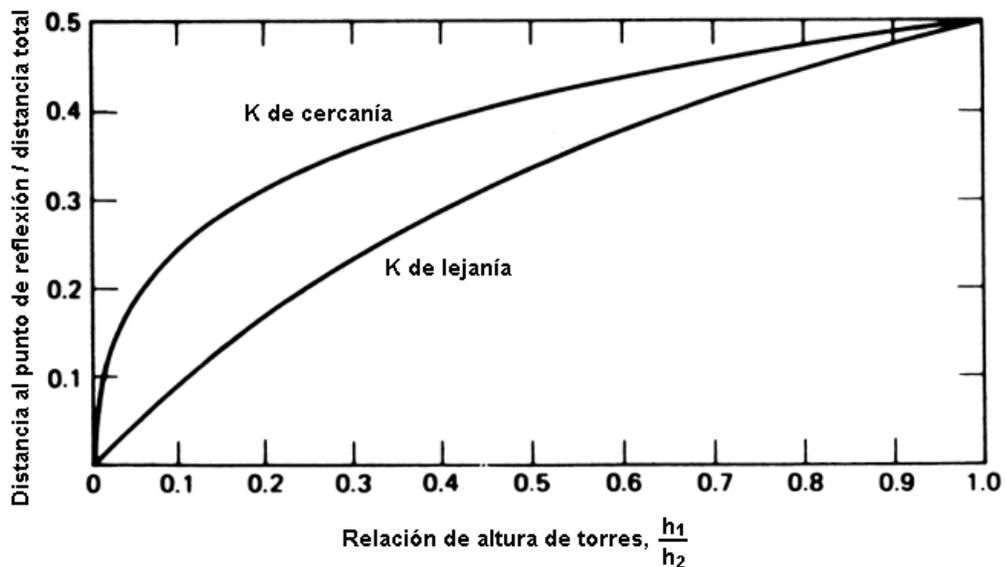


Figura 2.3

Cálculo de los puntos de reflexión (Telecommunications Transmisión Handbook).

¹ Este procedimiento se encuentra especificado en la Recomendación P.530-8 de la UIT-R.

El objetivo es asegurar que el punto de reflexión no caiga sobre un terreno plano o sobre agua; es preferible que caiga sobre un terreno donde la energía reflejada sea dispersada (bosques o áreas rocosas por ejemplo). Los cuerpos de agua y otras superficies planas causan reflexiones indeseables. El ajuste del punto de reflexión se puede realizar a partir de la figura 2.3. Se utiliza la relación de altura de las antenas h_1/h_2 , teniendo en cuenta que h_1 es la menor de las alturas. El área de reflexión se sitúa entre el factor límite $K=1$ y K infinito. Ajustando la relación h_1/h_2 se traslada el punto de reflexión.

Torres de antena: Existen dos tipos de torres utilizadas para los radioenlaces de microondas por línea de vista: sujetadas y autosoportadas. Los edificios y demás construcciones pueden servir para montar las antenas si resultan ser aptos para ello. Las torres autosoportadas son más fuertes, duraderas y seguras. Uno de los materiales más deseables para su construcción es el acero galvanizado. Las sujetadas son preferidas usualmente por su economía y versatilidad, pues a diferencia de las otras son de fácil instalación. Su desventaja es que requieren de un terreno mucho mayor debido al espacio necesario para instalar los vientos. La tabla 2.4, indica las áreas de terreno necesarias para diferentes alturas de torre.

La altura límite para cualquier tipo de torre es de 140 m aproximadamente, ya que a mayor altura, es necesaria mayor presión sobre el terreno en el cual esté soportada. Existe un límite para el valor de dicha presión fijado por la guía de diseño del estándar EIA RS-222-E, que establece que las fundiciones y anclaje para torres autosoportadas y sujetadas respectivamente, deben ser diseñadas para una presión sobre el terreno de 20000 Kg/m^2 en condiciones normales.

Otra consideración que se debe tener en cuenta acerca de las torres de antena es la torsión y la oscilación causadas por el viento y otras fuerzas de la naturaleza. Estos fenómenos además de afectar la trayectoria del rayo o la pérdida de la señal, pueden llegar a causar la destrucción de las torres. Para reducir el riesgo, la rigidez de estas debe aumentarse dependiendo de las condiciones del lugar. Por ejemplo, la ocurrencia de fuertes vientos o la presencia de hielo sobre las torres debida a temperaturas muy bajas, pueden afectar seriamente las estructuras.

Altura torre (m)	Área mínima requerida (m ²)				
	80%	75%	70%	65%	60%
20	29.99 x32.88	27.18 x31.49	25.57 x29.49	24.18 x28.10	22.57 x26.26
25	39.06 x39.87	32.71 x37.99	30.81 x35.54	29.02 x33.59	27.07 x31.70
30	40.96 x46.87	38.45 x44.48	36.07 x42.04	34.42 x39.09	31.56 x36.70
35	46.56 x53.87	43.98 x50.98	41.32 x48.09	38.86 x45.04	36.06 x41.70
40	52.57 x67.87	50.51 x63.98	46.57 x54.09	43.65 x50.70	40.56 x47.04
45	58.57 x67.87	56.22 x63.98	51.82 x60.09	48.54 x56.20	45.06 x52.31
50	64.56 x74.87	60.84 x70.48	57.07 x66.09	53.35 x61.70	49.56 x57.10
60	76.57 x88.88	72.09 x83.48	67.57 x78.09	63.09 x73.21	58.57 x67.66
70	88.56 x102.26	83.39 x96.48	78.07 x90.09	72.89 x84.30	67.57 x78.82
80	100.57 x 116.26	94.70 x116.43	88.56 x102.70	82.70 x95.30	76.56 x88.53
90	112.57 x130.26	105.93 x122.48	99.07 x114.70	92.44 x106.77	85.57 x98.93
100	124.57 x144.02	117.13 x135.48	109.56 x126.7	102.10 x117.55	94.56 x109.38
110	136.57 x157.64	128.32 x148.48	120.07 x138.70	111.82 x129.52	103.56 x114.96
120	148.57 x171.68	139.61 x161.06	128.48 x150.70	121.61 x140.53	112.57 x130.14
130	160.56 x185.33	150.91 x174.17	141.07 x142.43	131.42 x151.62	121.56 x140.41

Tabla 2.4

Área mínima requerida para la instalación de torres sujetadas (EIA RS-222-E).

2.2.5. EFECTOS VINCULADOS CON LA PROPAGACIÓN

El medio de propagación a través del cual viaja la señal de radio en los enlaces por línea de vista es un factor muy importante a tener en cuenta, ya que dependiendo de las condiciones atmosféricas y del terreno, el haz se ve afectado en alguna medida. La UIT-R, presenta métodos de predicción para los efectos de propagación que deben tenerse en cuenta en la mayoría de los enlaces fijos con visibilidad directa. Estos efectos incluyen:

- *“Desvanecimiento por difracción debido a la presencia de obstáculos en el trayecto en condiciones de propagación adversas.*
- *Atenuación debida a los gases atmosféricos.*
- *Desvanecimiento debido a la propagación atmosférica por trayectos múltiples o a la dispersión del haz asociado con la existencia de capas refractivas anormales.*
- *Desvanecimiento debido a la propagación por los trayectos múltiples que se originan por reflexión en la superficie.*

- *Atenuación debida a las precipitaciones o a otras partículas sólidas presentes en la atmósfera.*
- *Variación del ángulo de llegada en el terminal receptor y del ángulo de salida en el terminal transmisor debido a la refracción.*
- *Reducción de la discriminación por polarización cruzada (XPD) en condiciones de propagación por trayectorias múltiples o durante las precipitaciones.*
- *Distorsión de la señal debida a desvanecimientos selectivos en frecuencia y a retardos durante la propagación por trayectorias múltiples”.¹*

Las pérdidas de propagación para un trayecto terrestre con visibilidad directa, resultan de las siguientes contribuciones:

- *“Pérdidas de espacio libre.*
- *Atenuación debida a los gases atmosféricos.*
- *Desvanecimiento por difracción debido a la obstrucción parcial o total del trayecto.*
- *Atenuación debida a los ángulos de llegada y de salida.*
- *Atenuación debida a precipitaciones.*
- *Atenuación debida a tormentas de arena y polvo.*
- *Desvanecimiento debido a la propagación por trayectorias múltiples, la dispersión del haz y el centelleo.”¹*

Cada una de estas contribuciones tiene sus características propias en función de la frecuencia, longitud del trayecto y la ubicación geográfica.

¹ Rec. UIT-R P.530-8

Matemáticamente, las pérdidas de propagación (L_{MP}) se expresan de la manera siguiente:

$$L_{MP}(dB) = L_{FS} + L_{AG} + L_D + L_H + L_E \quad (2.4)$$

Donde:

L_{FS} : Pérdidas de espacio libre (dB).

L_{AG} : Atenuación debida a gases atmosféricos (dB).

L_D : Pérdidas por difracción (dB).

L_H : Atenuación por hidrometeoros (dB).

L_E : Pérdidas de eco adicionales (dB).

Como se puede observar en la ecuación anterior, la variación de los ángulos de llegada y salida no se ha tenido en cuenta, ya que las pérdidas producidas por el efecto del desalineamiento del haz no son predecibles matemáticamente, como lo indica la UIT-R:

“Gradientes anormales del índice de refracción con cielo despejado a lo largo de un trayecto pueden provocar variaciones considerables de los ángulos de salida y de llegada de las ondas transmitidas y recibidas, respectivamente. Esta variación es prácticamente independiente de la frecuencia y se produce principalmente en el plano vertical de las antenas. La gama de ángulos es superior en las regiones costeras húmedas que en las zonas secas del interior. En condiciones de precipitación no se han observado variaciones importantes.

El efecto puede ser importante en trayectos largos en los que se emplean antenas de elevada ganancia y haz estrecho. Si la anchura de haz de las antenas es demasiado pequeña, la onda directa de salida/llegada puede no estar centrada con el eje del haz y dar lugar a un desvanecimiento importante. Por otra parte si las antenas se han alineado durante periodos de ángulos de llegada muy anormales, la alineación puede no ser óptima. Por lo tanto, al alinear las antenas en trayectos críticos (por ejemplo,

*trayectos largos en zonas costeras), puede ser conveniente comprobar varias veces la alineación en un periodo de unos pocos días.*¹

Los efectos del desvanecimiento debido a la propagación por trayectorias múltiples inciden en la disponibilidad del sistema. De esto se hablará más adelante.

2.2.5.1. PÉRDIDAS DE ESPACIO LIBRE

Cuando se trata de un enlace punto a punto, es preferible calcular la atenuación en el espacio libre entre antenas isotrópicas también pérdida básica de transmisión en el espacio libre (L_{FS}) de la manera siguiente:²

$$L_{FS}(\text{dB}) = 32.45 + 20 \log f + 20 \log d \quad (2.5)$$

Donde:

f: Frecuencia (MHz).

d : Distancia (Km).

2.2.5.2. ATENUACIÓN DEBIDA A GASES ATMOSFÉRICOS

Para los trayectos terrestres y los ligeramente inclinados junto al suelo, la atenuación en el trayecto L_{AG} , puede expresarse como sigue:³

$$L_{AG}(\text{dB}) = (\gamma_w + \gamma_0) d \quad (2.6)$$

Donde:

d : Longitud del trayecto (Km).

γ_0 : Atenuación específica debida al aire seco (dB/Km).

γ_w : Atenuación específica debida al vapor de agua (dB/Km).

¹ Rec. UIT-R P.530-8 e Inf. UIT-R 338-5

² Rec. UIT-R P.525-2

³ Rec. UIT-R P.676-4

Las atenuaciones específicas debida al aire seco y al vapor de agua y consideradas a partir del nivel del mar hasta una altura de 5 Km, pueden estimarse utilizando los siguientes algoritmos. Para alturas superiores a 5 Km y en los casos en que se necesite una mayor precisión, se debe utilizar el cálculo raya por raya. ²

En el caso de aire seco la atenuación γ_0 viene dada por:

$$\gamma_0(\text{dB/Km}) = \left[\left(\frac{7.43\gamma_p^2\gamma_t^3}{f^2 + 0.36\gamma_p^2 + \gamma_t^2} \right) + \left(\frac{0.3429b\gamma_0'(54)}{(54-f)^a + b} \right) \right] f^2 \times 10^{-3} \quad (2.7.a)$$

Para $f < 54$ GHz.

Donde:

$$\gamma_0'(54) = 2.128\gamma_p^{1.4954}\gamma_t^{-1.6032}e^{-2.528(1-\gamma_t)} \quad (2.7.b)$$

$$a = \ln(\eta_2 / \eta_1) / \ln 3.5 \quad (2.7.c)$$

$$b = 4^a / \eta_1 \quad (2.7.d)$$

$$\eta_1 = 6.7665\gamma_p^{-0.5050}\gamma_t^{0.5106}e^{1.566(1-\gamma_t)} - 1 \quad (2.7.e)$$

$$\eta_2 = 27.8843\gamma_p^{-0.4908}\gamma_t^{-0.8491}e^{0.5496(1-\gamma_t)} - 1 \quad (2.7.f)$$

$$\gamma_p = p / 1013 \quad (2.7.g)$$

$$\gamma_t = 288 (273 + t) \quad (2.7.h)$$

t : Temperatura a una altura h:¹

$$t(h)(^\circ\text{C}) = 300.4222 - 6.3533 h + 0.005886 h^2 \quad (2.7.i)$$

¹ Rec. UIT-R P.835-3

p : Presión a una altura h :¹

$$p(h)(hPa) = 1012.0306 - 109.0338 h + 3.6316 h^2 \quad (2.7.j)$$

f : Frecuencia en GHz.

La atenuación específica por vapor de agua γ_w viene dada por:

$$\begin{aligned} \gamma_w(\text{dB/Km}) = & 3.13 \times 10^{-2} \gamma_p \gamma_t + 1.76 \times 10^{-3} \rho \gamma_t^{8.5} + \gamma_t^{2.5} \left[\frac{3.84 \xi_{w1} g_{22} \exp(2.23(1 - \gamma_t))}{(f - 22.235)^2 + 9.42 \xi_{w1}^2} + \right. \\ & \frac{10.5 \xi_{w2} \exp(0.7(1 - \gamma_t))}{(f - 183.3)^2 + 9.5 \xi_{w2}^2} + \frac{0.08 \xi_{w3} \exp(6.44(1 - \gamma_t))}{(f - 321.23)^2 + 6.3 \xi_{w3}^2} + \frac{3.7 \xi_{w4} \exp(1.6(1 - \gamma_t))}{(f - 325.2)^2 + 9.2 \xi_{w4}^2} \\ & + \frac{26.4 \xi_{w5} \exp(1.1(1 - \gamma_t))}{(f - 380)^2} + \left. \frac{17.8 \xi_{w5} \exp(1.5(1 - \gamma_t))}{(f - 448)^2} + \right. \\ & \left. \frac{883.7 \xi_{w5} g_{557} \exp(0.17(1 - \gamma_t))}{(f - 557)^2} + \frac{302.6 \xi_{w5} g_{752} \exp(0.41(1 - \gamma_t))}{(f - 752)^2} \right] f^2 \rho \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (2.8.a)$$

Donde :

$$\xi_{w1} = 0.9544 \gamma_p \gamma_t^{0.69} + 0.0061 \rho \quad (2.8.b)$$

$$\xi_{w2} = 0.95 \gamma_p \gamma_t^{0.64} + 0.0067 \rho \quad (2.8.c)$$

$$\xi_{w3} = 0.9561 \gamma_p \gamma_t^{0.67} + 0.0059 \rho \quad (2.8.d)$$

$$\xi_{w4} = 0.9543 \gamma_p \gamma_t^{0.68} + 0.0061 \rho \quad (2.8.f)$$

$$\xi_{w5} = 0.955 \gamma_p \gamma_t^{0.68} + 0.006 \rho \quad (2.8.g)$$

$$g_{22} = 1 + (f - 22.235)^2 / (f + 22.235)^2 \quad (2.8.h)$$

$$g_{557} = 1 + (f - 557)^2 / (f + 557)^2 \quad (2.8.i)$$

$$g_{752} = 1 + (f - 752)^2 / (f + 752)^2 \quad (2.8.j)$$

Donde:

ρ : Densidad de vapor de agua:¹

$$\rho(h)(g/m^3) = 19.6542 \exp(-0.2313 h - 0.1122 h^2 + 0.01351 h^3 - 0.0005923 h^4) \quad (2.8.k)$$

2.2.5.3. PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN

Numerosos trayectos de propagación comprenden uno o varios obstáculos de diferentes tipos, separados e interesa calcular la pérdida que éstos introducen. Para realizar el cálculo hay que idealizar la forma de tales obstáculos, considerándola bien sea como de arista de grosor despreciable o como arista gruesa y lisa cuyo radio de curvatura en la cima está bien definido. Claro está que los obstáculos reales tienen formas más complejas y por consiguiente las indicaciones dadas en las Recomendaciones se deben de considerar nada más como una aproximación.

Los datos son aplicables cuando la longitud de onda es suficientemente pequeña con relación a las dimensiones del obstáculo, o sea, principalmente en el caso de ondas métricas y más cortas ($f > 30\text{MHz}$).

Existen diversos casos para los cuales el cálculo de las pérdidas por difracción varían un poco dependiendo de la forma del obstáculo y de la cantidad de estos (obstáculo único en filo de cuchillo, pantalla de anchura finita, obstáculo único en forma redondeada, dos aristas aisladas, etc.). Sin embargo, para la implementación de la aplicación, se realizaron los cálculos con el *método general para uno o más obstáculos*², ya que su aplicación se recomienda para determinar la pérdida por difracción en un terreno irregular que presente uno o más obstáculos a la propagación con visibilidad directa. Los cálculos tienen en cuenta la curvatura de la tierra mediante el concepto de radio efectivo de la tierra. Este método es adecuado siempre que se necesite un único procedimiento general para los trayectos

¹ Rec. UIT-R P.835-3

² Rec. UIT-R P.526-6

terrestres sobre tierra o mar y tanto en el caso de visibilidad directa como transhorizonte.

Es preferible, pero no fundamental, que las muestras de perfil tengan la misma separación horizontal.

El exceso de pérdida por difracción en el trayecto viene dado por: ¹

$$L_D(\text{dB}) = J(v_p) + T(J(v_t) + J(v_r) + C) \quad \text{para } v_p > -0.78$$

$$L_D(\text{dB}) = 0 \quad \text{para } v_p < -0.78 \quad (2.9.a)$$

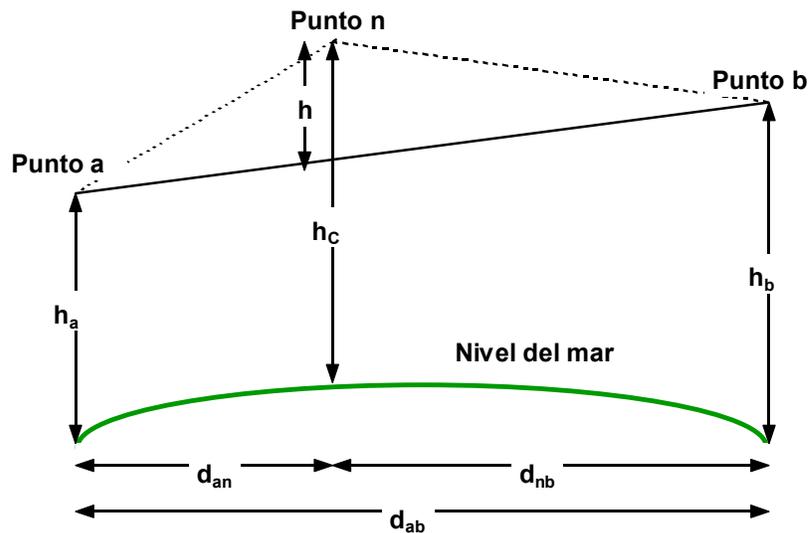


Figura 2.4

Difracción de la señal sobre un obstáculo (Rec. UIT-R P.526-6).

Donde:

h_a, h_b : Alturas verticales s.n.m. de los extremos (Puntos a y b).

h_c : Altura s.n.m. del obstáculo.

d_{an}, d_{nb}, d_{ab} : Distancias horizontales.

¹ Rec. UIT-R P.526-6

La pérdida causada por la presencia de un obstáculo en función de v_x , el cual es un parámetro sin dimensión en el que se agrupan todos los parámetros geométricos del obstáculo, para un v_x mayor que -0.7 esta dada por:

$$J(v_x)(dB) = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(v_x - 0.1)^2 + 1} + v_x - 0.1) \quad (2.9.b)$$

El método general, se basa en un procedimiento utilizado de uno a tres veces dependiendo del perfil del trayecto. Dicho procedimiento consiste en determinar el punto dentro de una sección concreta del perfil con el mayor valor del parámetro geométrico v_x . La selección del perfil que debe considerarse se define desde el punto a, hasta el punto b ($a < b$). Si $a + 1 = b$, no existe ningún punto intermedio y la pérdida por difracción en la sección del trayecto considerado es cero. En otros casos, la construcción se aplica evaluando v_n ($a < n < b$) y seleccionando el punto con el valor más alto de v_x (figura 2.4).

El valor de v_x para el punto de perfil n-ésimo viene dado por :

$$v_n = h \sqrt{2 d_{ab} / (d_{an} d_{nb})} \quad (2.9.c)$$

Donde :

$$h = h_c + (d_{an} d_{nb} / 2R) - ((h_a d_{nb} + h_b d_{an}) / d_{ab}) \quad (2.9.d)$$

R: Radio efectivo de la tierra.

Todas las variables anteriores deben expresarse en unidades coherentes.

El procedimiento anterior se aplica en primer lugar a todo el perfil del transmisor al receptor. Al punto con el valor más alto de v_x se le llama arista principal p y la pérdida correspondiente es $J(v_p)$.

Si $v_p > -0.78$ el procedimiento se aplica dos veces más:

- del transmisor al punto p para obtener v_t , y a continuación $J(v_t)$

- del punto p al receptor para obtener v_r , y a continuación $J(v_r)$

Donde:

C : Corrección empírica .

$$C = 10 + 0.04 d \quad (2.9.e)$$

d: longitud del trayecto (Km).

Y:

$$T = 1 - \exp(- J(v_p) / 6) \quad (2.9.f)$$

Reemplazando T, C, $J(v_r)$, $J(v_t)$ y $J(v_p)$ en la ecuación 2.9.a obtenemos el exceso de pérdidas por difracción.

2.2.5.4. ATENUACIÓN POR HIDROMETEOROS

Se da como resultado de la absorción y dispersión provocadas por hidrometeoros como la lluvia, nieve, el granizo y la niebla. Aunque puede hacerse caso omiso de la atenuación debida a la lluvia para frecuencias por debajo de unos 10 GHz, debe incluirse en los cálculos de diseño a frecuencias superiores, en las que su importancia aumenta rápidamente.

Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo:

Una estimación de la atenuación en el trayecto debida a la lluvia, excedida durante el 0.01% del tiempo viene dada por: ¹

$$L_{0.01}(\text{dB}) = \gamma_R d_{\text{eff}} \quad (2.10.a)$$

¹ Rec. UIT-R P.530

Donde:

γ_R : Atenuación específica para la frecuencia, polarización e índice de precipitación de interés (dB/Km).¹

d_{eff} : Longitud efectiva del trayecto (Km).

Para enlaces radioeléctricos situados por debajo de 30° de latitud, las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo p en la gama de 0.001% a 1% pueden deducirse de la siguiente ley exponencial:

$$L_H / L_{0.01} = 0.07 p^{-(0.855 + 0.139 \log p)} \text{(dB)} \quad (2.10.b)$$

Donde:

L_H : Atenuación excedida para un porcentaje de tiempo p (dB).

Banda (GHz)	K_H	K_V	α_H	α_V
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
5	0.0014	0.0012	1.2145	1.17
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
11	0.0147	0.0132	1.2254	1.0756
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
13	0.0252	0.0228	1.2034	1.0722
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
18	0.061	0.0545	1.1481	1.0637
23	0.1049	0.0959	1.0929	1.0555
26	0.1366	0.1238	1.0598	1.05
28	0.1618	0.1454	1.0377	1.046
38	0.3152	0.2792	0.927	1.029

Tabla 2.5

Coefficientes de regresión para estimar el valor de la atenuación específica
(Rec. UIT-R P.838-1).

¹ Rec. UIT-R P.838-1

Para estimar las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo puede utilizarse la siguiente técnica:¹

Se debe obtener la intensidad de lluvia o el índice de precipitación $R_{0.01}$ superado durante el 0.01% del tiempo (con un tiempo de integración de 1 min). Si no se dispone de esta información a partir de las fuentes locales medidas a largo plazo, puede obtenerse una estimación utilizando la información que aparece en la Recomendación UIT-R P.837-2.

La atenuación específica γ_R se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h) mediante la ley exponencial:

$$\gamma_R(\text{dB/Km}) = K R^\alpha \quad (2.10.c)$$

En la tabla 2.5. se indican los valores de K y α que dependen de la frecuencia, para las polarizaciones lineales (horizontal y vertical). Los valores de la tabla han sido probados y se han considerado lo suficientemente precisos como para realizar predicciones de la atenuación hasta frecuencias de 55 GHz.

$$K = (K_H + K_V + (K_H - K_V) \cos^2\theta) / 2 \quad (2.10.d)$$

$$\alpha = (K_H \alpha_H + K_V \alpha_V + (K_H \alpha_H - K_V \alpha_V) \cos^2\theta) / 2K \quad (2.10.e)$$

Donde:

θ : Ángulo de elevación del trayecto.

Finalmente, se calcula la longitud efectiva del trayecto d_{eff} :

$$d_{\text{eff}}(\text{Km}) = d r \quad (2.10.f)$$

¹ Rec. UIT-R P.530-8

Donde:

d: Longitud real del trayecto total (Km).

r: Factor de distancia.

$$r = 1 / (1 + d / d_0) \quad (2.10.g)$$

Donde, para $R_{0.01} < 100$ mm/h :

$$d_0 = 35 \exp(-0.015 R_{0.01}) \quad (2.10.h)$$

Para $R_{0.01} > 100$ mm/h utilícese el valor 100mm/h en vez de $R_{0.01}$.

2.2.5.5. PÉRDIDAS DE ECO ADICIONALES

En términos de protección contra interferencia puede obtenerse una ventaja de las pérdidas por difracción adicionales que pueden insertarse en antenas localizadas bajo condiciones de eco local básico (edificios, vegetación, etc.). Este procedimiento¹ permite añadir dichas pérdidas de eco en uno o ambos extremos del trayecto, en aquellas situaciones en que el escenario de eco se conoce. Cuando hay dudas en cuanto a la naturaleza del ambiente generador de eco, no deben incluirse estas pérdidas adicionales.

La tabla 2.6 indica las categorías de eco a las que puede aplicarse la corrección altura-ganancia cuando se conocen en forma precisa los parámetros del objeto reflectante. Se considera que la altura nominal del generador de eco, h_A (m) y la distancia respecto a la antena d_K (m), son valores promedio más representativos del tipo de generador u objeto reflectante. No obstante, el modelo de corrección debe formarse con reservas reconociendo la incertidumbre que existe en cuanto a la altura real adecuada para cada una de las situaciones individuales.

¹ Rec. UIT-R P.452-9

Categoría de generador de eco (superficie del terreno)	Altura nominal h_A (m)	Distancia nominal d_K (Km)
Campos de cultivo alto	4	0.1
Parques	4	0.1
Árboles dispersos de forma irregular	4	0.1
Cultivos (separados uniformemente)	4	0.1
Casas dispersas	5	0.07
Centro de población rural	5	0.07
Árboles de hoja caduca (separación irregular)	15	0.05
Árboles de hoja caduca (separación uniforme)	15	0.05
Bosques de árboles diversos	15	0.05
Coníferas (separación irregular)	20	0.05
Coníferas (separación uniforme)	20	0.05
Selva tropical húmeda	20	0.03
Entorno suburbano	9	0.025
Entorno suburbano denso	12	0.02
Entorno urbano	20	0.02
Entorno urbano denso	25	0.02
Zona industrial	20	0.05

Tabla 2.6

Alturas y distancias nominales de objetos reflectantes o generadores de eco

(Rec. UIT-R P.452-9).

Modelo de altura ganancia:

Las pérdidas adicionales debidas a la protección con respecto al eco local vienen dadas por la expresión:

$$L_E(\text{dB}) = 10.25 \exp(-dk) \left(1 - \operatorname{tgh} \left(6 \left(\frac{h}{h_A} - 0.625 \right) \right) \right) - 0.33 \quad (2.11)$$

Donde:

d_K : Distancia (Km) desde el punto nominal del eco a la antena.

h : Altura de la antena (m) por encima del nivel local del suelo.

h_A : Altura nominal del punto de eco (o reflectante) (m) por encima del nivel local del suelo.

2.2.6. CÁLCULOS DEL TRAYECTO

Mientras que a partir del trazado del perfil del trayecto se puede calcular la altura de las torres de antena requeridas para lograr el despeje necesario del trayecto del haz; de los cálculos del trayecto se obtienen los parámetros necesarios para dimensionar el equipo de radio. Esto incluye el tamaño de las antenas o apertura, potencia de salida del transmisor, figura de ruido del receptor, ancho de banda requerido, tipo de diversidad (si es necesario), ganancia de codificación para sistemas digitales, medida del desempeño de la relación señal a ruido (S/N) y ruido en el canal de voz derivado para sistemas FDM/FM o tasa de error de bit (BER) para sistemas digitales. Generalmente el desempeño se mide como una distribución de tiempo.

El punto de inicio en los cálculos del trayecto o planeación del enlace, es la potencia mínima requerida en el extremo receptor. Esta potencia umbral depende de la sensibilidad del equipo receptor. A partir dicha potencia debe calcularse, la relación portadora-ruido mínima requerida considerando el nivel umbral de ruido del receptor.

La relación portadora-ruido se da por la relación:

$$C/N(\text{dB}) = P_{\text{RX}} - P_{\text{N}} \quad (2.12)$$

Donde:

P_{RX} : Potencia de recepción (dBW).

P_{N} : Potencia de ruido umbral del receptor (dBW).

Como se puede observar, el nivel de señal recibida (P_{RX}) debe estar por encima de la potencia umbral dentro de una diferencia mínima. La magnitud de dicho margen depende de los siguientes factores:

- Confiabilidad requerida o medida en el tiempo de disponibilidad.
- BER, relación S/N o ruido en el canal de voz.
- Tipo de modulación.

- Desvanecimiento y margen de desvanecimiento.
- Tipo de codificación y otros factores de codificación.
- Interferencia externa.

Dependiendo del tipo de sistema, los cálculos en la planeación de radioenlaces se orientan de distinta forma ya que los procedimientos utilizados dentro de cada tipo de modulación son diferentes.

Sistemas analógicos: Desde sus inicios en los años 50, los sistemas de microondas por línea de vista analógicos utilizan modulación en frecuencia (FM) como soporte principal para telefonía local y de larga distancia. Aunque estos sistemas tienden a desaparecer (pues están siendo reemplazados por sistemas de modulación digital), los que aún prevalecen utilizan multiplexación por división de frecuencia (FDM). Por esto en este trabajo, en el análisis de sistemas analógicos se asume el tipo de modulación/multiplexación FM/FDM.

Sistemas digitales: Los nuevos sistemas de microondas por línea de vista que utilizan comunicación duplex son digitales. Dentro de estos sistemas, una o más propiedades de la portadora RF (amplitud, frecuencia y fase) son cuantificadas por una señal modulada, lo que implica fijar un conjunto de valores discretos. La forma de onda digital, puede asumir uno o más niveles discretos de amplitud, frecuencia o fase, resultando en un flujo serial de bits síncrono (señal modulada).

2.2.6.1. POTENCIA UMBRAL DE RUIDO EN EL RECEPTOR

El umbral de ruido en un receptor está dado por la siguiente expresión:

$$P_N(W) = F K T B_{IF} \quad (2.13.a)$$

Donde:

F: Figura de ruido del receptor. Este parámetro es dado por el fabricante del equipo.

K: Constante de Boltzman (1.380658 E-23 J/°K).

T: Temperatura absoluta (290 °K).

B_{IF} : Ancho de banda de frecuencia intermedia(Hz).

$$P_N(\text{dBW}) = -204 \text{ dBW} + 10 \log (B_{IF}) + NF \quad (2.13.b)$$

Donde:

NF: Figura de ruido (dB).

El cálculo del ancho de banda se realiza en diferente forma dependiendo del tipo de sistema, ya sea analógico o digital.

Sistemas analógicos: En estos sistemas la modulación en frecuencia es la más adecuada, ya que presenta mejoría en los factores de ruido, principalmente en el compromiso del ancho de banda para mejorar la relación S/N por encima de cierto umbral de ruido, el cual se conoce como umbral de mejora de FM.

El ancho de banda para el sistema de radio FM se define mediante la siguiente fórmula:

$$B_{IF}(\text{KHz}) = 2(f_{BB} + f_{DEV}) \quad (2.14.a)$$

Donde:

f_{BB} : Frecuencia central del canal más alto en banda base (KHz)¹

f_{DEV} : Desviación máxima de frecuencia (KHz).

La frecuencia máxima de banda base es el mayor valor de frecuencia, utilizada en configuración FDM por el transmisor para modulación.

La desviación es una medida de la variación instantánea de frecuencia y es función directa del nivel de la señal moduladora. Mientras más alto es el nivel de señal

¹ Rec. UIT-R 399-3

moduladora, existe una mayor desviación y por lo tanto se requiere un mayor ancho de banda resultando en un incremento de ruido térmico, lo que conlleva a una distorsión por intermodulación.

Los sistemas de radio que utilizan modulación analógica sufren un incremento lineal de la amplitud de ruido con el incremento de la frecuencia de banda base. Para solucionar este problema debe utilizarse sistemas de preacentuación que permitan que el nivel de ruido se mantenga constante en todas las frecuencias, haciendo que en el receptor haya una relación S/N constante en toda la banda base.

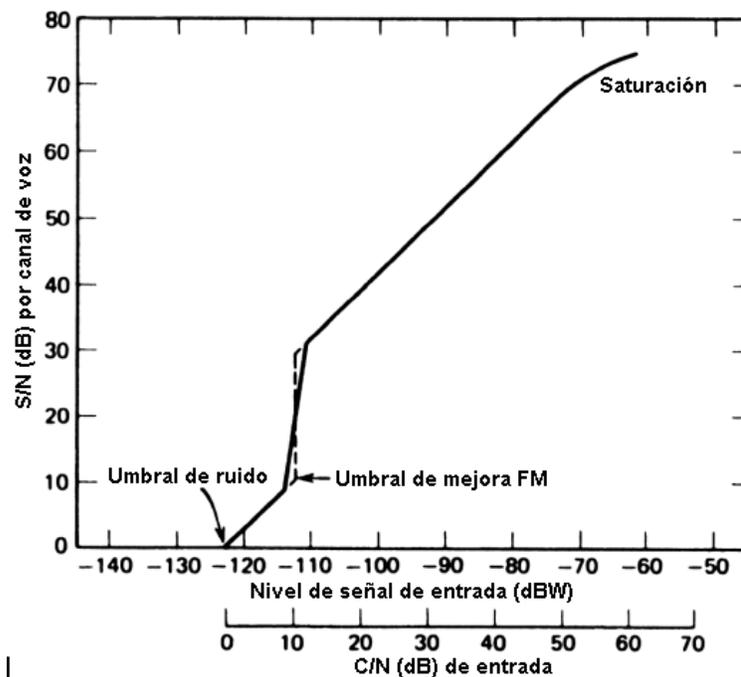


Figura 2.5

C/N Vrs S/N (por canal de voz) en un receptor de microondas FM convencional
(Telecommunications Transmisión Handbook).

La desviación pico puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$f_{DEV}(KHz) = 4.47 \Delta f \log^{-1}(NLR / 20) \quad (2.14.b)$$

Donde:

Δf : Desviación del tono de prueba rms por canal (KHz). Valor normalizado por la UIT-R para sistemas con y sin preacentuación¹.

$$\begin{aligned} \text{NLR} &= -1+4 \log N && \text{si } 12 < N < 240 \\ \text{NLR} &= -15+10 \log N && \text{para } N > 240 \end{aligned} \quad (2.14.c)$$

Donde:

N: Número de canales de voz.

El umbral de mejora FM es un valor que debe agregarse a la relación C/N ya que por el efecto de captura FM, el umbral de ruido se ve incrementado en 10 dB como se puede ver en la figura 2.5. Por lo tanto, la expresión 2.13.b se ve aumentada de la siguiente manera:

$$P_n(\text{dBW}) = -204 \text{ dBW} + 10 \log (B_{IF}) + NF + 10 \text{ dB} \quad (2.15)$$

Sistemas digitales: Un sistema digital debe transmitir un flujo estándar PCM de 8 bits. Mientras un canal de voz analógico ocupa 4 KHz, su contraparte digital ocupa 64 KHz, asumiendo una ocupación de 1 bit/Hz.

El máximo ancho de banda para un sistema digital debe ser entonces:

$$B_{IF(\text{máx})}(\text{KHz}) = N \times 64 \quad (2.16.1)$$

Donde:

N: Número de canales.

El ancho de banda calculado para un sistema digital depende del tipo de modulación. La UIT-R, dentro de la Recomendación SM.1046-1, expresa el ancho de banda como:

¹ Rec. UIT-R F.404-2

$$B_{IF}(\text{MHz}) = BR / \eta \quad (2.16.2)$$

Donde:

BR: Tasa de transmisión (Mbps).

η : Eficiencia del ancho de banda (bps/Hz).

La eficiencia del ancho de banda frecuentemente se utiliza para comparar el rendimiento de una técnica de modulación digital con respecto a otra. En esencia, es la relación de la tasa de bits de transmisión al mínimo ancho de banda requerido, por un esquema de modulación en particular.

Al comparar los resultados calculados con las expresiones 2.14.a y 2.16, puede observarse que el ancho de banda requerido en transmisión digital es considerablemente mayor que para los sistemas analógicos. Esta es una de las mayores desventajas de los sistemas digitales sobre los analógicos.

Los límites impuestos a la magnitud del ancho de banda escogido se encuentran especificados en la parte de reglas y regulaciones (parte 21) de la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos) y en las Recomendaciones F.1101 y SM.1046 de la UIT-R.

2.2.6.2. NIVEL DE SEÑAL RECIBIDA

A partir del nivel de señal recibida deseada se pueden calcular la potencia de transmisión, el tamaño de las antenas y otros parámetros necesarios para cumplir en forma efectiva con los objetivos de desempeño (calidad y disponibilidad) para radioenlaces tanto digitales como analógicos.

Los objetivos de calidad no tienen en cuenta los fenómenos de propagación y para cumplirlos se debe despejar el nivel mínimo de señal recibida a partir de los requerimientos de ruido en el canal de voz para los sistemas analógicos y la velocidad de errores en la transmisión de bits (BER) o símbolos (SER) según el tipo de modulación para los sistemas digitales.

Los objetivos de disponibilidad incluyen todos los eventos que afectan al menos una dirección de transmisión con una duración que al menos exceda 10 segundos consecutivos. En este caso se consideran los fenómenos de propagación y las fallas de los equipos y los tiempos de atención a dichas fallas.

A continuación se presentan los procedimientos a seguir en el cálculo del mínimo nivel de señal recibida aceptable para radioenlaces que operan dentro de los dos sistemas cumpliendo únicamente con los objetivos de calidad.

Los objetivos de disponibilidad serán tratados más adelante.

Radioenlaces analógicos: La fórmula convencional para calcular la relación S/N en un radioenlace FM que se encuentra dentro del estándar para sistemas de transmisión por microondas (EIA RS-252-A) es:

$$(S/N) = \frac{P_{RX}}{2 K T B F (\Delta f_{CH} / f_{BB})^2}$$

Donde:

F: Figura de ruido del receptor.

K: Constante de Boltzman (1.380658 E-23 J/°K).

T: Temperatura absoluta (290 °K).

B: Ancho de banda del canal de voz (3.1 KHz).

Δf_{CH} : Desviación típica del tono del canal de prueba (ajustado por preénfasis) (KHz).

Este valor (Δf por canal) es igual a $1.414 \Delta f$.¹

f_{BB} : Frecuencia central del canal más alto en banda base (KHz).²

En decibeles:

$$S/N(\text{dB}) = P_{RX} + 136.1 - F + 20 \log(\Delta f_{CH}/f_{BB}) \quad (2.17.a)$$

Para planeación de ruido, la UIT-R establece el circuito de referencia de 2500 Km, para el cual, en el punto de recepción no debe haber una potencia de ruido acumulada mayor a 10000 pWp, de los cuales 7500 pWp son permitidos a la porción de radio y 2500 pWp a la sección de multiplexación FDM.

La UIT-R ha establecido los límites para el ruido acumulado en la porción de radio de la siguiente manera:

“La potencia de ruido en un punto de nivel relativo cero, en cualquier canal telefónico del circuito ficticio de referencia de 2500 Km de longitud para sistemas de relevadores radioeléctricos para telefonía con multiplexación por división de frecuencia no exceda de los siguientes valores, elegidos para tener en cuenta las condiciones adversas de propagación:

- *7500 pWp0, potencia sofométrica media, durante un minuto y más del 20% de cualquier mes.*
- *47500 pWp0, potencia sofométrica media, durante un minuto y más del 0.1% de cualquier mes.*
- *1000000 pWp0, potencia no ponderada durante más del 0.01% de cualquier mes.”*³

Si se divide 7500 pWp entre los 2500 Km del circuito de referencia, se puede concluir que no debe haber más de 3 pWp/Km (aprox.) de acumulación de ruido en forma homogénea dentro de la porción de radio.

Despejando la potencia de ruido en el canal de voz derivado a partir de la relación señal a ruido:

$$P_{dBrc0}(dBrc0) = -P_{RX} - 48.1 + NF - 20 \log(\Delta f_{CH}/f_{BB}) \quad (2.17.b)$$

¹ Rec. UIT-R F.404-2

² Rec. UIT-R 399-3

³ Rec. UIT-R F.393-4

Donde:

P_{RX} : Potencia de recepción (dBm).

P: Potencia de ruido acumulado (dBm/0).

NF: Figura de ruido (dB).

En $pWp0$:

$$P_{pWp0}(pWp0) = \log^{-1}\left(\frac{-P_{RX} - 48.1 + NF \text{ dB} - 20\log(\Delta f_{CH}/f_{BB})}{10}\right) \quad (2.17.c)$$

A partir de la expresión 2.17.b y sabiendo que:

$$P_{pWp0}(pWp0) = \sum_{i=1}^n d \ 3pWp/Km \quad (2.17.d)$$

Donde:

d: Distancia del salto (Km).

n: Número de saltos dentro de un radioenlace.

Se puede despejar la P_{RX} mínima para satisfacer la mínima condición de potencia de ruido acumulado.

La potencia de ruido acumulado en la sección múltiplex, incluye los efectos del ruido de intermodulación (IM), causado por la no-linealidad cuando la señal de información en uno o más canales produce rizado o productos de intermodulación que aparecen como ruido ininteligible en otros canales. En un sistema de radio FM, el ruido de intermodulación no lineal puede ser atribuido a tres factores principales: la no-linealidad en los elementos del transmisor, los efectos de multitrayecto en el medio y la no-linealidad en el receptor. La no-linealidad de amplitud y fase es igualmente importante en la contribución al ruido total y cada uno debe ser considerado cuidadosamente.

Radioenlaces digitales: El desempeño de un sistema de radio digital está dado en términos de la tasa de error de bit (BER). La BER de un enlace o sistema puede ser establecida estadísticamente como un porcentaje de tiempo en el peor mes de un año.

E_B/N_0 (Relación de la energía con respecto a la densidad espectral de ruido) es una expresión comúnmente utilizada en sistemas de radio digital y está relacionada con el BER. Para un método particular de modulación, se debe hallar E_B/N_0 a partir del valor de BER requerido. Esto con el fin de hallar la potencia mínima (sin tener en cuenta los efectos desvanecimiento) necesaria en recepción para cumplir con los requerimientos de calidad, utilizando la siguiente expresión:

$$E_B/N_0(\text{teórico})(\text{dB}) = P_{RX} - 10 \log(\text{BR}) - N_0 \quad (2.18.a)$$

Donde:

P_{RX} : Nivel de potencia recibida (dBW).

BR: Tasa de transmisión (bps).

N_0 : Densidad de potencia de ruido (dBW). Corresponde al umbral de ruido en el receptor (expresión 2.13.b) con el valor del ancho de banda de frecuencia intermedia igual a 1 (valor normalizado).

$$N_0(\text{dBW}) = -204 \text{ dBW} + \text{NF} \quad (2.18.b)$$

Donde:

NF: Figura de ruido del receptor (dB).

La densidad de potencia de ruido es la potencia de ruido térmico normalizada a un ancho de banda de 1 Hz.

El valor de E_B/N_0 hallado a partir de la expresión anterior es teórico, pues es válido solo para sistemas ideales. En la práctica, los sistemas reales sufren pérdidas debidas a la implementación de la modulación; estas incluyen: los efectos de filtros reales (los cuales tienen un comportamiento no lineal, introduciendo distorsión) y la

adaptación entre amplificadores no lineales, la implementación de modems de ancho de banda eficiente incluyendo ecualizador de banda base. Por lo tanto:

$$E_B/N_0 \text{ (práctico)}(\text{dB}) = E_B/N_0 \text{ (teórico)} + L_{\text{MOD}} \quad (2.18.c)$$

Donde:

L_{MOD} : Pérdidas por implementación de modulación (dB).

Las pérdidas de implementación pueden ser tan altas como 5 dB o más. El valor por defecto es de 2 dB o menos para el diseño de un sistema eficiente.

En este punto cabe resaltar, que el método de modulación escogido es muy importante para la realización de estos cálculos. La UIT-R realiza una comparación de los diferentes métodos convenientes para transmisión de datos digitales.

“El método de modulación adecuado se selecciona teniendo en cuenta los requisitos del sistema. Por ejemplo, cuando la utilización eficaz del espectro no es especialmente importante, pero si lo es una tolerancia alta a la interferencia, se utilizará un método de modulación sencillo. Las características de los métodos de modulación sencillos son:

- *Fácil aplicación en todas las bandas de frecuencia.*
- *Solidez contra los efectos de propagación.*
- *Tolerancia alta contra todas las clases de interferencias.*
- *Características de alta ganancia del sistema.*

Por otra parte, los métodos de modulación multiestados mejoran la utilización eficaz del espectro en una ruta, las aplicaciones típicas de estos métodos son las redes troncales de gran capacidad, de enlace y de acceso.”¹

Existen tres tipos de modulación para sistemas digitales:

¹ Rec. UIT-R F.1101

- PSK (Modulación por desplazamiento de fase).
- FSK (Modulación por desplazamiento de frecuencia).
- QAM (Modulación de amplitud en cuadratura).

Para cada uno de ellos, el cálculo del valor de E_B/N_0 (teórico) en función del BER utilizando expresiones diferentes.

La UIT-R en la Recomendación F.594-1 establece, para el circuito de referencia de 2500 Km, definido en la Recomendación F.556-1 para el trayecto digital:

“Que la proporción de bits erróneos no exceda los siguientes valores:

- *1×10^{-6} durante más del 0.4% de cualquier mes; tiempo de integración 1 min. (minuto de calidad degradada) (véanse las notas 10 y 11).*
- *1×10^{-3} durante más del 0.054% de cualquier mes; tiempo de integración 1 s. (segundos con muchos errores).*
- *Que el total de los segundos con error, no exceda del 0.32% de cualquier mes.”*

Como primera medida, debe calcularse la probabilidad de error $P(e)$ o SER (*Symbol Error Rate*) a partir del BER utilizando la siguiente expresión:

$$\mathbf{SER = BER \log_2(M)} \quad \mathbf{(2.18.d)}$$

Donde:

M: Número de nivel del tipo de modulación.

El valor de E_B/N_0 puede hallarse para cada tipo de modulación utilizando las expresiones de la función de error (erf) y la función de error complementaria (erfc):

$$\mathbf{erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-r^2} dr} \quad \mathbf{(2.18.e)}$$

$$\mathbf{erfc(z) = 1 - erf(z)} \quad \mathbf{(2.18.f)}$$

PSK:

$$P(e) = 1 / \log_2(M) \operatorname{erf} [\operatorname{sen}(\pi / M) \sqrt{\log_2(M) (E_B/N_0)}] \quad (2.18.g)$$

Donde:

M: Número de fases (PSK).

erf: Función de error.

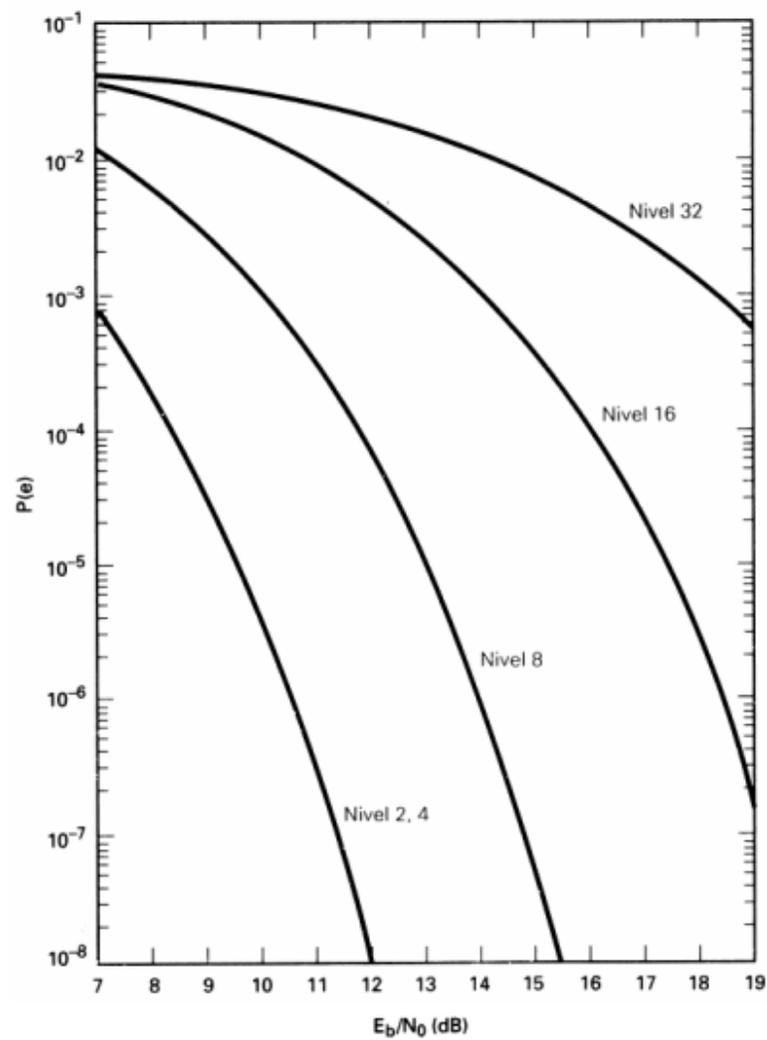


Figura 2.6.a

Probabilidad de error Vs. modulación PSK (Sistemas de Comunicaciones Electrónicas).

QAM:

$$P(e) = 1 / \log_2(L) (L-1) / L \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{\log_2(L)}}{L-1} \sqrt{\frac{E_B}{N_0}} \right] \quad (2.18.h)$$

Donde:

L: Número de niveles de cada eje QAM.

erfc: Función de error complementaria.

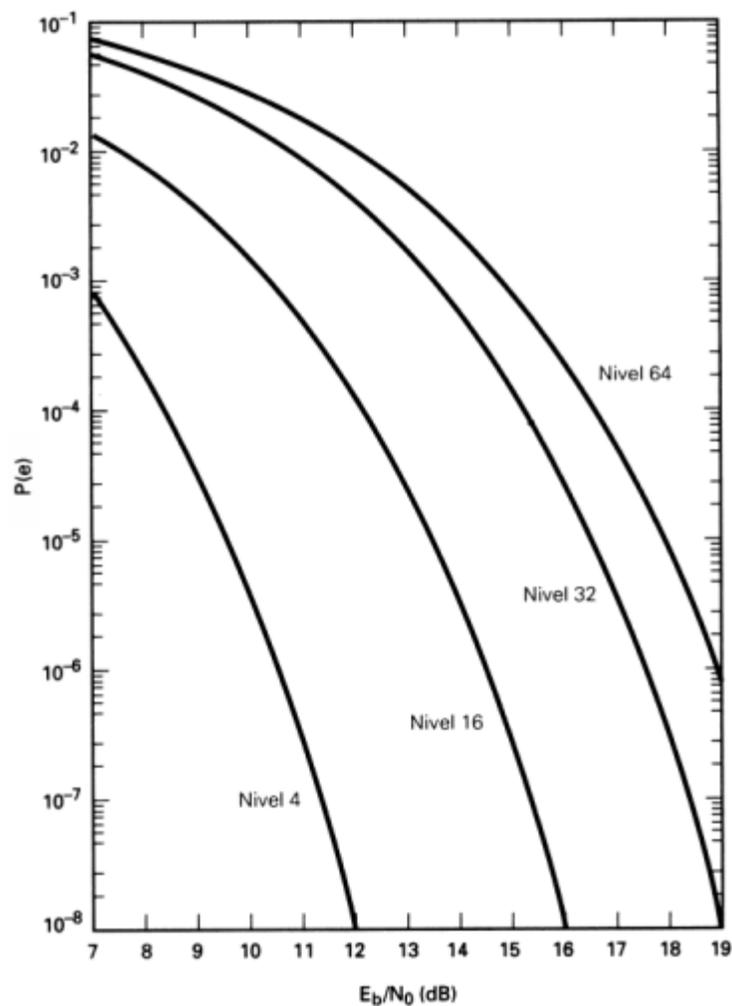


Figura 2.6.b

Probabilidad de error Vs. modulación QAM (Sistemas de Comunicaciones Electrónicas).

FSK:

$$P(e) = \frac{1}{2} \exp(-E_B / 2N_0) \text{ No coherente} \quad (2.18.i)$$

$$P(e) = \text{erfc} [\sqrt{E_B / N_0}] \text{ Coherente} \quad (2.18.j)$$

Donde:

erfc: Función de error complementaria.

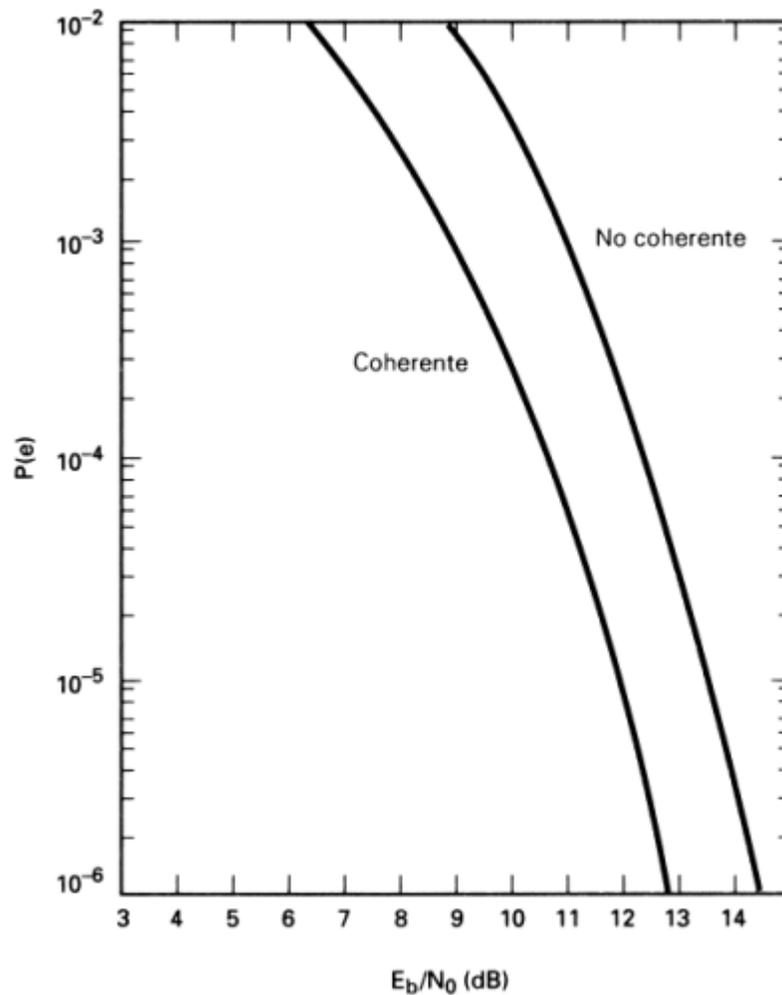


Figura 2.6.c

Probabilidad de error Vs. modulación FSK (Sistemas de Comunicaciones Electrónicas).

2.2.6.3. POTENCIA DE TRANSMISIÓN

El nivel de señal entrante al receptor es, según la siguiente expresión:

$$P_{RX}(dBW) = PIRE - L_{MP} + G_{ARX} - L_{RX} \quad (2.19.a)$$

Donde:

PIRE: Potencia efectiva radiada isotrópicamente (dBW).

L_{MP} : Pérdidas del medio de propagación (dB).

L_{RX} : Pérdidas del sistema de antena de recepción (dB).

G_{ARX} : Ganancia del sistema de antena de recepción (dBi).

La PIRE es la potencia en el haz de radio en relación con la antena isotrópica, radiando desde la antena transmisora y esta dada por la siguiente expresión:

$$PIRE(dBW) = P_{TX} - L_{TX} + G_{ATX} \quad (2.19.b)$$

Donde:

P_{TX} : Potencia de salida del transmisor (dBW).

L_{TX} : Pérdidas del sistema de antena de transmisión (dB).

G_{ATX} : Ganancia del sistema de antena de transmisión (dBi).

El sistema de antena de transmisión incluye la antena y los elementos de la línea de transmisión desde el transmisor hasta la alimentación de la antena.

La ganancia de antena se refiere a la ganancia de esta en la dirección deseada. A una frecuencia dada, la ganancia de una antena parabólica es función de su área efectiva y se puede expresar mediante la fórmula 2.19.c.

$$G_A(dBi) = 10 \log [\eta(D \pi / \lambda)^2] \quad (2.19.c)$$

Donde:

D: Diámetro de la antena (m).

η : Eficiencia.

λ : Longitud de onda (m).

Por otro lado, las pérdidas del sistema de antena son introducidas por la relación de onda estacionaria (SWR) de la misma antena y por el conjunto de elementos necesarios para conectarla al transmisor (expresión 2.19.d).

$$\text{SWR(dB)} = 20 \log (\text{VSWR}) \quad (2.19.d)$$

Donde:

VSWR: Relación de onda estacionaria. Este parámetro lo da el fabricante dentro del manual que contiene los parámetros de la antena.

Los elementos que normalmente también hacen parte del sistema de antena son el alimentador y la línea de transmisión. Esta última puede ser un cable coaxial o guía de onda dependiendo de la frecuencia. Adicionalmente, dependiendo de las necesidades de conexión del sistema de antena, se puede necesitar de uno o más de los siguientes dispositivos:

- **Circulador:** Se utiliza dentro de un circuito de ramificación para juntar o separar las portadoras que viajan dentro de una sola señal dependiendo del extremo donde esté conectado (transmisor o receptor respectivamente).
- **Acopladores:** Encargados de conducir y adaptar la energía entre conexiones de guías de onda.
- **Desfasador:** Permite un cambio ajustable en el ángulo de fase de la onda que circula a través de él. Debido a que la diferencia de fase se determina por la velocidad de propagación, la cual depende de la naturaleza del medio, un cambio de medio produce un cambio de fase que debe ser corregido.

- **Radón:** Cubierta que se superpone a la antena con el fin de protegerla de agentes externos tales como polvo y sal que pueden acumularse en el plato, ocasionando daños que afectan el desempeño del sistema.

Las pérdidas introducidas por el uso de estos dispositivos dependen del material de fabricación y de muchos otros factores cuyos valores son especificados por los fabricantes dentro de los manuales que se expiden para tal fin. Existen otros dispositivos no listados aquí por no ser de uso común, pero que también pueden ser consultados dentro de dichos manuales si su uso es requerido. La escogencia de algún dispositivo en especial depende de los requerimientos tanto funcionales como económicos.

2.2.7. DISPONIBILIDAD E INDISPONIBILIDAD

La fiabilidad es un concepto de gran importancia en la planeación de radioenlaces de microondas ya sea de un solo salto o de varios que sean parte de una red. La fiabilidad depende del tiempo en que el sistema sale de servicio debido a la propagación y del tiempo en el que el sistema sale de servicio debido al mal desempeño de los equipos o fallas.

El concepto de disponibilidad de un equipo o sistema consiste en el porcentaje de tiempo durante el cual desempeña satisfactoriamente sus funciones. En otras palabras corresponde a la probabilidad de que el sistema responda a las condiciones de funcionamiento en un momento determinado.

Durante el tiempo total en el que opera un sistema, se pueden definir dos componentes: un porcentaje de tiempo en el que el sistema funciona satisfactoriamente (disponibilidad) y el tiempo restante, durante el cual se considera que el enlace está fuera de servicio (indisponibilidad).

El desempeño de un radioenlace de microondas digital se evalúa con base en la indisponibilidad. La ocurrencia y duración de este fenómeno depende de muchos factores, componentes derivados de las siguientes causas:

- Equipo radioeléctrico.

- Fuentes de alimentación.
- Equipo de multiplexación.
- Medio de propagación.
- Interferencias.
- Actividades humanas.

También debe tenerse en cuenta el tiempo promedio necesario para el restablecimiento del servicio.

2.2.7.1. CRITERIOS DE INDISPONIBILIDAD

La UIT-R especifica las situaciones de indisponibilidad y el mínimo valor de indisponibilidad admisible así:

“El objetivo de disponibilidad adecuado para un circuito ficticio de referencia de 2500Km aplicable a sistemas de relevadores radioeléctricos con multiplexación por distribución de frecuencia (Rec. UIT-R F.392) y para un trayecto digital ficticio de referencia de 2500Km aplicable a sistemas de relevadores radioeléctricos digitales (Rec. UIT-R F.556-1) sea del 99.7% del tiempo, considerándose este porcentaje para que resulte estadísticamente válido sobre un periodo suficientemente largo, probablemente superior a un año; el periodo de tiempo se halla en estudio”.¹

Este valor de disponibilidad mínima, corresponde al 0.3% de indisponibilidad.

La UIT-R establece también:

“Este valor de 0.3, es provisional y se reconoce, en la práctica que el valor elegido puede caer dentro de la gama 0.1 a 0.5. La selección de un valor específico de esta gama depende de la asignación óptima del tiempo de interrupción entre las distintas causas, que puede no ser la misma al tenerse en cuenta las condiciones locales (a saber, propagación, factores

¹ Rec. UIT-R F.557-4

geográficos, distribución de la población y organización del mantenimiento).¹

2.2.7.2. CAUSAS DE INDISPONIBILIDAD

La UIT-R establece que los planificadores del sistema deben tener en cuenta todas las causas de interrupción o degradación de la calidad que afectan la indisponibilidad del sistema.

Las principales causas de indisponibilidad en los sistemas de relevadores radioeléctricos son el equipo y el medio de propagación.²

La expresión que define la indisponibilidad es la siguiente:

$$U_T(\%) = (U_E + U_P + U_{EM}^* + U_{EF}^*) \times 100 \quad (2.20)$$

* Son despreciables con respecto a los otros parámetros pues corresponden a la ocurrencia de dos eventos simultáneos.

Donde:

U_T : Indisponibilidad total.

U_E : Indisponibilidad debida a los equipos.

U_P : Indisponibilidad debida al trayecto.

U_{EM} : Indisponibilidad debida a las fallas del equipo o desvanecimiento presente durante el mantenimiento preventivo.

U_{EP} : Indisponibilidad del sistema debido a falla del equipo en simultánea con desvanecimiento.

2.2.7.3. INDISPONIBILIDAD DEBIDA A LOS EQUIPOS

Está ligada a la probabilidad, de que este cumpla su función bajo ciertas condiciones de operación y del tiempo necesario para su reparación.

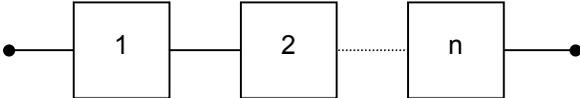
¹ Rec. UIT-R 695

² En el anexo I de la Recomendación UIT-R F.557-4 puede encontrarse más información.

La fiabilidad de un equipo se caracteriza por el factor MTBF (tiempo medio entre fallas), sin embargo, para evaluar la indisponibilidad, se introduce el concepto de tiempo fuera de servicio designado como MTTR (tiempo medio de reparación), el cual depende de la versatilidad del equipo para ser reparado y de los programas de mantenimiento y atención a fallas establecidos por la persona que se encuentre a cargo del sistema.

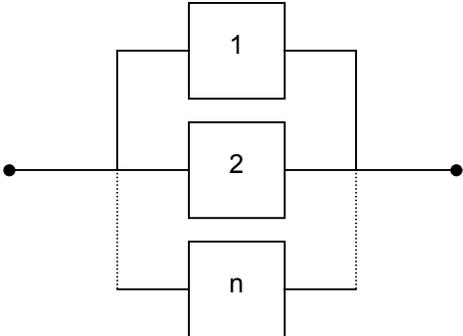
La indisponibilidad de cada uno de los dispositivos que hacen parte del equipo de radio viene dada por la expresión : ¹

$$U_{Ei} = \text{MTTR}/(\text{MTTR}+\text{MTBF}) \quad (2.21.a)$$



$$U_E = \sum_{i=1}^n U_{Ei} \quad (2.21.b)$$

(a)



$$U_E = \prod_{i=1}^n U_{Ei} \quad (2.21.c)$$

(b)

Figura 2.7

Configuración de equipos. (a) en serie (b) en paralelo.

Con el fin de facilitar los cálculos de la indisponibilidad, es conveniente definir un modelo o diagrama en bloques para el sistema, que represente los módulos conectados, teniendo en cuenta las relaciones lógicas entre sí o el grado de

¹ Inf. UIT-R 1053

prioridad que tienen dentro del sistema. Este diagrama puede tener configuración serie, paralelo o mixta (figura 2.7).

2.2.7.4. INDISPONIBILIDAD DEBIDA AL TRAYECTO DE PROPAGACIÓN

Se encuentra relacionada con la probabilidad de ocurrencia del desvanecimiento real, el cual está asociado con la probabilidad de ocurrencia del desvanecimiento tipo Rayleigh, el terreno, el clima, la distancia y la frecuencia.

Se denomina desvanecimiento a toda disminución del nivel de señal recibido con respecto al nivel recibido en condiciones ideales. A la diferencia entre dichos niveles se le llama profundidad de desvanecimiento y se expresa en dB.

Se denomina “margen de desvanecimiento” (figura 2.8) a la potencia extra en dB que debe agregarse con el fin de compensar las posibles caídas de la señal debidas al fenómeno de desvanecimiento por debajo del nivel mínimo necesario a la entrada del receptor.

Hasta este punto, no se habían considerado las condiciones de desvanecimiento en el cálculo del nivel de señal mínima recibida (P_{RX}). Estas condiciones aparecen debido a factores como la rugosidad del trayecto, clima, frecuencia y trayectoria.

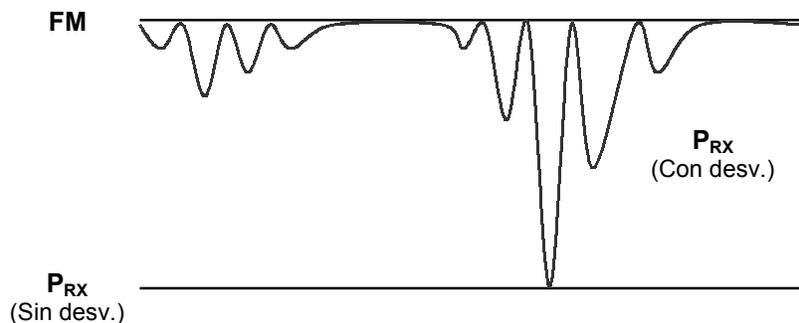


Figura 2.8

Margen de desvanecimiento.

Una de las causas principales del desvanecimiento proviene de las capas de la atmósfera o de la superficie y la condición de la tierra donde se encuentra el trayecto. Este tipo de desvanecimiento se conoce como multitrayectoria y ocasiona

interferencia tanto destructiva como constructiva en el nivel de la señal en el receptor. Naturalmente, las reflexiones en el suelo se pueden eliminar en muchos casos mediante el ajuste del punto de reflexión.

En los sistemas analógicos, así como en los digitales de baja capacidad ¹, en los que no existe degradación ocasionada por la interferencia entre símbolos, el margen de desvanecimiento calculado se define regularmente como “margen de desvanecimiento plano” o térmico (FFM), que corresponde a la máxima atenuación plana que genera una aceptable BER o S/N.

Cuando se deben considerar las distorsiones dentro de banda, como en el caso de los sistemas digitales de mediana y alta capacidad, se define un margen de desvanecimiento diferente, cuyas componentes se adicionan al FFM, el “margen de desvanecimiento compuesto” o neto (CFM).

Las contribuciones del margen de desvanecimiento compuesto se incluyen en la siguiente expresión:

$$\text{CFM} = 10 \log(10^{-\text{FFM}/10} + 10^{-\text{DFM}/10} + 10^{-\text{EIFM}/10} + 10^{-\text{AIFM}/10}) \quad (2.22)$$

Donde:

FFM: Margen de desvanecimiento plano o térmico (dB).

DFM: Margen de desvanecimiento dispersivo (dB). Es definido por el fabricante del equipo de radio. Está determinado por el tipo de modulación, la efectividad de la ecualización empleada en el extremo receptor y el tiempo de retardo de la componente reflejada, cuyo valor por defecto es de 6.3 ns.

EIFM: Margen de desvanecimiento de interferencia externa (dB). En ausencia de interferencia por canal adyacente es simplemente IFM. Su valor por defecto es 1 dB pero depende del objetivo del CFM.

¹ La clasificación por capacidad de los sistemas digitales se encuentra más adelante, en la tabla 2.8.

AIFM: Margen de desvanecimiento de interferencia por canal adyacente (dB). La degradación en el umbral del receptor es debida a la interferencia de canal adyacente en la señal transmitida sobre el mismo trayecto dentro de un solo sistema.

La indisponibilidad de trayecto corresponde a la fracción de tiempo media de desvanecimiento durante el mes más desfavorable o probabilidad de que se rebase el margen de desvanecimiento calculado para un sistema; por lo tanto, la disponibilidad del trayecto se define como la porción de tiempo para la cual en recepción, el nivel de señal es tal que se rebasa el margen de desvanecimiento, permitiendo así que el sistema funcione correctamente. Los estándares de la UIT-R no suministran objetivos de disponibilidad para enlaces de longitud diferente a la del circuito de referencia de 2500 Km, los objetivos de indisponibilidad para rutas con longitud d , se pueden derivar provisionalmente del valor dado para el circuito de referencia (U_p^*) (expresión 2.23.a).

$$U_p = U_p^* d / 2500 \quad \text{si } 280 < d < 2500 \text{ Km} \quad (2.23.a)$$

$$U_p = U_p^* 280 / 2500 \quad \text{si } d < 280 \text{ Km}$$

Donde:

U_p : Indisponibilidad del trayecto (%).

La fracción de tiempo media de desvanecimiento durante el mes más desfavorable puede aproximarse por la siguiente expresión:

$$P(FM > X) = K d^{3.6} f^{0.89} (1 + |\xi_p|)^{1.4} \times 10^{-FM/10} \quad (2.23.b)$$

Donde:

$P(FM > X)$ o U_p^* : Probabilidad de que se rebase el margen de desvanecimiento X . Corresponde al valor de indisponibilidad del trayecto para el circuito de referencia de 2500 Km.

X: Margen de desvanecimiento calculado a partir del requerimiento de disponibilidad (dB).

FM: Profundidad del desvanecimiento (dB). (FFM para sistemas analógicos, CFM para digitales).

K: Factor geoclimático que depende de la zona geográfica.

ξ_p : Inclinación del trayecto (mrad).

f: Frecuencia de operación (GHz).

d: Longitud del trayecto (Km).

El siguiente fragmento fue tomado de la Recomendación UIT-R P.530-8, que presenta los métodos para calcular cada uno de los parámetros incluidos dentro de la expresión anterior según la ubicación del enlace:

- **Enlaces de interior:** Son aquellos en los que la totalidad del perfil del trayecto se halla por encima de 100 m de altitud (s.n.m.) o dista más de 50 Km de la línea costera más cercana, o en los que parte o la totalidad del perfil del trayecto se halla por debajo de 100 m de altitud en el caso de un enlace que dista, en su totalidad, más de 50 Km de la línea costera, pero que existe una porción de tierra elevada de altura superior a 100 m que se interpone entre esa parte del enlace y la línea costera.

Si no se dispone de datos medidos para K, puede estimarse para enlaces de zonas interiores, a partir de la siguiente relación empírica con respecto a la variable climática p_l (es decir el porcentaje de tiempo en el que el gradiente de refractividad en los 100 m más bajos de la atmósfera es menor que -100 unidades N/Km durante el mes más desfavorable medio estimado):

$$K = 5 \times 10^{-7} \times 10^{(-0.1(C_0 - C_{Lat} - C_{Lon})p_l^{1.5})} \quad (2.23.c)$$

El valor de C_0 viene dado para tres gamas de altura de la más baja de las antenas transmisora y receptora y tres tipos de terreno (tabla 2.7).

Altura de antena más baja y tipo de terreno del trayecto	C₀(dB)
Antena de poca altura (0-400m) - Terreno plano: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de antena más baja inferior a 400m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	0
Antena de poca altura (0-400m) – Terreno ondulado: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de antena más baja inferior a 400m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente onduladas.	3.5
Antena de altura media (400-700m) - Terreno plano: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de antena más baja en la gama de 400-700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	2.5
Antena de altura media (400-700m) - Terreno ondulado: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de antena más baja en la gama de 400-700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente onduladas.	6
Antena de gran altura (>700m) – Terreno plano: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de antena más baja superior a 700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	5.5
Antena de gran altura (>700m) – Terreno ondulado: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de antena más baja superior a 700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente onduladas.	8
Antena de gran altura (>700m) – Terreno montañoso: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de antena más baja superior a 700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente montañosas.	10.5

Tabla 2.7

Valores del coeficiente C₀ para las tres gamas de alturas de antena más baja y tipos de terreno (Rec UIT-R P.530-8).

El coeficiente C_{Lat} que depende de la latitud L, donde se encuentre ubicado el punto medio del trayecto viene dado por:

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Lat}} &= 0 && \text{dB} && \text{para } L < 53^\circ \\
 C_{\text{Lat}} &= -53 + L && \text{dB} && \text{para } 53^\circ < L < 60^\circ \\
 C_{\text{Lat}} &= 7 && \text{dB} && \text{para } L > 60^\circ
 \end{aligned}$$

El coeficiente C_{Lon} viene dado por:

$$C_{\text{Lon}} = -3 \text{ dB} \quad \text{para longitudes de América del norte y América del sur.}$$

$C_{Lon} = 3 \text{ dB}$ para longitudes de Europa y África.

$C_{Lon} = 0 \text{ dB}$ para las demás longitudes.

El valor de la variable climática pl se estima tomando el valor excedido más elevado del gradiente de -100 unidades N/Km de los mapas correspondientes a los cuatro meses representativos estacionalmente, a saber febrero, mayo, agosto y noviembre, que se indican en las figuras 7 a 10 de la Recomendación UIT-R P.453-8.

- **Enlaces costeros sobre/cerca de masas de agua grandes:** Se puede considerar que el enlace atraviesa una zona costera si una fracción rc del perfil del trayecto se halla a menos de 100 m por encima del nivel medio de una masa de agua grande y se encuentra dentro de una distancia de 50 Km con respecto a su costa y si la latitud del terreno no es superior a 100 m entre cada fracción del perfil de trayecto y la costa.

Si no se dispone de datos medidos para K en el caso de enlaces costeros sobre/cerca de masas de agua grandes, puede estimarse K a partir de:

$$K = K_i(rc) = 10^{((1-rc) \log K_i + rc \log K_{cl})} \quad \text{para } K_{cl} > K_i \quad (2.23.d)$$

$$K = K_i \quad \text{para } K_{cl} < K_i$$

Donde:

K : Factor geoclimático que depende de la zona geográfica.

rc : fracción del perfil de trayecto cuya altitud por encima del nivel medio de la masa de agua en cuestión es inferior a 100 m y se encuentra dentro de una distancia de 50 Km con respecto a su costa sin que exista un terreno con una elevación superior a 100 m que se interponga entre el trayecto y la costa.

K_i : viene dado por la expresión para K

Y

$$K_{cl} = 2.3 \times 10^{-4} \times 10^{(-0.1C_0 - 0.011 |\xi|)} \quad (2.23.e)$$

Donde:

$|\xi|$: Inclinación del trayecto que esta dada por:

$$|\xi| \text{ (mrad)} = |h_A - h_B| / d \quad (2.23.f)$$

Donde:

d: Longitud del trayecto (Km)

h_A y h_B : Alturas de antena s.n.m.

- **Enlaces costeros sobre/cerca de masas de agua medianas:** Si no se dispone de datos medidos para K en el caso de enlaces costeros sobre/cerca de masas de agua medianas puede estimarse K a partir de :

$$\begin{aligned} K &= K_m(rc) = 10^{((1 - rc) \log K_i + rc \log K_{cm})} \quad \text{para } K_{cm} > K_i \\ K &= K_i \quad \text{para } K_{cm} > K_i \end{aligned} \quad (2.23.g)$$

Y:

$$K_{cm} = 10^{0.5(\log K_i + \log K_{cl})} \quad (2.23.h)$$

En caso de incertidumbre sobre si el tamaño de la masa de agua en cuestión es mediana o grande, deberá calcularse K mediante la siguiente expresión:

$$K = 10^{((1 - rc) \log K_i + 0.5 rc(\log K_{cm} + \log K_{cl}))} \quad (2.23.i)$$

Para calcular el porcentaje de tiempo P_w , durante el cual se rebasa el margen de desvanecimiento FM, durante el mes más desfavorable se utiliza la siguiente expresión:

$$P_w(\%) = K d^{3.6} f^{0.89} (1 + |\xi|)^{-1.4} \times 10^{-FM/10} \quad (2.23.j)$$

Esta ecuación se aplica únicamente a sistemas de banda estrecha. Se considera válida para desvanecimientos superiores a unos 15 dB o al valor rebasado durante el 0.1% del mes más desfavorable según cual sea mayor.

- **Método para diversos porcentajes de tiempo:** Este método da la predicción del porcentaje de tiempo en que se excede el margen de desvanecimiento, y combina la distribución de desvanecimiento profundo que se da en el punto precedente con un procedimiento empírico de interpolación para un desvanecimiento rasante de valor creciente de hasta 0 dB.
 - **Paso 1:** Calcular el factor de ocurrencia de propagación por trayectos múltiples, P_0 :

$$P_0 = K d^{3.6} f^{0.89} (1 + |\xi|)^{-1.4} \quad (2.23.k)$$

El valor de P_0 representa los efectos del factor radioclimático K , la longitud y la inclinación del trayecto y la frecuencia. El método es válido para valores de P_0 de hasta 2000.

- **Paso 2:** Calcular el valor el margen de desvanecimiento A_t , al que se produce la transición entre la distribución de desvanecimiento profundo y la distribución de desvanecimiento rasante obtenida por medio del procedimiento de interpolación empírica:

$$A_t = 25 + 1.2 \log P_0 \quad (2.23.l)$$

- **Paso 3a:** Si el margen de desvanecimiento requerido FM es igual o mayor que A_t , calcular el porcentaje de tiempo en que se excede FM en el mes más desfavorable medio:

$$P_w(\%) = P_0 10^{-FM/10} \quad (2.23.m)$$

- **Paso 3b:** Si el margen de desvanecimiento requerido FM es menor que A_t , calcular el porcentaje de tiempo P_t , en que se excede A_t en el mes más desfavorable medio:

$$P_t(\%) = P_0 10^{-FM/10} \quad (2.23.n)$$

Calcular q_a' a partir del desvanecimiento de transición A_t y del porcentaje de tiempo de transición p_t :

$$q_a' = -20 \log (-\ln((100 - P_t) / 100)) / A_t \quad (2.23.o)$$

Calcular q_t a partir de q_a' y del desvanecimiento de transición A_t :

$$q_t = \frac{q_a' - 2}{\left(1 + 0.3 \times 10^{\frac{-A_t}{20}}\right) 10^{-0.016A_t}} - 4.3 \left(10^{\frac{-A_t}{20}} + \frac{A_t}{800}\right) \quad (2.23.p)$$

Calcular q_a a partir del desvanecimiento requerido FM:

$$q_a = 2 + 10^{-0.016 \cdot FM} \left(1 + 0.3 \times 10^{\frac{-FM}{20}}\right) \left(q_t + 4.3 \left(10^{\frac{-FM}{20}} + \frac{FM}{800}\right)\right) \quad (2.23.q)$$

Calcular el porcentaje P_w en el que se excede el margen de desvanecimiento FM en el mes más desfavorable medio:

$$P_w(\%) = 100 \left(1 - \exp\left(-10^{\frac{-q_a FM}{20}}\right)\right) \quad (2.23.r)$$

2.2.8. MÉTODOS DE PROTECCIÓN

Cuando los desvanecimientos se presentan en exceso, causando una pérdida total de la señal recibida, se pierde la continuidad del servicio. Para evitar una interrupción del servicio durante los periodos de desvanecimiento severos o fallas en el equipo, se debe disponer de un equipo alternativo, denominado arreglo con “conmutación de protección”. Esencialmente hay dos tipos de arreglos: diversidad y respaldo en línea.

2.2.8.1. DIVERSIDAD

La diversidad sugiere que existe más de una ruta o método de transmisión disponible, entre un transmisor y un receptor. En un sistema de microondas, el propósito de utilizar la diversidad es incrementar la confiabilidad del sistema aumentando su disponibilidad.

El uso de la diversidad tiene las siguientes ventajas:

- Tiende a reducir el margen de desvanecimiento sobre la señal combinada.
- Provee mejora en la fiabilidad del equipo.
- Dependiendo del tipo de combinador que se utilice, se puede obtener alguna mejoría en la relación S/N en la salida combinada.

La señal de radio entrante en el punto de recepción sobre trayectos separados puede tener niveles de señal no correlacionados. En un instante de tiempo, una señal sobre un trayecto puede ser deteriorada debido a una condición de desvanecimiento, mientras que la otra señal idéntica sobre el otro trayecto no lo esté.

Primero se debe considerar que los trayectos deben estar separados en una magnitud apropiada. Dicha separación puede ser en:

- **Espacio:** Dos antenas en recepción que reciben la misma señal, afectada por el ángulo de llegada y el tipo de polarización. Este tipo de diversidad es apropiado

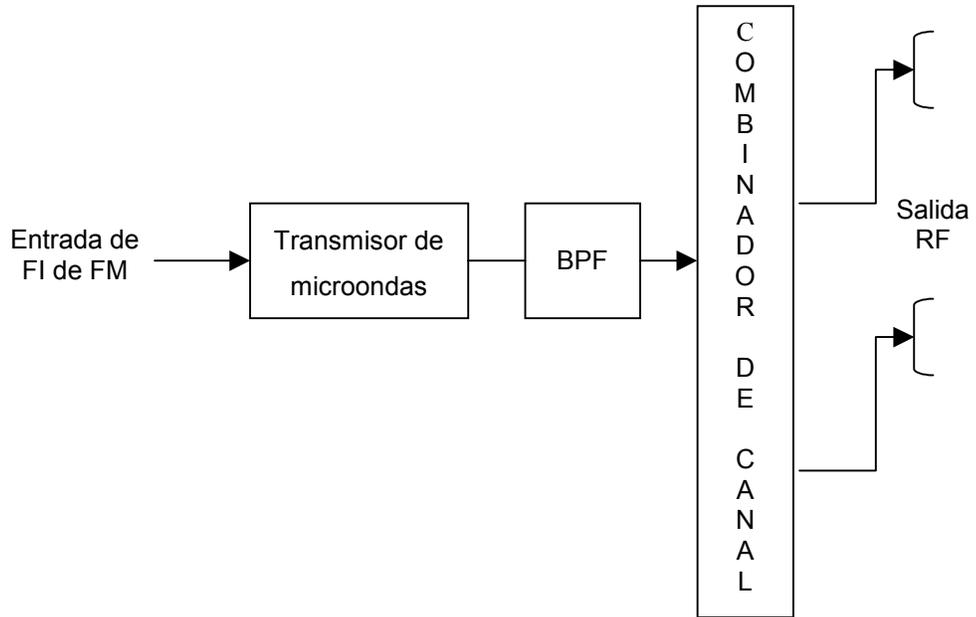
para reducir los efectos de la propagación por trayectorias múltiples originados en la superficie.

- **Frecuencia:** Transmisión de la misma información sobre señales en diferentes frecuencias. Este tipo de diversidad es utilizado cuando la señal se ve afectada por desvanecimientos selectivos en frecuencia.
- **Ángulo:** Cuando se utilice la diversidad en el espacio, debe utilizarse también la diversidad en ángulo inclinando las antenas hacia arriba con distintos ángulos. La diversidad en ángulo también debe emplearse en situaciones en que no es posible emplear la diversidad adecuada en el espacio o para disminuir las alturas de los mástiles.
- **Tiempo:** Un tiempo de retardo entre dos señales idénticas en trayectos paralelos.
- **Trayecto:** Señales que llegan en trayectos separados geográficamente. Se utiliza cuando sea posible enviar una señal por dos caminos distintos, de características y condiciones ambientales diferentes.

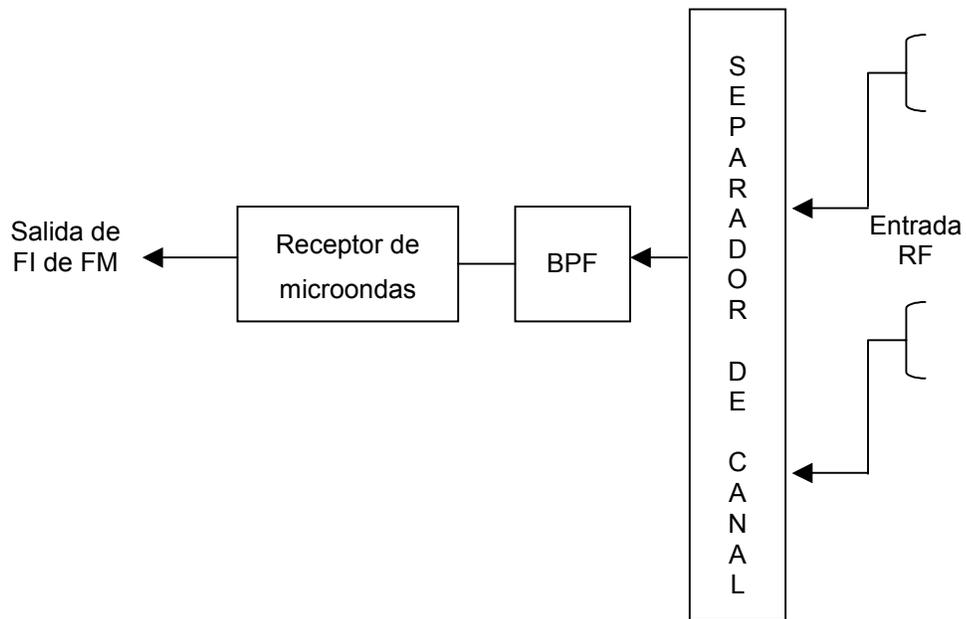
Los tipos de diversidad más utilizados en los sistemas de radioenlaces son los de espacio, frecuencia y trayecto.

2.2.8.1.1. DIVERSIDAD DE ESPACIO

Cuando se usa este tipo de diversidad (figura 2.9), las dos trayectorias se obtienen en el extremo receptor a partir de dos receptores con salida combinada. Cada receptor se conecta a su propia antena, las cuales se encuentran sobre la misma torre y cuya separación debe ser de al menos entre 70 y 100 longitudes de onda para evitar el desvanecimiento sobre ambas trayectorias simultáneamente.



(a)



(b)

BPF: Filtro pasa banda

Figura 2.9

Equipos para diversidad de espacio. (a) en transmisión y (b) en recepción.

La separación de antenas requerida para una óptima operación puede ser calculada utilizando la expresión 2.24.

$$S(m) = 3 \lambda R_E / d \quad (2.24)$$

Donde:

S: Separación entre antenas (m).

λ : Longitud de onda de la señal recibida (m) .

R_E : Radio efectivo de la tierra (Km).

d: Longitud del trayecto (Km).

Para verificar si la utilización de la diversidad de espacio es la más adecuada para el caso específico de un radioenlace, la siguiente expresión es de gran utilidad:

$$\delta = e^{-0.0021Sf(0.4d)^{1/2}} \quad (2.25)$$

Donde:

δ : Factor de correlación.

S: Separación vertical entre antenas (m).

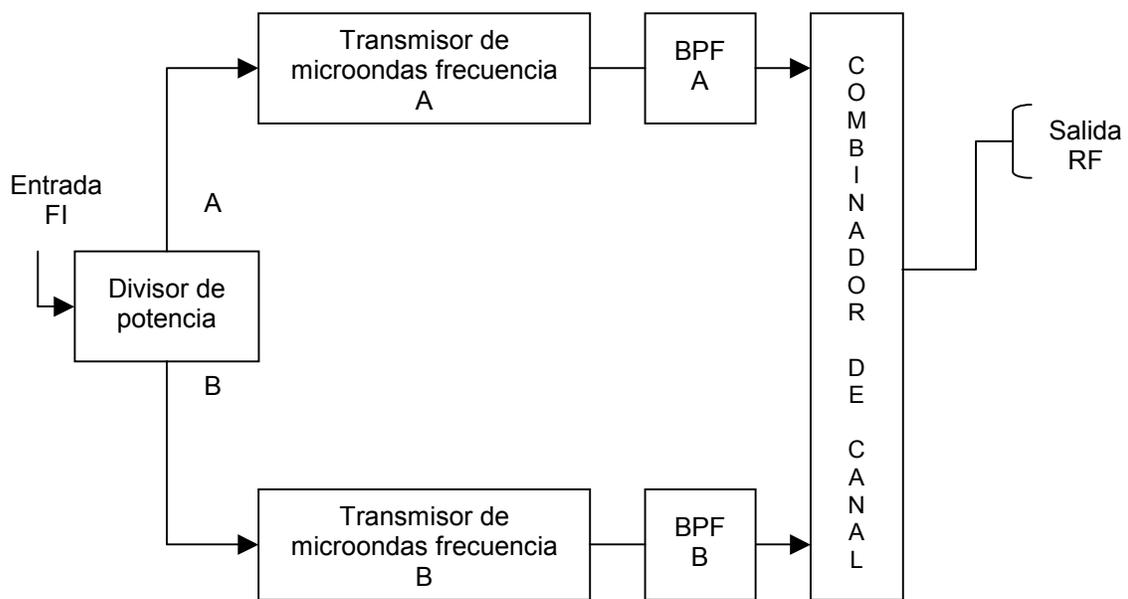
f: Frecuencia de operación (GHz).

d: Longitud del trayecto (Km).

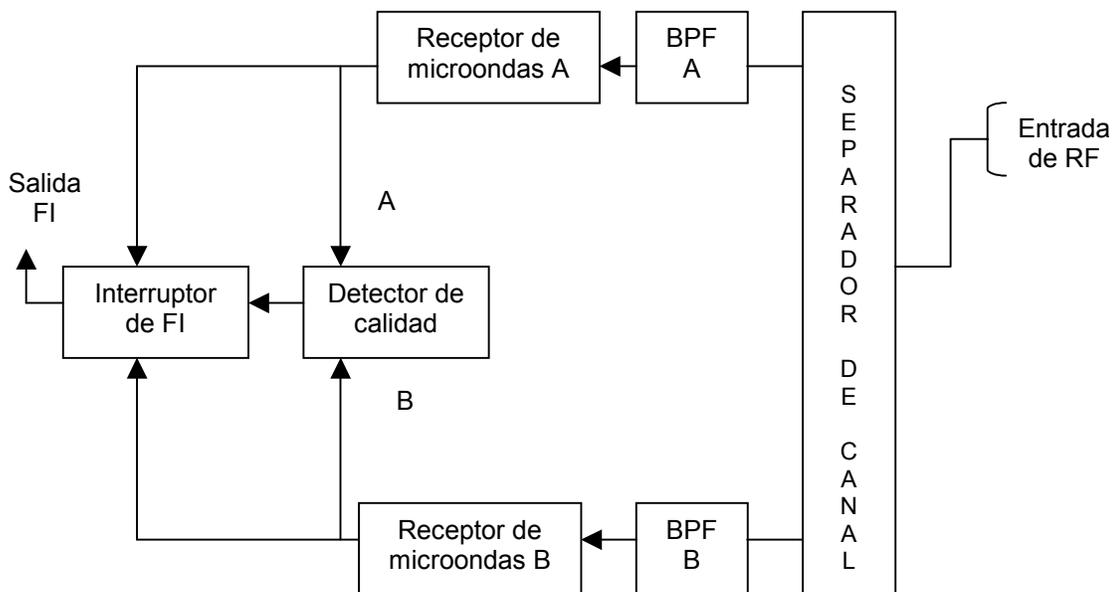
Si $\delta = 1$, el trayecto desde la antena transmisora hasta las antenas de recepción tiene el mismo comportamiento por lo que sería inútil utilizar diversidad de espacio.

Si $\delta = 2$, es mejor utilizar diversidad de trayecto si se dan las condiciones.

Si $\delta \leq 0.6$, la probabilidad de desviación es menor y por lo tanto la diversidad de espacio es aplicable.

2.2.8.1.2. DIVERSIDAD DE FRECUENCIA

(a)



(b)

Figura 2.10

Equipos para diversidad de frecuencia. (a) en transmisión y (b) en recepción.

La diversidad en frecuencia (figura 2.10) es más compleja y costosa, pero proporciona mayor seguridad.

La diversidad de frecuencia requiere de dos transmisores, los cuales se modulan simultáneamente con la misma señal, pero transmiten a frecuencias diferentes. Cuando el desvanecimiento afecta a una frecuencia, es muy probable que a la otra no.

Este tipo de diversidad proporciona redundancia de equipo simple y completa, con la ventaja del funcionamiento de dos trayectorias completas de extremo a extremo. En caso de que uno de los transmisores falle, no hay interrupción del servicio.

La desventaja principal de este tipo de diversidad, es que al ser necesaria la utilización de dos frecuencias se incrementan los costos por el requerimiento de otra licencia, ya que el espectro es limitado y además la consecución de una frecuencia que permita una separación apropiada es difícil debido a la saturación del espectro.¹

2.2.8.1.3. MEJORA POR DIVERSIDAD

La mejora que se logra utilizando alguna de estas técnicas depende del grado de descorrelación entre las señales que se transmiten por las ramas de diversidad del sistema.

Para los sistemas digitales de banda ancha, la mejora por diversidad depende de las estadísticas de la distorsión dentro de banda. En el caso de los sistemas analógicos de banda estrecha, basta con determinar la mejora en las estadísticas del margen de desvanecimiento para una sola frecuencia.

Los factores de mejora son mayores a 1, pues estos inciden en una disminución de la indisponibilidad del sistema de la siguiente manera:

$$U_p(\text{con diversidad}) = U_p(\text{sin diversidad}) / I_D \quad (2.26)$$

¹ El Informe 784-2 contiene información más detallada acerca de los tipos de diversidad, sus usos, ventajas y desventajas.

Donde:

U_P : Indisponibilidad del trayecto (%).

I_D : Factor de mejora por la utilización de alguna de las técnicas de diversidad.

- **Mejora por diversidad de espacio:** Desempeña una función importante en el incremento de la disponibilidad, lo que permite un decremento en los niveles de interferencia que degradan el margen de desvanecimiento compuesto de muchos enlaces digitales. El factor de mejora por la utilización de diversidad de espacio está dado por la expresión 2.27. ¹

$$I_{SD} = (1 - e^{-3.34 \times 10^{-4} S^{0.87} f^{-0.12} d^{0.48} P_0^{-1.04}}) 10^{\frac{FM - V}{10}} \quad (2.27)$$

Donde:

S: Separación vertical entre antenas (m).

f: Frecuencia de operación (GHz).

d: Longitud del trayecto (Km).

P_0 : Factor de ocurrencia de propagación por trayectos múltiples (%).

FM: Margen de desvanecimiento (dB). (FFM para sistemas analógicos, CFM para digitales).

Y además:

$$V = |G_{ATX} - G_{ARX}|$$

Donde:

G_{ATX} : Ganancia de la antena de transmisión (dB).

G_{ARX} : Ganancia de la antena de recepción (dB).

Para que la mejora por diversidad de espacio sea efectiva al ser implementada, debe tener un valor entre 10 y 200. Además, la separación entre antenas debe

estar entre 3 y 23 m, la frecuencia de trabajo entre 2 y 11 GHz, y la longitud del trayecto entre 43 y 240 Km.

- **Mejora por diversidad de frecuencia:** Al igual que la diversidad de espacio, diversidad de frecuencia introduce una mejora en la disponibilidad del sistema, la cual está dada por la siguiente expresión:¹

$$I_{FD} = \frac{80}{fd} \left(\frac{\Delta f}{f} \right) 10^{\frac{FM}{10}} \quad (2.28)$$

Donde:

f: Frecuencia central de la banda (GHz).

d: Longitud del trayecto (Km).

Δf : Separación de frecuencias (GHz).

$\Delta f/f$: Separación relativa de frecuencias (%).

FM: Margen de desvanecimiento (dB). (FFM para sistemas analógicos, CFM para digitales).

Para que la mejora por diversidad de frecuencia sea efectiva al ser implementada, debe tener un valor entre 1 y 100. Si Δf es mayor que 0.5 GHz, debe utilizarse 0.5 GHz.

- **Mejora por diversidad cuádruple:** Se utiliza en condiciones extremas, como es el caso de trayectos con visibilidad directa con reflexión. La diversidad de espacio se utiliza conjuntamente con protección por diversidad de frecuencia. Se utiliza también para trayectos difíciles largos o sobre agua, ya sea como diversidad cuádruple de espacio o como una combinación de la diversidad doble de espacio y la diversidad doble de frecuencia. La mejora introducida por un arreglo de este tipo está dada por la suma de cada una de las mejoras introducidas por los tipos de diversidad involucrados.

¹ Rec. UIT-R P.530-8

- **Mejora por diversidad de trayecto:** Como la diversidad de trayecto no es más que un enlace con dos trayectos, el sistema será equivalente a un radioenlace en configuración paralelo, por lo que la mejora introducida se ve representada por la disminución de la indisponibilidad de un solo trayecto al ser multiplicada por la del otro (expresión 2.29).

$$U_P(\text{con diversidad})(\%) = U_{P1} U_{P2} \quad (2.29)$$

Donde:

U_{P1} : Indisponibilidad del trayecto 1 (%).

U_{P2} : Indisponibilidad del trayecto 2 (%).

2.2.8.1.4. COMBINADORES DE DIVERSIDAD

Este dispositivo combina las señales recibidas de dos o más trayectos de diversidad. La combinación está dividida en dos categorías: predetección y postdetección.

La clasificación se ha hecho de acuerdo al proceso de combinación que se tenga en el lugar de recepción. La combinación por detección tiene lugar en la etapa de FI y el otro tipo es llevado a cabo en banda base.

Existen tres tipos de combinadores utilizados en los sistemas más comunes de radioenlaces que operan con diversidad:

- **Combinador de selección:** Se utiliza con un receptor a la vez. La relación S/N de salida es igual a la de entrada del receptor seleccionado.
- **Combinador de ganancia igual:** Adiciona las salidas del receptor de diversidad, entonces la relación S/N a la salida del combinador es:

$$S_0/N_0(\text{dB}) = (S_1+S_2) / 2N \quad (2.30.a)$$

¹ Rec. UIT-R P.530-8

- Combinador de relación máxima:** Produce un cambio de ganancia relativo entre las señales de salida en uso. La salida de la señal más fuerte se toma como el valor normalizado, de tal forma que su relación con la señal más débil corresponde a una ganancia G , la cual es ajustada para ser proporcional a la relación entre las señales de entrada:

$$(S_0/N_0)^2(\text{dB}) = (S_1/N)^2 + (S_2/N)^2 \quad (2.30.b)$$

La relación de salida S_0/N_0 es constante.

2.2.8.2. RESPALDO EN LÍNEA

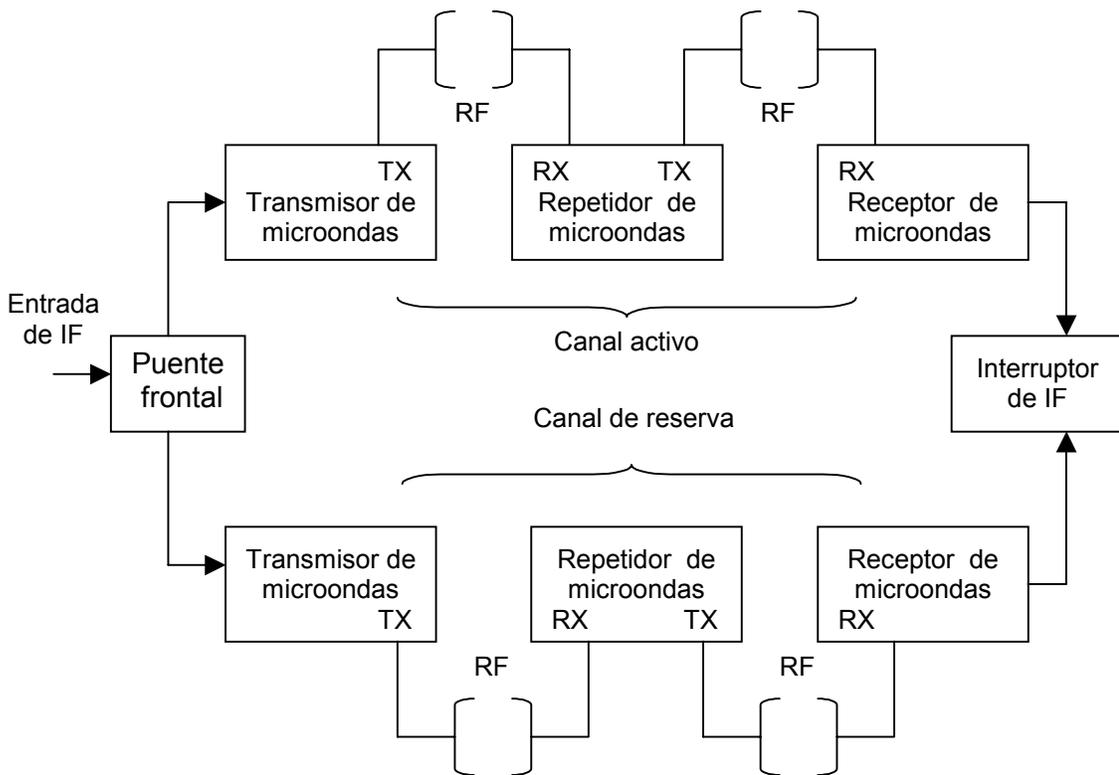


Figura 2.11

Arreglo de conmutación de protección de microondas. Respaldo en línea.

La figura 2.11 muestra un arreglo con protección de respaldo en línea de un solo canal. En el extremo transmisor, la señal FI pasa a un puente de extremo frontal,

que divide la potencia para las señales y la dirige simultáneamente a los canales de microondas que están trabajando y a los extras (en espera). Por lo tanto los canales activos y los de reserva llevan la misma información de banda base. En el extremo receptor, el interruptor de FI deja pasar la señal de FI del canal activo al equipo de FM. Dicho interruptor monitorea continuamente la potencia de la señal recibida en el canal activo y si falla, cambia al canal de reserva. Cuando la señal de FI del canal que está activo se restablece, el interruptor de FI vuelve a tomar su posición normal.

Cuando se utiliza respaldo en línea, el valor de la indisponibilidad debida a los equipos se ve disminuida. La indisponibilidad de una portadora individual con protección, en sistemas de N saltos está dada por la expresión 2.31.a.

$$U_{EP} = X_N + 0.5 U_E U_{S1} + U_{SS} \quad (2.31.a)$$

Donde :

X_N : Indisponibilidad de una portadora de radio debido al hecho del que el número de portadoras con fallo excede al número de portadoras de reserva.

$$X_N = \frac{1}{M - R} \sum_{i=R+1}^M \binom{M}{i} (U_E)(A_E)^{M-i}$$

M: número total de portadoras de RF (servicio y reserva).

$$M = N + R$$

R: Número de portadoras de RF de reserva.

U_E : Indisponibilidad de una portadora no protegida debido al transceptor y al modem.

A_E : Disponibilidad de una portadora simple sin protección.

$$A_E = 1 - U_E$$

U_{S1} : Indisponibilidad de las partes del conjunto de protección, que dejan inoperante el conjunto de protección cuando fallan. No afectan el tráfico. Puede despreciarse.

U_{SS} : Indisponibilidad de las partes del sistema de protección en banda base en serie con la señal, que cuando fallan, originan una interrupción de una portadora de RF y no permiten la conmutación hacia una portadora de reserva. Puede despreciarse.

Debido a que la protección de portadoras utilizada para este tipo de sistemas es la $N+1$, la anterior expresión se puede simplificar, haciendo $R=1$, obteniendo:

$$X_N = (M + 1) (U_E)^2 / 2 \quad (2.31.b)$$

2.2.9. REPETIDORES

Los repetidores extienden el alcance de un radioenlace por línea de vista permitiendo el transporte de la información sin importar las distancias o la presencia de obstrucciones geográficas que bloqueen la ruta de transmisión, que podrían hacer necesario un cambio en el curso de la señal.

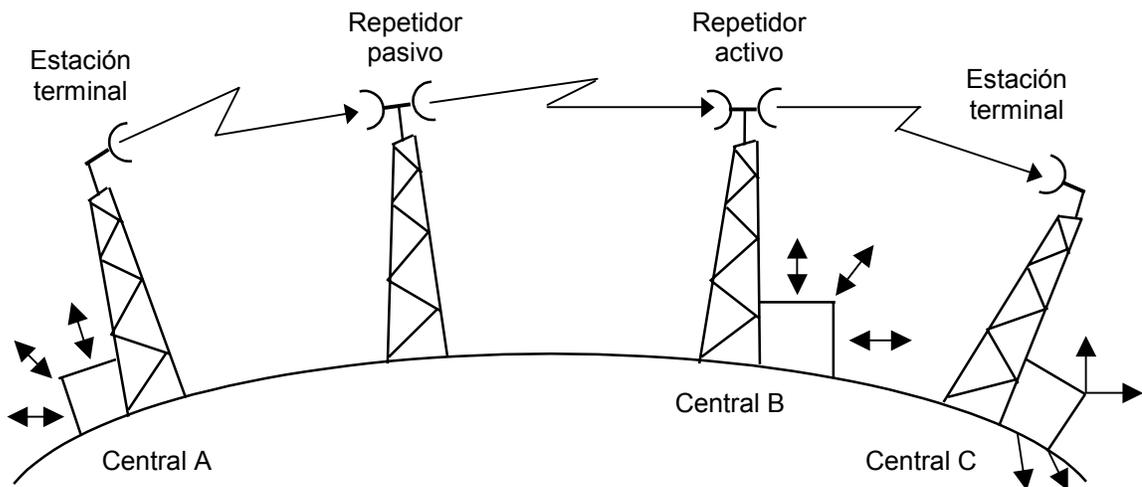


Figura 2.12

Croquis de un sistema de repetidores de microondas por línea de vista.

Existen dos tipos de repetidores cuyo uso se hace necesario dependiendo de las necesidades del radioenlace: los repetidores pasivos y activos. Ambos se explican a continuación.

2.2.9.1. REPETIDORES PASIVOS

Los repetidores de este tipo son utilizados para enrutar la señal ya sea mediante uso de carteleras (aprovechando el fenómeno de la reflexión) o de antenas en configuración *back to back* (espalda contra espalda).

En los repetidores pasivos no existe procesamiento de señales, por consiguiente no es necesaria la utilización de dispositivos activos.

La razón por la cual se utilizan los repetidores pasivos, es porque facilitan la superación de obstáculos insalvables por la línea de vista.

La expresión fundamental en la que están considerados los elementos del radioenlace a través del repetidor pasivo puede ser:

$$P_{RX}(\text{dBW}) = PIRE - L_{MP} + G_{REP} + G_{ARX} - L_{RX} \quad (2.32)$$

Donde:

P_{RX} : Potencia a la entrada del receptor (dBW).

PIRE: Potencia efectiva radiada isotrópicamente (dBW).

L_{MP} : Pérdidas del medio de propagación (dB).

G_{REP} : Ganancia del repetidor (dB).

L_{RX} : Pérdidas del sistema de antena de recepción (dB).

G_{ARX} : Ganancias del sistema de antena de recepción (dBi).

Esta expresión se escribe en forma diferente dependiendo del tipo de repetidor y de la configuración en la que se encuentran instalados los repetidores en el caso de los tipo cartelera.

2.2.9.1.1. REPETIDOR TIPO BACK TO BACK

La ganancia introducida por este tipo de repetidor se debe a las dos antenas que lo conforman (de recepción y transmisión). Aparecen además, unas pequeñas pérdidas introducidas por la línea de transmisión que une dichas antenas, que en la mayoría de los casos son de magnitud despreciable.

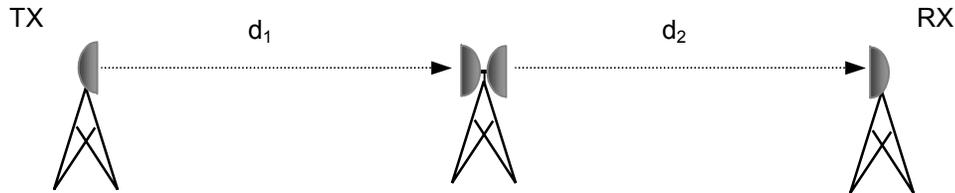


Figura 2.13

Repetidor pasivo tipo *back to back*.

Si las condiciones del medio de propagación de los dos trayectos (d_1 y d_2) son diferentes, deben calcularse las pérdidas de cada uno de dichos trayectos por aparte.

La expresión particular para la potencia de recepción, cuando se utiliza un repetidor pasivo tipo *back to back* es la siguiente:

$$P_{RX}(\text{dBW}) = \text{PIRE} - L_{MP1} + G_{REP} - L_{GO} + \gamma_1 + \gamma_2 - L_{MP2} + G_{ARX} - L_{RX} \quad (2.33.a)$$

Donde:

P_{RX} : Potencia a la entrada del receptor (dBW).

PIRE: Potencia efectiva radiada isotrópicamente (dBW).

L_{MP1} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_1 (dB).

L_{GO} : Pérdidas de la guía de onda (dB).

L_{MP2} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_2 (dB).

G_{REP} : Ganancia del repetidor (dB).

L_{RX} : Pérdidas del sistema de antena de recepción (dB).

Los factores γ_1 y γ_2 se obtienen de la figura 2.14.

G_{ARX} : Ganancias del sistema de antena de recepción (dBi).

$$G_{REP}(dB) = 2 G_A \quad (2.33.b)$$

Donde:

G_A : Ganancia del reflector parabólico (antena).

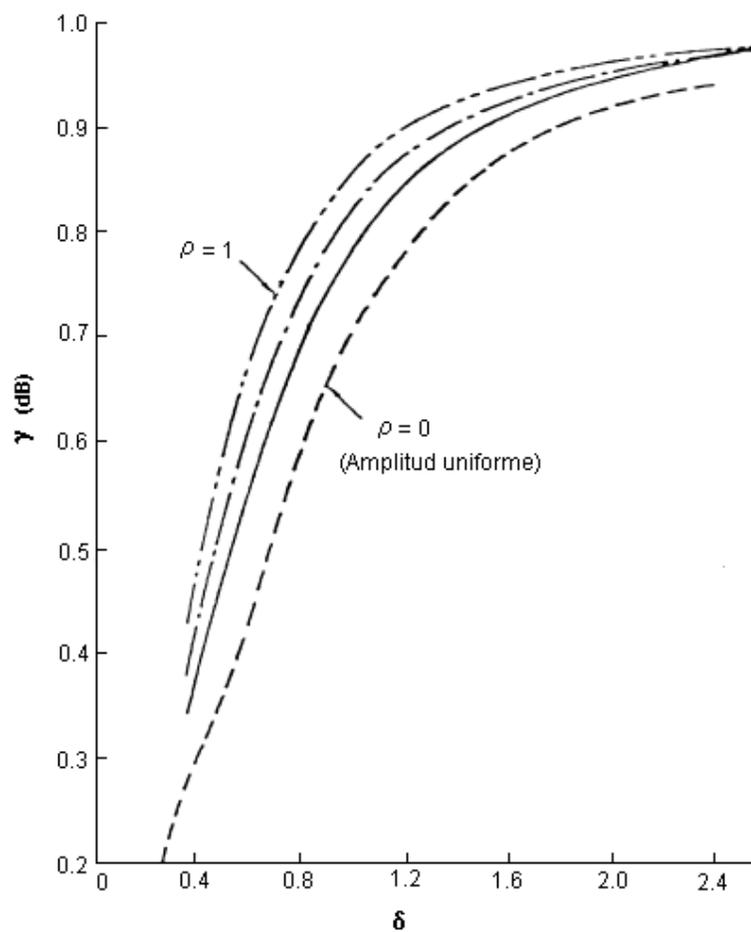


Figura 2.14

Curva de reducción del factor de ganancia
(Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales).

La abscisa δ se calcula con la expresión:

$$\delta = \lambda s / (\pi r^2) \quad (2.33.c)$$

Donde:

λ : Longitud de onda de la señal (m).

s : Longitud de cada semisalto (Km).

r : Radio de la antena (m).

El valor de γ se obtiene utilizando la curva correspondiente a la línea continua y multiplicando por 10 el logaritmo de la ordenada, así:

$$\gamma(\text{dB}) = 10 \log \gamma \quad (2.33.d)$$

2.2.9.1.2. REPETIDOR TIPO CARTELERA

Con la utilización de un repetidor de este tipo, la onda incidente se desvía por el efecto de la reflexión dando lugar al ángulo de transferencia, que se define como el ángulo de cambio de dirección de la señal con respecto a la dirección que seguiría en caso de ausencia del fenómeno de reflexión.

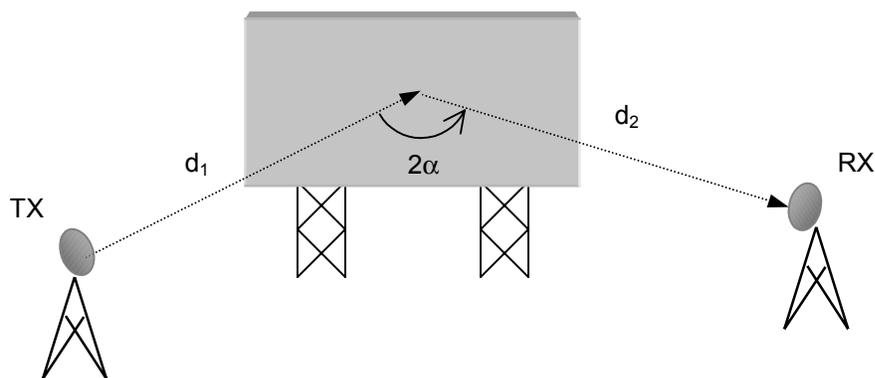


Figura 2.15

Repetidor pasivo tipo cartelera.

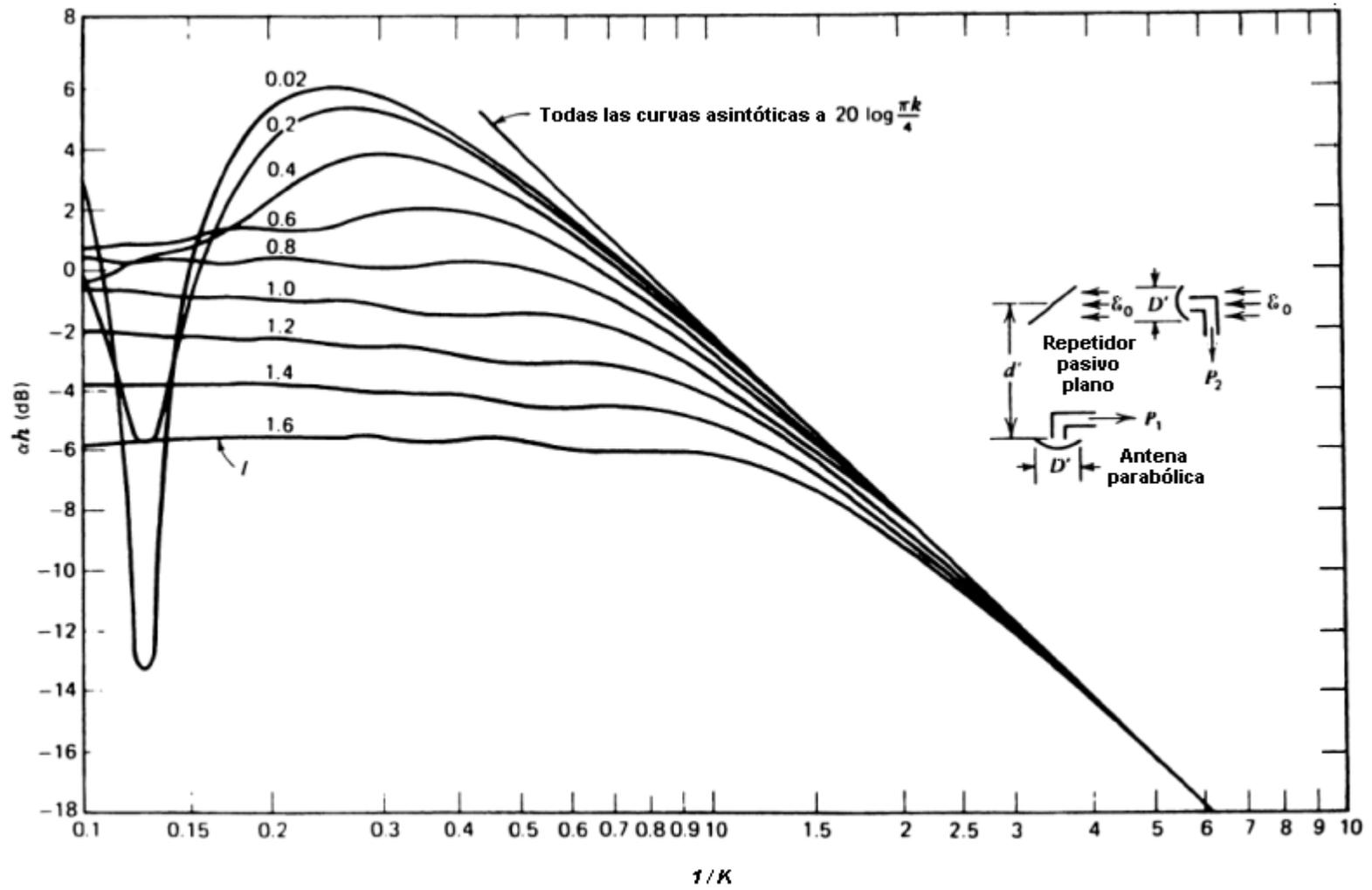


Figura 2.16

Pérdidas de acople del repetidor tipo cartelera (Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales).

En estas condiciones, la expresión 2.32 debe redefinirse en la siguiente forma:

$$P_{RX}(\text{dBW}) = \text{PIRE} - L_{MP1} + G_{REP} - L_{MP2} + G_{ARX} - L_{RX} \quad (2.34.a)$$

Donde:

P_{RX} : Potencia a la entrada del receptor (dBW).

PIRE: Potencia efectiva radiada isotrópicamente (dBW).

L_{MP1} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_1 (dB).

G_{REP} : Ganancia del repetidor (dB).

L_{MP2} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_2 (dB).

L_{RX} : Pérdidas del sistema de antena de recepción (dB).

G_{ARX} : Ganancias del sistema de antena de recepción (dB).

$$G_{REP}(\text{dB}) = 20 \log(4\pi A_E / \lambda^2) \quad (2.34.b)$$

Donde:

A_E : Área efectiva de la cartelera (m^2).

λ : Longitud de onda de la señal (m).

$$A_E(\text{m}^2) = A_R \cos(\alpha) \quad (2.34.c)$$

Donde:

A_R : Área de la cartelera (m^2).

2α : Ángulo incidente sobre la cartelera ($^\circ$), formado entre la onda incidente y la onda reflejada.

La expresión 2.34.a puede simplificarse para facilitar los cálculos dependiendo de la longitud de los trayectos d_1 y d_2 , ya que a falta de datos sobre las pérdidas de los

trayectos, puede describirse con aproximación mediante la aparición de un factor de corrección.

El primer paso es determinar si los trayectos cumplen la condición de campo cercano o lejano, utilizando siguiente expresión:

$$1/K = \pi \lambda d' / 4A_R \quad (2.34.d)$$

Donde:

λ : Longitud de onda de la señal (m).

d' : Longitud del trayecto en cuestión (m).

A_R : Área real de la cartelera (m²).

Si la relación $1/K$ es menor que 2.5 se da la condición de campo cercano, de lo contrario se da la condición de campo lejano.

- **d_1 y d_2 en campo lejano:** Para esta condición se debe considerar d_1 y d_2 como trayectos separados y sumar las respectivas pérdidas de medio de propagación. La expresión a utilizar para despejar la potencia de recepción es la 2.34.a.
- **d_1 campo lejano y d_2 campo cercano:** Para esta condición, deben considerarse únicamente las pérdidas del medio de propagación del salto en campo lejano (d_1). Las pérdidas en campo cercano se cancelan con la ganancia del repetidor. Aparece entonces un factor de corrección de ganancia (F_C) del repetidor que debe agregarse a la expresión 2.34.a:

$$P_{RX}(dBW) = PIRE - L_{MP1} + F_C + G_{ARX} - L_{RX} \quad (2.34.e)$$

Donde:

P_{RX} : Potencia a la entrada del receptor (dBW).

PIRE: Potencia efectiva radiada isotrópicamente (dBW).

L_{MP1} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_1 (dB).

F_C : Factor de corrección de ganancia (dB).

L_{RX} : Pérdidas del sistema de antena de recepción (dB).

G_{ARX} : Ganancias del sistema de antena de recepción (dB).

Este factor de ganancia se calcula conociendo el valor de $1/K$ y el factor de acople del reflector, haciendo uso de la figura 2.16.

El factor de acople representado por la abscisa l de la figura 2.16, se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$l = D' \sqrt{\pi / 4A_E} \quad (2.34.f)$$

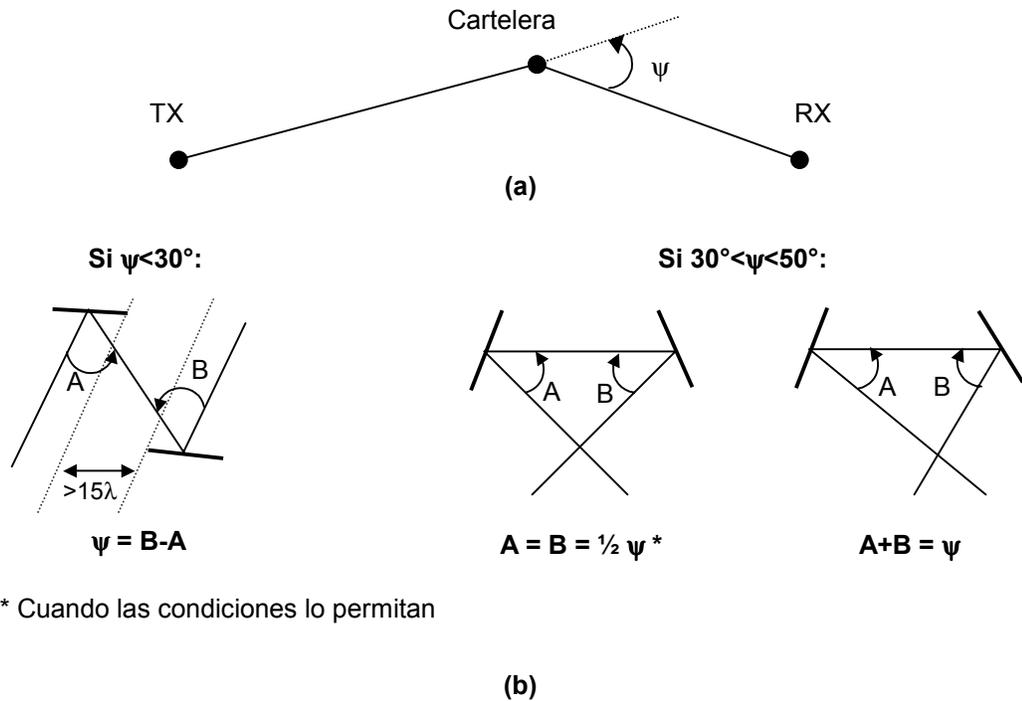
Donde:

D' : Diámetro de la antena parabólica contra la cual se ha evaluado la zona cercana (m).

A_E : Área efectiva del reflector pasivo (m^2).

- **d_1 y d_2 en campo cercano:** En este caso se recomienda replantear el enlace y no utilizar un sistema de microondas ya que para cortas distancias no se justifica una inversión de este tipo pues existen otros sistemas muy efectivos, a un costo mucho más bajo.
- **Repetidor pasivo doble:** Esta configuración se utiliza en lugar de un repetidor pasivo simple, cuando los extremos de transmisión y recepción se encuentran casi en condición de línea de vista y por lo tanto, la señal incide sobre el repetidor en forma casi rasante sobre la superficie, formando un ángulo de transferencia ψ menor de 50° (figura 2.17.a). En el caso en que el ángulo ψ sea muy pequeño (menor de 30°), la disposición de los repetidores debe ser tal, que la distancia entre la proyección de sus bordes internos, paralela a la trayectoria de la señal que incide sobre el primero, sea de al menos 15λ (figura 2.17b), ya que parte de la energía incidente sobre el primer repetidor, puede traspasarlo e interferir con la señal de recepción (la señal reflejada en la segunda cartelera).

Al utilizar dos repetidores tipo cartelera dentro de un solo trayecto, es recomendable que la distancia entre estos sea de campo cercano ya que la señal se debilita por la pérdida de energía al reflejarse sobre cada uno; por lo tanto, las distancias entre cada uno de los terminales a la respectiva cartelera más cercana, debe ubicarse en campo lejano.



* Cuando las condiciones lo permitan

Figura 2.17

(a) Ángulo de transferencia, (b) Configuraciones repetidor pasivo doble

(Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales).

Para saber si la distancia entre repetidores es de zona cercana se debe calcular el siguiente factor:

$$1/K^2 = 2\lambda d/a^2 \tag{2.34.g}$$

Donde:

λ : Longitud de onda de la señal (m).

d: Distancia entre repetidores (m).

a^2 : Área efectiva más pequeña entre las dos carteleras (m^2).

El factor $1/K^2$ se utiliza en forma similar al factor $1/K$. Si $1/K^2$ es menor a 4.4 el trayecto es de zona cercana, de lo contrario es de zona lejana.

En caso de que la distancia en cuestión se encuentre en zona lejana, se suman las ganancias de los repetidores y las pérdidas de propagación de los 3 trayectos así:

$$P_{RX} = PIRE - L_{MP1} + G_{REP1} - L_{MP'} + G_{REP2} - L_{MP2} + G_{ARX} - L_{RX} \text{ (dBW)} \quad (2.34.h)$$

Donde:

P_{RX} : Potencia a la entrada del receptor (dBW).

PIRE: Potencia efectiva radiada isotrópicamente (dBW).

L_{MP1} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_1 (dB).

G_{REP1} : Ganancia del repetidor 1 (dB).

$L_{MP'}$: Pérdidas del medio de propagación del trayecto entre repetidores (dB).

G_{REP2} : Ganancia del repetidor 2 (dB).

L_{MP2} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_2 (dB).

L_{RX} : Pérdidas del sistema de antena de recepción (dB).

G_{ARX} : Ganancias del sistema de antena de recepción (dB).

En caso contrario (zona cercana), se debe calcular el factor de corrección de ganancia (F_C) conociendo el valor de $1/K^2$ y la relación entre las áreas de los reflectores (b/a) haciendo uso de la figura 2.18 .Donde b^2 , es la mayor área efectiva entre los reflectores y a^2 es la menor.

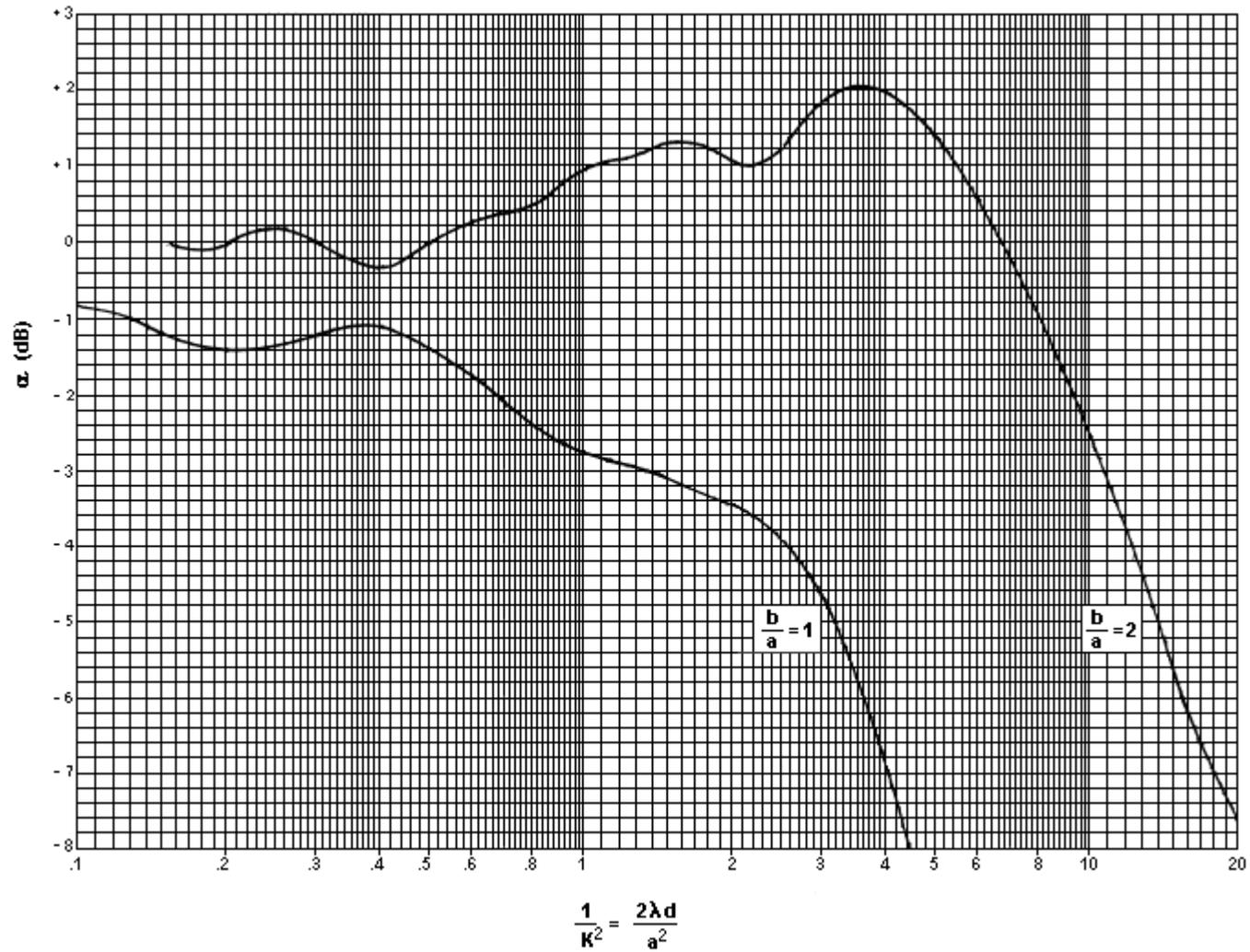


Figura 2.18

Pérdidas de acople del repetidor doble tipo cartelera (Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales).

Al introducir el factor de acople entre carteleras, la expresión para la potencia de recepción en este caso, difiere de la 2.34.h ya que las pérdidas de propagación del trayecto entre repetidores pueden ser canceladas con la mayor de las ganancias calculadas para los repetidores:

$$P_{RX}(dBW) = PIRE - L_{MP1} + G_{REP1} + F_C - L_{MP2} + G_{ARX} - L_{RX} \quad (2.34.i)$$

Donde:

P_{RX} : Potencia a la entrada del receptor (dBW).

PIRE: Potencia efectiva radiada isotrópicamente (dBW).

L_{MP1} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_1 (dB).

G_{REP1} : Ganancia del repetidor 1 (el de menor ganancia) (dB).

F_C : Factor de corrección de ganancia (dB).

L_{MP2} : Pérdidas del medio de propagación del trayecto d_2 (dB).

L_{RX} : Pérdidas del sistema de antena de recepción (dB).

G_{ARX} : Ganancias del sistema de antena de recepción (dB).

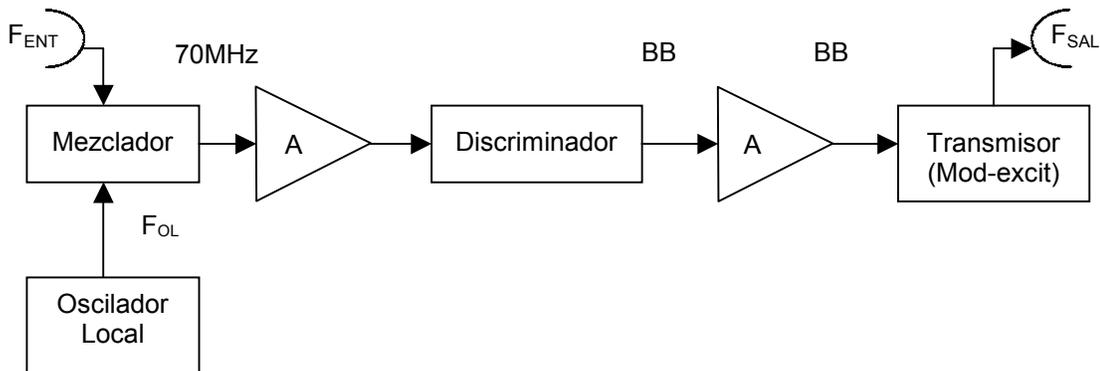
Se recomienda la utilización de máximo dos repetidores pasivos de cualquier tipo entre transmisor y receptor, ya que como se había dicho anteriormente, la señal se debilita por la pérdida de energía al pasar por cada uno de estos.

2.2.9.2. REPETIDORES ACTIVOS

Los repetidores de este tipo contienen partes activas que realizan algún tratamiento sobre la señal para mejorarla o como mínimo amplificarla. El tratamiento que se le da a los repetidores activos es muy similar al de las estaciones transmisora y receptora, ya que los equipos que contienen son básicamente los mismos.

2.2.9.2.1. REPETIDOR BANDA BASE

En la configuración más simple, la banda base que se demodula, se utiliza para modular el transmisor que se utiliza en la siguiente sección del enlace. La instalación de este tipo de repetidores es necesaria cuando se deben realizar bajadas e inserciones, por lo que su uso es preferido dentro de sistemas digitales (figura 2.19.a).



F_{ENT} : Frecuencia de entrada del receptor.

F_{OL} : Frecuencia del oscilador local

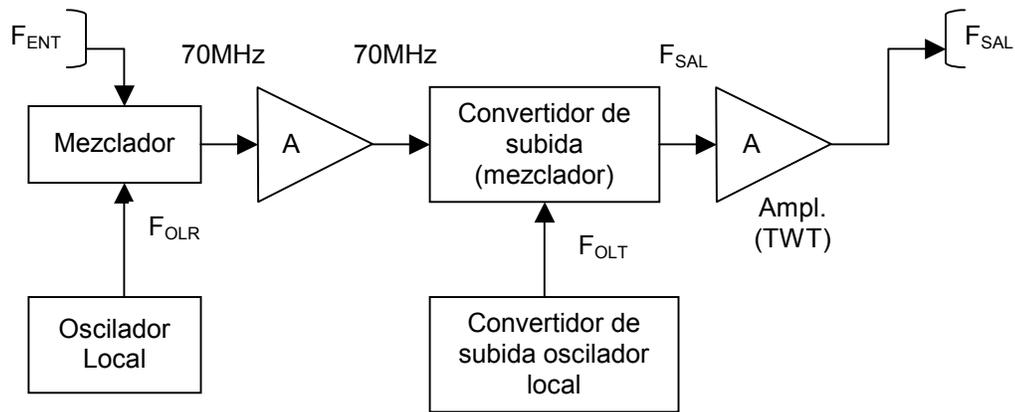
F_{SAL} : Frecuencia que sale del transmisor.

Figura 2.19.a

Repetidor banda base

2.2.9.2.2. REPETIDOR HETERODINO FI

Con la utilización de este repetidor se eliminan dos etapas de modulación. Simplemente traslada la señal de entrada a la FI mediante el oscilador local y mezclador adecuados, amplifica la señal FI obtenida y luego, la convierte a una nueva frecuencia de RF, la cual se amplifica mediante el tubo amplificador de onda viajera (TWT). Su utilización es recomendada para sistemas analógicos, en grandes troncales donde se debe minimizar el ruido, la ganancia o la fase diferencial (figura 2.19.b).



F_{ENT} : Frecuencia de entrada del receptor.
 F_{OLR} : Frecuencia del oscilador local del receptor.

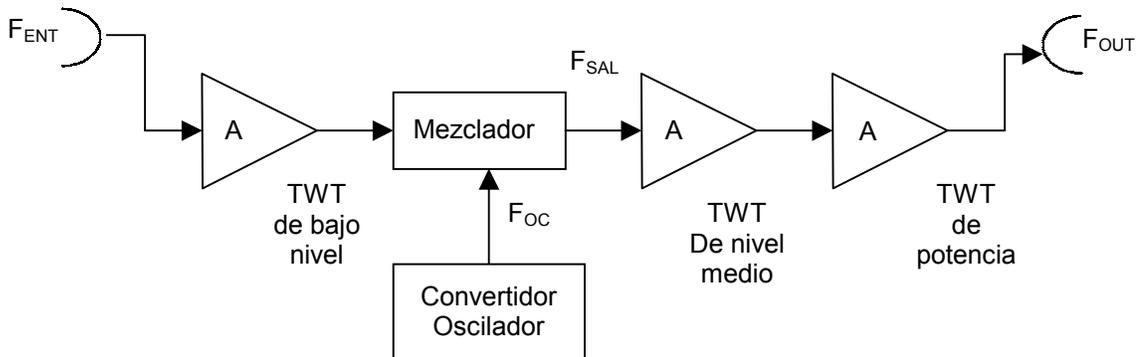
F_{SAL} : Frecuencia que sale del transmisor.
 F_{OLT} : Frecuencia del oscilador local del transmisor.

Figura 2.19.b

Repetidor heterodino FI

2.2.9.2.3. REPETIDOR HETERODINO RF

Con este tipo de repetidor, la amplificación se realiza directamente a frecuencias de RF. La señal de entrada se traslada a una frecuencia diferente, se amplifica por lo general mediante un TWT y finalmente se emite (figura 2.19.c).



F_{ENT} : Frecuencia de entrada del receptor.
 F_{SAL} : Frecuencia que sale del transmisor.

F_{OC} : Frecuencia que sale del oscilador del convertor local.

Figura 2.19.c

Repetidor heterodino RF

2.2.10. PLAN DE FRECUENCIAS

Para el óptimo funcionamiento de un radioenlace, se establece un plan de frecuencias que debe ser aprobado por la administración local. Esta se encarga de asignar una banda determinada, dependiendo del servicio y la disponibilidad de frecuencias libres existentes en el espectro del país o región donde se desee poner a punto el radioenlace.

La selección de la modulación analógica o digital es una decisión fundamental e irreversible. Muchas tecnologías analógicas y digitales pueden ser compatibles o por lo menos amigables para compartir el mismo bloque del espectro. Algunos sistemas son totalmente incompatibles (malos vecinos) y simplemente no pueden coexistir en el espectro adyacente. Esto puede constituir un problema en el caso de bandas compartidas o en bandas adyacentes cuando uno de los operadores desea actualizar su sistema analógico a digital. El administrador del espectro debe considerar cuidadosamente todos los factores y consultar con los usuarios vecinos antes de aprobar un plan de frecuencias.

En Colombia, la Dirección General de Planeación Sectorial (División de Planeación de Frecuencias y Redes) es la responsable de la planeación del Espectro Radioeléctrico (ERE) en aspectos como la definición del cuadro de atribución de frecuencias y la planificación y regulación de la utilización del ERE. La Dirección General de Telecomunicaciones y Servicios Postales (División de Gestión de Frecuencias) es la responsable de la Gestión y Vigilancia del ERE, registro de las frecuencias asignadas y permisos, estudio de solicitudes para la utilización del espectro y verificación de los equipos de los sistemas que lo utilicen.

Dentro de un radioenlace se requieren dos frecuencias por cada radiocanal, una para emisión y otra para recepción. Por cada estación repetidora que tenga como mínimo una antena por cada dirección es necesario que las frecuencias de emisión y recepción estén suficientemente separadas para minimizar los efectos de interferencia. El aislamiento entre polarizaciones es del orden de 35 dB.

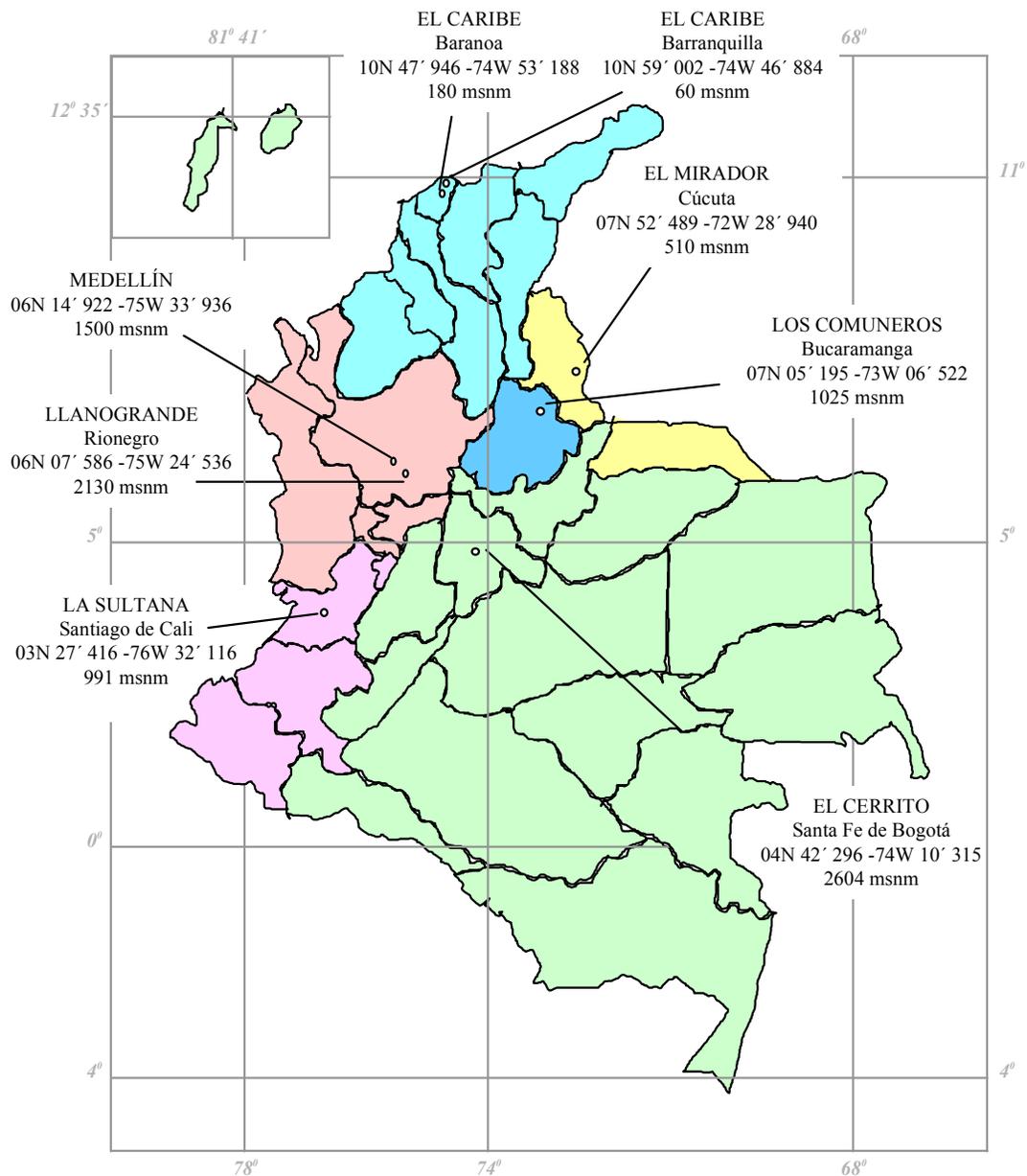


Figura 2.20

Secciones de administración y comprobación técnica del espectro radioeléctrico (Ministerio de Comunicaciones).

Asignación de frecuencias: En un radioenlace donde el receptor y el transmisor operan a la misma frecuencia, se debe asegurar una pérdida entre ellos de al menos 120 dB, para contrarrestar los efectos de la interferencia cocanal. Una manera de asegurar esta condición es colocar todos los canales de “ida” en la mitad de la

banda asignada y todos los canales de “regreso” en la otra mitad. Los términos “ida” y “regreso” se utilizan para distinguir los dos sentidos de transmisión. Para evitar la interferencia de canal adyacente, se recomienda utilizar alternadamente polarización horizontal y vertical.

Banda (GHz)	Frecuencias (MHz)	Capacidad						Estándar UIT-R	
		S.A.			S.D.			S.A.	S.D.
		B	M	A	B	M	A		
2	1700 – 2690							Rec. F.283-5 Inf. 1055 A4	Rec.F.283-5 Inf. 1055 A4
4	3700 – 4200							Rec F.382-7 Rec. F.382-7	Rec F.382-7 Rec. F.635-5 Inf. 934 A2,A3
5	4400 – 5000							--	Rec. F.1099-3
6	5925 – 7110							Rec. F.383-4 (Bb) Rec. F.384-7 (Ba)	Rec. F.383-4 (Bb) Rec. F.384-7 (Ba)
7	7425 – 7725							Rec. F.385-6 Inf. 1055 A1	Inf. 1055 A1 --
8	7725 – 8500							Rec.F.386-5	Rec. F.386-5
10	10500 – 10680							Inf. 607-4 A1	Inf. 607-4 A1
11	10700 – 11700							Rec. F.387-8	Rec. F.387-8
13	12750 – 13250							Rec. F.497-6	Rec. F.497-6
15	14400 – 15350							--	Rec. F.636-3
18	17700 – 19000							--	Rec. F.595-6
23	21200 – 23600							Rec. 637-2	Rec.F.637-3
26	25250 – 27500							Rec. F.748-3	Rec. F.748-3
28	27500 – 29500							Rec. F.748-3	Rec. F.748-3
38	37000 – 40000							Rec. F.749-1	Rec. F.749-1

S.A.: Sistemas analógicos.

S.D.: Sistemas digitales.

Capacidad (sistemas analógicos):

Baja (B): 60-600 Ch de voz.

Media (M): 600-960 Ch. de voz.

Alta (A): Más de 960 Ch. de voz.

A: Anexo.

Bb: Banda baja, Ba: Banda alta.

Capacidad (sistemas digitales):

Baja (B): Hasta 10 Mbps.

Media (M): 10-100 Mbps.

Alta (A): Más de 100 Mbps.

Tabla 2.8

Normatividad UIT-R para la disposición de canales en sistemas analógicos y digitales.

Para cada una de las bandas, la UIT-R establece (para el caso específico de Colombia) la disposición de canales en las recomendaciones listadas en la tabla 2.8.

Dentro de estas, se encuentran la frecuencia de trabajo correspondiente a la frecuencia central preferida, la separación entre el primer y último radiocanal y los bordes de la banda, la separación entre el canal más alto de la mitad inferior y el más bajo de la mitad superior, y las expresiones para los cálculos de la frecuencia de los radiocanales.

3. NORMATIVIDAD – ESTÁNDARES UIT-R

3.1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de sistemas de comunicaciones, deben tenerse en cuenta las definiciones y métodos consignados en las recomendaciones e informes de la UIT, ya que estos son el resultado de las múltiples investigaciones de las comisiones de estudio.

En el caso específico de este trabajo, se ha investigado toda la información necesaria para la planeación de radioenlaces por línea de vista que se encuentra en la rama de radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R). Debido a que estas normas están sujetas a actualizaciones, se trabajó con la última versión adquirida por la Universidad del Cauca, del año 1999.

En estas Recomendaciones, se encuentran las formulaciones matemáticas y procedimientos indicados para realizar los cálculos involucrados en los procesos a seguir en el desarrollo de los pasos que abarca la ingeniería del radioenlace, descritos en el capítulo anterior. Por supuesto, muchas de las formulaciones matemáticas propuestas en estas recomendaciones son muy complejas ya que abarcan muchos parámetros. En forma paralela, dentro de las mismas, se proponen algunas aproximaciones más sencillas aunque de menor exactitud, pero en pequeña escala, las cuales, en su mayoría fueron aplicadas dentro de este trabajo de grado.

3.2. SERIES

Las Recomendaciones e Informes de la UIT-R se encuentran clasificados en series, por temas. Las series que se estudiaron para el desarrollo de este trabajo de grado son las concernientes a sistemas de relevadores radioeléctricos tanto analógicos como digitales.

- **Serie F. Servicio Fijo.** Sistemas y redes del servicio fijo que funcionan mediante estaciones terrestres.
- **Serie P. Propagación de las ondas electromagnéticas.** Propagación de las ondas radioeléctricas en medios ionizados y no ionizados y características del ruido radioeléctrico a fin de mejorar los sistemas de radiocomunicación.
- **Serie SM. Gestión del espectro.** Planificación, utilización, ingeniería, compartición y comprobación técnica del espectro.

3.3. RECOMENDACIONES E INFORMES

Las recomendaciones e informes estudiados se han clasificado según el tema. Cada proceso sacado de estas normativas, asociado a la teoría y cálculos descritos en el capítulo anterior, tiene asociada una referencia que identifica la recomendación o informe que lo respalda.

3.3.1. DEFINICION DE TÉRMINOS

- **Recomendación P.310-9.** Definición de términos relativos a la propagación en medios no ionizados.
- **Recomendación P.341-5.** Noción de pérdidas de transmisión en los enlaces radioeléctricos.
- **Recomendación P.581-2.** Noción de mes más desfavorable.

3.3.2. CIRCUITO FICTICIO DE REFERENCIA

- **Recomendación F.391.** Circuito ficticio de referencia para sistemas de relevadores radioeléctricos de telefonía con multiplexación por división de frecuencia con una capacidad 12 a 60 canales telefónicos.
- **Recomendación F.392.** Circuito ficticio de referencia para sistemas de relevadores radioeléctricos para telefonía con multiplexación por división de frecuencia con capacidad superior a 60 canales telefónicos.

- **Recomendación F.556-1.** Trayecto digital ficticio de referencia para los sistemas de relevadores radioeléctricos que pueden formar parte de una red digital de servicios integrados (RDSI), con una capacidad superior al segundo nivel jerárquico.

3.3.3. ANCHO DE BANDA

- **Recomendación 399-3.** Medición del ruido por medio de una señal de espectro continuo y uniforme en los sistemas de relevadores radioeléctricos para telefonía que utilizan multiplexación por división de frecuencia.
- **Recomendación F.404-2.** Excursión de frecuencia en los sistemas de relevadores radioeléctricos analógicos para telefonía con multiplexación por división de frecuencia.
- **Recomendación SM.1046.** Definición de la eficacia en la utilización del espectro para un sistema de radiocomunicaciones.
- **Recomendación F.1101.** Características de los sistemas de relevadores radioeléctricos digitales por debajo de 17 GHz aproximadamente.

3.3.4. TRAYECTO DE PROPAGACIÓN

- **Recomendación P.452-9.** Procedimiento de predicción para evaluar la interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la tierra a frecuencias superiores a unos 0.7 GHz.
- **Recomendación P.453-8.** Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad.
- **Recomendación P.525-2.** Cálculo de la atenuación en el espacio libre.
- **Recomendación P.526-6.** Propagación por difracción.
- **Recomendación P.530-8.** Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrestres con visibilidad directa.

- **Recomendación P.676-4.** Atenuación debida a los gases atmosféricos.
- **Recomendación P. 835-3.** Atmósferas normalizadas de referencia para la atenuación debida a los gases.
- **Recomendación P.837-2.** Características de la precipitación para establecer modelos de propagación.
- **Recomendación P.838-1.** Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción.
- **Informe 721.** Atenuación producida por hidrometeoros, en particular en forma de lluvia y por otras partículas atmosféricas.

3.3.5. OBJETIVOS DE CALIDAD

- **Recomendación F.393-4.** Potencia de ruido admisible en el circuito ficticio de referencia de sistemas de relevadores radioeléctricos para telefonía con multiplexación por división de frecuencia.
- **Recomendación P.530-8.** Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrestres con visibilidad directa.
- **Recomendación F.594-1.** Tasa de error de bits admisible a la salida del trayecto digital ficticio de referencia para sistemas de relevadores radioeléctricos que pueden formar parte de una RDSI.

3.3.6. OBJETIVOS DE DISPONIBILIDAD

- **Recomendación P.453-7.** Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad.
- **Recomendación P.530-8.** Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrestres con visibilidad directa.

- **Recomendación F.557-4.** Objetivo de disponibilidad en sistemas de relevadores radioelétricos para un circuito ficticio de referencia y un trayecto digital ficticio de referencia.
- **Recomendación 695.** Objetivos de disponibilidad para enlaces de relevadores radioelétricos digitales reales que forman parte de un circuito de grado alto de calidad dentro de una RDSI.
- **Informe 1053.** Objetivos de calidad en materia de disponibilidad y de características de error para sistemas de relevadores radioelétricos digitales utilizados en la parte de “grado local” de una conexión de la RDSI.

3.3.7. DIVERSIDAD

- **Informe 338-5.** Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de relevadores radioelétricos terrestres con visibilidad directa.
- **Recomendación F. 752-1.** Técnicas de diversidad para sistemas de relevadores radioelétricos.
- **Informe 784-2.** Efectos de la propagación en el diseño y el funcionamiento de los sistemas de relevadores radioelétricos con visibilidad directa.

3.3.8. PLAN DE FRECUENCIAS

- **Recomendación F.283-5.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioelétricos analógicos o digitales de baja y media capacidad que funcionan en la banda de 2 GHz.
- **Recomendación F.382-7.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioelétricos que funcionan en las bandas de 2 y 4 GHz.
- **Recomendación F.383-6.** Disposición de radiocanales para sistemas de radioenlaces de alta capacidad que funcionan en la parte inferior de la banda de 6 GHz.

-
- **Recomendación F. 384-7.** Disposición de radiocanales para sistemas de radioenlaces analógicos o digitales de media y alta capacidad que funcionan en la parte superior de la banda de 6 GHz.
 - **Recomendación F. 385-6.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan en la banda de 7 GHz.
 - **Recomendación F.386-5.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos analógicos o digitales de mediana y alta capacidad que funcionan en la banda de 8 GHz.
 - **Recomendación F.387-8.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan en la banda de 11 GHz.
 - **Recomendación F.497-6.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan en la banda de 13 GHz.
 - **Recomendación F.595-6.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan en la banda de 18 GHz.
 - **Recomendación F.635-5.** Disposición de radiocanales basada en un plan homogéneo para sistemas de radioenlaces que funcionan en la banda de 4 GHz.
 - **Recomendación F.636-3.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan en la banda de 15 GHz.
 - **Recomendación F.637-3.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan en la banda de 23 GHz.
 - **Recomendación F.748-3.** Disposición de radiocanales para sistemas del servicio fijo que funcionan en las bandas de 25, 26 y 28 GHz.
 - **Recomendación F.749-1.** Disposición de radiocanales para sistemas del servicio fijo que funcionan en la banda de 38 GHz.

- **Recomendación F.1099-3.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos digitales de alta capacidad en la banda de 5 GHz.
- **Informe 607-4.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan en las bandas de frecuencias 10, 5-10, 68 GHz y 11, 7-15, 35 GHz.
- **Informe 934.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos digitales de mediana-alta y gran capacidad que funcionan en las bandas de frecuencia inferiores a unos 10 GHz.
- **Informe 1055.** Disposición de radiocanales para sistemas de relevadores radioeléctricos digitales de capacidad pequeña y media que funcionan en las bandas de frecuencia inferiores a unos 12 GHz.

4. DESARROLLO DEL PROYECTO: ANÁLISIS DEL TRAYECTO DE PROPAGACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR LÍNEA DE VISTA

4.1. INTRODUCCIÓN

La aplicación software HD-RADIOCOM (Herramienta de Desarrollo para Radiocomunicaciones) es el resultado del estudio de los factores básicos que actúan en un radioenlace de microondas por línea de vista y la normatividad asociada establecida por la UIT-R. En este capítulo se describe la forma en la que se ha implementado la aplicación teniendo en cuenta los conceptos más relevantes que justifican los procedimientos utilizados en el desarrollo.

Por ser una herramienta didáctica, HD-Radiocom no es una aplicación idónea para planear enlaces del mundo real, ya que los procedimientos acogidos de las recomendaciones son para los casos más generales, que aunque no son los más exactos, son aptos para la comprensión de los principios.

El manejo de la aplicación es secuencial, es decir que es necesario introducir las entradas en cierto orden según la lógica de la planeación de enlaces y bajo esa misma lógica se organizó cada etapa del proceso en este capítulo.

En cada etapa, se incluyen:

- **Datos de entrada:** Corresponden a las variables utilizadas para realizar los cálculos, introducidas a través de los campos de entrada de la aplicación. Estos datos van acompañados con la respectiva referencia al número de la tabla, figura y/o expresión del capítulo 2 donde se encuentran o el numeral donde se habla de su utilidad dentro de los cálculos.
- **Datos de salida:** Corresponden a las variables que almacenan los resultados que se muestran al usuario en los campos de salida de la aplicación. Estos datos van acompañados con la respectiva referencia al número de la ecuación

del capítulo 2 desde la cual se despejan y/o los procedimientos adicionales que hubo que implementar para calcularlos. Algunos datos de entrada aparecen desplegados en algunas de las interfaces como datos de salida, pues son aquellos que se consideran muy importantes y es bueno que el usuario los pueda observar sin tener que buscarlos en la parte donde fueron introducidos; tal es el caso de la frecuencia de operación y la longitud de los trayectos entre otros.

La aplicación se divide en dos partes, correspondientes a los cálculos para la planeación de radioenlaces y la simulación de fenómenos de propagación.

4.2. PLANEACIÓN DE RADIOENLACES

4.2.1. DEFINICIÓN DEL TIPO Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA (PUNTO DE INICIO).

El primer paso a seguir en la planeación de un radioenlace en HD-Radiocom, es definir los siguientes parámetros:

- **Tipo de modulación (analógica o digital):** Es necesario conocerlo para realizar los cálculos.

Del tipo de modulación dependen el cálculo del plan de frecuencias, los objetivos de calidad y todo lo que de ello se derive. No es necesario ahondar en detalles en este apartado, ya que en el capítulo 2 se explicó claramente cuáles son las diferencias entre dichos procedimientos, en los numerales 2.2.10 y 2.2.6.1 respectivamente.

- **Número de saltos (o vanos):** Representados por puntos pasivos de repetición. Es posible que un sistema se componga de diversos saltos donde se vean involucrados varios repetidores activos o radioenlaces completos con repetidores pasivos en medio de ellos. Sin embargo, la aplicación ha sido diseñada para manejar un máximo de 3 saltos, ya que como se dijo anteriormente, se trata de una herramienta didáctica. Claro que si se da el caso,

es posible analizar los saltos entre terminales activos por separado, dentro de varios proyectos diferentes.

Después de elegir el tipo y configuración del sistema se puede empezar a introducir los datos dentro de la interfaz que se muestra en la figura 4.1.

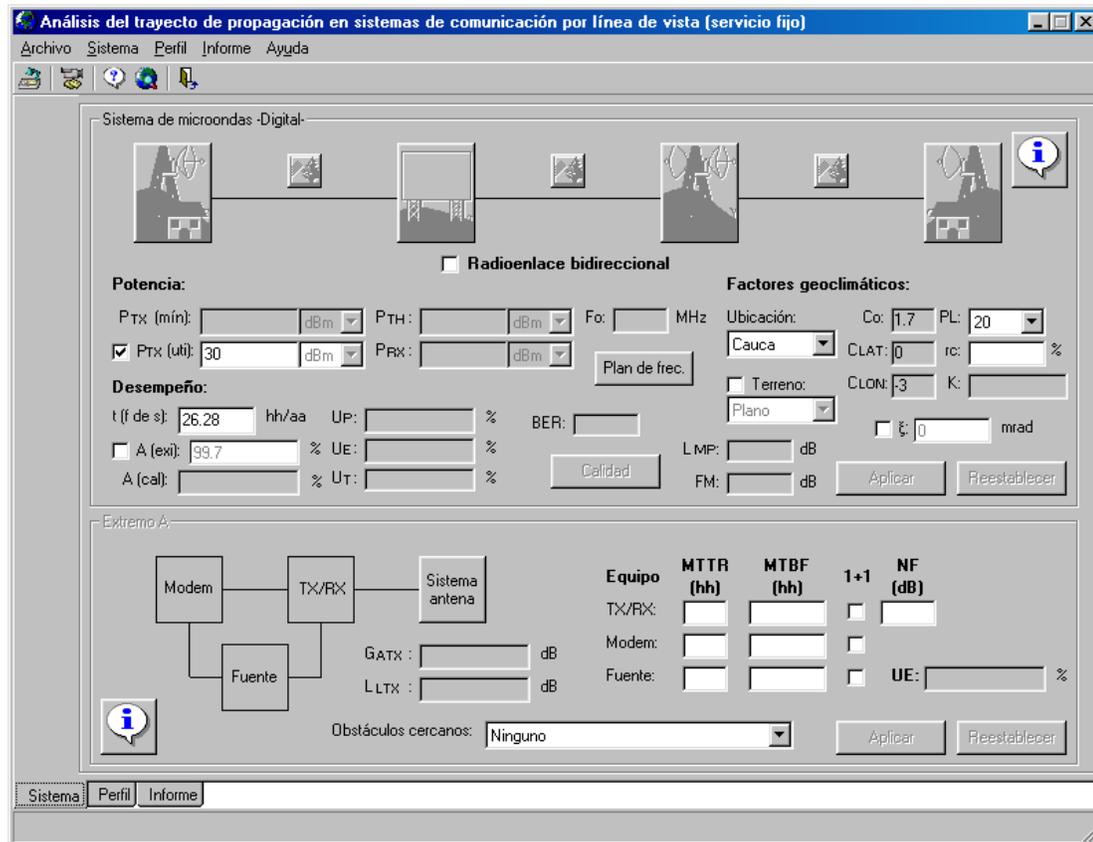


Figura 4.1

Interfaz **Sistema** de HD-Radiocom al iniciar un proyecto.

Casi todos los controles de la interfaz mostrada en la figura 4.1 aparecen deshabilitados. Esto es porque los datos en un principio deben ser introducidos en forma secuencial. La razón es que algunos cálculos necesitan de parámetros hallados anteriormente dentro de otros procedimientos, como es el caso de los cálculos del sistema de antena, pérdidas de trayecto, entre otros, que necesitan de la frecuencia de operación escogida dentro del plan de frecuencias; o el caso de los cálculos de los objetivos de calidad, que necesitan del tipo de modulación digital

para sistemas digitales o de la longitud total del trayecto en sistemas analógicos. Es claro que podría iniciarse el proyecto con valores por defecto de casi todas las variables, pero el hecho de que los controles se habiliten en forma secuencial facilita que el usuario no olvide incluir dentro de su proyecto los datos de su preferencia. Después, si es necesario cambiar una de las variables ya introducidas, es perfectamente posible y además se modifican todos los datos calculados a partir de ésta.

4.2.2. PLAN DE FRECUENCIAS

Los cálculos realizados en esta etapa son diferentes dependiendo de si el sistema es analógico o digital.

4.2.2.1. SISTEMA DIGITAL

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencias
Tipo de Modulación digital	Modulación	Integer	Numeral 2.2.6.2
Velocidad de transmisión	BR	Integer	Expresión 2.16
Portadoras de RF	Nportadoras	Integer	
Banda de frecuencias	BandaEscogida	Integer	Tabla 2.8
Frecuencia de operación	F	Single	

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencias
Eficiencia del ancho de banda	Neta	Double	Expresión 2.16
Ancho de banda	BIFDigital	Single	Expresión 2.16

4.2.2.2. SISTEMA ANALÓGICO

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencias
Banda de frecuencias	BandaEscogida	Integer	Tabla 2.8
Frecuencia de operación	F	Single	
Portadoras de RF	Nportadoras	Integer	
Canales de voz por portadora RF	NCh	Integer	Expresión 2.14.c

Desviación del tono de prueba rms por canal	Deltaf	Single	Expresión 2.14.b
Frecuencia máxima de banda base	FBB	Single	Expresión 2.14.a

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Desviación máxima de frecuencia	fDEV	Single	Expresión 2.14.b
Ancho de banda	BIFAnalogico	Single	Expresión 2.14.a

4.2.3. EXTREMOS TRANSMISOR Y RECEPTOR

Existen dos estaciones terminales y por lo tanto, deben realizarse los cálculos relacionados con cada una de éstas por aparte. Para ello, se utiliza la misma interfaz dependiendo del extremo sobre el cual se quiere trabajar. Es por eso que todas las variables utilizadas en esta etapa son arreglos de tamaño 2.

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Tiempo significativo de reparación	MTTRtxrxEx(1 To 2) MTTRmodemEx(1 To 2) MTTRfuenteEx(1 To 2)	Single	Expresión 2.21.a
Tiempo significativo entre fallas	MTBFtxrxEx(1 To 2) MTBFmodemEx(1 To 2) MTBFfuenteEx(1 To 2)	Single	Expresión 2.21.a
Protección	chkProtecTx(1 To 2) chkProtecMd(1 To 2) chkProtecFt(1 To 2)	Boolean	Expresiones 2.21.b y c (equipos en paralelo)
Figura de ruido	NftxrxEx(1 To 2)	Single	Expresión 2.13.b, 2.17.a y 2.17.b
Obstáculos cercanos (generadores de eco)	TipoObstaculosEco(1 To 2)	String	Tabla 2.5

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Indisponibilidad debida a equipos	UEEx(1 To 2)	Single	Expresión 2.21.a

4.2.4. SISTEMA ANTENA

Dentro de cada estación terminal existe una antena, necesaria para realizar la transmisión y recepción de la señal, y un conjunto de dispositivos necesarios para la conexión de ésta con los equipos. En este caso, al igual que el anterior, se utiliza la misma interfaz para desplegar la información del sistema de antena de ambos extremos.

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Antena			
Diámetro de antena	Diámetro	Single	Expresión 2.19.c
Eficiencia	Eficiencia	Single	Expresión 2.19.c
Polarización de antena	Polarizacion	String	Numeral 2.2.5.4
Relación de voltaje de onda estacionaria	SWR	Single	Expresión 2.19.d
Altura (desde el suelo)	AlturaAntena(1 To 2)	Single	
Torre			
Altura (desde el suelo)	AlturaTorre(1 To 2)	Single	Numeral 2.2.4
Soporte	PorcentajeTorre(1 To 2)	Single	Tabla 2.3
Tipo	TipoTorre(1 To 2)	String	Numeral 2.2.4
Línea de transmisión			
Longitud	LongitudLinea(1 To 2)	Single	Numeral 2.2.6.3
Atenuación por c/100 mt	AtenuacionLinea(1 To 2)	Single	Numeral 2.2.6.3
Dispositivos			
Cantidad (dispositivos adicionales)	Circuladores(1 To 2) Acopladores(1 To 2) Desfazadores(1 To 2)	Integer	Numeral 2.2.6.3
Atenuación unitaria	AtenuacionCC(1 to 2) AtenuacionCA(1 to 2) AtenuacionCD(1 to 2)	Single	Numeral 2.2.6.3

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Antena			
Ganancia de antena	GananciaAntena	Double	Expresión 2.19.c
Torre			
Dimensiones del terreno	DimensionTorre1(1 To 2)	Single	Tabla 2.3*
	DimensionTorre2(1 To 2)	Single	
Área de construcción	AreaTorre(1 To 2)	Single	Numeral 2.2.4
Línea de transmisión			
Atenuación total	PerdidasLinea(1 To 2)	Single	Expresión 2.19.b

Dispositivos			
Atenuación total	PerdidasCirculadores(1 To 2)	Single	Expresión 2.19.b
	PerdidasAcopladores(1 To 2)		
	PerdidasDesfazadores(1 To 2)		
	PerdidaRadon(1 To 2)		

* Dentro de la tabla 2.3. se indican únicamente las dimensiones del terreno necesarias para alturas de torre específicas. En HD-Radiocom, las dimensiones para alturas que no se encuentran en la tabla, se calculan aplicando interpolación, utilizando como términos a interpolar, las parejas altura-dimensiones que se encuentran en la tabla y la altura de torre introducida como dato de entrada.

4.2.5. TRAYECTOS DE PROPAGACIÓN

El trayecto de propagación se compone de todos los saltos que da la señal, ya sea uno solo entre transmisor y receptor o hasta tres, si es que existen repetidores. Cada trayecto debe asociarse a un perfil, ya que de esta manera se obtienen la distancia del trayecto, las alturas de los obstáculos que se encuentran en medio de los extremos y en general, todos los datos necesarios para calcular las pérdidas. Para poder realizar la carga de un perfil dentro de un trayecto, es decir, introducir los datos de un perfil dentro de las variables asociadas a un trayecto, debe haber datos de distancias y alturas dentro de la cuadrícula de la interfaz **Perfil** ya sea escritos manualmente o cargados desde un archivo, como ya se explicará más adelante.

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Inclinación del trayecto	Inclinacion(1 To 3)	Single	Expresión 2.23.f
Tipo de terreno	Terreno	String	Tabla 2.7
Ubicación del salto	Ubicacion	String	Numeral 2.2.7.4

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Parámetros trayecto			
Longitud del trayecto*	Distancia(1 To 3)	Single	Numeral 2.2.5
Altura del transmisor*	AlturaExtremoA(1 To 3)	Single	Numeral 2.2.5, expresiones 2.7.i, j y 2.8.k

Altura del receptor*	AlturaExtremoB(1 To 3)	Single	Numeral 2.2.5, expresiones 2.7.i, j y 2.8.k
Pérdidas de propagación			
Pérdidas por difracción	L(1 To 3)	Single	Expresión 2.10.b
Pérdidas por gases atmosféricos	Aa(1 To 3)	Single	Expresión 2.6
Pérdidas por hidrometeoros	Ahpp(1 To 3)	Single	Expresión 2.9.a
Pérdidas por eco	Ah(1 To 3)	Single	Expresión 2.11
Pérdidas de espacio libre	Lfs(1 To 3)	Double	Expresión 2.5
Pérdidas del trayecto	Lmp(1 To 3)	Double	Expresión 2.4
Parámetros pérdidas			
Presión media	p(1 To 3)	Double	Expresión 2.7.j.
Temperatura media	t(1 To 3)	Double	Expresión 2.7.i
Densidad de vapor de agua	dv(1 To 3)	Single	Expresión 2.8.k
Coefficiente de regresión	Kp(1 To 3)	Single	Expresión 2.10.d
Coefficiente de regresión	Alfa(1 To 3)	Single	Expresión 2.10.e
Intensidad de lluvia	ii(1 To 3)	Single	Expresión 2.10.c
Inclinación del trayecto	Inclinación(1 To 3)	Single	Expresión 2.23.f
Tipo de terreno	Terreno	String	Tabla 2.7

* Estos datos se obtienen al cargar un perfil en el trayecto. Esto se explicará en el siguiente punto.

4.2.6. PERFIL

Cada trayecto de propagación, ya sea entre extremos terminales, entre extremo y repetidor o entre repetidores, debe tener su propio perfil asociado, ya que de ello dependen las pérdidas y la condición de línea de vista. La figura 4.2. ilustra un perfil trazado por HD-Radiocom a partir de un conjunto de alturas y distancias introducido directamente en la aplicación por el usuario o cargado desde un archivo de extensión *.mdb compatible con el motor de bases de datos *Microsoft Access*.

El proceso de trazado del perfil es el siguiente:

- a. Primero, deben introducirse los datos de distancias con la altura asociada; proceso que se puede realizar manualmente mediante la tabla o cuadrícula de datos ubicada en la parte izquierda de la pantalla o cargándolos desde una base de datos. Cada vez que se produce un cambio en dichos datos, las curvas o series trazadas dentro del área de gráfico (figura 4.2) se redibujan automáticamente.

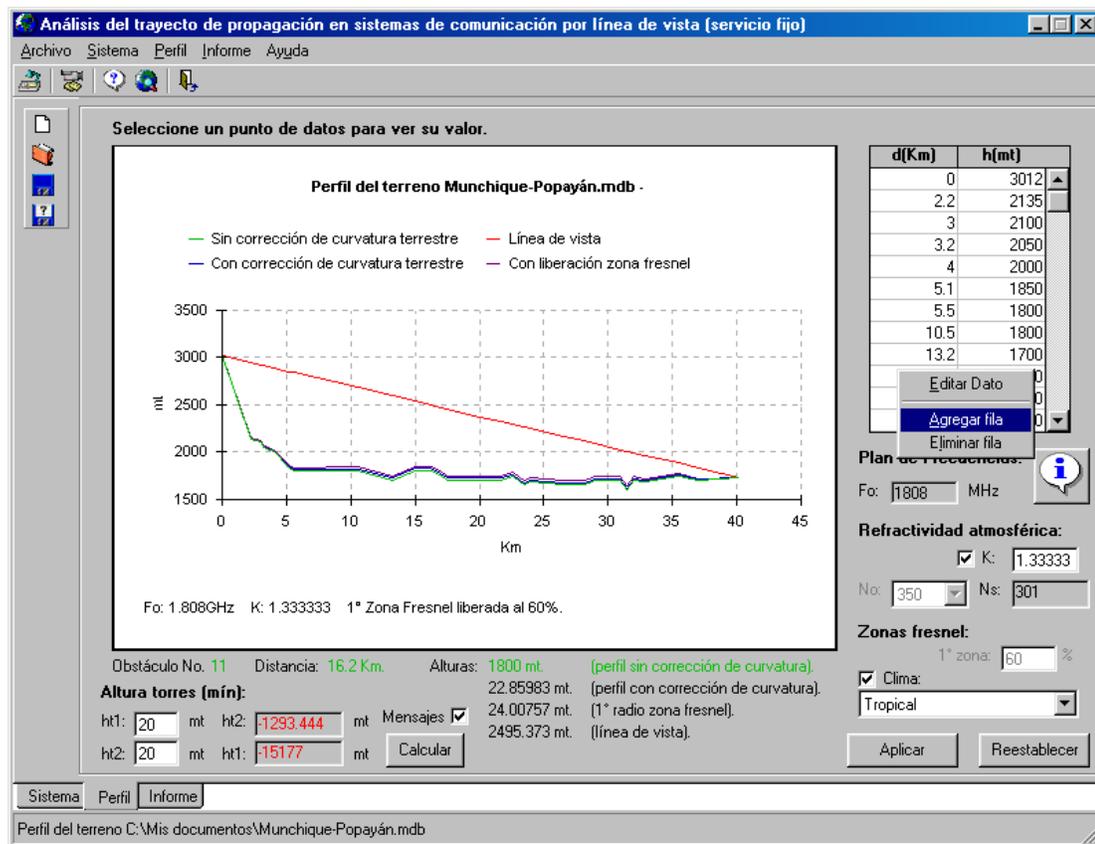


Figura 4.2

Interfaz **Perfil** con un perfil trazado dentro del área de gráfico.

- b. Cuando se carga un perfil desde un archivo, los datos aparecen dentro de la cuadrícula como si se los hubiese introducido desde la aplicación. La cuadrícula es modificable, y los datos dentro de ésta se pueden guardar siempre y cuando el PC tenga instalado el motor de bases de datos *Microsoft Access* o uno compatible, así:
- **Creando un archivo nuevo:** ya sea que los datos se hayan introducido directamente dentro de la aplicación, o se hayan cargado desde otro archivo.
 - **Sobrescribiendo un archivo existente.**
- c. Los datos necesarios para el trazado de todas las curvas (o series) dentro del área de gráfico se pueden modificar según las necesidades del sistema o

características geográficas de cada radioenlace. Cada vez que se realicen cambios sobre los controles de entrada, deben aplicarse para que se hagan efectivos y por lo tanto visibles en el trazado del perfil.

- d. Dentro de la área de gráfico, existe un plano de coordenadas (x,y), dentro del cual se trazan las curvas a partir de la información de distancias, alturas y demás parámetros involucrados en la construcción de un perfil. El eje de ordenadas X contiene los puntos de distancias en kilómetros y el eje de abscisas Y contiene los datos de alturas en metros, con los cuales se grafica cada una de las series. Las curvas o series tienen una apariencia en color diferente según lo que representen:
- La curva trazada a partir de las alturas introducidas en la cuadrícula aparece dibujada en color verde (&HC000&).
 - La serie correspondiente al perfil con corrección de curvatura terrestre, aparece en color azul (&HC00000).
 - La serie correspondiente al perfil con corrección de curvatura terrestre, más el porcentaje (definido por el usuario) de liberación de la 1° zona fresnel, aparece en color violeta (&H800080).
 - La línea de vista aparece en rojo (&HFF&).
- e. Utilizando los datos del perfil también pueden calcularse las alturas mínimas para las torres tanto en el punto receptor como en el punto transmisor. A partir de una altura definida en un extremo se puede determinar la mínima necesaria en el otro.

Para que un archivo (o base de datos) pueda ser utilizado por la aplicación debe tener un formato especial. Si es creado dentro de la aplicación no existe problema alguno, pero si es creado desde un motor de bases de datos, debe cumplir con exactitud los requisitos necesarios para que el sistema funcione correctamente al abrirlo. El formato de la base de datos es el siguiente:

Tipo de base de datos:	Microsoft Acces (*.mdb), compatible Jet 3.5.
Tablas:	1
Nombre:	Perfiles
Campos:	2
Campo 1:	D (Km)
Tipo de datos:	Numérico, Single, Clave primaria.
Observaciones:	Por tratarse de un valor de distancia debe ser un número, que puede ser entero o con punto decimal. No debe tener duplicados, ya que es ilógico tener la misma distancia dos veces. Es necesario y de extrema importancia que los datos sean introducidos en orden desde 0 (pues es el punto de referencia (Extremo A)) hasta la distancia al Extremo B
Campo 2:	Hc (m)
Tipo de datos:	Numérico, Single.
Observaciones:	Por tratarse de un valor de altura debe ser un número, que puede ser entero o con punto decimal. Es necesario que cada valor de distancia tenga un valor de altura correspondiente.

Tabla 4.1

Formato de la base de datos para perfiles, archivo *.mdb.

Los datos pueden ser introducidos en forma desordenada desde la aplicación; ese no es problema ya que la misma aplicación se encarga de organizar inmediatamente la cuadrícula.

Importante: Cuando se crea una base de datos directamente desde *Microsoft Access*, aún siguiendo al pie de la letra el formato para su construcción, puede ser posible que al momento de utilizarla, la aplicación no permita su carga. Debe entonces intentarse realizar una conversión a un formato anterior directamente desde el motor.

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Índice de refracción atmosférica			
Factor de curvatura terrestre	K	Single	Expresión 2.1.c y tabla 2.1.
Índice de refracción al nivel del mar	No	Integer	Expresión 2.1.d
Zonas Fresnel			
Porcentaje de despeje para la 1ª zona Fresnel	Porcentaje	Single	Numeral 2.2.3
Altura antenas (mín)			
Altura de antena extremos A y B	HTN(0 To 1)	Single	Expresión 2.3

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Plan de frecuencias			
Frecuencia de operación	F	Single	Expresión 2.2
Índice de refracción atmosférica			
Índice de refracción atmosférica	Ns	Single	Expresión 2.1.d
Series			
Alturas obstáculos (s.n.m.)	ArregloY(1 To 999)	Single	
Alturas + corrección de curvatura	ArregloZ(1 To 999)	Single	Expresión 2.1.a
Alturas + corrección de curvatura + porcentaje de liberación de zona fresnel	ArregloA(1 To 999)	Single	Numeral 2.2.3
Línea de vista	ArregloB(1 To 999)	Single	
Altura antenas (mín)			
Altura mínima de antena extremos B y A	AlturaNecesaria	Single	Expresión 2.3

4.2.7. EQUIPOS REPETIDORES

Los puntos de repetición son de tipo pasivo y pueden ser tipo cartelera o back to back según se haya elegido en al inicio del proyecto. El número de repetidores que puede haber entre los extremos transmisor y receptor es máximo dos.

Es posible encontrar entre dos estaciones terminales más de un repetidor pasivo, incluso no hay que olvidar lo necesaria que puede llegar a ser la inserción de uno o más repetidores de tipo activo. Sin embargo como ya se ha dicho anteriormente, este proyecto ha sido dimensionado de tal forma que cumpla satisfactoriamente con su objetivo de ser herramienta didáctica, ya que para comprender la forma en la que se planea un radioenlace no es necesario redundar en información. Con la inclusión de más etapas se repetirían los cálculos y los procesos sin aportar nada nuevo a quien está utilizando la aplicación y agotando más los recursos del PC.

Los parámetros que se hallan manualmente por medio de curvas como es el caso del factor de corrección en repetidores tipo cartelera tanto simples como dobles y el factor de reducción de ganancia en repetidores back to back, son calculados por la aplicación mediante la utilización de interpolación utilizando muestras de las curvas correspondientes.

4.2.7.1. REPETIDOR BACK TO BACK

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Longitud guía de onda.	LongitudLGO(1 To 2)	Single	Numeral 2.2.6.3
Atenuación guía de onda.	AtenuacionLGO(1 To 2)	Single	Numeral 2.2.6.3

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Ganancia del repetidor	Grepetidor(1 To 2)	Single	Expresión 2.33.b
Parámetros antena			
Abscisa	DeltaN(1 To 2)	Single	Expresión 2.33.c
Factor de reducción de ganancia.	YeN(1 To 2)	Double	Figura 2.14 y expresión 2.33.d*
Ganancia de antena.	GananciaAntena	Single	Expresión 2.19.c
Trayecto			
Distancia a-c	Distancia(1 To 3)	Single	Expresión 2.33.c
Distancia c-b	Distancia(1 To 3)	Single	Expresión 2.33.c

* Utilizando interpolación, se hizo posible hallar valores del factor de reducción γ para cualquier valor de la abscisa δ , así: de la figura 2.14, se tomaron muestras lo suficientemente pequeñas (para procurar el menor error posible) de la curva continua ρ para valores definidos de δ y de γ . Estos últimos fueron almacenados en variables de tipo arreglo de manera que pudieran ser relacionados para tal fin.

4.2.7.2. REPETIDOR TIPO CARTELERA

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Ángulo de incidencia	Alfa2(1 To 2)	Single	Expresión 2.34.c
Parámetros cartelera			
Altura cartelera	AlturaCartelera(1 To 2)	Single	Numeral 2.2.9.1.2
Ancho cartelera	LargoCartelera(1 To 2)	Single	Numeral 2.2.9.1.2

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Angulo de transferencia	Transferencia(1 To 2)	Single	Figura 2.17
Área real	AreaRCartelera(1 To 2)	Single	Expresión 2.34.c
Área efectiva	AreaECartelera(1 To 2)	Single	Expresión 2.34.c
Ganancia cartelera	GRepetidor(1 To 2)	Single	Expresión 2.34.b
Parámetros trayecto			
Distancia a-c	Distancia(1 To 3)	Single	Numeral 2.2.9.1.2
Distancia c-b	Distancia(1 To 3)	Single	Numeral 2.2.9.1.2
Condición de campo			
Factor 1/K	SobreK11(1 To 2) SobreK12(1 To 2)	Single	Expresión 2.34.d
Abscisa	LCS1(1 To 2) LCS2(1 To 2)	Single	Expresión 2.34.f
Factor de corrección	Fc11(1 To 2) Fc12(1 To 2)	Single	Figura 2.16*
Condición de campo (solo para cartelera doble)			
Relación b/a	badoble	Single	Figura 2.18
Factor $1/k^2$	SobreK2	Single	Expresión 2.34.g
Factor de corrección entre carteleras	Fc2	Single	Figura 2.18**

* Para hallar F_c a partir de cualquier valor del factor $1/K$ y de la abscisa l , se tomaron muestras de datos lo suficientemente pequeñas (para procurar el menor error posible) de la abscisa l (de la figura 2.16) para valores definidos de los factores $1/K$ y F_c , los cuales fueron almacenados en variables de tipo matriz para poder ser relacionados. Luego, mediante doble interpolación, se hizo posible hallar F_c para valores determinados de $1/K$ y l .

** Para hallar F_c' a partir de cualquier valor del factor $1/K^2$ y de la relación b/a , se tomaron muestras de datos lo suficientemente pequeñas (para procurar el menor error posible) de la relación b/a (de la figura 2.18) para valores definidos de $1/K^2$ y F_c' , los cuales fueron almacenados en variables de tipo matriz para poder ser relacionados. Luego, mediante doble interpolación se hizo posible hallar F_c' para valores determinados de b/a y $1/K^2$.

4.2.8. OBJETIVOS DE CALIDAD

Los cálculos relacionados con los objetivos de calidad se pueden realizar: en los sistemas digitales una vez se halla definido el plan de frecuencias, ya que es

necesario conocer el tipo de modulación digital utilizada; y en el caso de los sistemas analógicos después de cargar todos los perfiles relacionados con el trayecto, ya que se necesita la longitud total del enlace.

4.2.8.1. SISTEMAS DIGITALES

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Tasa de error de bit	BER	Single	Expresión 2.18.d
Pérdidas por implementación de la modulación	Lmod	Single	Expresión 2.18.b

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Tipo de modulación digital	Modulacion	String	Numeral 2.2.6.2
E_b/N_0 teórico	EbNo	Single	Expresión 2.18.a
E_b/N_0 práctico	EbNoprac	Single	Expresión 2.18.c
Probabilidad de error de símbolo (SER)	SER	Single	Expresión 2.18.d

4.2.8.2. SISTEMAS ANALÓGICOS

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Potencia de ruido acumulado por Km	pWp0Km	Single	Expresión 2.17.c

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Longitud total del trayecto	DistanciaTotal	Single	Expresión 2.17.c
Potencia de ruido acumulado en el trayecto	PpWp0	Single	Expresión 2.17.a

4.2.9. OBJETIVOS DE DISPONIBILIDAD

Después de realizar todos los cálculos descritos anteriormente, se pueden hallar los parámetros finales para los cuales se realiza un proyecto, tales como la disponibilidad del sistema y la potencia mínima de transmisión.

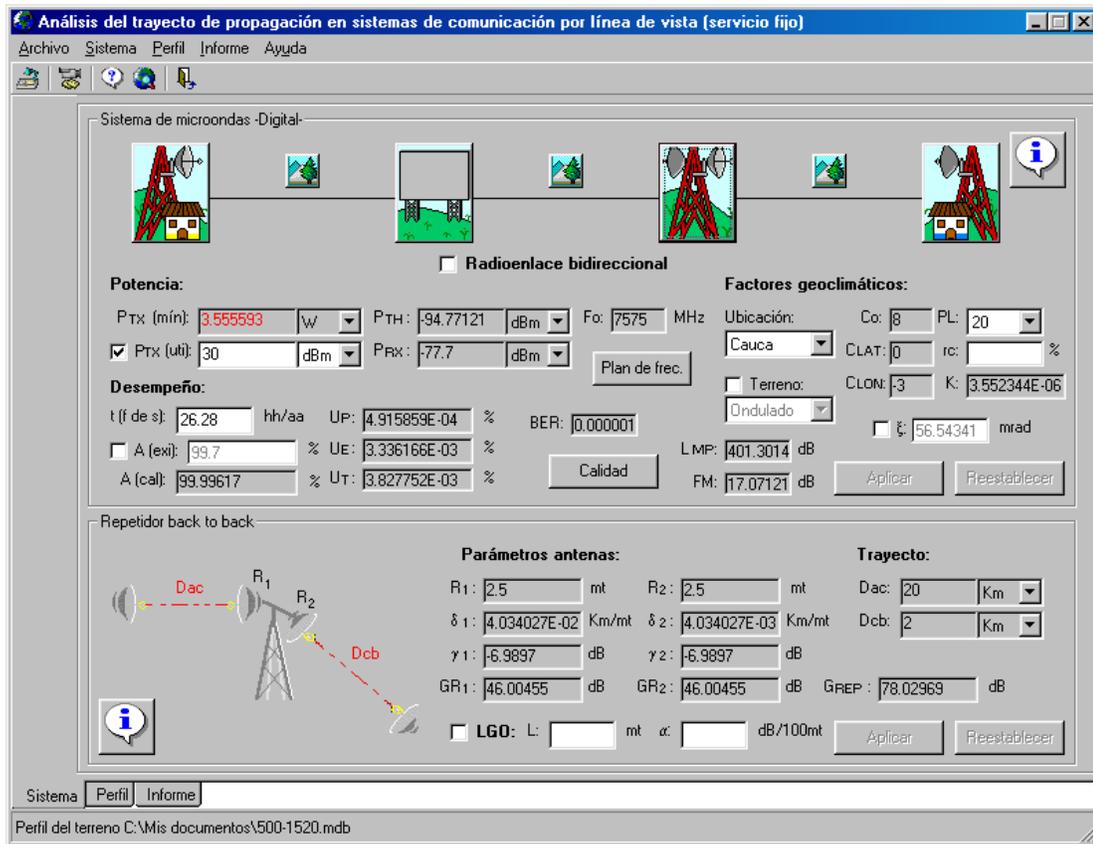


Figura 4.3

Interfaz Sistema de HD-Radiocom al finalizar un proyecto.

Datos de entrada:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Potencia			
Potencia a utilizar	PotenciaRequerida	Single	Expresiones 2.19.a y 2.32.
Desempeño			
Tiempo fuera de servicio	TfdeS	Single	Corresponde a la indisponibilidad total expresada en horas por año.

Disponibilidad exigida	Arequerida	Single	Numeral 2.2.7
Factores geoclimáticos			
Fracción de perfil del trayecto sobre/cerca de masas de agua	Rc	Single	Expresión 2.23.d
Variable climática	PL	Single	Expresión 2.23.c
Ubicación del punto medio del enlace	UbicacionTotal	String	
Inclinación del trayecto	InclinacionTotal	Single	Expresión 2.23.f y 4.1*
Tipo de terreno	TerrenoTotal	String	Tabla 2.7**

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Potencia			
Potencia mínima de transmisión calculada	PtxCalculada	Double	Expresión 2.19.b
Potencia umbral en recepción	PotenciaUmbral	Single	Expresiones 2.13.b y 2.15
Potencia mínima de recepción	PotenciaCalidad	Double	Expresiones 2.17.a y 2.18.a
Desempeño			
Disponibilidad calculada	Atotal	Single	Numeral 2.2.7
Indisponibilidad de trayecto	UP	Single	Expresión 2.23.a
Indisponibilidad de equipos	UE	Single	Expresión 2.21.a
Indisponibilidad total	Utotal	Single	Expresión 2.20
Factores geoclimáticos			
Coefficiente dependiente del tipo de terreno y la altura de antena más baja	Co	Single	Tabla 2.7
Coefficiente dependiente de la latitud	Clat	Integer	Expresión 2.23.c
Coefficiente dependiente de la longitud	Clon	Integer	Expresión 2.23.c
Factor geoclimático	Kindisponibilidad	Single	Expresión 2.23.c
Inclinación del trayecto	InclinacionTotal	Single	Expresión 2.23.f y 4.1*
Tipo de terreno	TerrenoTotal	String	Tabla 2.7**
Frecuencia de operación	F	Single	
Pérdida total de propagación	LmpTotal	Double	Expresión 2.4
Margen de desvanecimiento	FM	Single	Expresión 2.22
Tasa de error de bit (sistema digital) / Ruido acumulado en el trayecto (sistema analógico)	BER/PpWp0	Single	Expresión 2.17.c

* Es necesario conocer las inclinaciones de todos los trayectos para calcular la inclinación total. Esta se calcula, hallando la media ponderada de las inclinaciones de todos los trayectos utilizando la expresión 4.1.

$$\xi_T(\text{mrad}) = \sum_{i=1}^n \xi_i d_i / d \quad (4.1)$$

Donde:

ξ_T : Inclinación total (mrad)

ξ_i : Inclinación del trayecto i (mrad)

d_i : Distancia del salto i (Km)

d : Distancia total (Km)

n : Número de saltos.

En caso de que el enlace no cumpla la condición de línea de vista, el valor calculado con la anterior expresión puede alejarse del dato real de inclinación total.

** Para determinar el valor de éste parámetro se tuvo en cuenta la clasificación del relieve, consignada en la tabla 4.2 que ha sido elaborada a partir de información encontrada en publicaciones del Instituto Agustín Codazzi.

Denominación	Descripción	Pendiente(%)	Inclinación(mrad)
Plano a ligeramente plano	Incluye áreas con pendientes que varían desde el nivel horizontal a suavemente ondulado (paisaje aluvial)	0-3	0- 0.235
Ligeramente ondulado a ondulado	Comprende áreas de colinas bajas poco disectadas.	3-12	0.235-209.44
Fuertemente ondulado a quebrado	Comprende áreas quebradas de colinas bajas muy disectadas.	12-25	209.44-436.33
Fuertemente quebrado a muy escarpado	Incluye áreas con pendientes muy pronunciadas de serranías y cordilleras (montañoso).	>25	>436.33

Tabla 4.2

Clasificación del relieve según su forma y pendiente.

La tabla 4.2. puede ser consultada también para introducir el tipo de terreno manualmente, en caso de que el resultado generado para este no sea el indicado.

No significa esto que la aplicación presente fallas al calcular este parámetro. Lo que sucede es que éste y la inclinación del trayecto, son muy difíciles de generalizar, ya que pueden considerarse enlaces con características de terreno excepcionales o con obstáculos que superen la línea de vista entre las antenas: y los cálculos generados por la aplicación son especiales para radioenlaces con condición de línea de vista.

4.2.10. GENERACIÓN DE INFORMES

Una vez terminado un proyecto, se escriben en forma ordenada dentro de un informe, los datos introducidos en el sistema y los calculados a partir de éstos (figura 4.4).

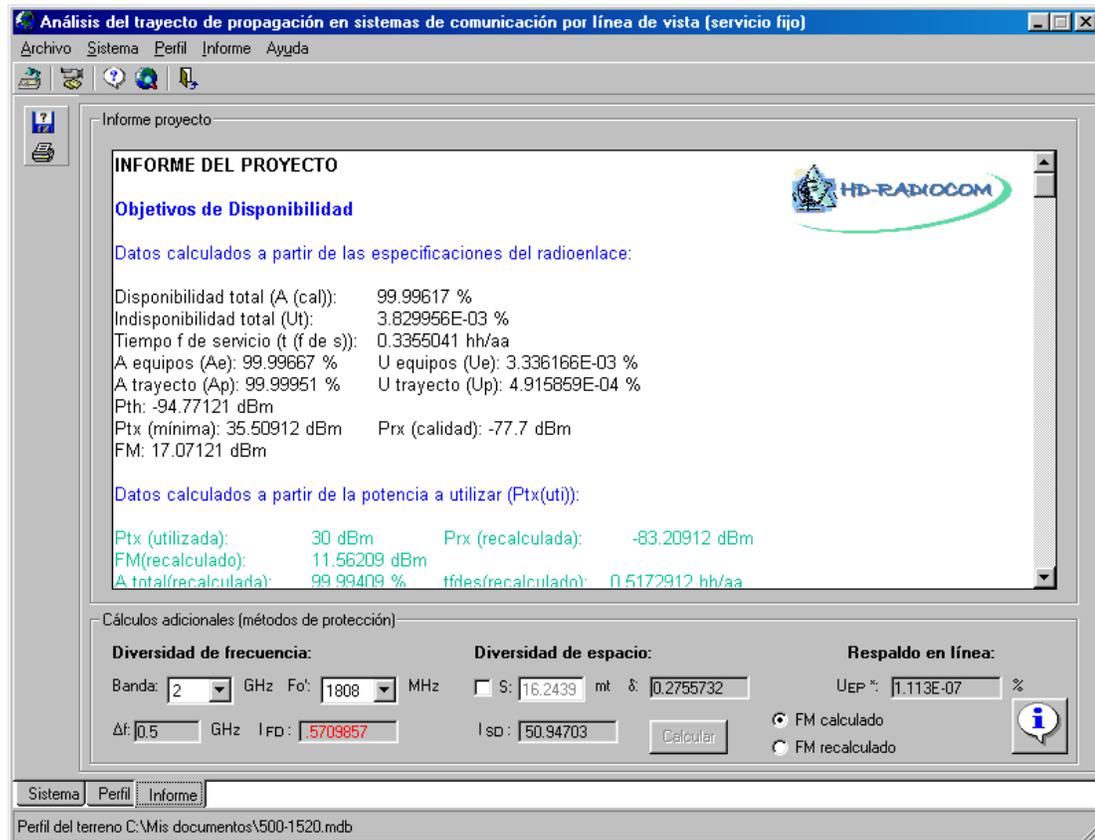


Figura 4.4

Interfaz **Informe** con el informe de un proyecto.

Esto es de gran utilidad, ya que permite guardar en un documento de texto la información generada con el fin de realizar comparaciones posteriores o iniciar otro proyecto a partir de los datos calculados en el anterior.

El informe generado por la aplicación puede ser modificado dentro de ésta o editado y/o guardado dentro de un archivo de extensión *.doc que puede ser accedido desde *Microsoft Word* o del *Worpad* (editor de texto que viene con *Windows*).

Dentro del informe se incluyen algunas observaciones, más no del tipo conclusión; pues solo los usuarios pueden concluir desde su propio punto de vista de ingeniería, ya que las condiciones en las que se planea cada sistema son diferentes a las de los demás. Sin embargo, si el usuario ve la necesidad de implementar algún sistema de protección para su radioenlace, en la parte inferior de la interfaz, puede encontrar dentro del recuadro **Cálculos adicionales (métodos de protección)** una especie de “calculadora”, con la que puede hacer los cálculos para protección que estime convenientes y luego incluirlos manualmente en el informe de su proyecto si lo desea.

Datos de entrada:

Los controles de entrada que hacen parte de **Informe** son:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Diversidad de frecuencia			
Frecuencia de operación señal de protección	FrecuenciaDF	Single	Numeral 2.2.8.1.2
Diversidad de espacio			
Separación entre antenas	SepAntenas	Single	Expresión 2.24

Datos de salida:

Dato	Variable	Tipo	Referencia
Diversidad de frecuencia			
Separación de frecuencias	SeparacionF	Single	Expresión 2.28
Factor de mejora por diversidad de frecuencia	IFD	Single	Expresión 2.28
Diversidad de espacio			
Factor de correlación	DeltaIDE	Single	Expresión 2.25

Factor de mejora por diversidad de espacio	IDE	Single	Expresión 2.27
Respaldo en línea			
Indisponibilidad de equipos (con portadora(s) protegida(s))	UEProte	Single	Expresión 2.31.a.

4.3. SIMULACIÓN

La simulación es la parte de la aplicación donde se ilustran en forma virtual, mediante videos de extensión *.avi, algunos de los fenómenos que afectan a la señal en su recorrido. Tales fenómenos son la *atenuación*, *reflexión*, *difracción* y *refracción*. No es el fin de esta etapa mostrar los fenómenos físicos que afectan a las ondas, sino ilustrar algunas situaciones en las que la señal de un radioenlace puede verse perturbada. Sin embargo, cada animación está acompañada por un texto de soporte, dentro del cual se da una breve explicación del fenómeno físico.



Figura 4.5

Ventana **Simulación** (Introducción).

Cada animación es ejecutada a partir del correspondiente botón ubicado en la barra de botones de la ventana **Simulación**. En el momento en que esta última se abre, se ejecuta la primera animación, en la cual se puede ver un radioenlace por línea de vista y sus partes. Como se puede observar en la figura 4.5, la distancia del trayecto es demasiado corta para un sistema de microondas en el mundo real, pero como el fin de la animación es ver observar los fenómenos, se tuvo que hacer de esa manera para que se pudiera ver claramente la condición de línea de vista y el radioenlace con sus extremos, torres y antenas.

Simulación de fenómenos:

Las figuras 4.6, 4.7 y 4.8. ilustran cada una, una imagen dentro de las animaciones que representan cada fenómeno. Como se puede observar, el texto de soporte, además de documentar lo que ocurre en cada animación, contiene los nombres de algunas recomendaciones y/o informes donde se puede encontrar información al respecto.



Figura 4.6

Simulación de atenuación por hidrometeoros.

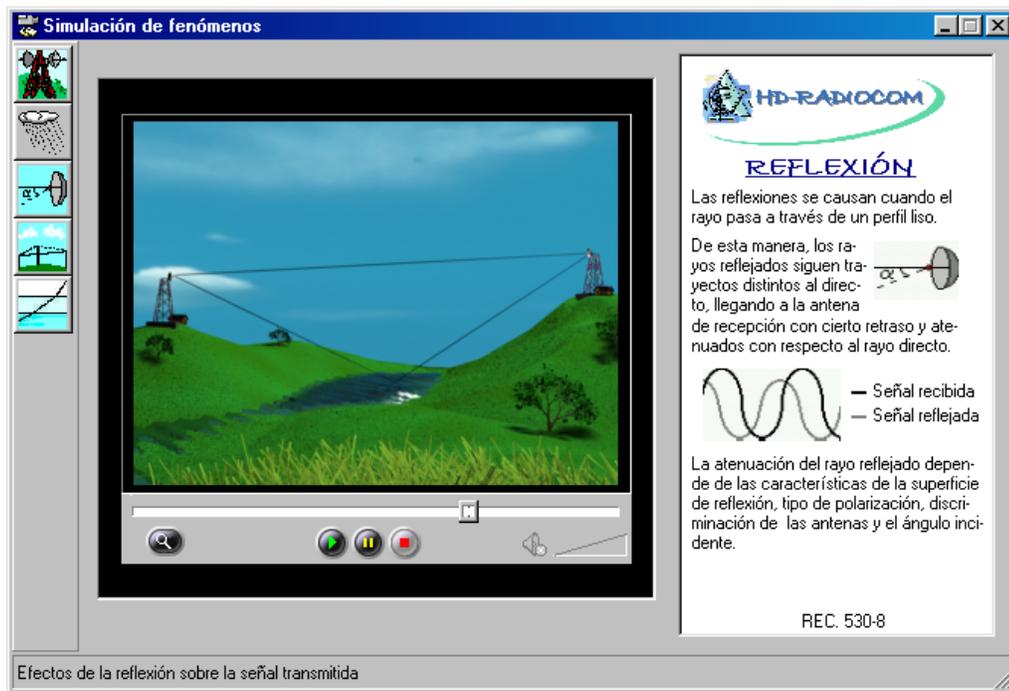


Figura 4.7

Simulación de reflexión sobre el agua.



Figura 4.8

Simulación de la difracción sobre un obstáculo sobre/cerca de la trayectoria.

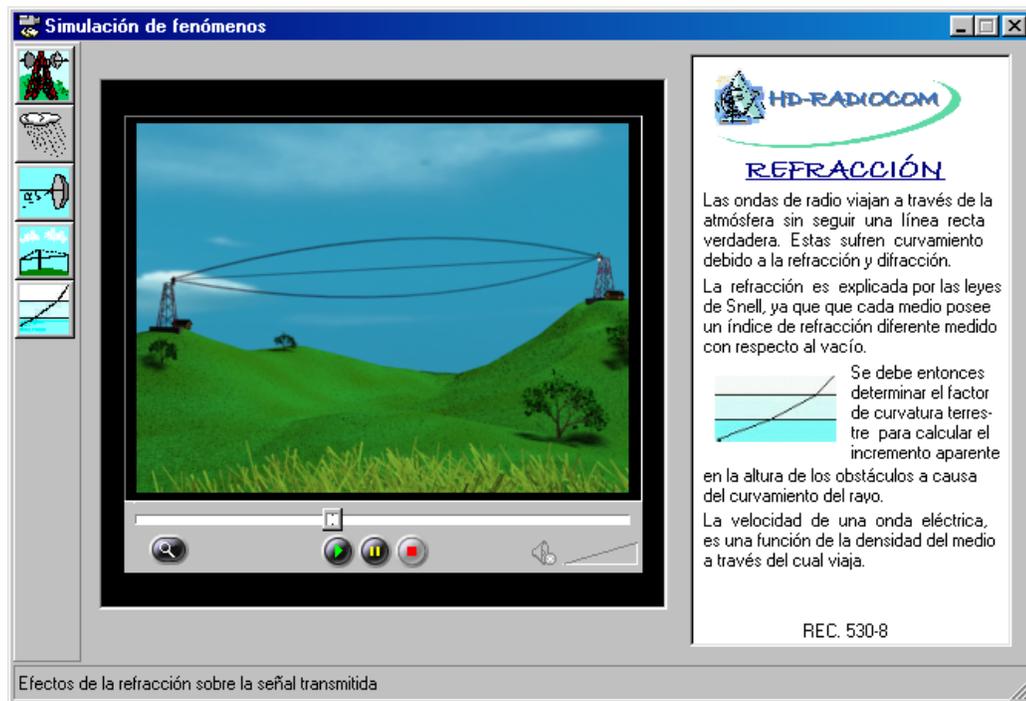


Figura 4.9

Simulación de la refracción atmosférica.

5. CONCLUSIONES

La continua aparición de nuevas tecnologías permite a la comunidad estudiantil obtener mejores posibilidades de adquirir conocimientos en forma efectiva, comprensible y motivadora.

El desarrollo de la herramienta didáctica HD-Radiocom, implicó un proceso de búsqueda de información, aprendizaje e implementación de los diversos conceptos teóricos, consideraciones prácticas y normativas que involucran los sistemas de microondas por línea de vista, obteniendo como resultado una aplicación software que contribuye en el proceso de aprendizaje facilitando la comprensión de los conocimientos adquiridos en este campo. Durante todo el proceso de desarrollo, se presentaron algunas dificultades las cuales serán también mencionadas a continuación, ya que al comentarlas puede evitarse que vuelvan a presentarse posteriormente, o que sean solucionadas rápidamente en los futuros desarrollos.

La implementación de los cálculos en forma automática, aprovechando las facilidades que ofrece el uso de los computadores en el campo práctico, reduce un proceso que manualmente podría tomar varias horas, a un análisis de unos pocos minutos, con la ventaja de obtener diferentes resultados prácticos con solo cambiar unos cuantos parámetros de entrada u opciones del programa. Esto facilita el proceso de ensayo y error que es de gran importancia dentro del proceso de aprendizaje.

El estudio de la normatividad, consignada en las recomendaciones e informes de la UIT-R requiere de mucho tiempo y análisis, debido a que muchos de los cálculos contenidos en estos son de gran complejidad y por lo tanto, es imposible abarcar en poco tiempo todos los tópicos que requiere el desarrollo de una herramienta que verdaderamente pueda ser utilizada para dimensionar un radioenlace real. Sin embargo, HD-Radicom puede ser actualizada a medida que se profundice en cada

proceso o con la aparición de nuevas versiones de dicha normatividad, pues la implementación en forma modular permite la modificación y reutilización del código o parte de este. Así mismo, con el tiempo aparecerán nuevos procesos y herramientas que puedan servir para introducir mejoras; tal es el caso de los mapas y bases de datos digitales, que no han sido tenidos en cuenta en este desarrollo debido a su alto costo y difícil consecución. Si llegado el momento la herramienta continúa vigente, es perfectamente posible modificar una parte del código fuente cambiando solo las partes implicadas con el proceso que se desea actualizar

Es importante destacar que muchas de las aplicaciones software desarrolladas en la facultad, han logrado la efectiva automatización de tareas y por lo tanto, pueden servir como base para realizar proyectos a gran escala, por lo que no deben ser desaprovechadas. Como recomendación final, la propuesta es que éstas no se subutilicen ni se dejen desactualizar, sino que por el contrario, se sigan trabajando y optimizando dentro de grupos de investigación y desarrollo.

GLOSARIO

- **Aislamiento entre polarizaciones:** Para dos ondas radioeléctricas transmitidas en la misma frecuencia con la misma potencia y polarización ortogonal, corresponde a la razón entre la potencia copolar en un receptor dado y la potencia contrapolar en el mismo receptor.
- **Banda base:** Señal que se sube sobre una portadora RF.
- **Centelleo:** Fluctuación rápida y aleatoria de una o más características (amplitud, fase, polarización, dirección de llegada) de una señal recibida, ocasionada por fluctuaciones del índice de refracción del medio de transmisión.
- **Condición de campo cercano:** Condición que determina si la longitud de un salto es lo suficientemente corta como para simplificar los cálculos del trayecto cuando en uno o ambos extremos existe un repetidor pasivo tipo cartelera.
- **Desvanecimiento:** Incremento o decremento en el nivel de señal recibida.
- **Discriminación por polarización cruzada:** Para una onda radioeléctrica que se transmite con una polarización dada, el cociente entre la potencia recibida con la polarización esperada en el punto de recepción y la potencia recibida con polarización ortogonal en ese mismo punto.
- **Factor de curvatura terrestre:** Relación entre el radio ficticio de la tierra y el radio real de la tierra. Está relacionado con el gradiente vertical del índice de refracción.
- **FI:** Frecuencia intermedia.

-
- **Índice de refracción:** Relación entre las velocidades de las ondas en el vacío y el medio considerado.
 - **Margen de desvanecimiento plano (FFM):** Corresponde a la máxima atenuación plana que genera un aceptable BER o S/N (según sea el sistema, digital o analógico respectivamente).
 - **Margen de desvanecimiento compuesto (CFM):** Resultante de adicionar al FFM algunas componentes al considerar las distorsiones dentro de la banda (en el caso de los sistemas digitales de media y alta capacidad).
 - **Polarización cruzada:** Aparición en el curso de la propagación, de una componente de polarización ortogonal a la polarización esperada.
 - **Ruido de intermodulación (IM):** Ruido producido en la sección múltiplex, causado por la no-linealidad cuando la señal de información en uno o más canales produce rizado o productos de intermodulación que aparecen como ruido ininteligible en otros canales.

BIBLIOGRAFÍA

NORMATIVIDAD UIT-R, RECOMENDACIONES E INFORMES, 1998.

FREEMAN, Roger L. Telecommunications Transmisión Handbook. Fourth edition. Ed. Wiley Interscience. N.Y, 1998.

FREEMAN, Roger L. Telecommunication System Engineering. Ed. Wiley & Sons. Inc. N.Y, 1993.

TOMASI, Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicos. Prentice-Hall. México, 1996.

KENNEDY, John y NEVILLE, Adam. Estadística para Ciencias e Ingeniería. Editorial Harla. N.Y. 1986.

Suelos y Bosques de Colombia. Ministerio de Hacienda y Crédito Público e Instituto Agustín Codazzi. Bogotá, 1988.

HOLGUÍN R, Aldemar. Estudio de los Sistemas de Radio en Microondas Digitales. Universidad del Cauca, 2000.

ROMO R, Harold A. Radiopropagación, conferencias de clase. Universidad del Cauca, 1998.

Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias. República de Colombia, Ministerio de Comunicaciones. 1998.

CORNELL, Gary. Visual Basic 6.0. Manual de Referencia. Osborne McGraw-Hill. Madrid, 1998.

BURGOS, Daniel. 3D Studio Max Práctico. McGraw-Hill. Madrid, 1997.